

Stratégies de caractérisation morpho-structurale des
instabilités apparentes des parois rocheuses par LiDAR 3D en
carrière urbaine

Par

Dorsaf LAGHA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTREAL, 7 SEPTEMBRE 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

© Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur, qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Jonathan D. Aubertion, PhD, ing., directeur de recherche
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Annie Poulin, présidente du jury
Département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure

Janie Masse Dufresne, membre du jury
Département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure

Julien Beaulieu, ing., M. Ing., M. Sc, membre externe du jury
Ville de Montréal

CE MÉMOIRE A ÉTÉ PRÉSENTÉ ET SOUTENU

DEVANT UN JURY ET LE PUBLIC

1^{ER} SEPTEMBRE 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Ce mémoire marque l'aboutissement d'un parcours scientifique, professionnel et profondément personnel. Il représente bien plus qu'un travail de recherche : il témoigne d'un cheminement fait d'apprentissage, de persévérance, de doutes, de remises en question, mais aussi de découvertes, de rencontres marquantes et de grandes avancées personnelles.

Ce projet m'a permis de grandir comme chercheuse, mais également comme personne. À travers les défis rencontrés, j'ai appris à mieux comprendre la rigueur scientifique, la valeur de l'observation, l'importance de la patience et la nécessité de construire une réflexion solide, critique et défendable. Chaque étape de ce mémoire, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'interprétation des résultats, m'a amenée à développer une plus grande confiance en mes capacités et à mieux mesurer la responsabilité associée au travail de recherche appliqué en ingénierie.

Ce travail s'inscrit dans un contexte de recherche appliquée portant sur l'étude des parois rocheuses de la carrière Francon, à Montréal. Il vise à améliorer la compréhension des indices morphologiques et structuraux associés aux instabilités apparentes, observables à partir de modèles tridimensionnels, et à proposer une lecture structurée de leur répartition dans le contexte d'une carrière urbaine réaménagée.

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma plus sincère gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Jonathan D. Aubertin, pour son soutien, sa patience, sa confiance et son accompagnement tout au long de ce projet. Son leadership, son expérience et sa vision scientifique ont joué un rôle déterminant dans mon cheminement. J'ai eu la chance de réaliser ce mémoire sous sa supervision, et je mesure pleinement la valeur de cette opportunité.

Je lui suis profondément reconnaissante pour le temps qu'il m'a accordé, pour ses conseils toujours enrichissants, pour sa rigueur intellectuelle et pour la confiance qu'il a su m'accorder. Chaque échange, chaque discussion et chaque remarque ont contribué à faire évoluer ma réflexion et à renforcer ma confiance en moi. Grâce à son encadrement, j'ai appris non seulement à mieux structurer une démarche scientifique, mais aussi à croire davantage en mes capacités. Son accompagnement a été pour moi une source constante d'apprentissage, de motivation et d'inspiration.

Je tiens également à remercier l'École de technologie supérieure ainsi que toutes les personnes ayant contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce projet de recherche. Je remercie les équipes, les partenaires et les collaborateurs associés à ce travail pour leur soutien, leur disponibilité et leur contribution au bon déroulement de cette recherche. Leur implication a permis de donner à ce projet une dimension appliquée, concrète et profondément formatrice.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont accompagnée durant mon parcours universitaire et professionnel. Les discussions, les conseils, les encouragements et les expériences partagées ont contribué à enrichir ce travail et à rendre cette aventure plus humaine. Ce mémoire est le résultat d'un effort personnel, mais il n'aurait jamais pu prendre forme sans l'appui des personnes qui m'ont entourée.

Enfin, et surtout, ce travail n'aurait pas été possible sans l'amour, le soutien et la présence de ma famille.

VIII

À ma mère, Hanene, j'adresse toute ma gratitude et tout mon amour. Merci pour ton dévouement envers mon bien-être, mon développement, mon éducation et mon bonheur. Merci pour ta force, ta douceur, ta patience et ton amour inconditionnel. Tu as toujours été pour moi un exemple de courage, de beauté, d'intelligence et de générosité. Merci d'être la meilleure mère qu'une personne puisse avoir, et merci d'avoir toujours cru en moi, même dans les moments où je doutais de moi-même.

À mon père, Jabrane, merci d'avoir cru en moi, de m'avoir poussée à avancer, de m'avoir mise au défi et de m'avoir constamment encouragée à devenir une meilleure version de moi-même. Merci pour ton soutien, tes conseils, ta présence et tes valeurs. Tu as toujours été une source de force, de confiance et de stabilité dans ma vie. Ce projet n'aurait certainement pas pu être complété sans ton appui, tes suggestions et tes encouragements. Tu es un père exceptionnel, et je suis profondément reconnaissante de t'avoir à mes côtés.

À mes deux frères, Iyed et Mouayed, merci pour votre amour, votre présence et la joie que vous apportez dans ma vie. Je suis tellement fière de vous, plus que les mots ne peuvent l'exprimer. Merci d'être une partie si précieuse de ma vie et de me rappeler, par votre existence, la valeur de la famille, de la complicité et de l'amour sincère.

À ma famille, merci d'être mon refuge, ma force et ma plus grande richesse. Votre amour m'a portée tout au long de ce parcours. Votre confiance m'a donné le courage de continuer, même lorsque le chemin devenait difficile.

DÉDICACE

*À ma mère Hanene,
À mon père Jabrane,
À mes frères Iyed et Mouayed,*

Pour leur amour, leur soutien et leur présence constante.

*Ce mémoire est dédié à ma famille,
Ma force, mon équilibre et la plus belle partie de ma vie.*

Stratégies de caractérisation morpho-structurale des instabilités apparentes des parois rocheuses par lidar 3d en carrière urbaine

dorsaf LAGHA

RÉSUMÉ

Les parois rocheuses excavées en milieu urbain présentent des conditions de détérioration difficiles à caractériser en raison de leur géométrie complexe et de leur accessibilité limitée. Les modèles tridimensionnels à haute résolution constituent un outil pertinent pour documenter les caractéristiques morphologiques et structurales visibles du massif rocheux.

Ce mémoire propose une stratégie intégrée de caractérisation morpho-structurale des instabilités apparentes à partir de données LiDAR 3D, appliquée à la carrière Francon, à Montréal. Ce site, utilisé pour le stockage de neige et de matériaux granulaires, présente des parois pouvant atteindre 70 m de hauteur. L'objectif consiste à identifier, cartographier, quantifier et interpréter les formes visibles renseignant sur l'état apparent du massif, sans les assimiler à une probabilité de rupture, à un facteur de sécurité ou à une mesure absolue du risque.

La méthodologie repose sur le traitement de modèles 3D issus d'acquisitions LiDAR et photogrammétriques. L'analyse structurale et cinématique a identifié la stratification, les familles de discontinuités et les mécanismes de rupture géométriquement compatibles.

Neuf classes morphologiques ont été définies, puis regroupées selon trois fonctions dominantes : libération directe de matériau, prédisposition structurale et dégradation progressive. Les résultats révèlent des signatures contrastées, allant d'une prédisposition structurale à une dégradation progressive diffuse, avec la présence de formes associées à la libération de matériau.

Un profil comparatif de géorisque apparent a été établi pour les contextes de plateforme de déversement ponctuelle, de plateforme de déversement étendue et de secteur sans déversement direct. Les plateformes ponctuelles présentent une dominante structurale accompagnée d'une composante de dégradation progressive. La plateforme étendue est dominée par les surfaces altérées et le suintement, tandis que les secteurs sans déversement direct présentent une signature diversifiée et une contribution des formes de libération directe.

La démarche proposée constitue un outil d'aide à la caractérisation, à la comparaison et au suivi des parois rocheuses, tout en maintenant une distinction entre observation morphologique, interprétation géomécanique et évaluation du risque.

Mots-clés : LiDAR 3D, parois rocheuses, instabilités apparentes, caractérisation morpho-structurale, discontinuités, géorisque apparent, carrière Francon, déversement de neige.

3D LiDAR-based morpho-structural characterization strategies for apparent rock wall instabilities in an urban quarry

dorsaf LAGHA

ABSTRACT

Excavated rock walls in urban environments may exhibit deterioration conditions that are difficult to characterize because of their complex geometry and limited accessibility. In this context, high-resolution three-dimensional models provide a relevant means of documenting the visible morphological and structural characteristics of the rock mass.

This thesis proposes an integrated strategy for the morpho-structural characterization of apparent rock wall instabilities using 3D LiDAR data, applied to Francon Quarry in Montréal. The site, which is used for snow and granular material storage, includes high rock walls and several operational configurations. The objective is to identify, map, quantify, and interpret visible features that provide information on the apparent condition of the rock mass, without equating them with a probability of failure, a factor of safety, or an absolute measure of risk.

The methodology is based on the processing of 3D models produced from LiDAR and photogrammetric surveys. Structural and kinematic analyses were used to identify bedding, the principal discontinuity sets, and geometrically admissible failure mechanisms. Mapped features were quantified from classified point counts and normalized to compare operational contexts having unequal spatial extents.

Nine morphological classes were defined and subsequently grouped into three dominant functions: direct material release, structural predisposition, and progressive degradation. The results reveal contrasting signatures ranging from strong structural predisposition to diffuse progressive degradation, together with localized features associated with material release.

A comparative apparent geohazard profile was developed for point dumping platforms, the extended dumping platform, and sectors without direct dumping. Point platforms exhibit a predominantly structural signature accompanied by a substantial progressive-degradation component. The extended platform is dominated by altered surfaces and seepage, whereas sectors without direct dumping display a more diverse signature and a notable contribution from direct-release features.

The proposed approach therefore provides a decision-support tool for the characterization, comparison, and monitoring of rock walls, while maintaining a clear distinction between morphological observation, geomechanical interpretation, and risk assessment.

Keywords: 3D LiDAR, rock walls, apparent instabilities, morpho-structural characterization, discontinuities, apparent geohazard, Francon Quarry, snow dumping.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PORTÉE ET OBJECTIFS	7
1.1 Contexte du partenariat et programme de recherche	7
1.2 Énoncé du problème	9
1.3 Objectif de la recherche	12
1.4 Portée du travail et approche méthodologique générale	13
1.5 Structure du mémoire.....	16
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	19
2.1 Préambule	19
2.2 Fondements géomécaniques des instabilités en parois rocheuses	21
2.2.1 Propriétés des roches intactes	21
2.2.2 Propriétés des discontinuités.....	25
2.2.3 Propriétés des massifs rocheux	37
2.2.4 Classifications géomécaniques	45
2.3 Géologie structurale et contrôle cinématique des instabilités.....	52
2.3.1 Origine structurale des discontinuités et influence sur les pentes rocheuses.....	53
2.3.2 Orientation des discontinuités et représentation stéréographique..	56
2.3.3 Principaux mécanismes de rupture structurale	58
2.3.4 Principe de l'analyse cinématique	63
2.3.5 Limites des approches cinématiques classiques	66
2.4 Télédétection et modèles 3D pour la caractérisation des parois rocheuses	67
2.4.1 LiDAR terrestre, LiDAR aéroporté et acquisitions UAV.....	68
2.4.2 Photogrammétrie et reconstruction Structure-from-Motion	73
2.4.3 Prétraitement et manipulation des nuages de points.....	75
2.4.4 Classification géométrique multiscalaire des nuages de points.....	77
2.4.5 Descripteurs géométriques dérivés des nuages de points	84
2.4.6 Cartographie structurale virtuelle à partir des modèles 3D	89
2.4.7 Incertitudes et limites de l'interprétation des nuages de points	91
2.5 Systèmes de cotation des talus rocheux	93
2.6 Carrières urbaines, dépôts de neige et contraintes opérationnelles.....	97
2.6.1 Rôle de l'eau et des cycles gel-dégel	98
2.6.2 Effets des neiges urbaines, des sels et des eaux de fonte.....	98
2.6.3 Influence des pratiques opérationnelles sur les parois rocheuses ..	99
2.7 Sommaire et lacunes	100
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE : CARRIÈRE FRANCON.	103
3.1 Préambule	103
3.2 Localisation et morphologie de la carrière.....	104

3.2.1	Localisation et contexte urbain	104
3.2.2	Morphologie générale et organisation interne de la fosse	106
3.3	Historique et conversion en dépôt de neige	110
3.3.1	Historique d'exploitation et évolution morphologique.....	110
3.3.2	Conversion en dépôt de neige et usage opérationnel actuel	112
3.4	Contexte géologique régional de la carrière	113
3.4.1	Plate-forme du Saint-Laurent et contexte structural régional	113
3.4.2	Succession stratigraphique et unités carbonatées de la région de Montréal	115
3.4.3	Intrusions montréalaises et implications pour la carrière Francon	118
3.5	Contexte géologique local de la carrière.....	120
3.5.1	Lithostratigraphie locale	120
3.5.2	Intrusions magmatiques et contacts lithologiques	124
3.6	Contexte structural de la carrière	126
3.7	Conditions opérationnelles et hydroclimatiques du dépôt de neige.....	131
3.7.1	Contexte climatique et cycles gel-dégel.....	131
3.7.2	Organisation des opérations de dépôt de neige.....	133
3.7.3	Nature de la neige usée et évolution saisonnière des charges.....	134
3.7.4	Eaux de fonte, drainage et conditions hydrogéologiques	135
3.8	Processus de dégradation des parois rocheuses et distinction entre contrôles naturels et opérationnels.....	137
3.8.1	Rôle de la géologie structurale dans la segmentation des parois .	138
3.8.2	Conditions des joints, infiltration et altération locale	140
3.8.3	Mécanismes de détachement contrôlés par la structure	145
3.8.4	Effets potentiels des opérations de dépôt de neige sur les parois	147
3.9	Synthèse du chapitre	152
CHAPITRE 4 OUTILS ET MÉTHODES		155
4.1	Préambule	155
4.2	Acquisition des données LiDAR et photogrammétriques	155
4.2.1	Plateforme UAV et capteurs utilisés.....	156
4.2.2	Stratégie d'acquisition et principe de l'acquisition UAV-LiDAR.....	159
4.2.3	Paramètres d'acquisition et qualité attendue des données UAV-LiDAR.....	163
4.3	Traitement des données 3D recueillies	166
4.3.1	Génération des nuages de points et des modèles de surface	166
4.3.2	Mise en place d'un chaînage longitudinal de référence.....	168
4.3.3	Organisation du modèle en secteurs A, B et C	171
4.3.4	Classification de la végétation par CANUPO et nettoyage complémentaire des nuages de points.....	176
4.3.5	Calcul des normales de surface et des cartes d'orientation.....	203
4.4	Synthèse du chapitre	204

CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION STRUCTURALE ET ANALYSE	
CINÉMATIQUE DIRECTIONNELLE DES PAROIS ROCHEUSES	
	206
5.1	Préambule 206
5.2	Secteurs d'analyse et orientations représentatives des parois..... 207
5.2.1	Orientation représentative des sous-secteurs A1, A2 et A3..... 208
5.2.2	Orientation représentative du secteur B..... 209
5.2.3	Orientation représentative du secteur C..... 211
5.2.4	Orientations retenues pour l'analyse cinématique 213
5.3	Cartographie structurale et analyse cinématique 215
5.3.1	Extraction des orientations structurales 216
5.3.2	Familles structurales identifiées..... 220
5.3.3	Analyse cinématique directionnelle..... 224
5.4	Synthèse du cadre structural et cinématique 230
CHAPITRE 6 CONSTRUCTION ET ANALYSE D'UN INVENTAIRE	
MORPHOLOGIQUE DES ÉLÉMENTS D'INSTABILITÉ	
APPARENTE..... 233	
6.1	Préambule 233
6.2	Cadre de cartographie des éléments d'instabilité apparente 234
6.2.1	Définition et classes morphologiques des éléments d'instabilité apparente 234
6.2.2	Organisation fonctionnelle des classes morphologiques 235
6.2.3	Critères d'identification des classes morphologiques 241
6.2.4	Principe de cartographie des éléments d'instabilité apparente 245
6.2.5	Délimitation, codification et classification des éléments cartographiés 246
6.2.6	Critères de délimitation et de validation des éléments d'instabilité apparente 249
6.3	Association structurale et compatibilité cinématique des éléments cartographiés 251
6.3.1	Association des éléments d'instabilité apparente aux discontinuités contrôlantes..... 252
6.3.2	Étiquetage de compatibilité cinématique 256
6.4	Construction du jeu de résultats quantitatifs 261
6.4.1	Principe de quantification par points classifiés..... 262
6.4.2	Proportion relative des classes par zone 264
6.4.3	Agrégation par groupe fonctionnel 266
6.4.4	Contrôle de cohérence et normalisation des distributions 268
6.5	Résultats et analyses du jeu de données d'instabilité apparente 271
6.5.1	Distribution spatiale des éléments d'instabilité apparente par zone 272
6.5.2	Synthèse quantitative globale 287
6.5.3	Comparaison normalisée des classes morphologiques entre les zones 291

6.5.4	Comparaison des groupes fonctionnels entre les zones	294
6.6	Interprétation morpho-structurale et cinématique des éléments cartographiés	297
6.6.1	Zone A : signature structurale dominée par la stratification fracturée et expression morphologique diffuse	298
6.6.2	Zone B : Prédiposition structurale dominante et compatibilité avec le glissement en coin	306
6.7	Synthèse intégrée des résultats morphologiques, quantitatifs, structuraux et cinématiques	318
6.8	Conclusion du chapitre	322

CHAPITRE 7 ANALYSE COMPARATIVE DES SIGNATURES GÉOTECHNIQUES APPARENTES SELON LES SPÉCIFICITÉS OPÉRATIONNELLES

7.1	Préambule	325
7.2	Définition et portée de la signature morpho-fonctionnelle apparente	326
7.3	Contextes opérationnels et définition des unités d'analyse	327
7.4	Croisement entre zonation géométrique, chaînage et contextes opérationnels	332
7.4.1	Application du croisement aux zones A, B et C	335
7.4.2	Application dans la zone A	335
7.4.3	Application dans la zone B	338
7.4.4	Application dans la zone C	340
7.5	Méthode de comparaison et construction du profil morpho-fonctionnel.....	342
7.5.1	Niveaux d'analyse.....	342
7.5.2	Calcul des proportions morphologiques	343
7.5.3	Construction du profil fonctionnel.....	343
7.5.4	Interprétation des profils	345
7.5.5	Portée et limites de la comparaison	347
7.6	Résultats comparatifs des profils morpho-fonctionnels selon les contextes opérationnels	348
7.6.1	Distribution des classes morphologiques selon les contextes opérationnels	349
7.6.2	Distribution des groupes fonctionnels selon les contextes opérationnels	352
7.6.3	Lecture complémentaire des profils opérationnels selon les zones A, B et C	355
7.6.4	Synthèse des profils morpho-fonctionnels.....	357

CHAPITRE 8 DISCUSSION INTÉGRÉE.....

8.1	Préambule	361
8.2	De la prédiposition structurale à son expression morphologique.....	362
8.2.1	Architecture structurale commune de la carrière	362
8.2.2	Compatibilité cinématique et expression morphologique des mécanismes	364

8.2.3	Formes à contrôle structural direct et formes à association contextuelle	367
8.3	Interprétation comparative des signatures morpho-fonctionnelles	370
8.3.1	Signature du contexte de plateforme de déversement ponctuelle.....	371
8.3.2	Signature du contexte de plateforme de déversement étendue	374
8.3.3	Signature du contexte de secteur sans déversement direct	377
8.4	Contribution scientifique et méthodologique de l'approche intégrée.....	381
8.5	Incertitudes, limites et domaine de validité	383
8.6	Implications pour la gestion, la surveillance et la conception opérationnelle.....	386
8.6.1	Portée des signatures morpho-fonctionnelles pour la conception et la gestion des zones de déversement	387
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		393
Synthèse de la recherche.....		393
Principaux résultats, contributions originales et conclusions générales		394
Travaux futurs et recommandations.....		398
Recommandations pour la gestion et la surveillance		398
Recommandations pour la conception et les pratiques opérationnelles.....		399
Travaux futurs sur la méthode de classification		400
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		405

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Classification des roches selon la résistance à la compression uniaxiale....23
Tableau 2.2	Classification de l'espacement des discontinuités selon l'ISRM29
Tableau 2.3	Classification de la persistance des discontinuités selon l'ISRM30
Tableau 2.4	Types de blocs dans les massifs rocheux en fonction de la disposition des discontinuités.....39
Tableau 2.5	Corrélation entre le RQD et la qualité du massif rocheux.....41
Tableau 2.6	Tableau de classification du système RMR.....46
Tableau 2.7	Paramètres de correction du système SMR47
Tableau 2.8	Tables de classification des paramètres du système Q49
Tableau 4.1	Paramètres techniques du capteur DJI Zenmuse L1 les plus pertinents pour les acquisitions UAV-LiDAR réalisées à la carrière Francon d'après les spécifications techniques du DJI Zenmuse L1163
Tableau 4.2	Structure des données issues des nuages de points LiDAR.....168
Tableau 4.3	Modèles 3D représentatifs retenus pour les principaux secteurs d'analyse de la carrière Francon175
Tableau 4.4	Paramètres utilisés pour l'apprentissage et l'application du classificateur CANUPO.....185
Tableau 4.5	Résultats internes de l'apprentissage du classificateur CANUPO190
Tableau 4.6	Matrice de confusion obtenue sur le jeu de validation indépendant195
Tableau 4.7	Résultats de l'évaluation des performances du classificateur CANUPO.....196
Tableau 5.1	Orientations moyennes des parois et orientations retenues pour l'analyse cinématique directionnelle214
Tableau 5.2	Orientations moyennes et caractéristiques descriptives des familles de discontinuités identifiées à l'échelle de la carrière Francon222

Tableau 5.3	Synthèse des orientations de paroi utilisées et des mécanismes cinématiquement admissibles par secteur.....	229
Tableau 6.1	Classes morphologiques des éléments d'instabilité apparente, critères d'identification et rôle fonctionnel associé.....	244
Tableau 6.2	Critères utilisés pour la délimitation des éléments d'instabilité apparente.....	250
Tableau 6.3	Règles d'association structurale des éléments d'instabilité apparente	254
Tableau 6.4	Règles d'étiquetage de compatibilité cinématique des éléments d'instabilité apparente.....	258
Tableau 6.5	Synthèse globale du nombre de points classés par classe morphologique.....	290
Tableau 6.6	Synthèse globale des groupes fonctionnels des éléments d'instabilité apparente.....	291
Tableau 6.7	Synthèse intégrée des résultats morphologiques, quantitatifs, structuraux et cinématiques dans les zones A, B et C	321
Tableau 7.1	Niveaux conceptuels de délimitation associés aux plateformes de déversement ponctuelles.....	333
Tableau 7.2	Correspondance entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les contextes opérationnels utilisés pour l'analyse comparative	334
Tableau 7.3	Logique d'interprétation des profils de géorisque apparent selon la contribution des groupes fonctionnels	346
Tableau 7.4	Distribution quantitative des classes morphologiques selon les contextes opérationnels.....	349
Tableau 7.5	Répartition relative des points cartographiés entre les groupes fonctionnels selon les contextes opérationnels	353
Tableau 7.6	Lecture spatiale complémentaire des profils opérationnels selon les zones A, B et C.....	356
Tableau 7.7	Synthèse interprétative des profils morpho-fonctionnels selon les contextes opérationnels.....	359

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 2.1	Définition de la direction de pendage et du pendage d'un plan de discontinuité	27
Figure 2.2	Profils de rugosité de référence et valeurs correspondantes du coefficient <i>JRC</i>	31
Figure 2.3	Principe de l'essai de cisaillement direct sur une discontinuité rocheuse ...	33
Figure 2.4	Procédure de mesure et de calcul du Rock Quality Designation à partir des carottes de forage.....	40
Figure 2.5	Relation entre les contraintes principales majeure et mineure selon le critère de rupture de Hoek-Brown	42
Figure 2.6	Classification de l'indice de résistance géologique GSI	44
Figure 2.7	Développement des joints dans la roche en fonction des conditions de contraintes lors des phases d'enfouissement et de soulèvement : (a) évolution des contraintes avec la profondeur, (b) conditions de rupture représentées sur un diagramme de Mohr, et (c) orientation des fractures par rapport aux contraintes principales.....	54
Figure 2.8	Influence des propriétés des discontinuités sur la stabilité des pentes rocheuses : (a) glissement planaire contrôlé par des joints persistants, (b) détachement progressif de petits blocs associé à des joints peu persistants, et (c) rupture par basculement liée à des discontinuités persistantes inclinées vers l'intérieur de la pente	55
Figure 2.9	Terminologie utilisée pour définir l'orientation des discontinuités : (a) représentation tridimensionnelle d'un plan montrant le pendage et la direction de pendage, (b) représentation en plan du strike et de la direction de pendage, et (c) représentation de l'orientation d'une ligne à l'aide du trend et du plunge	56
Figure 2.10	Représentation stéréographique des plans et des lignes sur l'hémisphère inférieur d'une sphère de référence et leur projection sur un réseau stéréographique d'aire égale : (a) représentation d'un plan et de son grand cercle, (b) représentation d'une ligne définie par son plunge et son trend, (c) projection d'un plan et de son pôle sur le stéréonet, et (d) projection d'une ligne sur le réseau stéréographique	57

Figure 2.20	Principe de la photogrammétrie : (a) géométrie de la caméra et paramètres internes pour le calcul des distances; (b) positionnement relatif des images et triangulation pour la reconstruction tridimensionnelle	74
Figure 2.21	Nuage de points obtenu à partir d'un levé UAV pour la modélisation tridimensionnelle de la topographie	76
Figure 2.22	Évolution multiscalaire de la dimensionnalité locale de différentes composantes d'une scène naturelle. Les diagrammes ternaires représentent la distribution des signatures géométriques de la végétation, du substrat rocheux, des graviers et de l'eau pour des échelles comprises entre 5 et 50 cm. Les sommets des diagrammes correspondent aux comportements géométriques linéaire (1D), planaire (2D) et volumique (3D)	80
Figure 2.23	Exemple du processus de classification supervisée multiscalaire avec CANUPO appliqué à une scène naturelle : (a) scène tridimensionnelle initiale; (b) classification par défaut distinguant notamment la végétation, le substrat rocheux, les graviers et l'eau; (c) classification améliorée par l'utilisateur; (d) points demeurés non classés.	82
Figure 2.24	Principe d'estimation d'une normale de surface locale dans un nuage de points : (a) définition du voisinage autour d'un point de référence ; (b) ajustement d'un plan local et calcul du vecteur normal associé	85
Figure 2.25	Principe du plan de meilleur ajustement appliqué à un nuage de points. Le plan ajusté passe par le centroïde du nuage et est défini par les deux directions principales de dispersion maximale. Le vecteur propre associé à la plus faible dispersion correspond à la normale du plan	87
Figure 2.26	(a) Nuage de points tridimensionnel d'un affleurement rocheux et (b) superposition des familles de discontinuités représentées par des plans circulaires caractérisés par leur pendage et leur direction	90
Figure 2.27	Schéma illustrant la relation entre l'angle d'incidence du faisceau laser, la normale à la surface et l'empreinte du laser sur la cible, montrant l'influence de la géométrie d'acquisition sur l'incertitude de mesure	92

Figure 2.28	Grille de cotation du Rockfall Hazard Rating System pour l'évaluation du danger de chutes de blocs95
Figure 3.1	Localisation de la carrière Francon. (a) Situation de Montréal dans la province de Québec. (b) Position de la carrière sur l'île de Montréal. (c) Vue rapprochée du site et de ses limites urbaines.....105
Figure 3.2	Dimensions principales et organisation morphologique en plateaux de la carrière Francon. Vue axonométrique de la fosse montrant les principaux plateaux, les variations altimétriques et les dimensions générales du site. Les altitudes indiquées correspondent aux élévations géodésiques, tandis que les profondeurs sont évaluées par rapport au sommet moyen de la carrière, estimé à 42 m au-dessus du niveau de la mer107
Figure 3.3	Coupe topographique A–A' de la carrière Francon. La coupe montre l'organisation étagée des plateaux, la variation des élévations entre le Plateau 3 et le Plateau 1, ainsi que la position basse du secteur associé à la station de pompage108
Figure 3.4	Vue représentative des parois rocheuses de la carrière Francon. Les photographies illustrent l'organisation des fronts rocheux en banquettes superposées, la présence de bermes végétalisées, le plan d'eau en pied de paroi ainsi que la stratification calcaire subhorizontale visible sur les parois. (a) Vue générale d'un front rocheux. (b) Vue rapprochée montrant les paliers, les bermes et les discontinuités visibles.....109
Figure 3.5	Évolution aérienne de la carrière Francon de 1930 à 2019. Mosaïque de photographies aériennes illustrant la progression de l'excavation entre 1930 et 1973, la stabilisation de l'empreinte après la fin de l'exploitation et l'apparition progressive des lacs de fonte dans la partie sud-est du site111
Figure 3.6	Accumulations de neige usée dans la carrière Francon en période hivernale112
Figure 3.7	Carte géologique simplifiée du Québec situant la plate-forme du Saint-Laurent entre le socle grenvillien protérozoïque au nord-ouest et les zones appalachiennes au sud-est.114
Figure 3.8	Coupe schématique structurale NW–SE de la plate-forme du Saint-Laurent dans la grande région de Montréal, montrant l'empilement des unités sédimentaires cambro-ordoviciennes sur le socle grenvillien et leur relation avec les nappes appalachiennes à l'est. Les unités carbonatées Trenton–

	Black River–Chazy correspondent aux formations exposées dans les parois de la carrière Francon.....	115
Figure 3.9	Colonne stratigraphique de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Montréal. La succession débute par les grès du Groupe de Potsdam, d'âge cambrien, et se termine par les molasses du Groupe de Queenston, d'âge ordovicien supérieur. Les unités carbonatées du Black River et du Trenton, encadrées en pointillé, correspondent aux formations exposées dans les parois de la carrière Francon	117
Figure 3.10	Carte géologique de la région de Montréal montrant les principales unités sédimentaires ordoviciennes, les grands plutons montréalais et les sills majeurs. La carrière Francon est localisée dans le Groupe de Trenton, à proximité des sills de la carrière Miron, de la rue Masson et de Montréal-Est. Les intrusions montréalaises, indiquées en brun foncé, recoupent la séquence sédimentaire cambro-ordovicienne	119
Figure 3.11	Colonne géologique simplifiée de la carrière Francon montrant la succession calcaire, les sills subhorizontaux et un dyke recoupant la paroi	121
Figure 3.12	Exemples d'intrusions et de contacts lithologiques observés dans les parois de la carrière Francon. Les vues montrent le contraste entre les niveaux intrusifs et les calcaires encaissants, ainsi que leur relation avec la stratification locale et la segmentation du massif	125
Figure 3.13	Stratification subhorizontale des bancs calcaires ordoviens exposés dans les parois de la carrière Francon	127
Figure 3.14	Exemples de joints subverticaux observés dans les parois de la carrière Francon. Les discontinuités raides recoupent la stratification calcaire et contribuent à la segmentation du massif en blocs	128
Figure 3.15	Segmentation structurale du massif rocheux dans la carrière Francon. Les vues montrent l'interaction entre la stratification subhorizontale et les familles de joints subverticaux, qui délimitent des blocs rocheux de géométrie variable.....	130
Figure 3.16	Plan thermique de la carrière Francon en conditions estivales et hivernales. En été, les parois rocheuses exposées constituent les zones les plus chaudes du site, tandis que les zones végétalisées demeurent plus fraîches. En hiver, la température diminue avec la profondeur de la fosse et les accumulations de neige accentuent le refroidissement de certains paliers. Ces contrastes thermiques conditionnent	

	l'intensité des cycles de gel–dégel agissant sur les discontinuités des parois rocheuses	132
Figure 3.17	Opérations de déversement de neige usée à la carrière Francon. Les vues illustrent le déversement gravitaire depuis les quais, la formation de cônes de neige au contact des parois rocheuses et leur distribution spatiale le long des bermes de la carrière.....	134
Figure 3.18	Schéma du ruissellement, de la gestion des contaminants et de l'évacuation des eaux à la carrière Francon selon les saisons. En hiver, la neige s'accumule contre les parois rocheuses et les eaux s'écoulent vers les bassins de rétention. Au printemps et en été, la fonte libère les contaminants, qui sont contenus par les bassins puis pompés vers le réseau municipal	136
Figure 3.19	Exemples de segmentation structurale des parois rocheuses de la carrière Francon. Les joints subverticaux recoupent les bancs calcaires subhorizontaux et contribuent à individualiser localement des blocs rocheux, influençant ainsi la morphologie et la dégradation des parois....	139
Figure 3.20	Morphologie de crête irrégulière contrôlée par des plans structuraux subverticaux à la carrière Francon. Les joints recoupent les bancs calcaires subhorizontaux et contribuent à former un profil localement en dents de scie, illustrant la segmentation structurale de la paroi rocheuse	140
Figure 3.21	Structures géologiques et indices d'humidité observables sur les parois rocheuses de la carrière Francon. Les vues montrent l'interaction entre les joints subverticaux, la stratification calcaire subhorizontale et les traces sombres associées à l'infiltration ou au suintement le long des discontinuités.....	142
Figure 3.22	Exemples d'érosion différentielle des horizons plus faibles dans les parois de la carrière Francon. Les vues montrent des renforcements horizontaux et des zones sombres associées au lessivage préférentiel de niveaux argileux, schisteux ou altérés intercalés entre des bancs calcaires plus résistants.....	143
Figure 3.23	Exemples de contacts entre les bancs calcaires et les sills dans la carrière Francon. Les horizons sombres subhorizontaux contrastent avec les calcaires gris clair encaissants et présentent localement des teintes d'altération, d'oxydation et une végétation associée aux zones plus humides	144
Figure 3.24	Exemples de mécanismes de détachement contrôlés par la structure dans les parois de la carrière Francon : (a) cicatrice de détachement	

	délimitée par des plans structuraux ; (b) sous-cavage érosif associé à l'érosion différentielle d'un horizon plus faible 146
Figure 3.25	Effets morphologiques potentiels des opérations de dépôt de neige sur les parois de la carrière Francon : (a) pentes dégradées sous les points de déversement ; (b) répétition de zones érodées en partie haute de la paroi, près des quais. Ces formes sont compatibles avec une influence opérationnelle locale, sans constituer une preuve directe de causalité..... 148
Figure 3.26	Exemples d'accumulation et d'écoulement d'eau de fonte piégés dans des zones confinées de la carrière Francon. (a) Vue du mur nord montrant un écoulement concentré entre le talus d'éboulis et la face rocheuse. (b) Vue du mur nord-est illustrant plusieurs zones où l'eau de fonte demeure piégée au pied de la paroi. Ces conditions sont susceptibles de favoriser localement le maintien de l'humidité, le lessivage et l'altération progressive des surfaces rocheuses..... 150
Figure 3.27	Exemples de lignes d'érosion observées sur les parois de la carrière Francon. (a) Vue d'ensemble montrant plusieurs traces de ruissellement sous les zones de déversement. (b) Vue rapprochée illustrant des marques d'érosion sur la face rocheuse. Ces formes indiquent des trajectoires préférentielles d'écoulement susceptibles de favoriser le lessivage et l'altération superficiel 152
Figure 4.1	Système d'acquisition LiDAR UAV utilisé dans ce mémoire : (a) DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur LiDAR Zenmuse L1 ; (b) opération de terrain du même système lors de l'acquisition des données tridimensionnelles à la carrière Francon 158
Figure 4.2	Principe de l'acquisition UAV-LiDAR 160
Figure 4.3	Planification et configuration des acquisitions UAV-LiDAR à la carrière Francon : (a) trajectoires de vol automatisées et couverture spatiale du site générées à partir de Pix4D ; (b) exemple d'acquisition manuelle rapprochée réalisée à proximité d'une paroi rocheuse afin d'améliorer la couverture des surfaces subverticales et des secteurs morphologiquement complexes..... 162
Figure 4.4	Série temporelle d'images aériennes acquises par UAV illustrant différentes campagnes de levé réalisées à la carrière Francon : (a) 14 novembre 2024; (b) 11 septembre 2024 ; (c) 11 juin 2025..... 165
Figure 4.5	Modèle tridimensionnel de la carrière Francon généré à partir des nuages de points LiDAR acquis par drone DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur Zenmuse L1. La flèche indique l'étendue

	approximatif du modèle, soit environ 1,2 km de parois rocheuses couvertes	167
Figure 4.6	Chaînage longitudinal de référence établi sur le modèle tridimensionnel de la carrière Francon. Les repères métriques permettent de localiser les observations et les plateformes de déversement le long de la crête principale des parois étudiées	170
Figure 4.7	Localisation des principales plateformes de déversement ponctuelles selon le chaînage longitudinal de référence	171
Figure 4.8	Organisation spatiale et chaînage des secteurs d'analyse A, B et C de la carrière Francon. Le secteur A s'étend du chaînage 0+050 au chaînage 0+400, le secteur B du chaînage 0+400 au chaînage 1+200 et le secteur C du chaînage 1+200 au chaînage 1+800	173
Figure 4.9	Modèles 3D représentatifs retenus pour les secteurs A, B et C de la carrière Francon	174
Figure 4.10	Principe de la classification géométrique multiscalaire utilisée par CANUPO : (a) définition de voisinages sphériques de dimensions croissantes autour d'un point du nuage; (b) domaine de dimensionnalité locale obtenu à partir des proportions normalisées des valeurs propres issues de l'analyse en composantes principales; (c) évolution multiscalaire des signatures géométriques	179
Figure 4.11	Construction des classes d'apprentissage utilisées pour le classificateur CANUPO : (a) localisation de la zone d'apprentissage dans le nuage de points global; (b) vue RGB de la portion sélectionnée; (c) superposition des classes d'apprentissage, avec la classe 1 correspondant aux surfaces non végétales en bleu et la classe 2 à la végétation en rouge; (d) visualisation isolée de la classe 1; (e) visualisation isolée de la classe 2	181
Figure 4.12	Séparabilité des classes d'apprentissage dans l'espace discriminant obtenu par CANUPO. Les points de la classe 1, correspondant aux surfaces non végétales, sont représentés en bleu, tandis que les points de la classe 2, correspondant à la végétation, sont représentés en rouge. La ligne magenta correspond à la frontière de décision déterminée par le classificateur	191
Figure 4.13	Matrice de confusion obtenue par comparaison entre la classification manuelle de référence et les classes prédites par CANUPO sur un ensemble indépendant de 2 000 000 de points. Les valeurs situées sur la diagonale correspondent aux points correctement classés,	

tandis que les valeurs hors diagonale représentent les erreurs de classification. L'exactitude globale obtenue est de 89,02 %..... 194

- Figure 4.14 Application du classificateur CANUPO à la zone A, entre les chaînages 0+050 et 0+400 : (a) vue RGB initiale du nuage de points; (b) résultat de la classification, avec la végétation en rouge et les surfaces non végétales en bleu; (c) végétation isolée après classification; (d) surfaces non végétales conservées après retrait de la végétation; (e) vue RGB après nettoyage 200
- Figure 4.15 Exemple de calcul des normales de surface dans CloudCompare : (a) nuage de points filtré et colorisé ; (b) représentation dérivée après calcul des normales, mettant en évidence les variations d'orientation et les discontinuités visibles de la paroi..... 204
- Figure 5.1 Orientation représentative des sous-secteurs A1, A2 et A3 du secteur A. (a) vue générale du modèle tridimensionnel montrant la subdivision du secteur, le chaînage longitudinal, la localisation des plateformes de déversement ponctuelles et les orientations moyennes dérivées des plans de meilleur ajustement; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, mettant en évidence la variation longitudinale de l'orientation de la paroi..... 209
- Figure 5.2 Détermination de l'orientation représentative du secteur B. (a) Vue générale du modèle tridimensionnel du secteur B montrant le chaînage longitudinal, la localisation des plateformes Pad #6, Pad #7 et Pad #8, la zone dynamitée au niveau du mur de la banquettes supérieure, ainsi que l'orientation moyenne de la paroi dérivée d'un plan de meilleur ajustement; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, illustrant la continuité générale de l'orientation de la paroi et ses variations locales..... 211
- Figure 5.4 Détermination de l'orientation représentative du secteur C : (a) vue générale du modèle tridimensionnel montrant l'orientation moyenne de la paroi dérivée d'un plan de meilleur ajustement, ainsi que le chaînage longitudinal et les principales références opérationnelles; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, mettant en évidence la continuité générale de l'orientation de la paroi et les variations locales observées 213
- Figure 5.5 Exemple d'extraction des orientations structurales dans le secteur C à partir du modèle 3D nettoyé. (a) Zoom sur un segment de la paroi montrant la carte de direction de pendage et les orientations

	structurales extraites; (b) vue d'ensemble de la paroi du secteur C avec localisation du segment illustré au moyen du chaînage longitudinal; (c) vue contextuelle tridimensionnelle de la paroi montrant la carte de direction de pendage et l'orientation moyenne de la paroi retenue pour l'analyse cinématique directionnelle	219
Figure 5.6	Diagramme stéréographique global des orientations structurales extraites des modèles tridimensionnels de la carrière Francon. Les regroupements de pôles mettent en évidence une famille de stratification faiblement inclinée, S0, et trois familles de joints à fort pendage, F1, F2 et F3	221
Figure 5.7	Diagrammes polaires de sensibilité directionnelle montrant la fréquence relative des structures satisfaisant les critères de compatibilité cinématique pour les différents mécanismes, selon la direction de pendage de la paroi. Un pendage uniforme de 90° est utilisé, tandis que les directions représentatives des secteurs sont indiquées comme suit : A1 = 137°, A2 = 160°, A3 = 194°, B = 213° et C = 213°. Les pourcentages correspondent à des fréquences relatives de structures géométriquement admissibles et non à des probabilités de rupture	227
Figure 6.1	Exemples d'éléments associés aux évidences directes de libération de matériau. (a) Surplombs caractérisés par des zones en porte-à-faux et des sous-creusements visibles ; (b) cicatrice en coin délimitée par deux surfaces planes sécantes ; (c) masse rocheuse fracturée à blocs ouverts, marquée par une segmentation importante du massif et l'ouverture visible de plusieurs discontinuités	237
Figure 6.2	Exemples d'éléments associés à la prédisposition structurale du massif rocheux. (a) Discontinuités persistantes à faible pendage ; (b) zones de joints verticaux persistants ; (c) zones de stratification fracturée ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills. Ces éléments structurent le massif, contrôlent la géométrie des blocs et peuvent influencer leur liberté cinématique	239
Figure 6.3	Exemples d'éléments associés à la dégradation progressive des parois rocheuses. (a) Surface altérée caractérisée par une texture visuellement dégradée et un contraste avec les surfaces rocheuses voisines ; (b) zone influencée par le suintement, marquée par des traces d'humidité, des colorations et une végétation localisée le long de discontinuités ouvertes	240
Figure 6.4	Exemple localisé de délimitation manuelle des éléments d'instabilité apparente et légende complète du champ scalaire Classification utilisé	

pour la cartographie morphologique. (a) Surface rocheuse exposée après nettoyage du nuage de points. (b) Délimitation manuelle des éléments d'instabilité apparente dans CloudCompare. (c) Représentation des éléments cartographiés selon leur classe morphologique..... 248

- Figure 6.5 Exemple d'association structurale d'une cicatrice en coin dans la zone C. (a) Identification de la cicatrice en coin sur l'image RGB ; (b) repérage des deux surfaces contrôlantes sur la carte d'orientation dérivée du modèle 3D ; (c) localisation de l'élément d'instabilité apparente sur le modèle 3D ; (d) échelle de direction de pendage utilisée pour l'interprétation. Les valeurs indiquées correspondent aux couples pendage/direction de pendage des surfaces contrôlantes. Cette figure illustre la démarche d'association entre un élément d'instabilité apparente et deux discontinuités sécantes, utilisée pour évaluer sa compatibilité avec un mécanisme de glissement en coin 255
- Figure 6.6 Schéma décisionnel d'attribution des étiquettes de compatibilité cinématique aux patches cartographiés. Chaque patch est associé à une géométrie structurale représentative, projeté dans le diagramme stéréographique du secteur, puis comparé aux enveloppes de faisabilité cinématique afin d'attribuer une étiquette de compatibilité 260
- Figure 6.7 Indicateurs morphologiques représentatifs observés sur les images RGB de la zone A. (a) Stratification fracturée marquée par des bandes subhorizontales discontinues ; (b) zone d'influence par suintement caractérisée par des traces sombres et des colorations localisées ; (c) surface altérée développée sur une portion exposée de la paroi ; (d) association spatiale entre stratification fracturée et influence du suintement..... 275
- Figure 6.8 Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone A et colorés selon le champ scalaire Classification de CloudCompare. La distribution met en évidence la forte représentation de la stratification fracturée, des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement 276
- Figure 6.9 Distribution des principales classes morphologiques cartographiées dans la zone A : (a) stratification fracturée; (b) surfaces altérées; (c) zones d'influence par suintement. Leur organisation met en évidence une forte contribution de la structuration subhorizontale du massif, associée à une expression morphologique diffuse de l'altération et du suintement 277
- Figure 6.10 Indicateurs topographiques représentatifs de l'instabilité apparente dans la zone B à partir des images RGB. (a) Zones de joints verticaux

	persistants, illustrant la segmentation structurale de la paroi ; (b) zone influencée par le suintement, caractérisée par des traces d'humidité, des colorations sombres et une végétation localisée ; (c) stratification fracturée, marquée par des surfaces étagées et discontinues le long du litage ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills, visibles comme des limites lithologiques continues280
Figure 6.11	Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone B. Les éléments sont colorés selon le champ scalaire Classification utilisé dans CloudCompare. La distribution met en évidence la dominance des zones de joints verticaux persistants, des zones d'influence par suintement, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et des contacts intrusifs281
Figure 6.12	Distribution des principales classes morphologiques représentatives cartographiées dans la zone B : (a) zones de joints verticaux persistants ; (b) zones d'influence par suintement ; (c) masses rocheuses fracturées à blocs ouverts ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills282
Figure 6.13	Indicateurs topographiques représentatifs de l'instabilité apparente dans la zone C à partir des images RGB. (a) Zone influencée par le suintement, caractérisée par des traces sombres et des colorations verticales ; (b) masse rocheuse fracturée à blocs ouverts, traduisant l'individualisation locale de volumes rocheux ; (c) stratification fracturée, marquée par des bandes subhorizontales discontinues ; (d) surface altérée développée sur une portion exposée de la paroi284
Figure 6.14	Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone C, colorés selon le champ scalaire de classification utilisé dans CloudCompare. La distribution des classes met en évidence une dominance des surfaces altérées, des zones d'influence par suintement et de la stratification fracturée, avec une contribution locale des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts285
Figure 6.15	Distribution des principales classes morphologiques dominantes cartographiées dans la zone C : (a) surfaces altérées ; (b) zones d'influence par suintement ; (c) stratification fracturée. Ces classes traduisent une expression d'instabilité apparente principalement associée à la dégradation progressive des surfaces rocheuses, à l'action locale de l'eau et à la structuration subhorizontale du massif.....286
Figure 6.16	Comparaison des distributions relatives des neuf classes morphologiques dans les zones A, B et C292

Figure 6.17	Composition relative des groupes fonctionnels dans les zones A, B et C	295
Figure 6.18	Vue RGB annotée des principaux indicateurs morphologiques et structuraux observés dans les sous-secteurs A1, A2 et A3 de la zone A	300
Figure 6.19	Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant la variabilité structurale interne de la zone A. La figure met en évidence une interaction dominante entre F1 et F3 dans A1–A2 et une association F1–F2 plus lisible dans A3	302
Figure 6.20	Carte de classification des éléments d’instabilité apparente de la zone A. La carte montre la forte représentation de la stratification fracturée et son association spatiale avec les surfaces altérées et les zones d’influence par suintement, ainsi que la présence locale d’éléments plus structurés	304
Figure 6.21	Vue RGB annotée de la zone B montrant les principales familles de joints persistants F1 et F2 ainsi que les zones de suintement et les contacts intrusifs (sills), illustrant la segmentation structurale de la paroi et l’individualisation de compartiment.....	307
Figure 6.22	Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant la dominance des familles structurales F1 et F2 et leur rôle dans la segmentation du massif rocheux de la zone B	308
Figure 6.23	Carte de classification des éléments d’instabilité apparente cartographiés dans la zone B. La carte montre la dominance des zones de joints verticaux persistants, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, des zones d’influence par suintement et des contacts intrusifs	309
Figure 6.24	Vue RGB annotée des indicateurs structuraux et morphologiques de la zone C. La figure montre la prédominance des surfaces altérées et des zones d’influence par suintement, ainsi que la présence locale de surplombs, de stratification fracturée, de zones de joints verticaux persistants et de cicatrices en coin déjà exprimées.....	313
Figure 6.25	Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant une cicatrice en coin déjà exprimée dans la zone C. La figure illustre son association avec les familles structurales F1 et F2.....	314
Figure 6.26	Carte de classification des éléments d’instabilité apparente cartographiés dans la zone C. La carte montre la dominance des	

	surfaces altérées, des zones d'influence par suintement et de la stratification fracturée, ainsi que la présence locale de cicatrices en coin et d'éléments structuraux associés316
Figure 7.1	Zonation géométrique et contextes opérationnels de la carrière Francon : (a) vue générale des zones A, B et C ; (b) coupe longitudinale de la zone C illustrant une plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et un secteur sans déversement direct329
Figure 7.2	Répartition des cinq plateformes de déversement ponctuelles et des secteurs sans déversement direct dans la zone A selon le chaînage longitudinal336
Figure 7.3	Application du croisement entre le chaînage longitudinal, la subdivision géométrique et les contextes opérationnels dans les sous-secteurs A1, A2 et A3 de la zone A.....337
Figure 7.4	Répartition des six plateformes de déversement ponctuelles et des secteurs sans déversement direct dans la zone B selon le chaînage longitudinal339
Figure 7.5	Répartition des deux plateformes de déversement ponctuelles, des secteurs sans déversement direct et de la plateforme de déversement étendue dans la zone C selon le chaînage longitudinal de référence.....341
Figure 7.6	Comparaison visuelle des classes morphologiques entre les contextes opérationnels.....350
Figure 7.7	Signature morphologique relative des contextes opérationnels351
Figure 7.8	Profils fonctionnels comparés des contextes opérationnels354
Figure 8.1	Mise en relation de la compatibilité cinématique et de l'expression morphologique des mécanismes : (a) compatibilité cinématique directionnelle à l'échelle des secteurs étudiés ; (b) exemple de cicatrice en coin observée sur la paroi et interprétée comme une trace morphologique de détachement antérieur ; (c) synthèse des mécanismes cinématiquement admissibles par secteur365
Figure 8.2	Illustration locale de la signature morpho-fonctionnelle de la plateforme de déversement ponctuelle dans la zone C : (a) vue d'ensemble classifiée de la paroi et localisation des plateformes nos 12 et 13 ; (b) et (c) détails morphologiques tridimensionnels des deux plateformes ; (d) comparaison des proportions relatives des

classes morphologiques calculées séparément pour les deux secteurs.

La partie inférieure présente l'échelle des neuf classes morphologiques ainsi que la synthèse des groupes fonctionnels de la plateforme de déversement ponctuelle à l'échelle de la carrière 372

Figure 8.3 I Illustration de la signature morpho-fonctionnelle de la plateforme de déversement étendue dans la zone C : (a) vue d'ensemble classifiée de la zone C et localisation de l'emprise comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775 ; (b) détail tridimensionnel de cette portion de paroi ; (c) échelle de classification et description des neuf classes morphologiques ; (d) distribution relative des classes dans la plateforme de déversement étendue. Le panneau inférieur droit présente la répartition des groupes fonctionnels et met en évidence la dominance de la dégradation progressive..... 375

Figure 8.4 Illustration locale de la signature morpho-fonctionnelle du secteur sans déversement direct dans la zone C : (a) vue d'ensemble de la zone C et localisation du secteur compris entre les chaînages 1+775 et 1+800 ; (b) détail tridimensionnel classifié de cette portion de paroi ; (c) échelle et description des neuf classes morphologiques ; (d) distribution relative des classes et synthèse des groupes fonctionnels. Cette illustration constitue une lecture locale complémentaire et ne représente pas, à elle seule, le profil global du secteur sans déversement direct à l'échelle de la carrière 380

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
A1	Sous-secteur A1 de la zone A
A2	Sous-secteur A2 de la zone A
BFP	Best-Fit Plane
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
F1	Famille principale de discontinuités 1
F2	Famille principale de discontinuités 2
F3	Famille principale de discontinuités 3
GCP	Ground Control Point
GSI	Geological Strength Index
GPS	Global Positioning System
ISRM	International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering
JCS	Joint Wall Compressive Strength
JRC	Joint Roughness Coefficient
LiDAR	Light Detection and Ranging
MNT	Modèle numérique de terrain
MNS	Modèle numérique de surface
P1	Plateau supérieur de la carrière Francon

XXXVIII

P2	Plateau intermédiaire de la carrière Francon
P3	Plateau inférieur de la carrière Francon
QGIS	Quantum Geographic Information System
Q-Slope	Système de classification géomécanique appliqué aux pentes rocheuses
RGB	Red, Green, Blue
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
RTK	Real-Time Kinematic
S0	Stratification principale du massif rocheux
SfM	Structure from Motion
SIG	Système d'information géographique
SMR	Slope Mass Rating
TLS	Terrestrial Laser Scanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 1984
DEM	Digital Elevation Model
3D	Tridimensionnel
A1	Sous-secteur A1 de la zone A
A2	Sous-secteur A2 de la zone A
BFP	Best-Fit Plane
DEM	Digital Elevation Model
DTM	Digital Terrain Mode

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

N_z	Nombre total de points classifiés dans la zone z
$N_{z,i}$	Nombre de points appartenant à la classe i dans la zone z
$P_{z,i}$	Proportion de la classe i dans la zone z , exprimée en pourcentage
N_o	Nombre total de points classifiés dans le contexte opérationnel o
$N_{o,i}$	Nombre de points appartenant à la classe i dans le contexte opérationnel o
$P_{o,i}$	Proportion de la classe i dans le contexte opérationnel o
$G_{o,L}$	Proportion associée au groupe de libération directe dans le contexte opérationnel o
$G_{o,P}$	Proportion associée au groupe de prédisposition structurale dans le contexte opérationnel o
$G_{o,D}$	Proportion associée au groupe de dégradation progressive dans le contexte opérationnel o
i	Indice de classe morphologique
z	Indice de zone d'analyse
o	Indice de contexte opérationnel

INTRODUCTION

Les parois rocheuses excavées constituent des environnements géotechniques complexes, particulièrement lorsqu'elles sont situées en milieu urbain ou intégrées à des usages opérationnels actifs. Contrairement aux talus naturels, ces parois résultent d'un historique d'excavation, de découpages successifs, de modifications du drainage et d'interventions humaines qui peuvent transformer durablement leur état morphologique et structural. Leur évolution dépend de plusieurs facteurs interdépendants, notamment la nature lithologique du massif, l'orientation et la persistance des discontinuités, la géométrie des fronts rocheux, les conditions hydriques, l'altération des surfaces et les sollicitations environnementales ou opérationnelles auxquelles elles sont exposées (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Dans ce contexte, la gestion des instabilités rocheuses ne peut pas reposer uniquement sur une lecture globale de la paroi. Elle nécessite une compréhension spatialisée des formes visibles, de leur organisation structurale et de leur signification géomécanique potentielle.

Les anciennes carrières urbaines représentent un cas particulièrement sensible de cette problématique. Elles combinent souvent des parois abruptes, des banquettes, des surfaces irrégulières, des zones fracturées, des discontinuités persistantes, des surplombs et des secteurs difficilement accessibles. Lorsqu'elles sont réutilisées à des fins municipales ou industrielles, leur évolution ne dépend plus uniquement de l'état géologique initial du massif, mais également des conditions d'exploitation et des usages post-extraction. Ces sites constituent alors des systèmes complexes intégrant plusieurs composantes interdépendantes : géologiques, géotechniques, urbaines et opérationnelles. L'analyse des formes visibles sur les parois devient ainsi une étape essentielle pour documenter l'état apparent du massif et appuyer une gestion plus éclairée de la stabilité des parois rocheuses.

La carrière Francon, située dans le quartier Saint-Michel à Montréal, constitue un exemple représentatif de ce type d'environnement. Ancienne carrière de calcaire aujourd'hui utilisée comme dépôt à neige municipal, elle présente une fosse de 70 mètres de profond, des parois abruptes, une organisation en paliers et une proximité directe avec des secteurs résidentiels,

industriels et municipaux. Son cadre géologique est dominé par des calcaires stratifiés de la plate-forme du Saint-Laurent, recoupés par des familles de joints subverticaux et localement par des intrusions magmatiques associées à la province montréalaise. Cette organisation structurale contrôle la segmentation du massif rocheux, la formation de blocs et la circulation préférentielle de l'eau. À cette complexité géologique s'ajoute un contexte opérationnel particulier lié au dépôt saisonnier de neige usée, aux eaux de fonte, aux sels de déglacage, aux matériaux abrasifs et aux cycles de gel-dégel. Les approches classiques d'évaluation des parois rocheuses reposent principalement sur la caractérisation géologique et géomécanique du massif, la description des discontinuités, l'identification des familles structurales et l'analyse cinématique des mécanismes de rupture potentiels. Ces méthodes permettent d'évaluer la faisabilité géométrique de mécanismes tels que le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement (Goodman, 1991; Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Elles constituent une base essentielle pour comprendre la prédisposition structurale d'une paroi. Toutefois, l'analyse cinématique demeure principalement géométrique. Elle permet d'identifier des mécanismes possibles, mais elle ne montre pas toujours comment ces mécanismes s'expriment réellement à la surface du massif. Une configuration peut être cinématiquement admissible sans se manifester clairement dans la morphologie de la paroi. À l'inverse, une forme visible peut résulter d'une rupture passée, d'une altération progressive, d'une circulation d'eau préférentielle ou d'une interaction entre plusieurs facteurs structuraux et environnementaux.

Cette limite met en évidence la nécessité de mieux relier les mécanismes géométriquement admissibles aux formes réellement observables sur les parois rocheuses. Dans les environnements complexes comme la carrière Francon, l'enjeu n'est pas seulement de déterminer si un mécanisme de rupture est possible d'un point de vue géométrique, mais aussi de documenter où et comment les indices morphologiques d'instabilité apparente s'expriment dans l'espace. Cette distinction est fondamentale, car les formes visibles ne possèdent pas toutes la même signification géomécanique. Une cicatrice en coin peut témoigner d'une libération passée de matériau, tandis qu'une zone de joints persistants peut traduire une prédisposition structurale du massif. Une surface altérée ou une zone de suintement renseigne

plutôt sur des processus de dégradation progressive, sans nécessairement correspondre à une rupture active.

Le développement des technologies LiDAR, de la photogrammétrie et des modèles tridimensionnels à haute résolution offre aujourd'hui de nouvelles possibilités pour répondre à cet enjeu. Ces outils permettent de documenter la géométrie des fronts rocheux, d'observer des secteurs difficiles d'accès, d'extraire des orientations structurales et de cartographier des formes morphologiques visibles sur les surfaces rocheuses (Jaboyedoff et al., 2012; Sturzenegger & Stead, 2009; Westoby et al., 2012). Les modèles 3D permettent également d'appuyer la cartographie structurale virtuelle, l'identification des discontinuités et l'analyse de leur distribution spatiale (M. J. Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014). Toutefois, un modèle 3D ne constitue pas à lui seul une interprétation géotechnique. Sa valeur scientifique repose sur la manière dont il est traité, interprété et intégré à une démarche capable de relier la géométrie, la structure, la morphologie et le contexte opérationnel.

Dans le présent mémoire, les données topographiques générées par LiDAR aéroporté à l'aide d'un aéronef télépiloté (UAV), les données photogrammétriques, les images RGB et les observations de terrain ont été utilisées afin de construire des modèles tridimensionnels détaillés des parois rocheuses de la carrière Francon. Ces modèles ont servi de support à une démarche intégrée combinant la cartographie structurale virtuelle, l'analyse cinématique directionnelle et la cartographie morphologique des éléments d'instabilité apparente. Les formes visibles sont identifiées, délimitées et classifiées selon leur expression morphologique. Elles comprennent notamment la stratification fracturée, les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage, les zones de joints verticaux persistants, les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, les cicatrices en coin, les contacts intrusifs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts.

L'utilisation des éléments d'instabilité apparente cartographiés permet de convertir l'interprétation visuelle des parois en un jeu de données spatialement structuré. Chaque élément correspond à une portion de surface rocheuse attribuée à une classe morphologique selon des critères prédéfinis de géométrie, de structure, de texture et de contraste visuel.

Bien que la reproductibilité inter observateur n'ait pas été quantifiée formellement dans le cadre de ce mémoire, l'établissement de critères explicites et leur application uniforme à l'ensemble des secteurs visent à limiter la variabilité interprétative et à assurer la cohérence interne de la cartographie. Les formes morphologiques majeures devraient ainsi être reconnues de manière comparable par différents observateurs, tandis que des écarts peuvent subsister dans la délimitation précise des contours ou dans le classement des formes de transition. Une validation inter observateur fondée sur des mesures d'accord constitue donc une étape pertinente pour évaluer quantitativement la reproductibilité de la méthode.

Cette démarche permet néanmoins de préserver la localisation spatiale des formes, de distinguer leur signification géomécanique apparente et de comparer leur distribution entre les différents secteurs de la carrière. Les classes morphologiques sont ensuite regroupées selon trois fonctions principales : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Cette organisation permet de passer d'une cartographie détaillée des formes à une lecture synthétique de leur rôle apparent dans l'état du massif rocheux.

L'originalité de cette recherche réside ainsi dans l'intégration de quatre niveaux d'analyse complémentaires. Le premier niveau est morphologique : il consiste à identifier et classer les formes visibles sur les parois rocheuses. Le deuxième niveau est spatial : il concerne la localisation et l'organisation des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans les modèles tridimensionnels. Le troisième niveau est structural et cinématique : il relie, lorsque possible, les formes cartographiées aux familles de discontinuités et aux mécanismes géométriquement admissibles. Le quatrième niveau est comparatif et opérationnel : il mobilise le jeu de données construit afin d'examiner les signatures morphologiques et fonctionnelles associées aux plateformes de déversement ponctuelles, à la plateforme de déversement étendue et aux secteurs sans déversement direct.

Cette démarche ne cherche pas à démontrer une relation causale directe entre les opérations de déversement et les formes d'instabilité apparente observées. Les parois de la carrière Francon résultent d'une interaction complexe entre la stratification, les joints, les contacts lithologiques,

l'altération, l'eau, les cycles climatiques, l'héritage de l'excavation et les usages actuels du site. La comparaison entre contextes opérationnels vise donc à caractériser des signatures apparentes et non à attribuer chaque forme observée à une cause unique. Cette prudence méthodologique est essentielle pour maintenir une distinction claire entre observation morphologique, interprétation géomécanique et évaluation du risque.

L'objectif général de cette mémoire est de développer une approche méthodologique fondée sur les modèles LiDAR et photogrammétriques afin de cartographier, interpréter et comparer les éléments d'instabilité apparente observables sur les parois rocheuses de la carrière Francon, en tenant compte de leur contexte structural, morphologique et opérationnel. Cette approche vise à établir un référentiel spatialement explicite permettant de relier les données 3D, les mécanismes cinématiquement admissibles et les formes morphologiques visibles, puis à mobiliser ce référentiel pour construire une lecture comparative des signatures morphologiques et fonctionnelles associées aux différents contextes opérationnels de la carrière.

La contribution attendue de cette recherche est double. Sur le plan méthodologique, elle propose une démarche intégrée permettant de passer d'un modèle 3D brut à un inventaire structuré d'éléments d'instabilité apparente cartographiés. Sur le plan appliqué, elle fournit un cadre d'interprétation adapté aux anciennes carrières urbaines réaménagées, où les parois rocheuses doivent être analysées en tenant compte à la fois de leur structure géologique, de leur état morphologique et de leur contexte opérationnel.

Dans le cas spécifique de la carrière Francon, cette démarche permet notamment de documenter la présence de formes morphologiques contrastées, telles que la stratification fracturée, les zones de joints verticaux persistants, les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, les contacts intrusifs, les surplombs, les cicatrices en coin et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Elle permet également de mettre en évidence des signatures distinctes entre les secteurs associés aux plateformes de déversement ponctuelles, à la plateforme de déversement étendue et aux portions de paroi sans déversement direct.

Les observations réalisées montrent ainsi que l'instabilité apparente à Francon ne s'exprime pas selon une seule forme dominante, mais résulte de l'interaction entre l'architecture structurale du massif, l'altération des surfaces, la circulation locale de l'eau et les conditions opérationnelles propres au site. Cette démarche peut ainsi contribuer à une meilleure compréhension des conditions susceptibles de favoriser les instabilités dans les sites de dépôt de neige et de matériaux granulaires en fosse, tout en maintenant la distinction nécessaire entre observation, interprétation et décision géotechnique.

CHAPITRE 1

PORTÉE ET OBJECTIFS

1.1 Contexte du partenariat et programme de recherche

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche collaboratif entre l'École de technologie supérieure (ÉTS) et la Ville de Montréal, consacré à l'étude de la durabilité et de l'évolution des parois rocheuses dans les infrastructures de dépôt en milieu urbain. Ce programme s'intéresse particulièrement à la carrière Francon, réaménagée pour l'entreposage de neige, de déblais ou de matériaux granulaires, où les parois rocheuses demeurent exposées à des conditions géomécaniques, hydriques, climatiques et opérationnelles complexes.

Dans ce type d'environnement, les parois excavées ne peuvent pas être interprétées uniquement comme des fronts rocheux excavés de manière conventionnelle. Elles constituent des systèmes géotechniques actifs, dont l'évolution peut être influencée par la structure du massif rocheux, l'orientation des discontinuités, la géométrie des fronts, les conditions de drainage, les cycles de gel-dégel, l'altération des surfaces et les usages opérationnels actuels. La compréhension de ces interactions est essentielle pour appuyer la gestion durable des sites municipaux de dépôt et pour mieux documenter les formes de dégradation ou d'instabilité apparente pouvant se développer sur les parois.

La carrière Francon constitue le site d'étude principal de cette recherche. Située dans le quartier Saint-Michel à Montréal, cette ancienne carrière de calcaire est aujourd'hui utilisée comme dépôt à neige municipal. Elle présente des parois abruptes, une organisation en paliers, une géométrie complexe, des discontinuités persistantes, des zones fracturées, des conditions hydriques variables et une exposition saisonnière aux opérations de déversement de neige. Ces caractéristiques en font un site particulièrement pertinent pour étudier l'évolution morphologique des parois rocheuses dans un contexte urbain réaménagé.

L'intérêt scientifique de la carrière Francon réside dans la superposition de plusieurs facteurs de contrôle. D'une part, le massif rocheux est structuré par une stratification calcaire subhorizontale, des familles de joints subverticaux et des contacts lithologiques pouvant influencer la segmentation des parois, la circulation de l'eau et l'altération différentielle. D'autre part, l'usage actuel du site comme dépôt à neige introduit des conditions opérationnelles saisonnières liées aux accumulations de neige usée, aux eaux de fonte, aux sels de déglacage, aux matériaux abrasifs et aux cycles de saturation, de gel et de dégel. Ces facteurs ne sont pas considérés dans ce mémoire comme des causes uniques ou directes d'instabilité, mais comme des éléments de contexte susceptibles de moduler l'expression morphologique des formes observées sur les parois.

Le programme de recherche vise plus largement à améliorer la compréhension des mécanismes de détérioration des parois rocheuses dans les fosses de dépôt urbaines et à appuyer le développement de stratégies de conception, de surveillance et de gestion mieux adaptées à ces environnements. Il s'intéresse notamment à la caractérisation topographique des parois, à l'analyse de leur évolution spatiotemporelle, à l'influence des facteurs géomécaniques et opérationnels, ainsi qu'au développement d'outils d'aide à la décision pour la gestion municipale des sites de dépôt de neige et de matériaux granulaires.

Dans ce cadre, les travaux présentés dans ce mémoire portent plus spécifiquement sur l'exploitation de modèles tridimensionnels de la carrière Francon afin de documenter, cartographier et interpréter les formes morphologiques associées à l'instabilité apparente des parois rocheuses. La démarche repose sur des données LiDAR acquises par UAV, des données photogrammétriques, des images RGB et des observations de terrain. Ces données sont utilisées pour produire des modèles 3D, appuyer la cartographie structurale virtuelle, réaliser une analyse cinématique directionnelle et construire un inventaire spatial d'éléments d'instabilité apparente cartographiés.

Ce mémoire constitue ainsi un volet spécifique du programme de recherche global. Il ne vise pas à établir, à lui seul, un modèle complet de conception des ouvrages de déversement, une

analyse probabiliste de l'aléa ou une quantification absolue du risque. Il propose plutôt une base méthodologique permettant de relier les formes visibles sur les modèles 3D au contexte structural, morphologique et opérationnel de la carrière. Cette contribution permet de construire une lecture comparative du géorisque apparent et de préparer des analyses futures portant sur l'évolution des parois, la surveillance des sites de dépôt et l'amélioration des pratiques de gestion en milieu urbain.

1.2 Énoncé du problème

Les parois rocheuses des anciennes carrières constituent des systèmes géotechniques complexes dont l'évolution peut se poursuivre longtemps après l'arrêt des activités d'extraction. Leur état morphologique et structural peut être affecté par une combinaison de facteurs naturels et anthropiques, incluant la lithologie, la stratification, les familles de discontinuités, la géométrie des fronts rocheux, la présence d'eau, l'altération des surfaces, les cycles de gel-dégel et les usages opérationnels du site. Dans les massifs rocheux fracturés, l'orientation, la persistance, l'espacement, l'ouverture, la rugosité et l'état d'altération des discontinuités exercent un contrôle majeur sur la segmentation du massif, la formation de blocs et les mécanismes d'instabilité potentiels (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). À ces contrôles structuraux s'ajoutent les effets de l'eau et des cycles thermiques, qui peuvent favoriser l'ouverture progressive des fractures, l'altération des plans de faiblesse et la détérioration des surfaces exposées (Matsuoka, 2008; Matsuoka & Murton, 2008).

Cette évolution ne se manifeste pas nécessairement par des ruptures soudaines, spectaculaires ou clairement identifiables. Dans de nombreux cas, elle s'exprime d'abord par des formes morphologiques localisées ou diffuses : surfaces altérées, joints ouverts, zones de stratification fracturée, blocs partiellement individualisés, zones d'influence par suintement, renforcements liés à l'érosion différentielle, surplombs ou cicatrices de détachement. Ces formes ne possèdent pas toutes la même signification géomécanique. Certaines peuvent correspondre à des indices de libération passée de matériau, d'autres traduisent une prédisposition structurale du massif,

tandis que d'autres renseignent davantage sur des processus de dégradation progressive associés à l'eau, à l'altération ou à la perte locale de support.

Dans les carrières urbaines réaménagées, l'interprétation de ces formes devient encore plus délicate, car les processus naturels peuvent être modulés par les usages actuels du site. À la carrière Francon, l'utilisation de la fosse comme dépôt à neige municipal introduit des conditions saisonnières particulières liées au déversement de neige usée, aux accumulations temporaires, aux eaux de fonte, aux sels de déglacage, aux matériaux abrasifs et aux cycles répétés de saturation, de gel et de dégel. Ces facteurs peuvent modifier localement les conditions d'humidité, de drainage et d'altération des parois. Ils ne permettent toutefois pas, à eux seuls, d'attribuer une forme d'instabilité à une cause opérationnelle directe. Ils doivent plutôt être considérés comme des conditions de contexte pouvant influencer ou moduler l'expression morphologique de la dégradation apparente des parois.

Les approches classiques d'évaluation des parois rocheuses fournissent une base essentielle pour comprendre les mécanismes d'instabilité potentiels. Les inspections de terrain, les levés structuraux, les classifications géomécaniques, l'analyse cinématique et les systèmes de cotation permettent d'identifier les discontinuités défavorablement orientées, de caractériser la qualité du massif et d'évaluer la faisabilité géométrique de mécanismes tels que le glissement planaire, le glissement en coin ou le basculement (Goodman, 1991; Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Toutefois, ces approches présentent certaines limites lorsqu'il s'agit de documenter finement la distribution spatiale des formes observables sur des parois étendues, abruptes ou difficiles d'accès. Elles peuvent conduire à une lecture globale de la paroi, alors que les indices morphologiques d'instabilité apparente sont souvent localisés, discontinus, variables d'un secteur à l'autre et associés à des processus différents.

Les modèles tridimensionnels issus du LiDAR et de la photogrammétrie permettent de pallier partiellement les limites des méthodes conventionnelles. Ils permettent de représenter la géométrie des fronts rocheux, d'observer des secteurs difficilement accessibles, d'extraire des

informations structurales et de cartographier les formes visibles sur les parois (Sturzenegger & Stead, 2009 ; Jaboyedoff et al., 2012 ; Riquelme et al., 2014).

Malgré ces avantages, les modèles LiDAR présentent certaines limites liées à leur résolution spatiale et à leur précision géométrique. La capacité à détecter et à caractériser une forme dépend notamment de la densité et de l'espacement des points, de la distance d'acquisition, de l'angle d'incidence du faisceau, de la rugosité des surfaces ainsi que de la présence d'occlusions. La précision géométrique dépend également des performances instrumentales, de la qualité du géoréférencement et des erreurs résiduelles associées au recalage des différentes acquisitions. Par conséquent, les discontinuités fines, les surfaces masquées et les formes dont les dimensions sont proches de la résolution effective du nuage de points peuvent être insuffisamment représentées ou ne pas être détectées. L'interprétation doit donc être limitée aux caractéristiques effectivement observables compte tenu de l'échelle et de la qualité du modèle utilisé (Sturzenegger & Stead, 2009 ; Jaboyedoff et al., 2012 ; Westoby et al., 2012).

En outre, la disponibilité d'un modèle 3D ne suffit pas, à elle seule, à produire une interprétation géotechnique complète. Les formes observées doivent être identifiées, délimitées, classées et interprétées selon leur signification géotechnique potentielle, tout en conservant leur position spatiale ainsi que leurs relations avec le cadre structural et le contexte morphologique.

Le problème central de ce mémoire réside donc dans le manque d'une approche intégrée permettant de passer de l'observation tridimensionnelle des parois rocheuses à une interprétation structurée de leur instabilité apparente. Il existe un besoin de transformer les informations visibles dans les modèles LiDAR et photogrammétriques en un inventaire spatial d'éléments d'instabilité apparente cartographiés, puis de relier ces éléments à leur rôle géomécanique apparent, à leur contexte structural et à leur distribution dans différents contextes opérationnels. Une telle approche doit permettre de distinguer les formes associées à la libération directe de matériau, à la prédisposition structurale et à la dégradation

progressive, sans confondre ces observations avec une mesure absolue de stabilité, d'aléa ou de risque.

Dans le cas de la carrière Francon, cet enjeu est particulièrement important, car les parois sont à la fois contrôlées par une architecture géologique héritée et exposées à des conditions opérationnelles liées au dépôt de neige. L'absence d'un cadre spatialement explicite pour organiser les formes visibles limite la capacité à comparer les secteurs de paroi, à distinguer les signatures morphologiques dominantes et à évaluer leur relation avec les configurations opérationnelles du site. Ce mémoire répond à cette lacune en développant une démarche fondée sur les modèles 3D, la cartographie des éléments d'instabilité apparente, l'analyse structurale et cinématique, puis la construction d'un profil comparatif de géorisque apparent adapté à un contexte de carrière urbaine réaménagée.

1.3 Objectif de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est de développer un cadre méthodologique fondé sur l'exploitation de modèles tridimensionnels afin de documenter, cartographier, interpréter et comparer les éléments d'instabilité apparente observables sur les parois rocheuses d'une ancienne carrière urbaine réaménagée. La carrière Francon, située dans le quartier Saint-Michel à Montréal et utilisée comme dépôt à neige municipal, est retenue comme cas d'étude.

L'approche proposée vise à relier les données LiDAR acquises par UAV, les modèles photogrammétriques, les images RGB, les informations structurales, les indicateurs morphologiques visibles et les contextes opérationnels de déversement. Elle cherche ainsi à transformer les observations tridimensionnelles des parois rocheuses en un jeu de données spatialement structuré, permettant d'analyser les formes associées à la libération de matériau, à la prédisposition structurale et à la dégradation progressive des surfaces rocheuses.

Pour atteindre cet objectif général, la recherche poursuit les objectifs spécifiques suivants :

1. Définir un cadre de référence pour la cartographie topographique du site à l'étude.

2. Développer un barème de classification topographique et empirique pour la cartographie des éléments d'instabilités apparente.
3. Comparer explicitement les éléments d'instabilité cartographiés avec le potentiel cinématique de rupture.
4. Réaliser une cartographie d'instabilités topographiques du site à l'étude
5. Évaluer la corrélation entre les indicateurs d'instabilités et les contextes :
 - a. Géométrique (dimension et orientation des excavations)
 - b. Géotechniques
 - c. Opérationnels.

1.4 Portée du travail et approche méthodologique générale

Afin d'atteindre les objectifs de la recherche, une approche méthodologique intégrée a été développée pour relier les données tridimensionnelles, l'architecture structurale des parois rocheuses, les formes morphologiques visibles et l'analyse comparative du géorisque apparent. Cette démarche est appliquée à la carrière Francon, retenue comme principal cas d'étude, et repose sur l'exploitation combinée de données LiDAR acquises par UAV, de modèles photogrammétriques, d'images RGB, d'observations de terrain et de documents géotechniques disponibles.

La portée du travail est centrée sur l'observation, la cartographie, la classification, la quantification et l'interprétation des formes visibles sur les parois rocheuses. La recherche ne vise pas à réaliser une analyse complète de stabilité, un calcul de facteur de sécurité, une modélisation mécanique détaillée ou une estimation probabiliste de l'aléa et du risque. Elle propose plutôt un cadre spatialement explicite permettant de transformer les observations issues des modèles 3D en un inventaire structuré, puis en une lecture comparative du géorisque apparent. Cette orientation maintient une distinction claire entre l'observation morphologique, l'interprétation géomécanique et l'évaluation du risque au sens strict.

L'approche méthodologique générale comprend six phases principales.

La première phase concerne l'acquisition et la préparation initiale des données. Elle comprend les levés UAV-LiDAR, l'acquisition d'images RGB, l'intégration des données photogrammétriques et la production des nuages de points représentant les parois rocheuses. Ces données constituent la base géométrique des analyses réalisées dans la suite du travail.

La deuxième phase porte sur le traitement et l'organisation des modèles tridimensionnels. Elle comprend le nettoyage des nuages de points, le retrait des éléments ne représentant pas la roche en place, la sélection des modèles les plus pertinents et la subdivision spatiale du site. Un chaînage longitudinal est également établi afin de localiser les observations, les portions de paroi et les plateformes de déversement. Des normales de surface et des cartes d'orientation sont ensuite générées pour soutenir la lecture géométrique et structurale des parois.

La troisième phase concerne la caractérisation structurale et l'analyse cinématique. Les surfaces planes identifiées dans les modèles 3D sont utilisées pour extraire les orientations de la stratification et des principales familles de discontinuités. Ces orientations sont comparées à celles des parois afin d'évaluer la compatibilité géométrique de mécanismes potentiels tels que le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement. Cette étape fournit un cadre cinématique de référence, sans constituer à elle seule une analyse de stabilité.

La quatrième phase est consacrée à la cartographie morphologique des éléments d'instabilité apparente. Les formes visibles sont identifiées et délimitées dans les modèles 3D, puis réparties en neuf classes : la stratification fracturée, les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage, les zones de joints verticaux persistants, les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, les cicatrices en coin, les contacts intrusifs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Cette classification permet de conserver la localisation et la géométrie des observations tout en structurant l'inventaire selon leur expression morphologique dominante.

La cinquième phase consiste à regrouper les neuf classes morphologiques selon trois fonctions géomécaniques apparentes dominantes : la libération directe de matériau, la prédisposition

structurale et la dégradation progressive. Ces fonctions ne sont pas nécessairement mutuellement exclusives sur le plan des mécanismes, puisqu'une même forme peut intervenir dans plusieurs processus ou traduire différents stades d'évolution de la paroi. Le regroupement repose donc sur la fonction jugée prédominante au regard de l'expression morphologique, du contexte structural et de la signification géomécanique apparente de chaque classe. Afin d'assurer l'uniformité de la quantification et d'éviter un double comptage, chaque classe est néanmoins rattachée à un seul groupe fonctionnel principal. Les classes et les groupes ainsi définis sont ensuite quantifiés à partir du nombre de points classifiés et comparés au moyen de proportions normalisées. Cette quantification décrit la composition relative de l'inventaire, sans constituer une mesure surfacique exacte ni un indicateur direct de stabilité ou de danger.

La sixième phase mobilise l'inventaire ainsi construit afin d'établir des profils comparatifs de géorisque apparent selon les contextes opérationnels de la carrière. Les distributions des classes morphologiques et des groupes fonctionnels sont comparées entre les plateformes de déversement ponctuelles, la plateforme de déversement étendue et les secteurs sans déversement direct. Cette analyse permet d'identifier les signatures dominantes associées aux différentes configurations opérationnelles, tout en tenant compte de la géométrie des parois, du cadre structural et des conditions hydriques. Elle demeure comparative et observationnelle et ne permet pas, à elle seule, de démontrer une relation causale entre les activités de déversement et les formes observées.

L'ensemble de ces phases constitue un cadre méthodologique continu permettant de passer de l'acquisition des données tridimensionnelles à la caractérisation structurale, à la construction d'un inventaire morphologique spatialement explicite, puis à l'élaboration de profils comparatifs de géorisque apparent. Cette démarche constitue le fil conducteur du mémoire et soutient l'interprétation des conditions observées sur les parois rocheuses de la carrière Francon.

1.5 Structure du mémoire

La structure de ce mémoire suit la démarche méthodologique générale présentée à la section 1.4. Les chapitres sont organisés de manière progressive afin d'introduire le cadre scientifique de la recherche, le contexte du site d'étude, les outils méthodologiques mobilisés, la construction du jeu de données d'instabilité apparente et son utilisation pour l'analyse comparative du géorisque apparent. Le cœur de la recherche est développé aux chapitres 5 et 6, qui portent respectivement sur la cartographie structurale et morphologique des éléments d'instabilité apparente, puis sur leur mobilisation dans une lecture comparative fondée sur les contextes opérationnels de la carrière Francon.

Le chapitre 2 présente la revue de la littérature. Il expose les fondements géomécaniques nécessaires à l'étude des parois rocheuses, notamment les propriétés de la roche intacte, des discontinuités et des massifs rocheux. Il décrit les principaux mécanismes de rupture structurale, soit le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement, ainsi que les principes et les limites de l'analyse cinématique. Le chapitre examine également l'apport du LiDAR, de la photogrammétrie et des modèles tridimensionnels à la caractérisation des parois, à la cartographie structurale virtuelle et à l'interprétation des formes morphologiques visibles. Enfin, il présente les principaux systèmes de classification et de cotation existants, puis précise le positionnement conceptuel du géorisque apparent retenu dans cette recherche.

Le chapitre 3 présente le site d'étude, soit la carrière Francon située dans le quartier Saint-Michel à Montréal. Il décrit la localisation du site, sa morphologie générale, son organisation en paliers, son historique d'exploitation et sa conversion en dépôt à neige municipal. Il présente également le contexte géologique régional et local, la lithostratigraphie, les intrusions magmatiques, les principaux éléments structuraux et les conditions hydroclimatiques et opérationnelles associées au dépôt de neige. Ce chapitre permet de replacer les observations morphologiques dans leur contexte géologique, structural, urbain et opérationnel.

Le chapitre 4 présente les données, les outils et les méthodes utilisés pour l'acquisition, la préparation et le traitement des modèles tridimensionnels. Il décrit les levés UAV-LiDAR et photogrammétriques, la génération et l'organisation des nuages de points ainsi que la mise en place du chaînage longitudinal. Le nettoyage des données combine un préfiltrage de la végétation par CANUPO et une segmentation manuelle des éléments résiduels ou non pertinents. Le calcul des normales de surface et la production des cartes d'orientation établissent la base géométrique nécessaire aux analyses structurales, cinématiques, morphologiques et spatiales développées dans la suite du mémoire.

Le chapitre 5 porte sur la caractérisation structurale et cinématique des parois rocheuses. Il présente l'extraction des orientations à partir des modèles tridimensionnels, l'identification de la stratification et des principales familles de discontinuités, ainsi que leur distribution spatiale. Les orientations structurales sont ensuite comparées à celles des parois afin d'évaluer la compatibilité géométrique des mécanismes potentiels de glissement planaire, de glissement en coin et de basculement. Ce chapitre établit le cadre géométrique et cinématique utilisé pour interpréter les formes morphologiques cartographiées dans le chapitre suivant.

Le chapitre 6 est consacré à la construction et à l'analyse de l'inventaire tridimensionnel des éléments d'instabilité apparente. Il présente les critères d'identification, de délimitation, de classification et de validation des formes visibles dans les modèles LiDAR et photogrammétriques. Les observations sont réparties en neuf classes morphologiques, puis regroupées selon trois fonctions géomécaniques apparentes : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Le chapitre expose également la méthode de quantification fondée sur les points classifiés et présente les distributions morphologiques, fonctionnelles, structurales et cinématiques observées sur les différentes portions de la carrière.

Le chapitre 7 mobilise l'inventaire construit au chapitre 6 afin de développer une lecture comparative du géorisque apparent. Il définit d'abord la portée de cet indicateur descriptif, sans l'assimiler à une analyse complète de stabilité, d'aléa ou de risque. Il présente ensuite les trois

contextes opérationnels étudiés : les plateformes de déversement ponctuelles, la plateforme de déversement étendue et les secteurs sans déversement direct. Le croisement entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les unités opérationnelles permet de comparer les distributions des classes morphologiques et des groupes fonctionnels, puis d'établir des profils comparatifs de géorisque apparent. Le chapitre examine enfin les implications de ces profils pour la caractérisation, le suivi et la gestion des zones de déversement.

Le chapitre 8 présente la discussion générale des résultats. Il met en relation les observations structurales, cinématiques, morphologiques et opérationnelles afin d'interpréter les principaux contrastes observés dans la carrière Francon. Il discute les apports scientifiques et méthodologiques de la démarche, sa portée pour l'étude des parois rocheuses dans les carrières urbaines réaménagées, ainsi que les incertitudes et les limites associées aux données, à la cartographie et à la quantification. Il replace également les résultats dans une perspective plus large liée à la conception et à la gestion des sites de stockage de neige et de matériaux granulaires.

Le chapitre 9 présente les conclusions générales du mémoire. Il synthétise les principaux résultats, rappelle les contributions scientifiques et méthodologiques de la recherche, précise les limites de l'approche et formule des recommandations pour les travaux futurs. Il souligne finalement l'intérêt des modèles LiDAR 3D, de la caractérisation morpho-structurale et des profils comparatifs de géorisque apparent pour l'étude et le suivi des parois rocheuses dans les anciennes carrières urbaines réaménagées

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Préambule

Les instabilités rocheuses en parois de carrière constituent un enjeu important en géotechnique, particulièrement lorsque d'anciennes excavations sont réutilisées dans des contextes urbains ou opérationnels complexes. Les parois rocheuses exposées sont généralement contrôlées par la structure du massif, l'orientation des discontinuités, la géométrie des fronts, les conditions hydriques et les processus d'altération qui agissent sur les surfaces au fil du temps (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Ces facteurs conditionnent la prédisposition du massif à différents mécanismes d'instabilité, tels que le glissement planaire, le glissement en coin, le basculement ou la chute de blocs.

Dans les environnements froids et urbanisés, ces processus peuvent être modulés par des facteurs hydroclimatiques et opérationnels. Les cycles de gel-dégel, la circulation de l'eau dans les discontinuités et l'exposition aux eaux de fonte peuvent favoriser la dégradation progressive des surfaces rocheuses et l'ouverture de certaines fractures (Matsuoka, 2008; Matsuoka & Murton, 2008). Dans les sites utilisés pour le dépôt de neige urbaine, les eaux de fonte peuvent également transporter des chlorures, des particules fines et des matériaux abrasifs, susceptibles de modifier localement les conditions d'humidité et d'altération des parois (Borris et al., 2021; Reinosdotter & Viklander, 2007; Viklander, 1999). Ces facteurs ne constituent pas nécessairement des causes directes d'instabilité, mais ils peuvent influencer l'expression morphologique de la dégradation apparente des parois.

L'évaluation des instabilités rocheuses repose traditionnellement sur la caractérisation géologique et structurale du massif, l'identification des familles de discontinuités et l'analyse cinématique des mécanismes de rupture potentiels. Ces approches permettent d'évaluer la faisabilité géométrique de mécanismes tels que le glissement planaire, le glissement en coin et

le basculement (Goodman, 1991; Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Toutefois, l'analyse cinématique demeure principalement géométrique. Elle permet d'identifier des mécanismes possibles, mais elle ne décrit pas toujours la manière dont ces mécanismes s'expriment réellement à la surface des parois, ni le rôle de facteurs tels que la persistance réelle des discontinuités, leur ouverture, leur rugosité, leur degré d'altération ou les conditions d'eau (Eberhardt, 2003; Jaboyedoff et al., 2012).

Le développement des technologies LiDAR, de la photogrammétrie et des modèles tridimensionnels à haute résolution a transformé les méthodes de caractérisation des parois rocheuses. Ces outils permettent de documenter la géométrie des fronts, d'extraire des discontinuités, de cartographier les surfaces structurales et d'observer des formes morphologiques difficiles à caractériser uniquement par des levés de terrain classiques (Jaboyedoff et al., 2012; M. J. Lato & Vöge, 2012; Sturzenegger & Stead, 2009). Les modèles 3D offrent ainsi un support pertinent pour relier les structures observées, les mécanismes cinématiquement admissibles et les indicateurs morphologiques visibles sur les parois.

Ce chapitre présente le cadre scientifique nécessaire au développement de cette approche. Il aborde d'abord les fondements géomécaniques des instabilités en parois rocheuses, en mettant l'accent sur les propriétés des discontinuités, des massifs rocheux et les principaux mécanismes de rupture. Il présente ensuite les principes de l'analyse structurale et cinématique, ainsi que leurs limites. Le chapitre examine ensuite l'apport de la télédétection, du LiDAR, de la photogrammétrie et des modèles 3D pour la cartographie structurale virtuelle et l'interprétation morphologique des parois rocheuses. Enfin, il discute les systèmes de cotation des talus rocheux et positionne la notion de géorisque apparent comme une évaluation comparative fondée sur les formes visibles, sans prétendre remplacer une analyse complète de l'aléa ou du risque.

Cette revue permet ainsi d'identifier les principales lacunes auxquelles répond le mémoire, notamment le manque d'intégration entre analyse cinématique, cartographie morphologique 3D, contexte opérationnel et cotation comparative du géorisque apparent. Elle fournit la base

conceptuelle nécessaire pour interpréter les observations réalisées à partir des modèles LiDAR et photogrammétriques de la carrière Francon.

2.2 Fondements géomécaniques des instabilités en parois rocheuses

L'analyse des instabilités en parois rocheuses nécessite de distinguer trois niveaux complémentaires : la roche intacte, les discontinuités et le massif rocheux. La roche intacte correspond au matériau rocheux non fracturé à l'échelle de l'échantillon. Les discontinuités correspondent aux plans de faiblesse qui interrompent la continuité du matériau, tels que les joints, les plans de stratification, les failles ou les contacts lithologiques. Le massif rocheux représente l'ensemble formé par la roche intacte et le réseau de discontinuités qui le traverse. Cette distinction est essentielle, car le comportement d'une paroi rocheuse dépend rarement de la seule résistance de la roche intacte. Dans les massifs fracturés, les mécanismes d'instabilité sont généralement contrôlés par l'orientation, la persistance, l'espacement, l'ouverture, la rugosité et l'état d'altération des discontinuités (Hoek & Bray, 1981; Priest, 1993; Wyllie & Mah, 2004).

Dans le contexte des parois de carrière, les instabilités se développent souvent à partir de surfaces de faiblesse préexistantes. Les propriétés géomécaniques doivent donc être interprétées à une échelle compatible avec les mécanismes étudiés. Les propriétés de la roche intacte permettent de comprendre la résistance du matériau de base et sa sensibilité à l'altération. Les propriétés des discontinuités contrôlent la résistance au cisaillement, la segmentation et la liberté cinématique des blocs. Les propriétés du massif rocheux permettent enfin d'évaluer le comportement global de la paroi en tenant compte de la combinaison entre matériau rocheux, structures et conditions d'exposition.

2.2.1 Propriétés des roches intactes

La roche intacte correspond au matériau rocheux considéré à l'échelle de l'échantillon, en l'absence de discontinuités macroscopiques visibles. Ses propriétés mécaniques permettent de caractériser la résistance et la déformabilité intrinsèques du matériau rocheux avant l'influence

du réseau de fractures. Elles constituent donc une base importante en mécanique des roches, même si le comportement des parois rocheuses naturelles ou excavées dépend généralement davantage de l'état du massif rocheux et des discontinuités que de la roche intacte seule (Hoek & Bray, 1981; Jaeger et al., 2007; Wyllie & Mah, 2004).

Les principales propriétés de la roche intacte comprennent la résistance en compression uniaxiale, la résistance en traction, les paramètres élastiques et la résistance sous confinement. Ces paramètres sont généralement déterminés en laboratoire sur des carottes ou des éprouvettes préparées selon des procédures normalisées. Les méthodes proposées par l'ISRM et les standards ASTM permettent notamment de caractériser la résistance en compression, les modules élastiques et la résistance en traction indirecte des échantillons de roche intacte (ISRM, 1978 ; ASTM International, 2023a, 2023b).

La résistance en compression uniaxiale, souvent désignée par UCS ou σ_{ci} (MPa), constitue l'un des paramètres les plus utilisés pour décrire la résistance de la roche intacte. Elle correspond à la contrainte axiale maximale qu'un échantillon peut supporter en compression simple, sans confinement latéral, avant la rupture. Ce paramètre est utilisé pour comparer les lithologies, classer la résistance du matériau rocheux et alimenter certains critères empiriques de rupture, notamment le critère de Hoek-Brown (Hoek & Brown, 1980; Hoek et al., 2002). La classification proposée par Brown (1981) présentée au Tableau 2.1, illustre l'utilisation de l'UCS comme indicateur de résistance de la roche intacte.

Tableau 2.1 Classification des roches selon la résistance à la compression uniaxiale

Tiré de Brown (1981)

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled using a pocketknife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocketknife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocketknife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

* Grade according to Brown (1981).
 ** Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

La résistance en traction est généralement nettement plus faible que la résistance en compression. Elle traduit la capacité du matériau rocheux à résister à l'ouverture et à la propagation des fissures. Cette propriété est importante pour comprendre les processus de fracturation, de fragmentation et de dégradation progressive des surfaces rocheuses exposées (Jaeger et al., 2007). En pratique, la résistance en traction est souvent estimée par des essais indirects, notamment l'essai brésilien, qui consiste à soumettre un disque de roche à une compression diamétrale afin d'induire une rupture par traction indirecte (ISRM, 1978 ; ASTM International, 2023a, 2023b).

Les paramètres élastiques, tels que le module de Young et le coefficient de Poisson, décrivent la réponse déformationnelle de la roche intacte sous chargement avant que l'endommagement ne se manifeste (i.e. avant le comportement plastique). Ils sont principalement utilisés dans les analyses mécaniques détaillées et les modélisations numériques, où ils permettent de représenter la rigidité et la déformabilité du matériau rocheux (Hudson & Cosgrove, 1997; Jaeger et al., 2007). Dans le contexte des instabilités en parois rocheuses, ces paramètres fournissent une information utile sur le comportement du matériau, mais ils ne suffisent pas à expliquer les mécanismes de rupture lorsque ceux-ci sont contrôlés par les discontinuités.

La résistance de la roche intacte peut également être étudiée sous confinement à l'aide d'essais triaxiaux. Ces essais montrent que l'augmentation de la contrainte de confinement accroît généralement la résistance à la rupture et peut modifier le mode de déformation du matériau, en le faisant évoluer d'un comportement fragile vers un comportement plus ductile (Jaeger et al., 2007). Les résultats triaxiaux sont notamment utilisés pour établir des critères de rupture tels que Mohr-Coulomb ou Hoek-Brown, qui relient la résistance du matériau aux conditions de contrainte (Hoek & Brown, 1980; Hoek et al., 2002).

Dans le cadre de ce mémoire, les propriétés des roches intactes sont considérées comme un niveau de caractérisation de base. Elles permettent de comprendre la résistance intrinsèque du matériau rocheux, mais elles ne constituent pas le principal contrôle des instabilités apparentes étudiées. En effet, dans les parois rocheuses fracturées, la stabilité est généralement dominée

par l'orientation, la persistance, l'ouverture, la rugosité et l'état d'altération des discontinuités, ainsi que par leur relation avec la géométrie des fronts rocheux (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Les sections suivantes portent donc plus spécifiquement sur les propriétés des discontinuités et sur le comportement du massif rocheux.

2.2.2 Propriétés des discontinuités

Les discontinuités désignent l'ensemble des surfaces de faiblesse qui interrompent la continuité de la roche intacte dans un massif rocheux. Elles comprennent notamment les joints, les plans de stratification, les failles, les zones de cisaillement, les fractures d'origine tectonique et certains contacts lithologiques. Dans les massifs rocheux fracturés, ces surfaces contrôlent souvent davantage le comportement mécanique de la paroi que la résistance de la roche intacte elle-même, car elles définissent les surfaces potentielles de rupture, les limites des blocs et les chemins préférentiels de circulation de l'eau (Wyllie & Mah, 2004 ; Brady & Brown, 2006).

La présence de discontinuités confère au massif rocheux un comportement hétérogène et anisotrope. Les propriétés mécaniques et hydrauliques du massif peuvent donc varier selon la direction, la densité des fractures et l'état des surfaces de discontinuité. Cette anisotropie est particulièrement importante dans l'analyse des parois rocheuses, car la relation entre l'orientation des discontinuités et la géométrie de la paroi conditionne la possibilité de mécanismes tels que le glissement planaire, le glissement en coin ou le basculement (Hoek & Bray, 1981; Goodman, 1991; Wyllie & Mah, 2004).

La description des discontinuités repose sur plusieurs paramètres géométriques et mécaniques. Les méthodes proposées par l'ISRM recommandent notamment de documenter l'orientation, l'espacement, la persistance, la rugosité, l'ouverture, le remplissage, l'altération des parois et les conditions d'eau (ISRM, 1978). Ces paramètres permettent de relier l'observation géologique à l'analyse géomécanique du massif. Dans le cadre de ce mémoire, ils sont particulièrement importants, car ils servent à interpréter les familles structurales, les zones de

joints persistants, les blocs ouverts, les surfaces altérées et les zones influencées par le suintement observées sur les modèles tridimensionnels.

L'orientation d'une discontinuité correspond à son attitude spatiale dans le massif rocheux. Elle est généralement définie par le pendage et la direction de pendage. Le pendage représente l'angle maximal d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontale, tandis que la direction de pendage correspond à l'azimut de cette inclinaison maximale, mesuré à partir du nord. En mécanique des roches, cette notation est souvent privilégiée par rapport à la notation par direction de ligne d'affleurement, car elle décrit directement le sens potentiel du mouvement le long du plan (Brady & Brown, 2006). Ces deux paramètres sont illustrés à la Figure 2.1, qui présente la relation entre le pendage et la direction de pendage d'un plan de discontinuité.

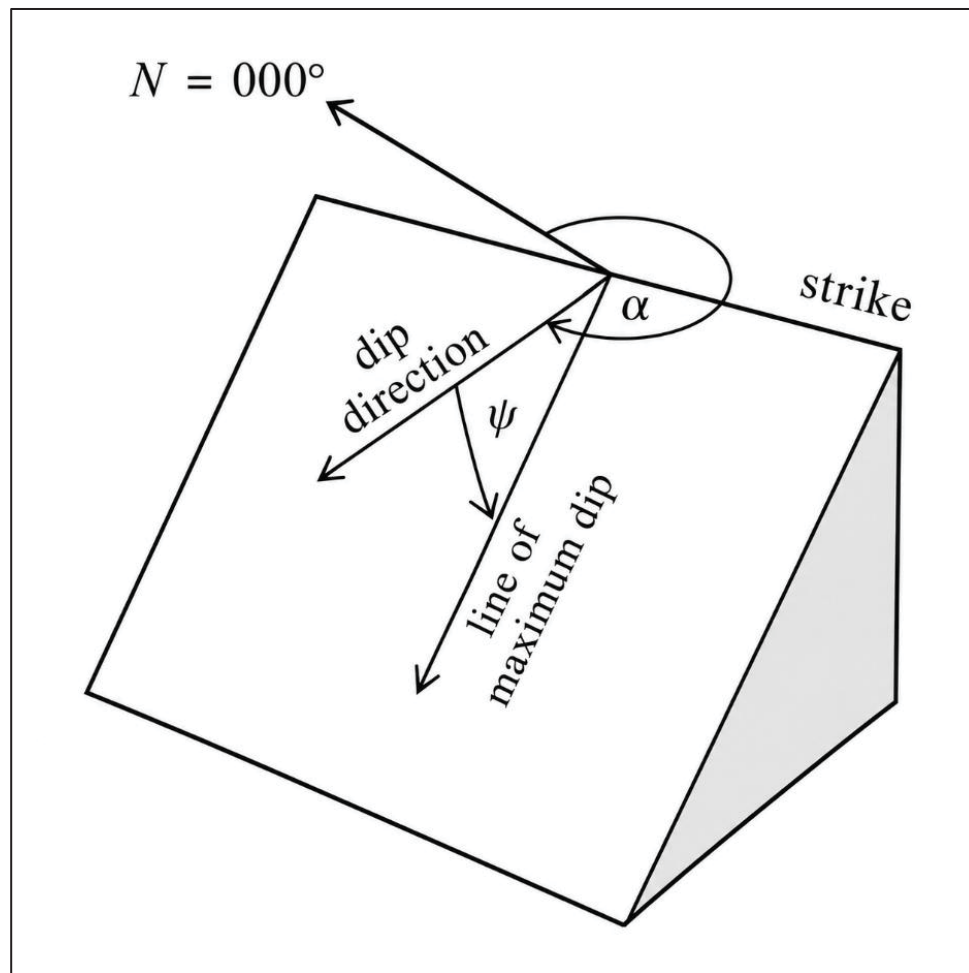


Figure 2.1 Définition de la direction de pendage et du pendage d'un plan de discontinuité

Tiré de Brady et Brown (2006)

L'orientation est le paramètre central de l'analyse cinématique, car elle permet d'évaluer si une discontinuité ou une ligne d'intersection entre deux discontinuités est géométriquement compatible avec un mécanisme de rupture. Une discontinuité plongeant vers la face libre peut favoriser un glissement planaire, alors que deux discontinuités sécantes peuvent former un coin rocheux susceptible de se déplacer le long de leur ligne d'intersection. À l'inverse, des discontinuités fortement inclinées plongeant vers l'intérieur du massif peuvent favoriser des mécanismes de basculement lorsque les blocs sont suffisamment individualisés (Hoek & Bray, 1981; Goodman, 1991; Wyllie & Mah, 2004).

L'espacement des discontinuités correspond à la distance perpendiculaire entre deux discontinuités adjacentes appartenant à une même famille. Ce paramètre influence directement la taille des blocs formés par l'intersection des familles de discontinuités. Un espacement faible favorise la formation de blocs plus petits et plus nombreux, tandis qu'un espacement plus large peut conduire à des volumes rocheux plus importants. L'espacement influence également la perméabilité du massif, son degré de fragmentation et la manière dont les instabilités peuvent s'exprimer à l'échelle de la paroi (Priest & Hudson, 1976; ISRM, 1978; Priest, 1993). La classification de l'espacement proposée par l'ISRM, présentée au Tableau 2.2, permet de classer empiriquement de manière standardisée le degré de fracturation associé à une famille de discontinuités.

Tableau 2.2 Classification de l'espacement des discontinuités selon l'ISRM

Tiré de Brady et Brown (2006), d'après ISRM (1978)

Description	Spacing (mm)
extremely close spacing	<20
very close spacing	20–60
close spacing	60–200
moderate spacing	200–600
wide spacing	600–2000
very wide spacing	2000–6000
extremely wide spacing	>6000

La persistance désigne l'extension d'une discontinuité dans son propre plan. Elle est souvent estimée à partir de la longueur de trace observable sur une paroi, un affleurement ou une carotte de forage. Ce paramètre est essentiel, car une discontinuité longue et continue peut former une surface de faiblesse plus efficace qu'une discontinuité courte et interrompue. Les discontinuités persistantes peuvent contrôler la libération de blocs, la continuité des surfaces de rupture et la possibilité d'un glissement ou d'un basculement. À l'inverse, lorsque les discontinuités sont peu persistantes, la stabilité peut dépendre de ponts rocheux qui relient encore les blocs au massif (ISRM, 1978; Priest, 1993; Wyllie & Mah, 2004). Le Tableau 2.3 présente la classification de la persistance proposée par l'ISRM, fondée sur la longueur de trace modale des discontinuités.

Tableau 2.3 Classification de la persistance des discontinuités selon l'ISRM

Tiré de Brady et Brown (2006), d'après ISRM (1978)

Description	Modal trace length (m)
very low persistence	<1
low persistence	1–3
medium persistence	3–10
high persistence	10–20
very high persistence	20

La rugosité correspond aux irrégularités et aux ondulations présentes sur les surfaces de discontinuité. Elle contrôle une partie importante de la résistance au cisaillement, car les aspérités peuvent créer un emboîtement mécanique entre les deux parois du joint. Les surfaces rugueuses, fraîches et non remplies offrent généralement une résistance plus élevée que les surfaces lisses, polies, altérées ou remplies de matériaux faibles. Le rôle de la rugosité est particulièrement important dans les mécanismes de glissement, car elle influence la mobilisation du frottement et la dilatance pendant le cisaillement (Barton, 1973; Barton & Choubey, 1977).

Le Joint Roughness Coefficient, ou *JRC*, proposé par Barton et Choubey (1977) constitue l'un des indicateurs les plus utilisés pour estimer la rugosité des joints rocheux. Il repose sur la comparaison entre le profil d'une discontinuité et des profils de référence standardisés, avec des valeurs généralement comprises entre 0 et 20. Les valeurs faibles indiquent des surfaces relativement lisses, tandis que les valeurs élevées correspondent à des surfaces fortement rugueuses. La Figure 2.2 présente les profils de référence utilisés pour l'estimation visuelle du coefficient *JRC*. Cette approche permet d'intégrer la rugosité dans l'estimation de la résistance

au cisaillement des discontinuités, notamment dans le critère empirique de Barton-Bandis (Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990).

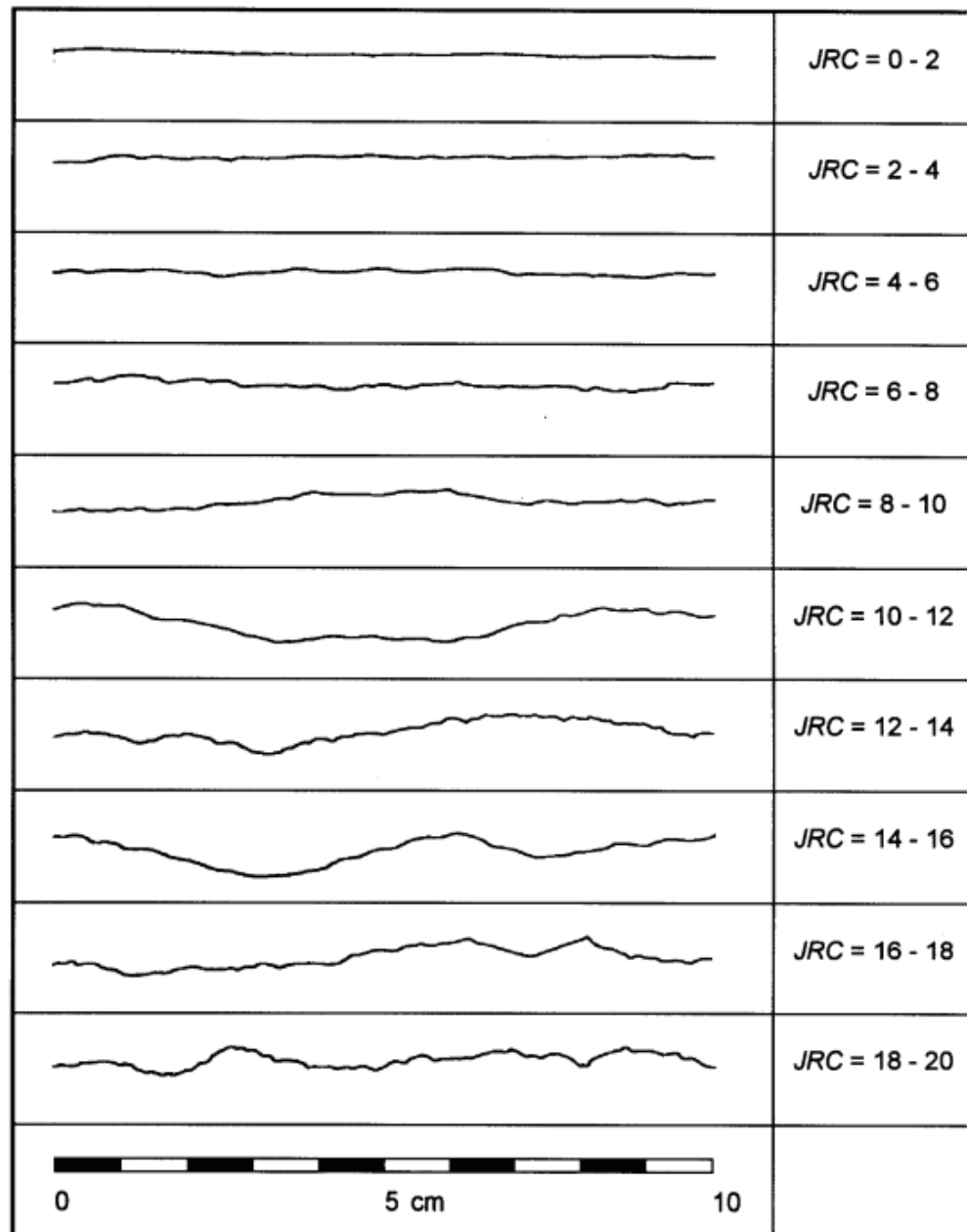


Figure 2.2 Profils de rugosité de référence et valeurs correspondantes du coefficient JRC

Tiré de Hoek (2006) d'après Barton et Choubey (1977)

La résistance au cisaillement des discontinuités constitue un paramètre essentiel pour comprendre le comportement mécanique des massifs rocheux fracturés. Les massifs rocheux sont généralement composés de différents types de discontinuités, notamment des plans de litage, des joints, des failles ou des contacts lithologiques. À faible profondeur, lorsque les contraintes de confinement demeurent relativement faibles, la rupture de la roche intacte est généralement moins probable que le glissement le long des surfaces de discontinuité, en particulier dans les roches de bonne qualité. Le comportement global du massif rocheux peut alors être gouverné par la résistance au cisaillement mobilisée le long de ces surfaces de faiblesse (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Hoek, 2006).

L'analyse de la stabilité d'un système de discontinuités nécessite donc de connaître les principaux paramètres qui contrôlent cette résistance. Ceux-ci comprennent notamment la surface de contact initiale entre les parois du joint, la rugosité des surfaces rocheuses, la rigidité et la déformabilité des aspérités, ainsi que l'épaisseur et les propriétés mécaniques du matériel de remplissage lorsqu'il est présent. D'autres facteurs, tels que la taille des blocs, les contraintes en place et les conditions d'eau, peuvent également influencer le comportement au cisaillement des discontinuités.

Dans le cas d'interfaces planaires, les essais de cisaillement réalisés en laboratoire permettent de déterminer certains paramètres fondamentaux de la résistance des joints tel qu'illustré conceptuellement à la Figure 2.3 ci-dessous. Même si les discontinuités naturelles ne sont jamais parfaitement lisses et planes, des échantillons sciés peuvent être utilisés pour estimer l'angle de friction de base φ_b . Des échantillons contenant un plan de litage cimenté peuvent également être testés lorsque la séparation des deux parties nécessite une résistance en traction initiale. Dans un essai de cisaillement direct, l'échantillon est soumis à une contrainte normale σ_n appliquée perpendiculairement au plan de discontinuité, tandis qu'une contrainte de cisaillement τ est imposée afin de provoquer un déplacement relatif δ entre les deux parties de l'échantillon (Hoek, 2006).

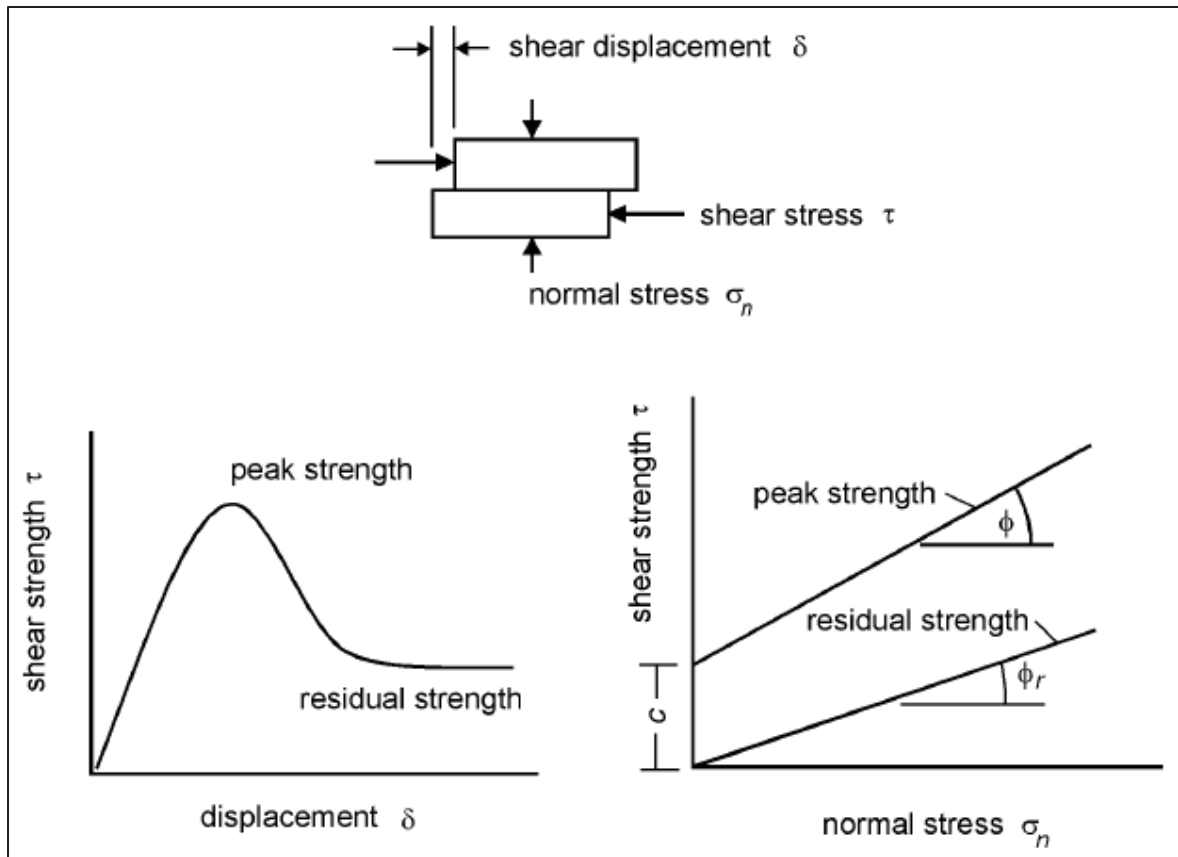


Figure 2.3 Principe de l'essai de cisaillement direct sur une discontinuité rocheuse

Tiré de Hoek (2006)

Les résultats d'un essai de cisaillement permettent généralement de distinguer une résistance au cisaillement maximale et une résistance au cisaillement résiduelle. Pour des surfaces de discontinuités planes, les valeurs obtenues pour différentes contraintes normales peuvent être représentées par une relation approximativement linéaire. La pente de l'enveloppe de résistance maximale correspond à l'angle de friction ϕ tandis que l'ordonnée à l'origine représente la cohésion c . La pente de l'enveloppe résiduelle correspond quant à elle à l'angle de friction résiduel ϕ_r . Il est toutefois important de distinguer la cohésion réelle, associée par exemple à des joints cimentés, de la cohésion apparente, qui peut résulter de la rugosité, de l'emboîtement des aspérités ou de l'irrégularité des surfaces de discontinuité (Hoek, 2006).

Dans le cas d'une discontinuité plane, la résistance au cisaillement maximale peut être décrite par le critère de Mohr-Coulomb :

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.1)$$

Où τ_p représente la résistance au cisaillement maximale, c la cohésion, σ_n la contrainte normale appliquée sur le plan de discontinuité et φ l'angle de friction. Lorsque la résistance résiduelle est considérée, la cohésion peut être négligée. La relation devient alors :

$$\tau_r = \sigma_n \tan \varphi_r \quad (2.2)$$

Où τ_r représente la résistance au cisaillement résiduelle et φ_r l'angle de friction résiduel. Ces relations montrent que l'angle de friction est un paramètre fondamental, puisqu'il traduit la capacité d'une surface de discontinuité à résister au glissement sous l'effet d'une contrainte normale.

Cependant, les joints naturels ne sont généralement pas parfaitement plans. Ils comportent des aspérités, des ondulations et des irrégularités qui influencent fortement leur comportement au cisaillement. La rugosité peut augmenter la résistance mobilisée, notamment par l'emboîtement mécanique des aspérités et par la dilatance pendant le cisaillement. Pour tenir compte de ces effets, Barton et ses collaborateurs ont proposé un critère empirique permettant d'estimer la résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses rugueuses. Ce critère, généralement désigné comme le critère de Barton-Bandis, s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = \sigma'_n \tan \left(\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) \right) \quad (2.3)$$

Où τ représente la résistance au cisaillement de la discontinuité, σ'_n la contrainte normale effective, φ_b l'angle de friction de base, JRC le coefficient de rugosité du joint (Joint Roughness Coefficient) et JCS la résistance à la compression des parois du joint (Joint Wall Compressive Strength) (Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990; Hoek, 2006). La contrainte normale effective σ'_n peut être exprimée par :

$$\sigma'_n = \sigma_n - u \quad (2.4)$$

Où σ_n représente la contrainte normale totale et u la pression interstitielle agissant dans la discontinuité. Le terme $JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right)$ représente la contribution de la rugosité et de la résistance des aspérités à la résistance au cisaillement, tandis que φ_b correspond à la composante frictionnelle de base de la surface rocheuse.

Le coefficient JRC permet d'estimer la rugosité des joints de manière visuelle, en comparant le profil d'une discontinuité à des profils de référence établis par Barton et Choubey (1977). Les petits échantillons de laboratoire peuvent être évalués de cette manière, mais la valeur du JRC doit aussi être appréciée à l'échelle réelle de la surface observée sur le terrain, puisque la rugosité peut varier avec l'échelle d'observation.

Le paramètre JCS quant à lui décrit la résistance à la compression des parois du joint. Dans une roche de bonne qualité, lorsque la surface ne présente pas de remplissage faible ou d'altération marquée, le JCS peut être proche de la résistance en compression uniaxiale de la roche intacte. Il peut également être estimé sur le terrain à l'aide du marteau de Schmidt, selon l'approche proposée par Deere et Miller (1966).

L'intérêt du critère de Barton-Bandis est de montrer que la résistance au cisaillement d'une discontinuité ne dépend pas uniquement de son orientation, mais également de l'état mécanique de ses surfaces. Une discontinuité rugueuse, fraîche et résistante peut mobiliser une résistance plus élevée qu'une discontinuité lisse, altérée, ouverte ou remplie, même si leur orientation est similaire. Dans le cadre de ce mémoire, cette distinction est importante, car les joints persistants, les blocs ouverts, les surfaces altérées et les zones influencées par le suintement ne renseignent pas seulement sur la géométrie du massif, mais aussi sur des conditions susceptibles d'influencer localement la résistance au cisaillement des discontinuités.

L'ouverture et le remplissage des discontinuités influencent également leur comportement mécanique et hydraulique. Une discontinuité ouverte peut réduire l'emboîtement entre les surfaces et faciliter la circulation de l'eau. Lorsque la discontinuité est remplie par des matériaux faibles, comme des argiles, des limons ou des produits d'altération, sa résistance au cisaillement peut diminuer fortement. À l'inverse, certains remplissages minéraux résistants, comme la calcite ou le quartz, peuvent localement renforcer la discontinuité, bien que leur comportement dépende de leur continuité, de leur épaisseur et de leur degré d'altération (ISRM., 1978; Wyllie & Mah, 2004 ; Brady & Brown, 2006).

L'état d'altération des surfaces de discontinuité constitue un autre paramètre important. L'altération peut réduire la résistance des parois de joints, modifier leur rugosité, augmenter leur porosité et favoriser la formation de matériaux de remplissage. Les processus d'altération sont souvent associés à la circulation de l'eau, aux variations thermiques, aux cycles de gel-dégel ou aux réactions chimiques affectant certains minéraux (Goodman, 1991; Matsuoka & Murton, 2008). Dans les parois rocheuses exposées, ces processus peuvent se manifester par des surfaces adoucies, des changements de couleur, des dépôts secondaires ou des zones de suintement.

Les conditions d'eau dans les discontinuités jouent enfin un rôle majeur dans l'évolution des parois rocheuses. L'eau peut réduire la résistance effective au cisaillement, favoriser l'altération, exercer des pressions dans les fractures et contribuer à l'ouverture progressive des joints (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Les zones de suintement ou d'humidité persistante observées sur les parois peuvent donc être interprétées comme des indices d'une circulation préférentielle de l'eau le long du réseau de discontinuités. Cette relation entre structure, eau et altération est importante pour l'interprétation des formes d'instabilité apparente cartographiées dans les modèles 3D.

En résumé, les discontinuités contrôlent la segmentation du massif rocheux, la formation des blocs et les mécanismes d'instabilité cinématiquement admissibles. Leur orientation définit les mécanismes possibles, leur espacement et leur persistance contrôlent la taille et la continuité

des blocs, tandis que leur rugosité, leur ouverture, leur remplissage, leur altération et leurs conditions d'eau influencent la résistance au cisaillement et l'évolution progressive du massif. Ces propriétés constituent donc une base essentielle pour comprendre les instabilités apparentes en parois rocheuses et pour interpréter les indices morphologiques tels que les joints persistants, les blocs ouverts, les surfaces altérées et les zones influencées par le suintement.

2.2.3 Propriétés des massifs rocheux

Le massif rocheux correspond à l'ensemble formé par la roche intacte et par le réseau de discontinuités qui le recoupe. Contrairement à la roche intacte, dont les propriétés peuvent être déterminées à partir d'essais de laboratoire sur des échantillons relativement homogènes, le massif rocheux constitue un milieu naturel hétérogène, anisotrope et discontinu. Son comportement mécanique dépend de la résistance de la roche intacte, de la géométrie des discontinuités, de leur état de surface, de la présence d'eau, des contraintes in situ et de l'échelle d'observation considérée (Wyllie & Mah, 2004).

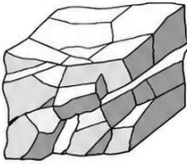
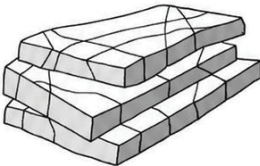
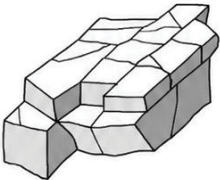
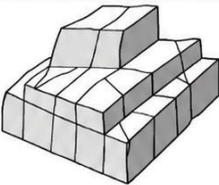
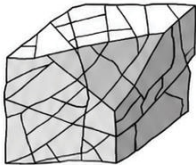
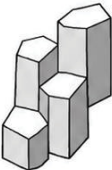
L'évaluation des propriétés d'un massif rocheux est essentielle pour l'analyse des talus, des excavations, des fondations et des ouvrages souterrains. Dans les parois rocheuses, la stabilité ne dépend pas uniquement de la résistance intrinsèque de la roche, mais aussi de la manière dont les discontinuités segmentent le massif et définissent des volumes potentiellement mobilisables. Un massif constitué d'une roche intacte résistante peut présenter une stabilité réduite si les joints sont persistants, ouverts, altérés ou défavorablement orientés par rapport à la paroi. À l'inverse, un massif plus fracturé peut conserver une meilleure stabilité locale lorsque les discontinuités sont peu persistantes, rugueuses ou orientées favorablement (Priest, 1993; Wyllie & Mah, 2004).

La géométrie des blocs constitue un premier indicateur de l'organisation interne du massif rocheux. Elle dépend principalement du nombre de familles de discontinuités, de leur orientation, de leur espacement et de leur persistance. Selon la disposition des discontinuités, les blocs peuvent être tabulaires, prismatiques, polyédriques, colonnaires ou plus irréguliers.

Cette géométrie influence directement les mécanismes potentiels de rupture, la taille des volumes susceptibles d'être mobilisés et l'expression morphologique des instabilités observables sur les parois. Les principaux types de blocs associés à différentes organisations de discontinuités sont présentés au Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Types de blocs dans les massifs rocheux en fonction de la disposition des discontinuités

Tiré de Singh et Goel (2011)

S. No.	Terms	Figure	Description
1	Polyhedral blocks		Irregular discontinuities without arrangement into distinct sets, and of small persistence
2	Tabular blocks		One dominant set of parallel discontinuities, for example, bedding planes, with other noncontinuous joints; thickness of blocks much less than length or width
3	Prismatic blocks		Two dominant sets of discontinuities, approximately orthogonal and parallel, with a third irregular set; thickness of blocks much less than length or width
4	Equidimensional blocks		Three dominant sets of discontinuities, approximately orthogonal, with occasional irregular joints, giving equidimensional blocks
5	Rhombohedral blocks		Three (or more) dominant, mutually oblique, sets of joints, giving oblique-shaped, equidimensional blocks
6	Columnar blocks		Several, usually more than three, sets of discontinuities; parallel joints usually crossed by irregular joints; length much greater than other dimensions

Le Rock Quality Designation (RQD) constitue l'un des indices les plus anciens et les plus couramment utilisés pour évaluer le degré de fracturation d'un massif rocheux à partir de carottes de forage. Introduit par Deere (1964), il est défini comme le rapport, exprimé en pourcentage, entre la longueur cumulée des fragments de carotte intacts mesurant au moins 10 cm et la longueur totale de la passe de forage considérée. La méthode de calcul du RQD est illustrée à la Figure 2.4, tandis que le Tableau 2.5 présente la classification généralement utilisée pour associer les différentes plages de valeurs du RQD à la qualité globale du massif rocheux.

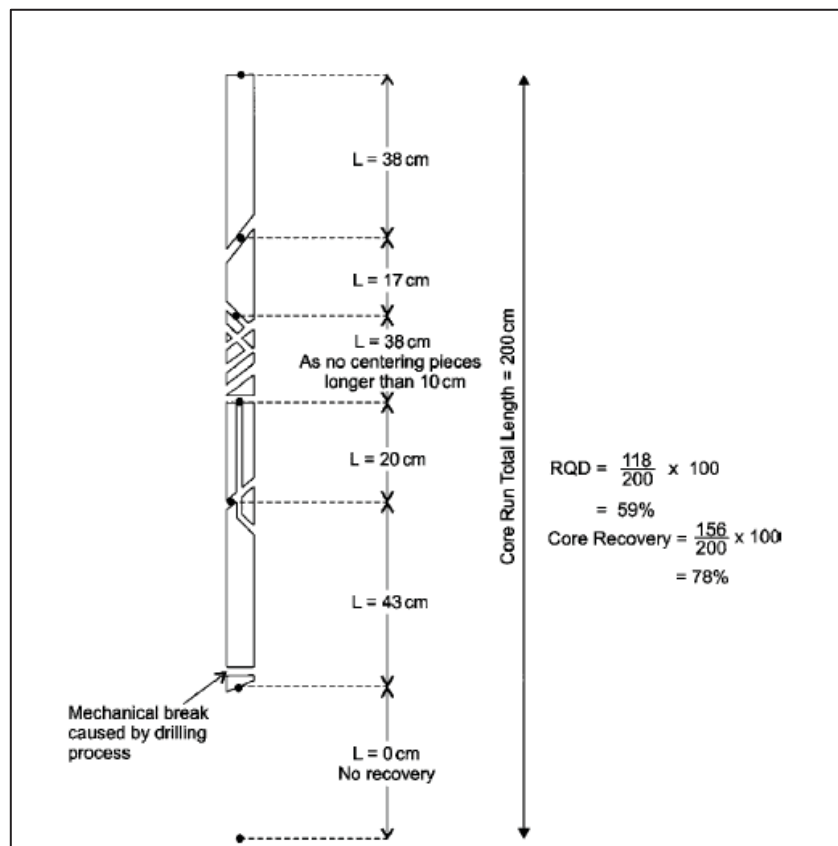


Figure 2.4 Procédure de mesure et de calcul du Rock Quality Designation à partir des carottes de forage

Tiré de Singh et Goel (2011)

Tableau 2.5 Corrélation entre le RQD et la qualité du massif rocheux

Tiré de Singh et Goel (2011)

S. No.	RQD (%)	Rock quality
1	<25	Very poor
2	25–50	Poor
3	50–75	Fair
4	75–90	Good
5	90–100	Excellent

Malgré son utilisation répandue, le RQD présente plusieurs limites. Il dépend de l'orientation du forage, de la qualité de récupération des carottes et de la distinction entre fractures naturelles et fractures induites par le forage. Il ne décrit pas directement l'orientation des discontinuités, leur rugosité, leur ouverture, leur remplissage ou leur relation avec la géométrie d'une paroi rocheuse. Il constitue donc un indicateur utile de fracturation, mais il doit être complété par une description structurale plus détaillée du massif (Deere & Deere, 1989; Priest, 1993).

Afin d'estimer la résistance globale des massifs rocheux fracturés, Hoek et Brown ont proposé un critère empirique reliant la résistance de la roche intact (Hoek & Bray, 1981). Le critère de Hoek-Brown est largement utilisé en mécanique des roches, car il permet de représenter une enveloppe de rupture non linéaire mieux adaptée au comportement des roches et des massifs rocheux que les critères linéaires simples. La relation entre les contraintes principales majeure et mineure selon ce critère est illustrée à la Figure 2.5.

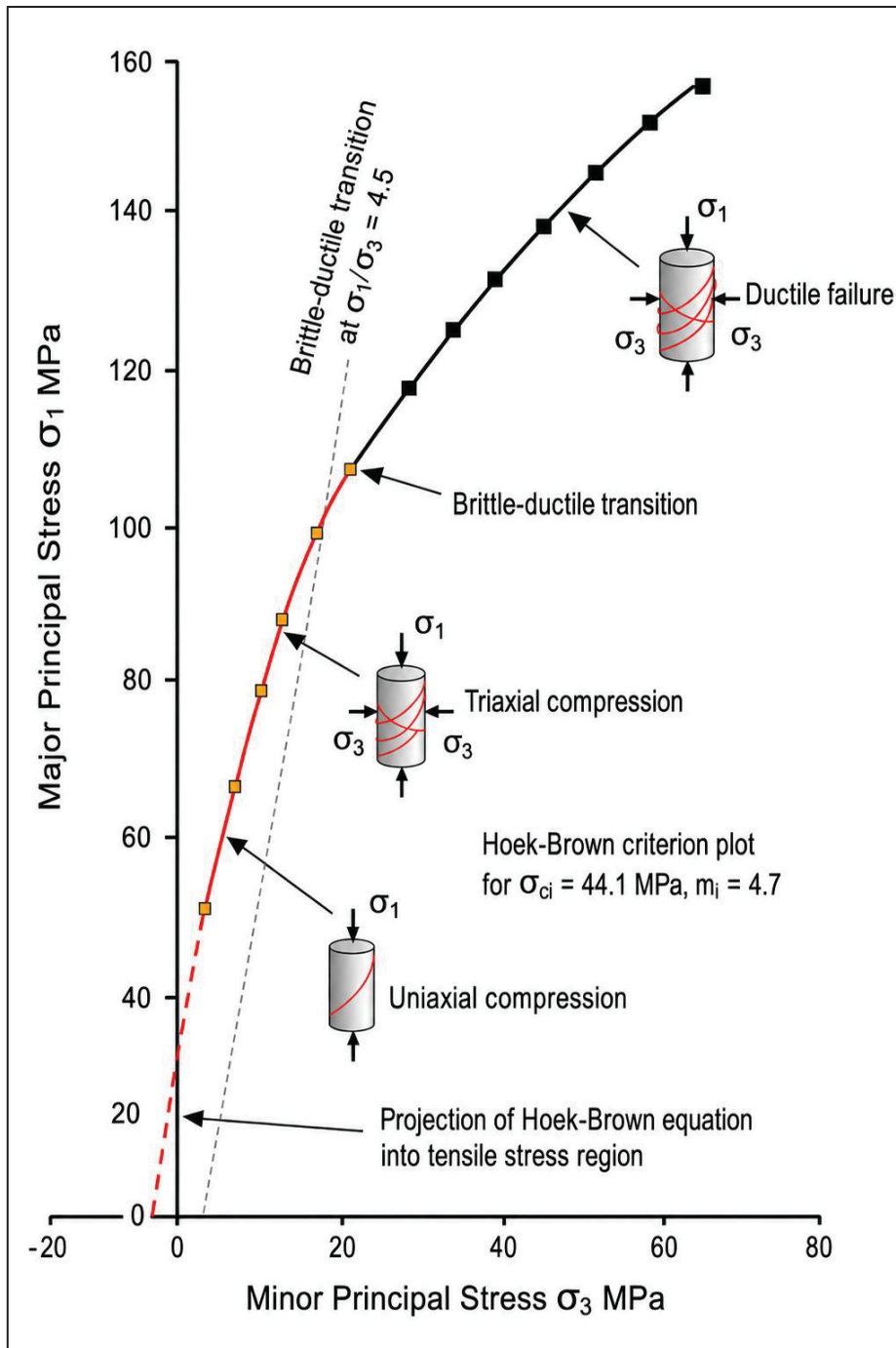


Figure 2.5 Relation entre les contraintes principales majeure et mineure selon le critère de rupture de Hoek-Brown

Tiré de Hoek et Brown (1980)

Dans sa formulation généralisée, le critère de Hoek-Brown s'écrit :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.5)$$

Où σ'_1 représente la contrainte principale effective maximale à la rupture, σ'_3 représente la contrainte principale effective minimale, σ_{ci} correspond à la résistance à la compression simple de la roche intacte et m_b, s, a sont des constantes dépendant des caractéristiques du massif rocheux.

Le Geological Strength Index, ou GSI, a été introduit afin d'améliorer l'estimation des paramètres du critère de Hoek-Brown pour les massifs rocheux fracturés. Il repose sur une évaluation visuelle de la structure du massif et de l'état des surfaces de discontinuité. La structure décrit le degré de blocage, de fracturation et d'emboîtement du massif, tandis que l'état des surfaces reflète la rugosité, l'altération et la qualité des discontinuités (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 2000; Marinos & Hoek, 2000). La grille classique d'évaluation du GSI est présentée à la Figure 2.6.

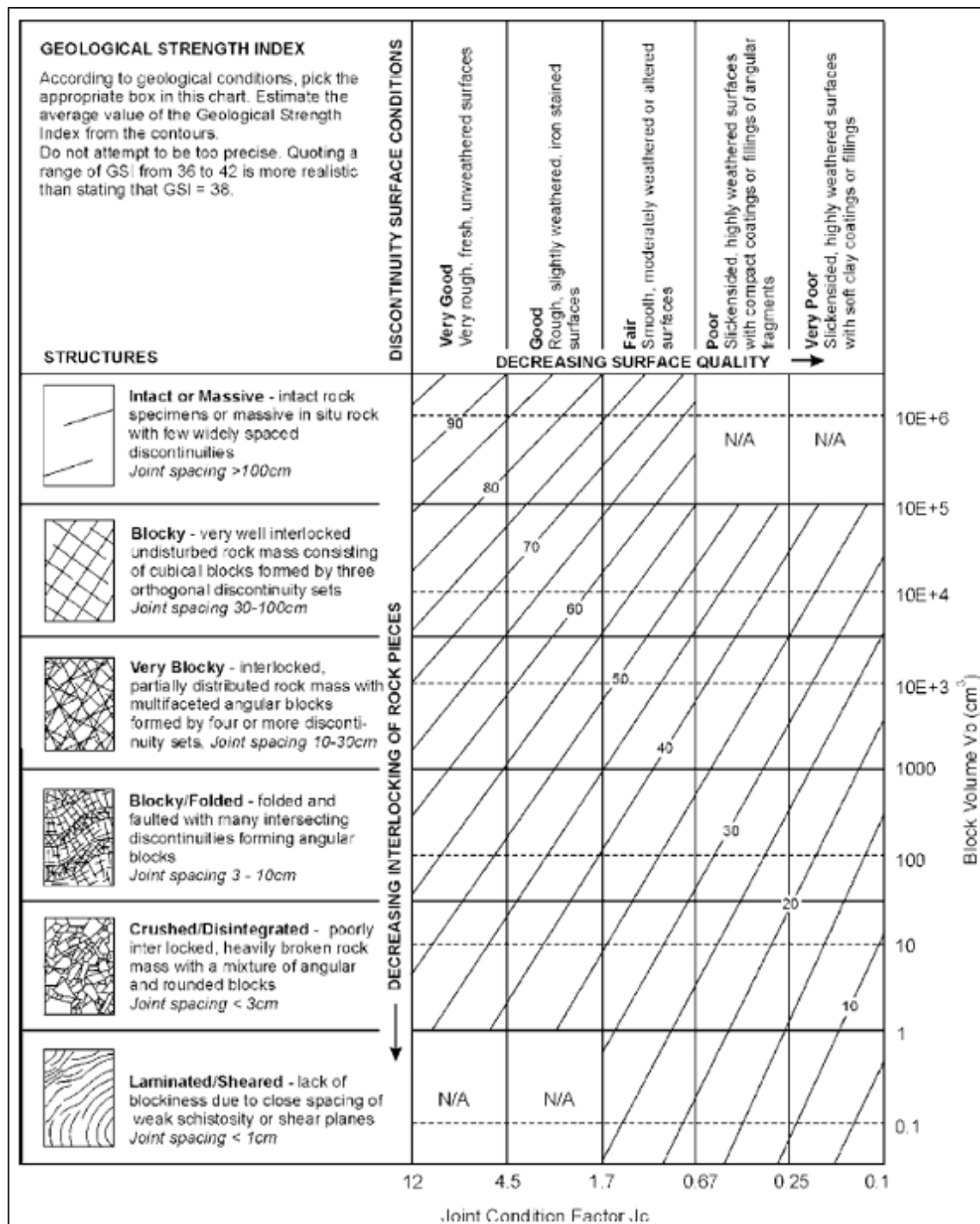


Figure 2.6 Classification de l'indice de résistance géologique GSI

Tiré de Hoek et Brown (1997)

Le GSI présente l'avantage d'être simple, rapide à appliquer et directement relié au critère de Hoek-Brown. Cependant, il demeure une méthode partiellement subjective, car son estimation dépend de l'expérience de l'observateur et des conditions d'exposition du massif. Il est généralement recommandé d'exprimer le GSI sous forme d'intervalle plutôt que comme une valeur unique. De plus, lorsque le comportement de la paroi est dominé par quelques discontinuités persistantes et défavorablement orientées, une approche structurale et cinématique détaillée devient plus pertinente qu'une représentation homogénéisée du massif (Marinos & Hoek, 2000; Hoek et al., 2002).

2.2.4 Classifications géomécaniques

Les classifications empiriques des massifs rocheux constituent également des outils importants pour la caractérisation géotechnique. Le Rock Mass Rating, ou RMR, développé par Bieniawski (1973,1989), évalue la qualité du massif à partir de plusieurs paramètres : résistance de la roche intacte, RQD, espacement des discontinuités, état des discontinuités, conditions d'eau et orientation des structures par rapport à l'ouvrage. La grille de classification RMR est présentée au Tableau 2.6. Elle permet d'obtenir une note globale comprise entre 0 et 100, associée à une classe de qualité du massif rocheux.

Tableau 2.6 Tableau de classification du système RMR

Tiré de Bieniawski (1989)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infiling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Rating			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infiling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Le RMR est largement utilisé pour l'évaluation préliminaire des massifs rocheux et pour l'appui à la conception des excavations. Il peut fournir des indications sur la qualité générale du massif, les conditions de stabilité et les besoins potentiels en soutènement. Toutefois, son application à des pentes rocheuses doit être faite avec prudence, car la stabilité d'un talus dépend fortement de la relation géométrique entre les discontinuités et la face libre. Cette limite a conduit au développement du Slope Mass Rating, ou SMR, proposé par Romana (1985) pour adapter le RMR au cas des pentes rocheuses.

Le SMR ajuste le RMR de base à l'aide de facteurs de correction qui tiennent compte du parallélisme entre les discontinuités et la pente, du pendage des discontinuités, de la relation entre le pendage de la discontinuité et celui du talus, ainsi que de la méthode d'excavation. Ces facteurs permettent d'intégrer explicitement l'influence de l'orientation structurale sur la stabilité des pentes. Les paramètres de correction utilisés dans le système SMR sont présentés au Tableau 2.7.

Tableau 2.7 Paramètres de correction du système SMR

Tiré de Romana et al (2015)

Table 1. Correction parameters for SMR (Romana, 1985).						
Type of failure		Very favourable	Favourable	Normal	Unfavourable	Very unfavourable
P	A = $ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T						
P/T	F ₁	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	B = β_j	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P						
T	F ₂	1.00	0.40	0.70	0.85	1.00
P	C = $\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
T						
P/T	F ₃	0	-6	-25	-50	-60
FAILURE: P planar; T toppling. DIP DIRECTION: α_j discontinuity; α_s slope. DIP: β_j discontinuity ; β_s : slope .						
Table 2. Values corresponding to the factor F ₄ (Romana, 1985).						
Excavation method (F ₄)						
Presplitting			+10	Blasting or mechanical		0
Smooth blasting			+8	Natural slope		+15
Natural slope			+15			

Le SMR est particulièrement pertinent pour les talus rocheux, car il établit un lien direct entre la qualité générale du massif et les mécanismes structuraux potentiels. Il permet de distinguer les configurations plus favorables ou plus défavorables selon l'orientation des discontinuités par rapport à la pente. Toutefois, comme les autres classifications empiriques, il ne remplace pas une analyse cinématique détaillée ni une évaluation mécanique complète lorsque les conditions structurales sont complexes ou fortement variables (Romana, 1985; Romana et al., 2015).

Le Q-system, développé par Barton et al. (1974), est une autre classification empirique largement utilisée, principalement pour les excavations souterraines. Il combine six paramètres : RQD, nombre de familles de joints, rugosité des joints, altération des joints, conditions d'eau et facteur de réduction lié aux contraintes. Ces paramètres sont regroupés dans l'expression suivante :

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2.6)$$

Où $\left(\frac{RQD}{J_n} \right)$ représente approximativement la taille des blocs, $\left(\frac{J_r}{J_a} \right)$ la résistance au cisaillement des discontinuités, et $\left(\frac{J_w}{SRF} \right)$ l'influence de l'eau et des contraintes (Barton et al., 1974). Les tables de sélection des paramètres du système Q sont présentées au Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Tables de classification des paramètres du système Q
Tiré de Barton et al (1974)

DESCRIPTION	VALUE	NOTES
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	RQD	
A. Very poor	0 - 25	1. Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.
B. Poor	25 - 50	
C. Fair	50 - 75	2. RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90 etc. are sufficiently accurate.
D. Good	75 - 90	
E. Excellent	90 - 100	
2. JOINT SET NUMBER	J_n	
A. Massive, no or few joints	0.5 - 1.0	
B. One joint set	2	
C. One joint set plus random	3	
D. Two joint sets	4	
E. Two joint sets plus random	6	
F. Three joint sets	9	1. For intersections use $(3.0 \times J_n)$
G. Three joint sets plus random	12	
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	2. For portals use $(2.0 \times J_n)$
J. Crushed rock, earthlike	20	
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r	
a. Rock wall contact		
b. Rock wall contact before 10 cm shear		
A. Discontinuous joints	4	
B. Rough and irregular, undulating	3	
C. Smooth undulating	2	
D. Slickensided undulating	1.5	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.
E. Rough or irregular, planar	1.5	
F. Smooth, planar	1.0	
G. Slickensided, planar	0.5	2. $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength.
c. No rock wall contact when sheared		
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
J. Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r degrees (approx.)
a. Rock wall contact		
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	1. Values of ϕ_r , the residual friction angle, are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present.
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0	
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0	
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 - 2 mm or less)	4.0	

Tableau 2.8 Tables de classification des paramètres du système Q

Tiré de Barton et al (1974) (suite)

4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ/r degrees (approx.)
b. Rock wall contact before 10 cm shear		
F. Sandy particles, clay-free, disintegrating rock etc.	4.0	25 - 30
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 - 24
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 - 16
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of J_a depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water.	8.0 - 12.0	6 - 12
c. No rock wall contact when sheared		
K. Zones or bands of disintegrated or crushed	6.0	
L. rock and clay (see G, H and J for clay	8.0	
M. conditions)	8.0 - 12.0	6 - 24
N. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0	
O. Thick continuous zones or bands of clay	10.0 - 13.0	
P. & R. (see G.H and J for clay conditions)	6.0 - 24.0	
5. JOINT WATER REDUCTION	J_w	approx. water pressure (kgf/cm ²)
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0	< 1.0
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0 - 2.5
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 - 10.0
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5 - 10.0
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 - 0.1	> 10
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 - 0.05	> 10
6. STRESS REDUCTION FACTOR		
a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated		SRF
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock any depth)	10.0	1. Reduce these values of <i>SRF</i> by 25 - 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation
B. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth < 50 m)	5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)	2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)	7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation < 50 m)	5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free). (depth of excavation > 50 m)	2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or 'sugar cube', (any depth)	5.0	

Tableau 2.8 Tables de classification des paramètres du système Q

Tiré de Barton et al (1974) (suite)

DESCRIPTION	VALUE		NOTES
6. STRESS REDUCTION FACTOR	SRF		
b. Competent rock, rock stress problems			
	σ_c/σ_1	σ_1/σ_3	2. For strongly anisotropic virgin stress field
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2.5 (if measured): when $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c
J. Medium stress	200 - 10	13 - 0.66	1.0 to $0.8\sigma_c$ and σ_1 to $0.8\sigma_1$. When $\sigma_1/\sigma_3 > 10$,
K. High stress, very tight structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2 reduce σ_c and σ_1 to $0.6\sigma_c$ and $0.6\sigma_1$ where σ_c = unconfined compressive strength, and σ_1 = tensile strength (point load) and σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses.
L. Mild rockburst (massive rock)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 - 20
c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure			
N. Mild squeezing rock pressure			5 - 10
O. Heavy squeezing rock pressure			10 - 20
d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water			
P. Mild swelling rock pressure			5 - 10
R. Heavy swelling rock pressure			10 - 15
ADDITIONAL NOTES ON THE USE OF THESE TABLES			
When making estimates of the rock mass Quality (Q), the following guidelines should be followed in addition to the notes listed in the tables:			
1. When borehole core is unavailable, RQD can be estimated from the number of joints per unit volume, in which the number of joints per metre for each joint set are added. A simple relationship can be used to convert this number to RQD for the case of clay free rock masses: $RQD = 115 - 3.3 J_v$ (approx.), where J_v = total number of joints per m^3 ($0 < RQD < 100$ for $35 > J_v > 4.5$).			
2. The parameter J_n representing the number of joint sets will often be affected by foliation, schistosity, slaty cleavage or bedding etc. If strongly developed, these parallel 'joints' should obviously be counted as a complete joint set. However, if there are few 'joints' visible, or if only occasional breaks in the core are due to these features, then it will be more appropriate to count them as 'random' joints when evaluating J_n .			
3. The parameters J_f and J_a (representing shear strength) should be relevant to the weakest significant joint set or clay filled discontinuity in the given zone. However, if the joint set or discontinuity with the minimum value of J_f/J_a is favourably oriented for stability, then a second, less favourably oriented joint set or discontinuity may sometimes be more significant, and its higher value of J_f/J_a should be used when evaluating Q. The value of J_f/J_a should in fact relate to the surface most likely to allow failure to initiate.			
4. When a rock mass contains clay, the factor SRF appropriate to loosening loads should be evaluated. In such cases the strength of the intact rock is of little interest. However, when jointing is minimal and clay is completely absent, the strength of the intact rock may become the weakest link, and the stability will then depend on the ratio rock-stress/rock-strength. A strongly anisotropic stress field is unfavourable for stability and is roughly accounted for as in note 2 in the table for stress reduction factor evaluation.			
5. The compressive and tensile strengths (σ_c and σ_t) of the intact rock should be evaluated in the saturated condition if this is appropriate to the present and future in situ conditions. A very conservative estimate of the strength should be made for those rocks that deteriorate when exposed to moist or saturated conditions.			

Bien que le Q-system ait été conçu à l'origine pour les ouvrages souterrains, il illustre clairement l'importance combinée de la fracturation, de la rugosité, de l'altération, de l'eau et des contraintes dans l'évaluation du comportement du massif rocheux. Ces paramètres sont

également pertinents pour l'analyse des parois rocheuses, même si leur application directe aux talus doit être adaptée au contexte de surface.

Le Q-Slope constitue une adaptation plus récente du Q-system pour l'évaluation de la stabilité des pentes rocheuses. Développé par Bar et Barton (2017), il vise à estimer rapidement la qualité d'un talus rocheux et à proposer des angles de pente stables sans soutènement à partir de paramètres directement observables sur le terrain. Le Q-Slope reprend plusieurs paramètres du Q-system, mais intègre un facteur d'orientation des discontinuités et un facteur environnemental adapté aux pentes exposées, notamment en lien avec l'eau, l'altération et les effets climatiques.

Le Q-Slope est défini par la relation suivante :

$$Q_{slope} = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_o \times \left(\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \right) \quad (2.7)$$

Où le terme $\left(\frac{J_r}{J_a} \right)$ intègre l'effet de l'orientation des discontinuités par rapport à la pente, J_{wice} tient compte des conditions hydriques et climatiques, SRF_{slope} représente les effets liés aux contraintes, aux zones de faiblesse ou aux conditions géologiques défavorables (Bar & Barton, 2017). Cette méthode est intéressante pour les talus rocheux, car elle met en évidence le rôle combiné de la structure, de l'eau, de l'altération et de l'orientation dans l'évaluation de la stabilité.

2.3 Géologie structurale et contrôle cinématique des instabilités

La géologie structurale joue un rôle central dans l'évaluation des instabilités en parois rocheuses. Dans un massif fracturé, les joints, les plans de stratification, les failles, les zones de cisaillement et les contacts lithologiques peuvent constituer des surfaces de faiblesse susceptibles de contrôler la géométrie des blocs et les mécanismes de rupture. L'orientation, la persistance, l'espacement et l'état de ces discontinuités influencent directement les modes

d'instabilité potentiels, notamment le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement (Hoek & Bray, 1981; Goodman, 1991; Wyllie & Mah, 2004).

Dans les pentes rocheuses, la stabilité dépend étroitement de la relation géométrique entre les discontinuités et la face libre de la pente. Une même famille de joints peut ainsi présenter une configuration stable pour une orientation donnée de la paroi, mais devenir défavorable lorsque l'orientation du front rocheux change. L'analyse structurale vise donc à identifier les principales familles de discontinuités et à caractériser leur relation avec la géométrie des fronts rocheux. Elle constitue le fondement de l'analyse cinématique, laquelle permet de déterminer si les conditions géométriques nécessaires à la mobilisation d'un bloc rocheux sont réunies (Hoek & Bray, 1981 ; Markland, 1972). Toutefois, cette approche ne constitue pas à elle seule une analyse complète de la stabilité. Elle permet uniquement d'identifier les mécanismes de rupture géométriquement admissibles, sans calculer directement un facteur de sécurité ni intégrer de manière exhaustive la résistance au cisaillement, la persistance réelle des discontinuités, les pressions d'eau, la présence de ponts rocheux ou les conditions de chargement. Elle représente donc une étape préliminaire essentielle, à interpréter avec prudence et à compléter par des observations morphologiques, structurales et géotechniques détaillées (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

2.3.1 Origine structurale des discontinuités et influence sur les pentes rocheuses

Les discontinuités présentes dans les massifs rocheux résultent d'une histoire géologique complexe associée à la sédimentation, à l'enfouissement, aux épisodes tectoniques, au soulèvement et à l'érosion. Pendant ces différentes étapes, les variations de contraintes, de température et de pression peuvent provoquer la formation de fractures, de joints ou de failles. Dans les roches sédimentaires, les plans de stratification peuvent également constituer des discontinuités majeures, car ils correspondent à des interfaces héritées des processus de dépôt (Wyllie & Mah, 2004 ; Brady & Brown, 2006).

La formation des fractures dépend de l'état de contraintes auquel la roche est soumise. À faible confinement, les roches peuvent se fracturer plus facilement, tandis qu'à grande profondeur, le confinement augmente la résistance apparente du matériau. L'orientation des fractures est généralement liée à la direction des contraintes principales, ce qui explique l'existence de familles de joints organisées dans plusieurs massifs rocheux. La Figure 2.7 illustre le lien entre l'évolution des contraintes, les conditions de rupture et l'orientation des fractures dans la roche.

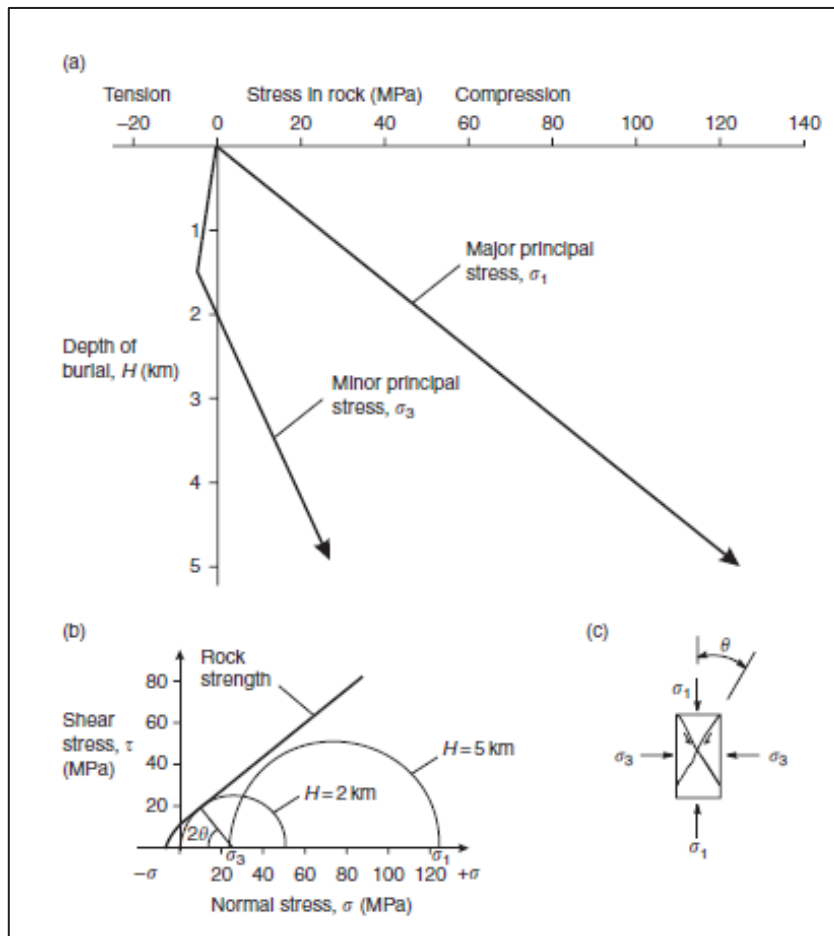


Figure 2.7 Développement des joints dans la roche en fonction des conditions de contraintes lors des phases d'enfouissement et de soulèvement : (a) évolution des contraintes avec la profondeur, (b) conditions de rupture représentées sur un diagramme de Mohr, et (c) orientation des fractures par rapport aux contraintes principales

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

L'influence des discontinuités sur la stabilité ne dépend pas uniquement de leur orientation. Leur persistance, leur espacement et leur continuité jouent également un rôle important. Des joints persistants et continus peuvent former des surfaces de rupture bien définies, tandis que des joints peu persistants et rapprochés peuvent plutôt conduire à un détachement progressif de petits blocs. De même, des discontinuités fortement inclinées vers l'intérieur du massif peuvent favoriser le basculement de colonnes rocheuses (Wyllie & Mah, 2004). Ces effets sont illustrés à la Figure 2.8, qui montre comment des propriétés différentes des discontinuités peuvent conduire à des comportements d'instabilité distincts.

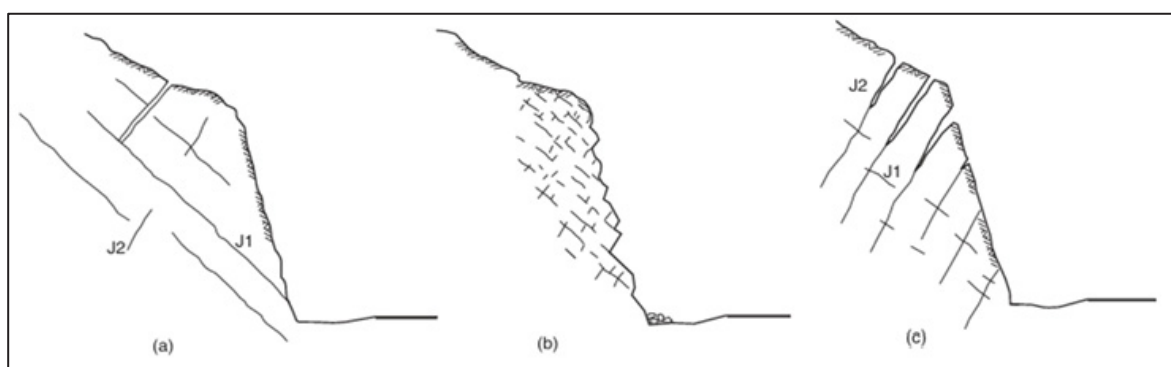


Figure 2.8 Influence des propriétés des discontinuités sur la stabilité des pentes rocheuses :
 (a) glissement planaire contrôlé par des joints persistants, (b) détachement progressif de petits blocs associé à des joints peu persistants, et (c) rupture par basculement liée à des discontinuités persistantes inclinées vers l'intérieur de la pente

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

Ces exemples montrent qu'une analyse fondée uniquement sur l'orientation des discontinuités peut être insuffisante. Deux pentes présentant des orientations structurales similaires peuvent avoir des comportements différents selon la persistance, l'espacement, l'ouverture, la rugosité ou l'état d'altération des discontinuités. Cette distinction est importante dans le cadre de ce mémoire, car les formes cartographiées sur les modèles 3D ne traduisent pas seulement une orientation structurale, mais aussi l'expression morphologique d'un état de segmentation, d'altération ou de dégradation progressive.

2.3.2 Orientation des discontinuités et représentation stéréographique

L'étude structurale d'un massif rocheux commence généralement par la mesure de l'orientation des discontinuités. Cette orientation est décrite à l'aide du pendage et de la direction de pendage. Le pendage correspond à l'angle maximal d'inclinaison d'un plan par rapport à l'horizontale, tandis que la direction de pendage correspond à l'azimut vers lequel le plan s'incline. Le strike, ou direction de ligne d'affleurement, correspond à l'orientation de la ligne horizontale formée par l'intersection du plan avec une surface horizontale. Ces conventions sont illustrées à la Figure 2.9, qui présente également les notions de trend et de plunge utilisées pour décrire l'orientation d'une ligne, comme l'intersection entre deux plans de discontinuité (Wyllie & Mah, 2004).

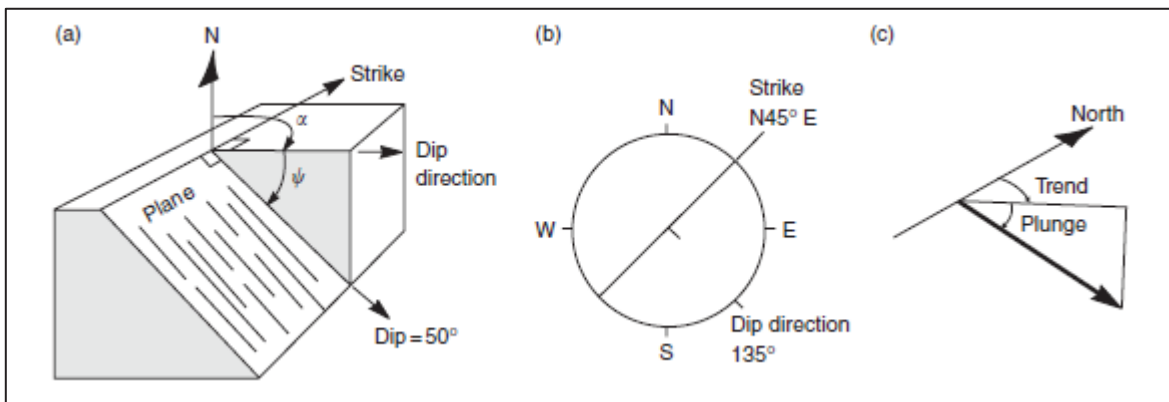


Figure 2.9 Terminologie utilisée pour définir l'orientation des discontinuités : (a) représentation tridimensionnelle d'un plan montrant le pendage et la direction de pendage, (b) représentation en plan du strike et de la direction de pendage, et (c) représentation de l'orientation d'une ligne à l'aide du trend et du plunge

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

La projection stéréographique constitue l'un des outils les plus utilisés pour représenter et analyser les orientations structurales. Elle permet de projeter sur un plan bidimensionnel l'orientation de plans et de lignes définis dans l'espace tridimensionnel. Les plans de discontinuité peuvent être représentés par leurs grands cercles ou par leurs pôles, c'est-à-dire

les points correspondant à la normale au plan. Les lignes, comme les intersections entre deux discontinuités, sont représentées par des points définis par leur trend et leur plunge (Wyllie & Mah, 2004).

La Figure 2.10 présente le principe de la représentation stéréographique des plans et des lignes sur l'hémisphère inférieur d'une sphère de référence. Cette représentation permet de comparer rapidement les orientations des discontinuités, d'identifier les familles structurales dominantes et d'évaluer leurs relations géométriques avec la pente.

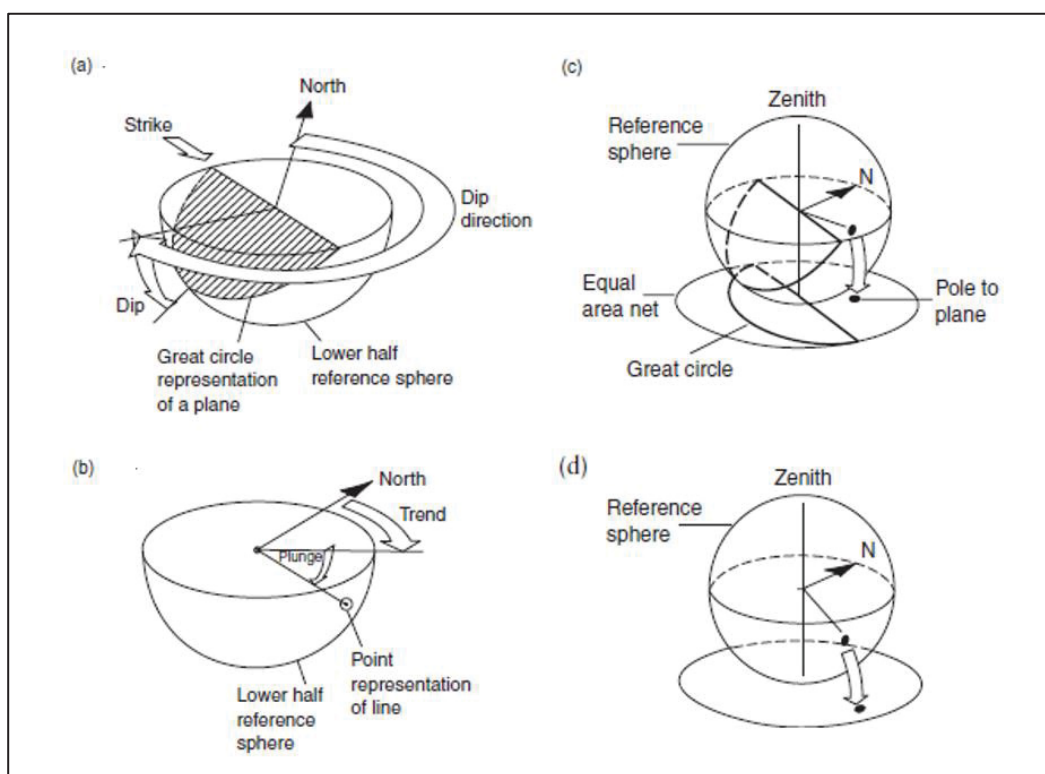


Figure 2.10 Représentation stéréographique des plans et des lignes sur l'hémisphère inférieur d'une sphère de référence et leur projection sur un réseau stéréographique d'aire égale : (a) représentation d'un plan et de son grand cercle, (b) représentation d'une ligne définie par son plunge et son trend, (c) projection d'un plan et de son pôle sur le stéréonet, et (d) projection d'une ligne sur le réseau stéréographique

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

Dans les études de stabilité, les stéréonets permettent de représenter simultanément les discontinuités et la face de la pente. Les diagrammes de pôles sont particulièrement utiles lorsque de nombreuses mesures structurales sont disponibles, car ils permettent d'identifier des concentrations d'orientations correspondant aux familles de discontinuités. Les grands cercles, quant à eux, facilitent l'analyse des intersections entre plans et l'identification des lignes de glissement potentielles, notamment dans le cas des ruptures en coin.

La projection stéréographique demeure cependant une représentation géométrique. Elle ne renseigne pas directement sur la position spatiale réelle des discontinuités, leur longueur, leur persistance ou leur état de surface. Elle doit donc être interprétée avec les observations géologiques, les modèles 3D et les indices morphologiques visibles sur les parois.

2.3.3 Principaux mécanismes de rupture structurale

Les principaux mécanismes de rupture dans les pentes rocheuses sont associés à des configurations structurales spécifiques. Les mécanismes les plus couramment analysés sont la rupture planaire, la rupture en coin et la rupture par basculement. La rupture circulaire peut également se produire dans les massifs très fracturés ou fortement altérés, lorsque le comportement du matériau devient plus homogène et moins contrôlé par des discontinuités individuelles (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

La Figure 2.11 présente les principaux modes de rupture et leurs configurations structurales typiques. Elle montre que chaque mécanisme dépend de la relation entre les discontinuités et la face libre de la pente. Une discontinuité plongeant vers la pente peut favoriser une rupture planaire, deux discontinuités sécantes peuvent former un coin rocheux, et des discontinuités fortement inclinées vers l'intérieur du massif peuvent favoriser un basculement.

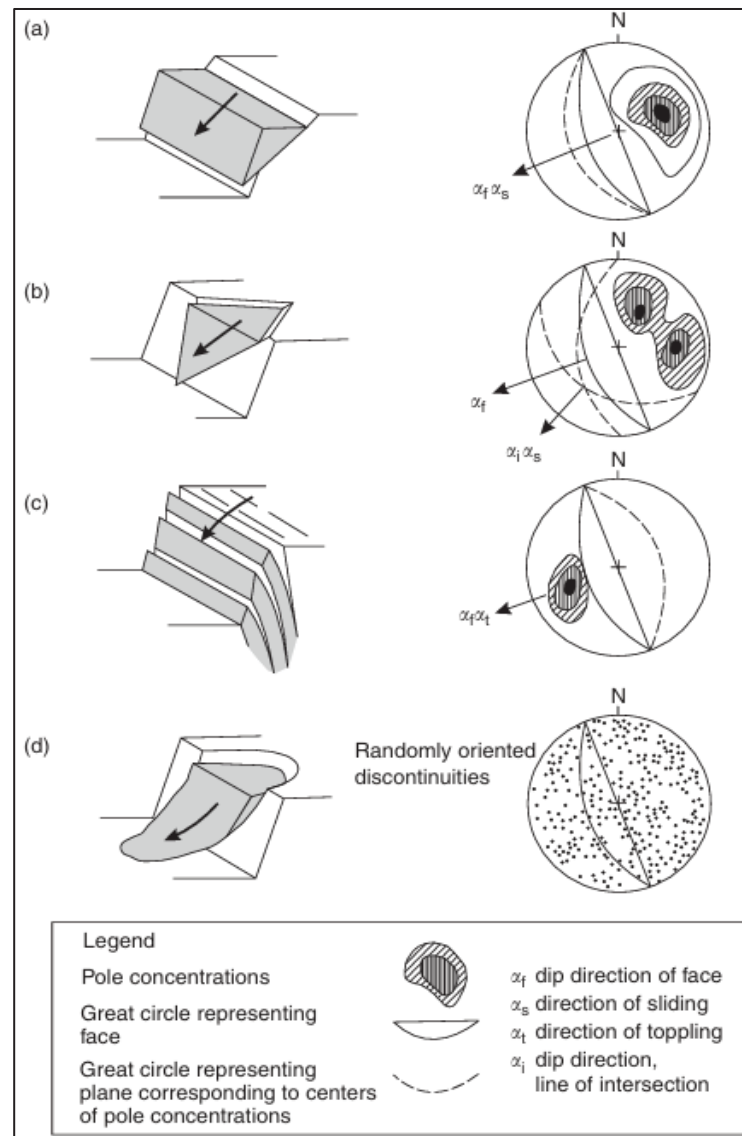


Figure 2.11 Principaux types de rupture dans les pentes rocheuses et configurations structurales associées : (a) rupture planaire liée à des discontinuités persistantes plongeant vers la face de la pente et approximativement parallèles à celle-ci, (b) rupture en coin résultant de l'intersection de deux plans de discontinuités, (c) rupture par basculement associée à des discontinuités fortement inclinées vers l'intérieur de la pente, et (d) rupture circulaire caractéristique des massifs rocheux très fracturés ou de faible résistance présentant des discontinuités orientées de manière aléatoire

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

La rupture planaire se produit lorsqu'un bloc rocheux glisse le long d'un plan de discontinuité unique, généralement persistant, qui plonge vers la face libre de la pente. Pour que ce mécanisme soit possible, le plan doit affleurer dans la pente, présenter une direction de pendage proche de celle de la face et avoir un pendage supérieur à l'angle de frottement mobilisable le long de la discontinuité (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). La Figure 2.12 illustre la géométrie typique d'une rupture planaire, incluant le plan de glissement, une fissure de traction et les surfaces de libération latérales.

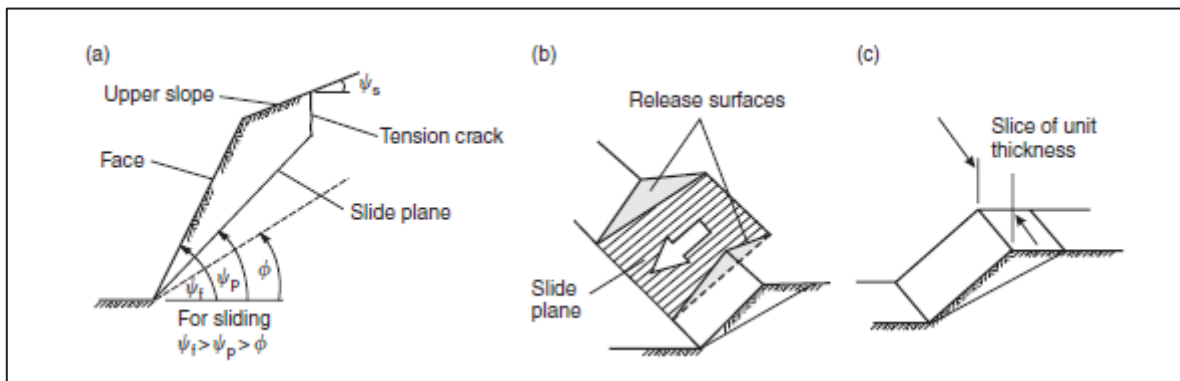


Figure 2.12 Géométrie d'une rupture planaire dans une pente rocheuse : (a) coupe illustrant le plan de glissement et la fissure de traction dans la partie supérieure du talus, (b) surfaces de libération aux extrémités du bloc instable, et (c) représentation d'une tranche de largeur unitaire utilisée dans l'analyse de stabilité

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

La rupture en coin se développe lorsqu'un bloc est délimité par deux plans de discontinuités sécants. Le déplacement potentiel se produit le long de la ligne d'intersection entre ces deux plans, à condition que cette ligne plonge vers la face libre et présente une inclinaison compatible avec les conditions de frottement. Ce mécanisme est fréquent dans les massifs rocheux recoupés par plusieurs familles de joints, car l'intersection de deux plans peut individualiser un volume rocheux susceptible de se détacher (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). La Figure 2.13 présente la géométrie d'un bloc en coin et sa représentation sur stéréonet.

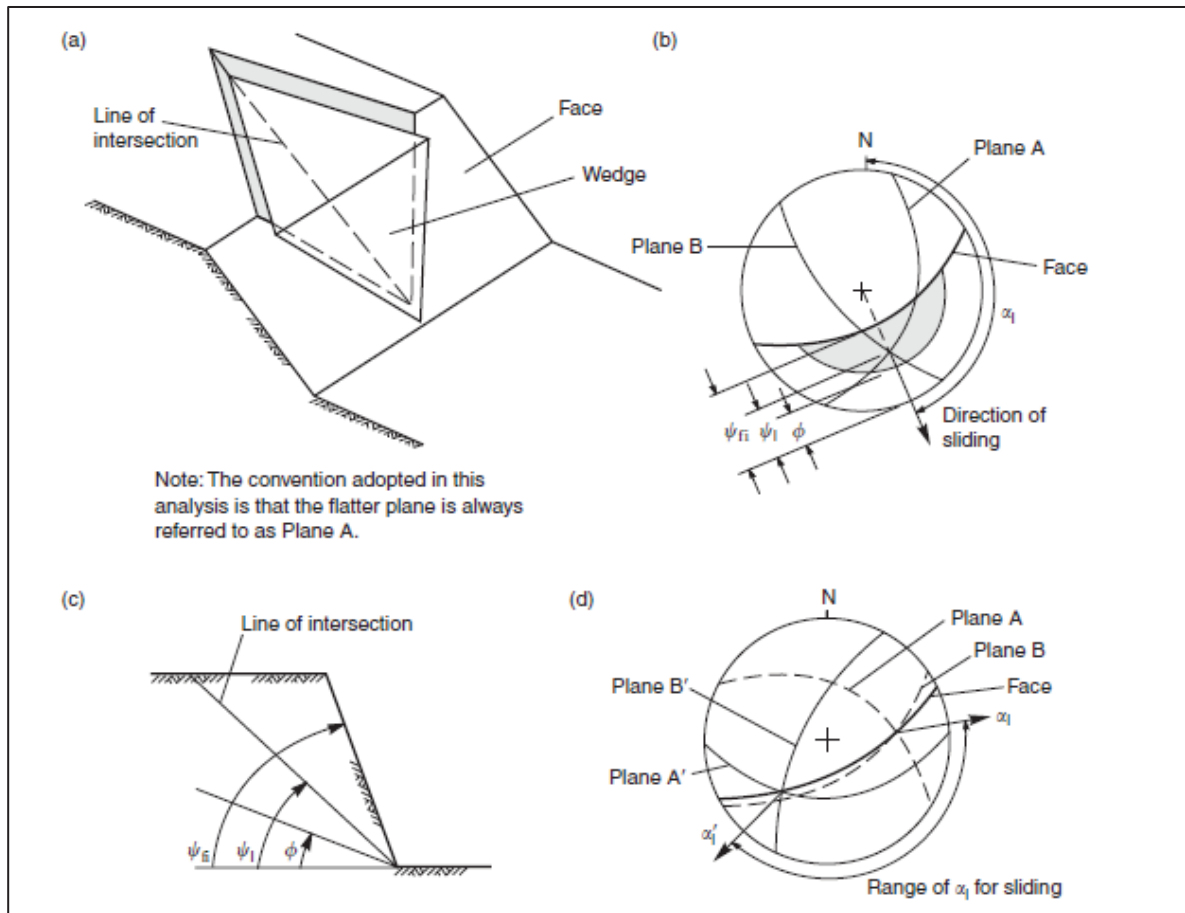


Figure 2.13 Conditions géométriques d'une rupture en coin : (a) représentation tridimensionnelle du bloc en coin formé par l'intersection de deux plans de discontinuités, (b) représentation sur stéréonet montrant les grands cercles des deux plans, la face du talus et la direction potentielle de glissement, (c) coupe illustrant la relation entre la pente et la ligne d'intersection, et (d) stéréonet indiquant la plage de directions dans laquelle le glissement est cinématiquement possible

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

Le basculement correspond à la rotation de blocs ou de colonnes rocheuses vers l'extérieur de la pente. Il est généralement associé à des discontinuités fortement inclinées vers l'intérieur du massif, combinées à une face libre permettant la rotation progressive des blocs (Goodman, 1991; Wyllie & Mah, 2004). Plusieurs formes de basculement peuvent être distinguées,

notamment le basculement en blocs, le basculement flexural et le basculement bloc-flexure. Ces mécanismes sont illustrés à la Figure 2.14.

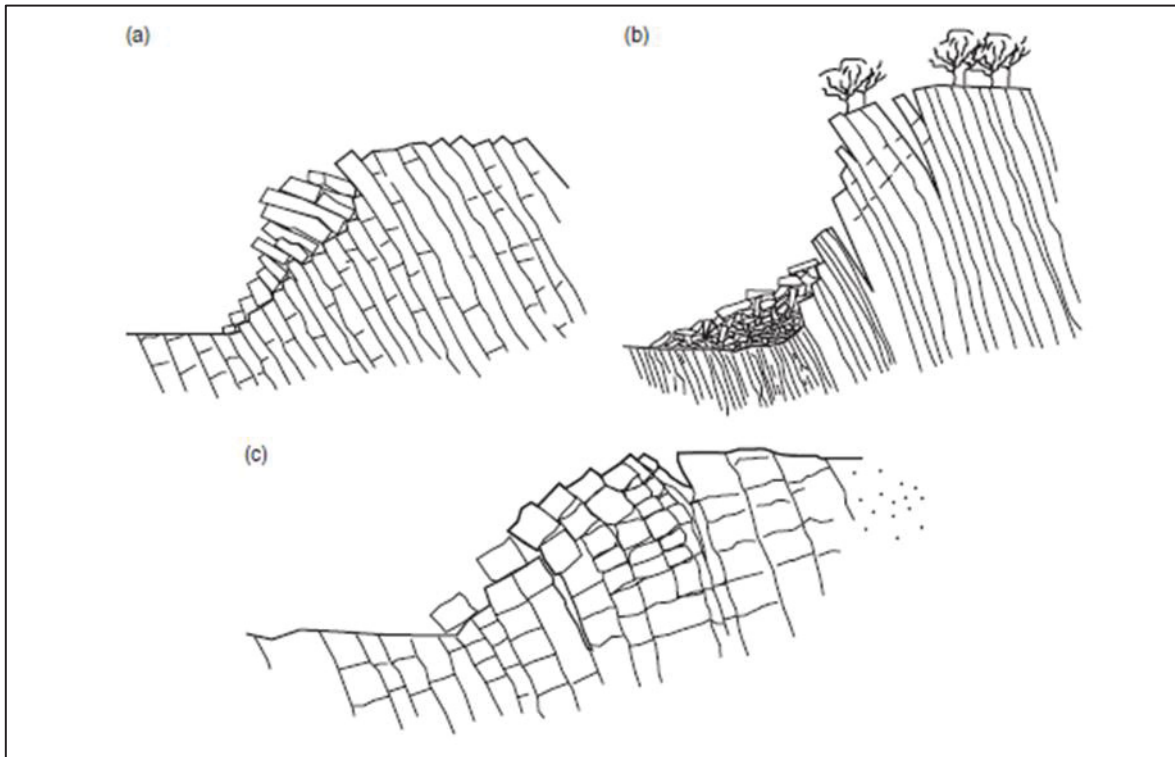


Figure 2.14 Principales classes de rupture par basculement : (a) basculement en blocs de colonnes rocheuses séparées par des joints orthogonaux espacés, (b) basculement fléchissant de dalles rocheuses plongeant fortement vers l'intérieur de la pente, et (c) basculement bloc-flexure caractérisé par une flexion pseudo-continue de longues colonnes rocheuses le long de nombreux joints transversaux

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

La rupture circulaire se distingue des mécanismes précédents, car elle n'est pas nécessairement contrôlée par une seule famille de discontinuités ou par une intersection structurale précise. Elle se développe généralement dans des massifs très fracturés, très altérés ou à faible résistance, où le matériau se comporte de manière plus continue. Ce type de rupture est plus fréquent dans les sols ou les roches très dégradées, et il est moins directement lié à l'analyse cinématique structurale classique (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

2.3.4 Principe de l'analyse cinématique

L'analyse cinématique vise à déterminer si la géométrie des discontinuités, combinée à celle de la pente, est compatible avec un mouvement potentiel de blocs rocheux. Elle repose sur la comparaison de l'orientation des discontinuités avec celle de la face de la pente, tout en tenant compte de l'angle de frottement mobilisable le long des surfaces. Cette approche permet ainsi d'identifier les mécanismes de rupture géométriquement admissibles, sans toutefois évaluer directement la stabilité mécanique ni calculer un facteur de sécurité (Hoek & Bray, 1981 ; Wyllie & Mah, 2004).

Dans ce type d'analyse, les discontinuités et la face de la pente sont représentées sur un stéréonet. Des enveloppes géométriques, notamment les enveloppes d'affleurement, sont ensuite utilisées pour vérifier si un plan de discontinuité ou une ligne d'intersection est susceptible de déboucher sur la face libre. La Figure 2.15 illustre ce principe à partir d'une pente comportant plusieurs familles de discontinuités. Les domaines délimités sur le stéréonet permettent d'identifier les configurations favorables aux glissements planaires, aux ruptures en coin et aux mécanismes de basculement.

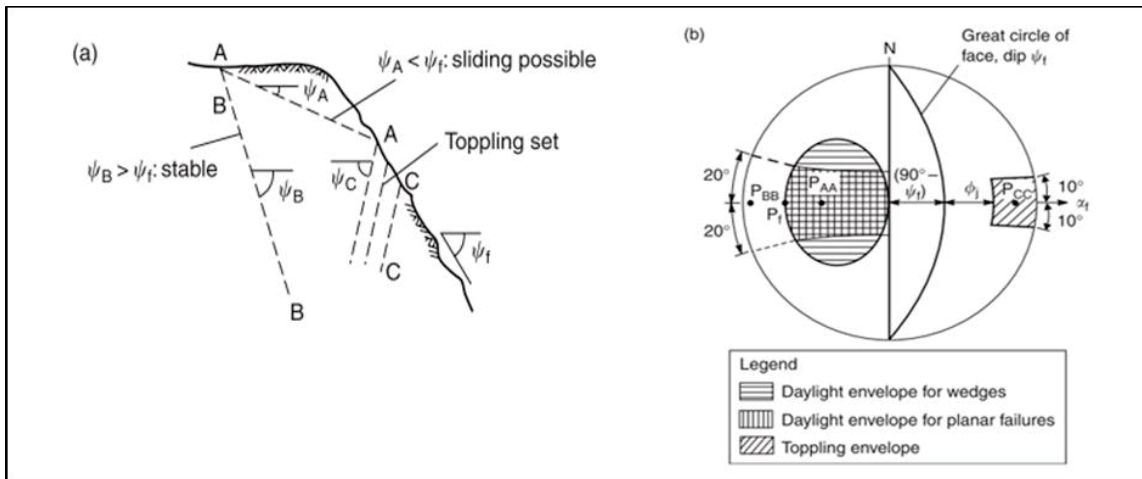


Figure 2.15 Analyse cinématique de blocs rocheux dans une pente : (a) ensembles de discontinuités représentés dans la géométrie du talus, et (b) projection des enveloppes d’affleurement sur un stéréonet d’aire égale. Les enveloppes sont définies par rapport aux pôles des surfaces

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

Pour le glissement planaire, les conditions principales sont que la discontinuité plonge vers la face libre, qu’elle affleure dans la pente, que sa direction de pendage soit approximativement parallèle à celle de la pente et que son pendage soit supérieur à l’angle de frottement. Pour le glissement en coin, la ligne d’intersection entre deux plans doit plonger vers la face libre et satisfaire les conditions de frottement. Pour le basculement, les discontinuités doivent généralement plonger vers l’intérieur du massif et être suffisamment inclinées pour permettre la rotation des blocs ou des colonnes (Goodman, 1991; Wyllie & Mah, 2004).

L’analyse cinématique est particulièrement utile lors de la conception préliminaire des talus, des routes, des excavations minières et des parois rocheuses. Elle permet de comparer les orientations structurales avec différentes orientations de pente et d’identifier les secteurs où certains mécanismes sont plus susceptibles d’être géométriquement admissibles. La Figure 2.16 présente un exemple d’application de l’analyse cinématique dans une mine à ciel ouvert, où les stéréonets sont utilisés pour évaluer les mécanismes potentiels dans différentes régions structurales.

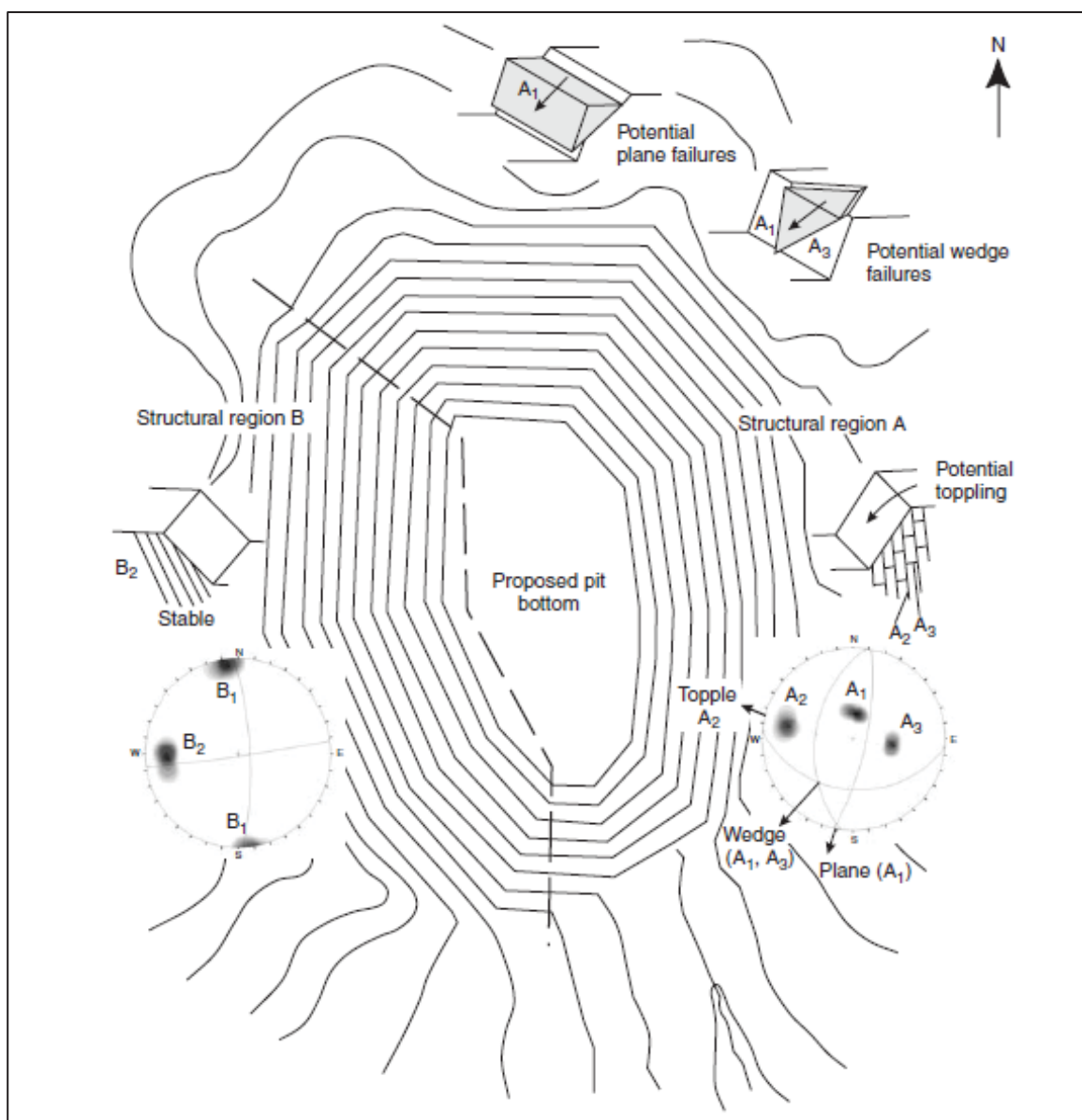


Figure 2.16 Représentation de la géologie structurale sur stéréonets et évaluation préliminaire de la stabilité des talus dans une mine à ciel ouvert

Tiré de Wyllie et Mah (2004)

Dans le cadre de ce mémoire, ce principe est important, car l'analyse cinématique sert à établir un référentiel géométrique des mécanismes admissibles. Ce référentiel est ensuite comparé aux formes morphologiques observées sur les modèles 3D, comme les cicatrices en coin, les surplombs, les zones de joints persistants et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts.

2.3.5 Limites des approches cinématiques classiques

Malgré son utilité, l'analyse cinématique classique présente plusieurs limites. Elle repose principalement sur les relations angulaires entre les discontinuités et la face de la pente. Elle permet donc de déterminer si un mécanisme est géométriquement possible, mais pas s'il est mécaniquement probable ou imminent. Une configuration peut être cinématiquement admissible sans conduire à une rupture si les discontinuités sont peu persistantes, fortement rugueuses, non ouvertes ou si des ponts rocheux maintiennent encore la cohésion du massif (Hoek & Bray, 1981).

L'analyse cinématique ne tient pas directement compte de la position spatiale exacte des discontinuités, de leur continuité réelle, de leur ouverture, des pressions d'eau, de l'altération ou des conditions de chargement. Elle ne permet pas non plus de distinguer les mécanismes réellement exprimés sur la paroi de ceux qui sont seulement possibles d'un point de vue géométrique. Cette limite est particulièrement importante dans les parois complexes, où plusieurs familles de discontinuités coexistent et où les formes observées peuvent résulter d'une combinaison entre structure, altération, eau et contexte opérationnel.

Une autre limite concerne la faible spatialisation de l'analyse classique. Les stéréonets représentent des orientations structurales, mais ils ne montrent pas toujours où les discontinuités se trouvent sur la paroi, comment elles s'organisent spatialement, ni si elles correspondent à des formes visibles d'instabilité. L'intégration des données 3D permet de dépasser en partie cette limite, car elle permet de relier les mesures structurales à leur position sur le modèle de paroi et aux indices morphologiques observables (Sturzenegger & Stead, 2009; Jaboyedoff et al., 2012; Lato & Vöge, 2012).

Ainsi, l'analyse cinématique doit être considérée comme une étape nécessaire, mais non suffisante. Elle identifie les mécanismes géométriquement admissibles, tandis que l'observation morphologique permet de vérifier comment ces mécanismes, ou d'autres processus de dégradation, s'expriment réellement à la surface des parois. Cette distinction est

au cœur de la démarche développée dans ce mémoire, qui combine l'analyse structurale, l'analyse cinématique et la cartographie morphologique 3D afin de construire un jeu de données d'instabilités apparentes et d'appuyer une évaluation du géorisque apparent.

2.4 Télédétection et modèles 3D pour la caractérisation des parois rocheuses

La télédétection et les modèles tridimensionnels occupent aujourd'hui une place importante dans la caractérisation des parois rocheuses. Contrairement aux levés traditionnels réalisés directement sur le terrain, ces approches permettent d'acquérir des informations géométriques détaillées sur des surfaces abruptes, instables ou difficiles d'accès. Elles améliorent ainsi la sécurité des campagnes de terrain et permettent de documenter la géométrie des parois, les discontinuités, les zones de rupture et les formes morphologiques associées aux instabilités rocheuses (Sturzenegger & Stead, 2009; Jaboyedoff et al., 2012).

Dans les applications géotechniques et géoscientifiques, les données 3D sont principalement acquises par LiDAR terrestre, LiDAR aéroporté ou sur UAV, et photogrammétrie. Ces techniques produisent des nuages de points tridimensionnels qui représentent la surface rocheuse sous forme d'un ensemble dense de points définis par des coordonnées spatiales. Selon le capteur et la méthode d'acquisition, ces points peuvent aussi contenir des attributs complémentaires, tels que l'intensité du signal, la couleur RGB, le numéro de retour ou l'information temporelle (Vosselman & Maas, 2010; Shan & Toth, 2018). Ces modèles peuvent ensuite être utilisés pour extraire les discontinuités, estimer leur orientation, identifier des familles structurales, comparer des surfaces acquises à différentes dates et cartographier des indices d'instabilité visibles sur les parois (Sturzenegger & Stead, 2009; Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014).

Toutefois, un nuage de points ne constitue pas directement une interprétation géologique. Il représente un échantillonnage discret d'une surface continue, sans structure topologique explicite. Son interprétation nécessite donc des opérations de traitement, de filtrage, de calcul géométrique et de validation. La densité des points, le bruit de mesure, l'angle d'incidence, les

occlusions, les variations d'éclairage et les conditions de surface peuvent influencer la qualité de l'information extraite. Dans ce contexte, l'intérêt des modèles 3D ne réside pas seulement dans la visualisation des parois, mais dans leur capacité à transformer une géométrie brute en informations géotechniques interprétables.

L'intérêt de ces approches ne se limite pas à la mesure de l'orientation des discontinuités. Les modèles 3D permettent aussi de spatialiser l'information géologique, c'est-à-dire de relier les structures mesurées à leur position réelle sur la paroi. Cette dimension est essentielle pour dépasser les limites de l'analyse cinématique classique, qui repose principalement sur des orientations structurales projetées sur stéréonets. Dans ce mémoire, les données 3D servent ainsi de support pour relier la structure du massif, les mécanismes cinématiquement admissibles et les indices morphologiques d'instabilité apparente observés sur les parois.

2.4.1 LiDAR terrestre, LiDAR aéroporté et acquisitions UAV

Le LiDAR, ou Light Detection and Ranging, est une technique active de télédétection fondée sur l'émission d'impulsions laser et la mesure du signal réfléchi par la surface étudiée. La distance entre le capteur et la cible est déterminée à partir du temps de vol ou du déphasage du signal, ce qui permet de générer un nuage de points tridimensionnel représentant la géométrie de la surface rocheuse (Vosselman & Maas, 2010; Jaboyedoff et al., 2012; Shan & Toth, 2018). Dans les applications géotechniques, le LiDAR est particulièrement utile pour caractériser des parois abruptes, mesurer des discontinuités, identifier des zones fracturées et suivre l'évolution morphologique de surfaces instables.

La Figure 2.17 illustre le principe général de mesure par impulsion laser. Le système émet un signal vers une cible, puis mesure le temps nécessaire pour que le signal réfléchi revienne au capteur. Cette mesure directe de distance constitue l'un des principaux avantages du LiDAR pour la caractérisation géométrique des parois rocheuses.

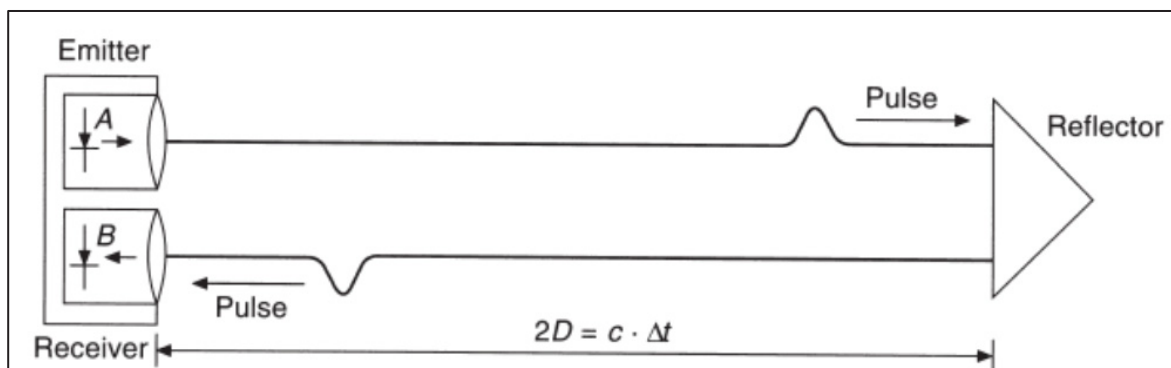


Figure 2.17 Principe de mesure de distance par impulsion laser. La distance entre le capteur et la surface est déterminée à partir du temps de trajet aller-retour du signal émis et réfléchi par la cible

Tiré de Schofield et Breach (2007)

Les modes fixes de collecte de données reposent sur des systèmes maintenus dans une position stationnaire pendant l'acquisition. Dans le cas des scanners laser, cette configuration est désignée par le terme *terrestrial laser scanning (TLS)*, ou *LiDAR terrestre*. Généralement installés sur un trépied, ces instruments acquièrent les données depuis une position fixe au sol (Lichti, 2002 ; Vosselman & Maas, 2010 ; Telling et al., 2017).

Le scanner émet des impulsions laser vers les surfaces environnantes et balaie la scène selon des rotations horizontales et verticales. Cette acquisition permet de produire des nuages de points tridimensionnels denses décrivant avec précision la géométrie des surfaces observées. Selon la distance d'acquisition, les caractéristiques de l'instrument et les conditions de levé, la résolution spatiale obtenue peut varier de l'ordre du millimètre à celui du centimètre (Slob & Hack, 2004 ; Telling et al., 2017).

Le TLS constitue un outil particulièrement adapté à l'analyse détaillée des parois rocheuses, notamment pour l'identification des plans structuraux, des surplombs, des ruptures localisées et des zones de fracturation. Les nuages de points issus du TLS peuvent être utilisés pour extraire des plans, mesurer le pendage et la direction de pendage, estimer la persistance apparente des structures et comparer plusieurs acquisitions dans le temps. Plusieurs études ont

montré que le TLS constitue un complément important aux levés structuraux traditionnels, car il permet d'échantillonner des surfaces plus larges et parfois inaccessibles, tout en réduisant les risques liés à l'inspection directe des parois instables (Sturzenegger & Stead, 2009; Jaboyedoff et al., 2012; Battulwar et al., 2021). La Figure 2.18 présente un exemple de scanner LiDAR terrestre couramment utilisé en ingénierie.

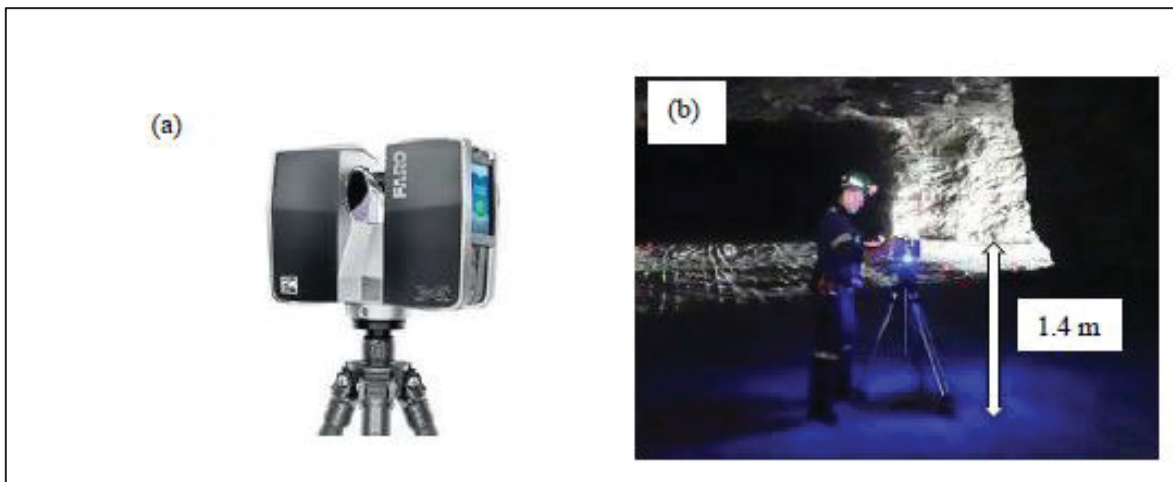


Figure 2.18 Exemple de scanner LiDAR terrestre (TLS) : (a) scanner FARO X-130 ; (b) scanner X-130 en utilisation dans une mine de sel souterraine

Tiré de J. D. Aubertin (2020)

L'un des avantages majeurs du TLS réside dans la stabilité géométrique de l'acquisition : comme le capteur demeure immobile pendant la mesure, la reconstruction de trajectoire n'est pas nécessaire, et l'incertitude de positionnement est principalement contrôlée par la calibration du scanner et la qualité de l'installation sur station (Telling et al., 2017). Les systèmes fixes permettent également de répéter des acquisitions depuis une même position, ce qui est particulièrement avantageux pour le suivi temporel et la détection de changements. Le TLS présente toutefois certaines limites. Les zones masquées par la géométrie de la paroi, les surplombs, les irrégularités de surface ou les objets présents devant la paroi peuvent créer des occlusions dans le nuage de points. La densité des points dépend également de la distance au scanner et de l'angle devient défavorable, l'empreinte du faisceau sur la surface s'allonge, ce qui peut augmenter l'incertitude de positionnement et réduire la fiabilité de l'interprétation

locale (Lague et al., 2013; Shan & Toth, 2018). Ces effets peuvent influencer la qualité de l'extraction structurale et la détection des formes morphologiques fines.

À l'opposé des systèmes fixes, les modes aéroportés correspondent à des capteurs montés sur des plateformes en mouvement, telles que des avions ou des véhicules aériens sans pilote (unmanned aerial vehicles, UAV). Dans cette configuration, les données sont acquises en continu le long d'une trajectoire de vol, ce qui permet de couvrir rapidement de grandes surfaces difficilement accessibles par des systèmes terrestres (McKean & Roering, 2004; Vosselman & Maas, 2010; Casagli et al., 2017; Telling et al., 2017). Comme le capteur est mobile pendant l'acquisition, la position et l'orientation de la plateforme doivent être déterminées avec précision à chaque instant, généralement au moyen de systèmes GNSS et d'unités de mesure inertielle (IMU), afin d'assurer le géoréférencement direct des données (Vosselman & Maas, 2010; Giordan et al., 2018; Telling et al., 2017).

Le LiDAR aéroporté embarqué sur avion piloté, souvent désigné par airborne laser scanning (ALS), est largement utilisé pour la cartographie régionale et la modélisation topographique à grande échelle (McKean & Roering, 2004; Vosselman & Maas, 2010). Toutefois, ces systèmes opèrent généralement à plus haute altitude, ce qui peut réduire la résolution spatiale et la précision géométrique par rapport aux plateformes de plus basse altitude. De plus, les acquisitions sur avion piloté sont souvent plus coûteuses et moins flexibles sur le plan opérationnel (Klemas, 2015).

Les systèmes UAV-LiDAR constituent une alternative particulièrement intéressante pour les applications géotechniques et la caractérisation des parois rocheuses. En volant à basse altitude et à faible vitesse, ils permettent de produire des nuages de points denses et de documenter des surfaces complexes ou difficiles d'accès plus efficacement que certaines plateformes aéroportées conventionnelles (Colomina & Molina, 2014; Resop et al., 2019). Ils sont particulièrement adaptés aux carrières, falaises et fronts rocheux, car ils permettent d'acquérir des points de vue obliques ou aériens qui complètent les observations terrestres et améliorent la couverture des surfaces subverticales. La Figure 2.19 illustre un exemple de plateforme

UAV équipée d'un système LiDAR et le principe d'acquisition de données tridimensionnelles par balayage laser aéroporté.

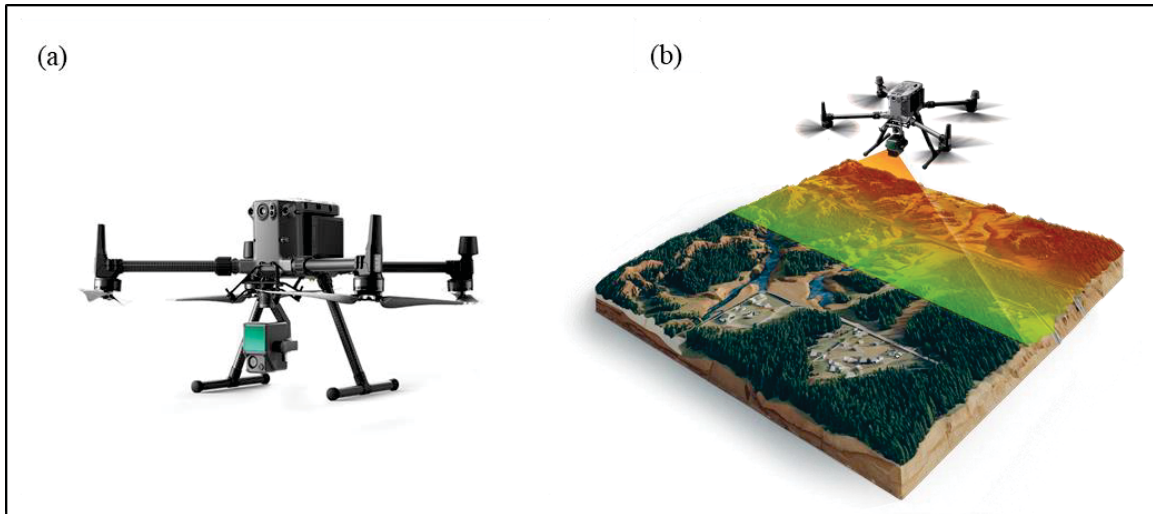


Figure 2.19 Exemple de système UAV-LiDAR utilisé pour l'acquisition de données tridimensionnelles : (a) drone équipé d'un capteur LiDAR ; (b) principe d'acquisition LiDAR aéroportée pour la génération de nuages de points

Les acquisitions UAV offrent ainsi une meilleure couverture globale du site et permettent d'observer des secteurs élevés, obliques ou difficilement accessibles. Elles demeurent toutefois soumises à plusieurs contraintes. La capacité d'emport limite la taille et la configuration des capteurs, tandis que l'autonomie des batteries restreint la durée des vols et l'étendue des levés (Colomina & Molina, 2014; Mohsan et al., 2023). La qualité des données dépend également de la précision du géoréférencement, de la qualité de la trajectoire GNSS/IMU, des conditions de vol et, dans certains environnements, de la visibilité satellitaire (Elamin et al., 2022; Resop et al., 2019). Lorsqu'un capteur photographique est utilisé plutôt qu'un LiDAR, la qualité de la reconstruction dépend en plus du recouvrement des images, de l'éclairage et de la texture des surfaces (Westoby et al., 2012).

Dans l'ensemble, les modes fixes et aéroportés doivent être considérés comme complémentaires. Le TLS fournit une précision locale élevée et une excellente stabilité

géométrique, mais il reste limité par les occlusions et par sa couverture spatiale restreinte. À l'inverse, les acquisitions aéroportées, en particulier sur UAV, permettent une couverture plus étendue et une meilleure observation des secteurs élevés ou masqués, au prix d'une plus grande sensibilité aux conditions de vol et au géoréférencement. En contexte de carrière ou de paroi rocheuse complexe, l'intégration des approches terrestres et aériennes constitue donc une stratégie particulièrement pertinente, car elle combine couverture spatiale, précision géométrique et flexibilité opérationnelle (Battulwar et al., 2021; Giordan et al., 2018; Jaboyedoff et al., 2012).

2.4.2 Photogrammétrie et reconstruction Structure-from-Motion

La photogrammétrie est une technique passive qui permet de reconstruire la géométrie tridimensionnelle d'une surface à partir d'images acquises depuis plusieurs points de vue. Elle repose sur l'identification de points homologues visibles sur plusieurs images, puis sur la triangulation de leur position dans l'espace. Le principe général consiste à déterminer la position tridimensionnelle d'un point à partir de l'intersection de plusieurs rayons de projection issus de positions de caméra différentes (Mikhail et al., 2001; Schofield et al., 2007; Westoby et al., 2012).

La Figure 2.20 illustre les principes géométriques de la photogrammétrie. Elle montre le rôle des paramètres internes de la caméra, de la distance focale, du positionnement relatif des images et de la triangulation dans la reconstruction tridimensionnelle.

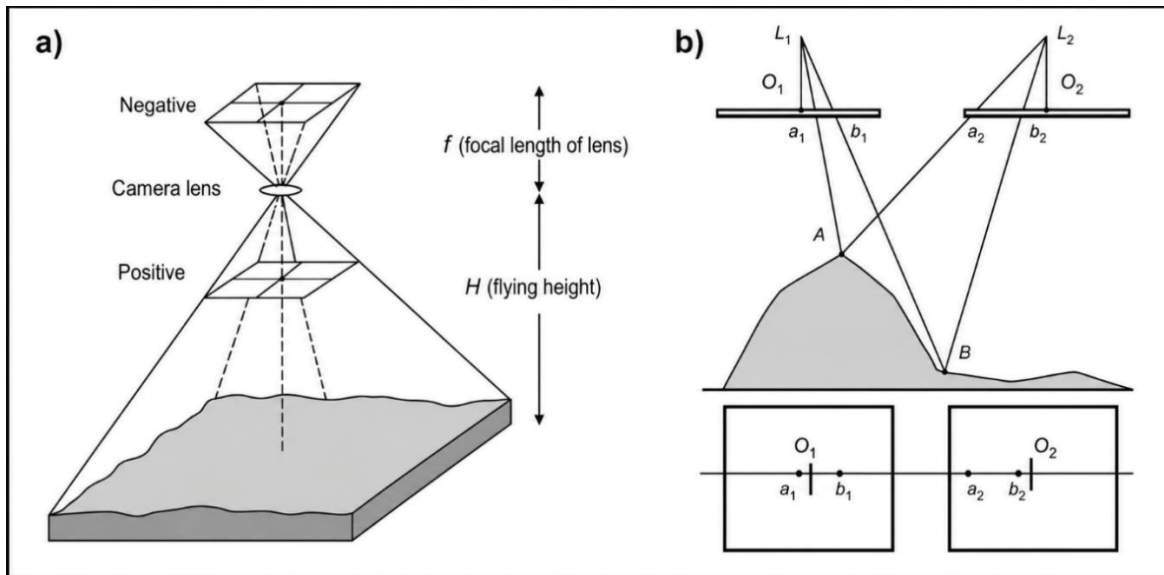


Figure 2.20 Principe de la photogrammétrie : (a) géométrie de la caméra et paramètres internes pour le calcul des distances; (b) positionnement relatif des images et triangulation pour la reconstruction tridimensionnelle

Tiré de J. D. Aubertin (2020)

Les approches récentes de photogrammétrie reposent largement sur la méthode Structure-from-Motion, ou SfM. Cette méthode permet d'estimer simultanément la position des caméras et la structure tridimensionnelle de la scène à partir d'un ensemble d'images se chevauchant. Le traitement comprend généralement la détection de points caractéristiques, l'appariement de ces points entre les images, l'ajustement de faisceaux et la densification du nuage de points (Snavely et al., 2008; Westoby et al., 2012). Cette approche a fortement contribué à démocratiser la production de modèles 3D en géosciences, notamment grâce à l'utilisation d'appareils photographiques numériques et de plateformes UAV.

En ingénierie géologique, la photogrammétrie SfM constitue un outil utile pour la cartographie structurale virtuelle des affleurements et des parois rocheuses. Les modèles obtenus peuvent être texturés, ce qui facilite l'interprétation visuelle des lithologies, des discontinuités, des zones altérées, des traces d'humidité et des contacts lithologiques. Plusieurs travaux ont montré que la photogrammétrie et le TLS peuvent fournir des informations comparables pour la

caractérisation des discontinuités, à condition que la qualité des images, la géométrie d'acquisition et le géoréférencement soient suffisamment contrôlés (James & Robson, 2012; Sturzenegger & Stead, 2009; Westoby et al., 2012).

La photogrammétrie présente cependant des limites spécifiques. Elle dépend fortement de la texture des surfaces, de l'éclairage, du contraste des images, du recouvrement entre les prises de vue et de la qualité du géoréférencement. Les surfaces homogènes, mouillées, fortement ombragées ou peu texturées peuvent réduire la qualité de la reconstruction. Des erreurs de correspondance entre images peuvent également créer des artefacts géométriques ou des zones incomplètes. Malgré ces limites, la photogrammétrie demeure une méthode complémentaire au LiDAR, en particulier lorsqu'une information visuelle texturée est nécessaire pour interpréter les formes morphologiques et les indices d'altération visibles sur les parois.

2.4.3 Prétraitement et manipulation des nuages de points

Les acquisitions LiDAR et photogrammétriques produisent des nuages de points tridimensionnels qui représentent la géométrie des surfaces étudiées sous forme d'un ensemble dense de points. Chaque point est défini par des coordonnées spatiales et peut, selon le capteur utilisé, contenir des attributs complémentaires tels que l'intensité du signal, la couleur RGB ou le numéro de retour. La Figure 2.21 présente un exemple de nuage de points obtenu à partir d'un levé UAV pour la modélisation tridimensionnelle de la topographie. Ce type de représentation montre l'intérêt des acquisitions aériennes pour couvrir de grandes surfaces et produire une base géométrique exploitable pour l'analyse des parois rocheuses.



Figure 2.21 Nuage de points obtenu à partir d'un levé UAV pour la modélisation tridimensionnelle de la topographie

Tiré de J. D. Aubertin (2020)

Cependant, un nuage de points brut ne constitue pas directement une interprétation géologique ou géotechnique. Les données acquises peuvent contenir du bruit, des points aberrants, des artefacts liés au capteur, des zones masquées, des surfaces non rocheuses ou des éléments transitoires tels que la végétation, la neige, l'eau ou les dépôts meubles. Le prétraitement constitue donc une étape essentielle pour améliorer la qualité des données et préparer leur utilisation dans les analyses structurales, morphologiques ou temporelles.

Les opérations de prétraitement comprennent généralement le nettoyage du nuage de points, la suppression des points aberrants, le filtrage des surfaces non pertinentes, l'alignement des jeux de données et le sous-échantillonnage. Le sous-échantillonnage permet de réduire le volume de données tout en conservant les caractéristiques géométriques nécessaires à l'analyse. Il est particulièrement utile dans les levés de grande dimension, où la densité des points peut être très élevée et où les temps de calcul deviennent importants. Toutefois, cette opération doit être réalisée avec prudence afin de ne pas supprimer des détails morphologiques importants, comme les petits surplombs, les ruptures de pente, les traces de discontinuités ou les surfaces altérées.

La qualité et la représentativité d'un nuage de points dépendent également du mode d'acquisition et de la géométrie d'observation. Les levés terrestres peuvent offrir une grande précision locale, mais ils sont souvent affectés par des occlusions liées au point de vue au sol, à la géométrie de la paroi ou à la présence d'obstacles. À l'inverse, les acquisitions UAV et les reconstructions photogrammétriques permettent généralement une couverture plus complète des surfaces élevées, obliques ou difficilement accessibles.

Dans les études impliquant plusieurs acquisitions, le prétraitement vise également à établir une cohérence entre les jeux de données. Les différences de densité, de couverture, de bruit et de géométrie d'acquisition peuvent influencer la comparaison entre secteurs ou entre dates. L'alignement spatial et le contrôle de qualité sont donc essentiels pour éviter que des variations liées au traitement soient interprétées comme des différences géologiques ou morphologiques réelles. Ces précautions sont particulièrement importantes lorsque les nuages de points servent à cartographier des formes d'instabilité apparente ou à comparer la distribution spatiale des indices morphologiques sur différentes parois.

2.4.4 Classification géométrique multiscalaire des nuages de points

Les nuages de points acquis dans les environnements naturels contiennent généralement plusieurs types de surfaces et d'objets. Dans le cas des parois rocheuses, les données peuvent représenter simultanément la roche en place, la végétation, les dépôts meubles, les blocs détachés, les surfaces d'eau et différents artefacts associés aux conditions d'acquisition. Avant de procéder aux analyses géométriques et structurales, il est donc souvent nécessaire de distinguer les éléments appartenant réellement à la surface rocheuse de ceux susceptibles de perturber l'interprétation.

La segmentation et la classification constituent deux opérations complémentaires permettant de structurer cette information tridimensionnelle. La segmentation vise à regrouper les points en entités présentant des propriétés géométriques similaires, tandis que la classification consiste à attribuer une catégorie à chaque point ou groupe de points. Ces traitements

permettent de transformer un nuage de points initialement non structuré en un ensemble de surfaces ou d'objets interprétables, notamment des plans de discontinuité, des blocs, des dépôts meubles ou des éléments végétaux (Dewez et al., 2016; Riquelme et al., 2014).

Dans les applications géotechniques, la qualité de cette séparation influence directement le calcul des normales, l'estimation de la rugosité, l'extraction des orientations et la cartographie structurale virtuelle. La présence de végétation ou d'objets non rocheux peut notamment introduire des distributions locales de points ne correspondant pas à la géométrie réelle du massif et conduire à des orientations ou à des surfaces artificielles.

2.4.4.1 Segmentation géométrique des nuages de points

Les méthodes classiques de segmentation reposent principalement sur l'analyse des propriétés géométriques locales du nuage de points. Elles utilisent notamment l'orientation des normales, la courbure, la distance entre les points et leur degré de coplanarité. Les points possédant des caractéristiques semblables peuvent ainsi être regroupés afin de former des surfaces géométriquement homogènes.

Les méthodes de croissance de régions regroupent progressivement les points voisins lorsque leurs normales présentent des orientations comparables et que leur distance par rapport à une surface ajustée respecte des seuils préétablis. Les algorithmes de type RANSAC permettent également de rechercher des formes géométriques dominantes, notamment des plans, tout en limitant l'influence des points aberrants.

Riquelme et al. (2014) ont proposé une approche semi-automatique permettant de reconnaître les surfaces planes associées aux discontinuités à partir de tests de coplanarité entre points voisins, d'une estimation des orientations principales et d'un regroupement spatial des points. Ces méthodes contribuent à l'extraction des familles de discontinuités et à la caractérisation géométrique des massifs rocheux à partir de nuages de points 3D.

Dans une approche comparable, Dewez et al. (2016) ont développé le module FACETS dans CloudCompare afin de segmenter les nuages de points non structurés en facettes planes et d'en calculer la direction et le pendage. Cette méthode repose sur la subdivision du nuage en cellules élémentaires, suivie de l'agrégation progressive des objets planaires selon un critère de planéité. Elle facilite ainsi l'extraction et la représentation stéréographique des surfaces géologiques visibles dans les modèles tridimensionnels.

La performance de ces approches dépend toutefois des seuils retenus, de la densité du nuage, du niveau de bruit et de la complexité géométrique des surfaces. Les parois rocheuses naturelles présentent rarement une géométrie parfaitement plane ou homogène. Les bordures de blocs, les surplombs, les surfaces altérées et les secteurs fortement fracturés peuvent donc être difficiles à traiter au moyen d'un critère géométrique unique.

2.4.4.2 Dimensionnalité locale et analyse multiscalaire

La dimensionnalité locale décrit la manière dont les points sont distribués autour d'une position donnée dans le nuage. Elle est généralement évaluée à partir d'une analyse en composantes principales appliquée aux coordonnées des points compris dans un voisinage local. Cette analyse produit trois valeurs propres associées aux principales directions de variation de la distribution spatiale. Leurs amplitudes relatives permettent de distinguer une organisation principalement linéaire, planaire ou volumique, respectivement associée à des comportements géométriques de type 1D, 2D et 3D (Brodu & Lague, 2012).

Une analyse réalisée à une seule échelle demeure toutefois insuffisante pour caractériser certains objets naturels complexes. La géométrie perçue dépend en effet de la taille du voisinage utilisé. Une branche peut apparaître linéaire à petite échelle, alors qu'un ensemble de branches et de feuilles adopte une organisation volumique lorsqu'un voisinage plus large est considéré. De manière similaire, une surface rocheuse rugueuse peut présenter localement une géométrie irrégulière, tout en conservant une organisation globalement planaire à une échelle plus grande.

L'analyse multiscalaire consiste donc à répéter le calcul de la dimensionnalité locale pour plusieurs tailles de voisinage. Elle permet de suivre l'évolution de la signature géométrique de chaque objet en fonction de l'échelle d'observation. Comme l'illustre la Figure 2.22, les principales composantes d'une scène naturelle, telles que la végétation, le substrat rocheux, les graviers et l'eau, occupent des domaines de dimensionnalité distincts et présentent des évolutions différentes lorsque la taille du voisinage augmente. La végétation tend notamment à développer une signature davantage volumique aux grandes échelles, alors que le substrat rocheux conserve une organisation principalement planaire. Les graviers et les surfaces d'eau présentent quant à eux des comportements intermédiaires qui varient selon leur organisation spatiale et l'échelle considérée (Brodu & Lague, 2012).

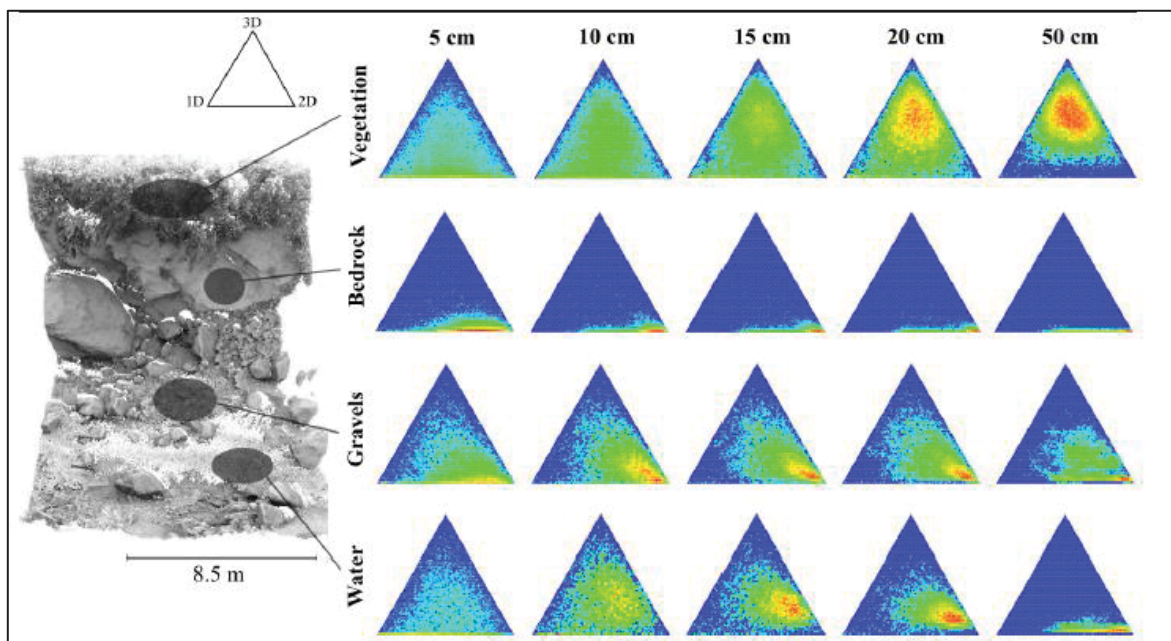


Figure 2.22 Évolution multiscalaire de la dimensionnalité locale de différentes composantes d'une scène naturelle. Les diagrammes ternaires représentent la distribution des signatures géométriques de la végétation, du substrat rocheux, des graviers et de l'eau pour des échelles comprises entre 5 et 50 cm. Les sommets des diagrammes correspondent aux comportements géométriques linéaire (1D), planaire (2D) et volumique (3D)

Tiré de Brodu et Lague (2012)

2.4.4.3 Classification supervisée avec CANUPO

Brodu et Lague (2012) ont développé une méthode de classification supervisée fondée sur l'analyse multiscalaire de la dimensionnalité locale. Cette méthode, mise en œuvre dans CANUPO, a été conçue pour traiter directement des scènes tridimensionnelles naturelles présentant des géométries complexes, des objets de dimensions variables et des distributions de points hétérogènes.

Le principe repose sur la sélection préalable d'échantillons représentatifs des classes que l'utilisateur souhaite distinguer. Les signatures géométriques multiscalaires de ces échantillons sont calculées, puis comparées afin de déterminer une direction discriminante maximisant leur séparation. Une frontière de décision est ensuite construite dans l'espace des descripteurs et utilisée pour attribuer une classe aux autres points du nuage (Brodu & Lague, 2012).

CANUPO se distingue des méthodes fondées uniquement sur la couleur ou sur l'intensité du signal LiDAR. La classification repose principalement sur l'organisation spatiale des points, ce qui permet de différencier des objets présentant des couleurs semblables ou des apparences variables selon les conditions d'éclairage, d'humidité ou d'acquisition. La méthode peut ainsi être appliquée à des nuages de points non colorisés ou lorsque les informations RGB sont insuffisantes pour établir une séparation fiable.

La Figure 2.23 illustre un exemple complet du processus de classification appliqué à un nuage de points représentant une scène naturelle. La Figure 2.23a montre la scène tridimensionnelle initiale. La Figure 2.23b présente une première classification par défaut, dans laquelle plusieurs classes sont distinguées, notamment la végétation, le substrat rocheux, les graviers et l'eau. La Figure 2.23c montre ensuite une classification améliorée par l'utilisateur, tandis que la Figure 2.23d présente les points demeurés non classés. Cet exemple met en évidence la capacité de CANUPO à traiter des scènes complexes et à discriminer plusieurs catégories d'objets à partir de leurs signatures géométriques multiscalaires (Brodu & Lague, 2012).

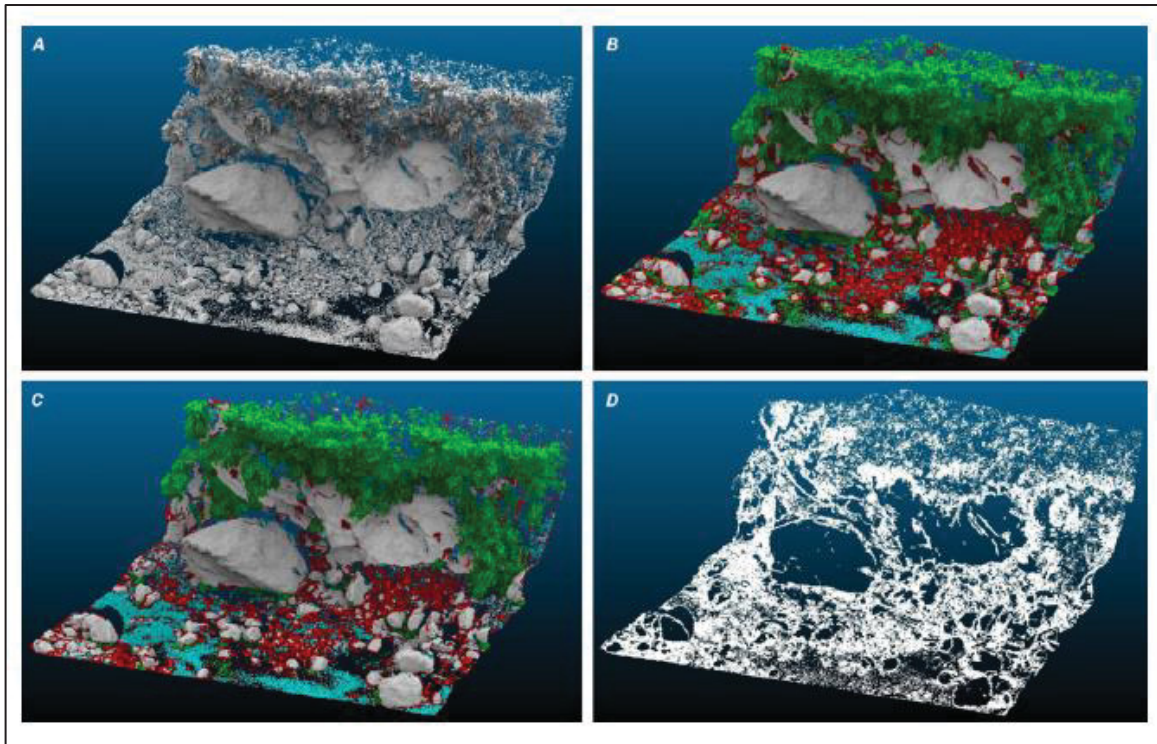


Figure 2.23 Exemple du processus de classification supervisée multiscalaire avec CANUPO appliqué à une scène naturelle : (a) scène tridimensionnelle initiale; (b) classification par défaut distinguant notamment la végétation, le substrat rocheux, les graviers et l’eau; (c) classification améliorée par l’utilisateur; (d) points demeurés non classés.

Tiré de Brodu et Lague (2012)

Cette figure montre également que la classification n’est pas entièrement automatique au sens d’un traitement aveugle. Le résultat peut être affiné par l’utilisateur afin d’améliorer la cohérence des classes produites, en particulier dans les zones de transition ou dans les portions du nuage où les signatures géométriques sont partiellement ambiguës. La présence de points non classés rappelle aussi qu’une partie des données peut rester proche de la frontière de décision ou ne pas être attribuée avec un niveau de confiance suffisant.

Dans le cas de la séparation entre végétation et roche, l’intérêt de CANUPO tient au fait que les surfaces rocheuses conservent généralement une organisation surtout plane aux échelles

locales et intermédiaires, tandis que la végétation tend à présenter une organisation plus hétérogène et plus volumique, en raison de l'enchevêtrement des feuilles, des tiges et des branches. L'exploitation simultanée de plusieurs échelles améliore ainsi la séparabilité des classes par rapport à une analyse réalisée à échelle unique (Brodu & Lague, 2012).

La qualité du résultat demeure toutefois dépendante de plusieurs facteurs, notamment de la représentativité des classes d'apprentissage, du choix des échelles, de la densité du nuage de points et de la complexité géométrique de la scène. Certaines surfaces rocheuses très fracturées, des bordures de blocs ou des objets partiellement végétalisés peuvent présenter des signatures intermédiaires et conduire à des erreurs ou à des ambiguïtés de classification. Dans ce contexte, une vérification visuelle et, au besoin, une correction manuelle demeurent souvent nécessaires.

Dans le cadre de la présente recherche, CANUPO est utilisé selon une approche plus ciblée, dans le but de préfiltrer la végétation avant les analyses géométriques des parois rocheuses. Les modalités d'apprentissage, les paramètres retenus, la validation du classificateur et son application aux données de la carrière Francon sont présentés au chapitre 4.

2.4.4.4 Apports et limites pour la caractérisation des parois rocheuses

Dans l'étude des parois rocheuses, la classification multiscalaire peut constituer une étape de prétraitement avant les analyses structurales et morphologiques. Le retrait de la végétation réduit le risque que les feuilles, les branches ou les amas végétaux influencent le calcul des normales, soient assimilés à des surfaces rocheuses ou génèrent des orientations sans signification géologique.

Cette opération améliore également la visibilité des bancs, des discontinuités, des surplombs, des ruptures de pente et des surfaces altérées. Elle peut ainsi faciliter la sélection des portions pertinentes pour la cartographie structurale virtuelle et réduire le volume de segmentation manuelle nécessaire. Brodu et Lague 2012 soulignent notamment l'intérêt de la classification

géométrique pour séparer la végétation des surfaces rocheuses, des graviers ou des surfaces d'eau dans des scènes naturelles complexes.

CANUPO ne constitue toutefois pas une méthode entièrement autonome ou universelle. Sa performance dépend notamment de la qualité et de la densité des données, du choix des échelles, de la taille des objets, de la représentativité des classes d'apprentissage et de la complexité géométrique de la scène.

Certaines surfaces rocheuses peuvent présenter une signature proche de celle de la végétation. C'est notamment le cas des bordures de blocs, des surplombs, des secteurs très fracturés ou des portions caractérisées par une densité de points réduite. Inversement, des branches isolées, une végétation clairsemée ou des éléments plaqués contre la paroi peuvent présenter localement une organisation relativement planaire et être confondus avec la roche.

Une inspection visuelle et, au besoin, une correction manuelle demeurent donc nécessaires. Dans les applications géotechniques, la classification multiscalaire doit être considérée comme une étape de préfiltrage permettant de réduire le volume de données à traiter, plutôt que comme un remplacement complet de l'expertise de l'opérateur.

Dans cette recherche, CANUPO est utilisé pour préfiltrer la végétation avant les traitements géométriques des modèles tridimensionnels de la carrière Francon. Les classes d'apprentissage, les échelles retenues, les paramètres du classificateur, sa validation indépendante et son application aux nuages de points sont présentés au chapitre 4.

2.4.5 Descripteurs géométriques dérivés des nuages de points

L'interprétation des nuages de points repose sur l'extraction de descripteurs géométriques capables de traduire la morphologie des surfaces et les caractéristiques structurales du massif rocheux. Comme les nuages de points représentent des échantillons discrets d'une surface continue, ces descripteurs sont généralement calculés à partir de voisinages locaux ou

régionaux. Ils permettent de transformer les coordonnées brutes en informations utiles pour l'analyse des discontinuités, des surfaces planes, des ruptures de pente et des morphologies associées aux instabilités.

L'un des descripteurs géométriques les plus fondamentaux d'un nuage de points est la normale de surface. Elle représente l'orientation locale d'une surface et est généralement estimée par l'ajustement d'un plan aux points voisins d'un point donné, à l'intérieur d'un rayon de recherche ou selon un nombre prédéfini de voisins. La normale obtenue correspond à la direction perpendiculaire au plan local ajusté. La Figure 2.24 illustre le principe d'estimation d'une normale locale à partir d'un voisinage de points et de l'ajustement d'un plan de meilleure concordance.

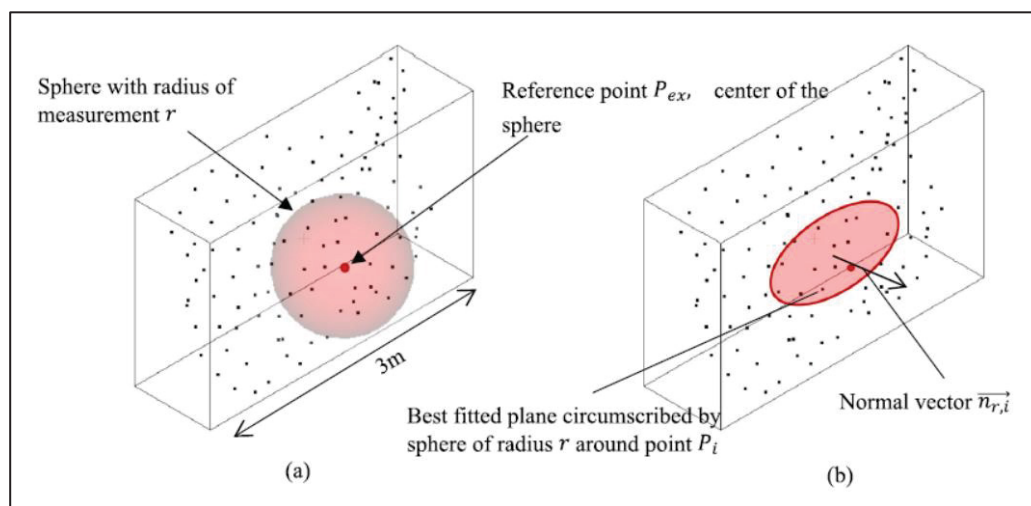


Figure 2.24 Principe d'estimation d'une normale de surface locale dans un nuage de points :
(a) définition du voisinage autour d'un point de référence ; (b) ajustement d'un plan local et
calcul du vecteur normal associé

Tiré de Aubertin et Hutchinson (2022)

Les normales de surface permettent de produire des cartes d'orientation à l'échelle des parois. Elles constituent un support essentiel pour l'identification des surfaces planes, la détection de changements d'orientation et la reconnaissance des discontinuités structurales. Les

regroupements de normales ou de pôles peuvent révéler des familles de plans dominantes, tandis que les variations locales d'orientation peuvent signaler des ruptures de pente, des zones fracturées ou des transitions entre unités morphologiques.

Les mesures de courbure et les changements locaux d'orientation peuvent également compléter cette caractérisation. Elles permettent d'identifier des arêtes, des ruptures de pente, des bordures de blocs, des cicatrices de rupture ou des transitions entre surfaces morphologiques. Cependant, ces descripteurs sont sensibles au bruit, à la densité des points et au choix de l'échelle de calcul, ce qui impose une interprétation prudente.

Ainsi, les normales de surface, les cartes d'orientation et les variations locales de géométrie constituent des informations utiles pour passer d'un nuage de points brut à une lecture géotechnique de la paroi. Combinées à l'observation visuelle, aux images RGB et aux connaissances géologiques, elles permettent d'appuyer l'identification des discontinuités, des surfaces structurales et des indices morphologiques d'instabilité.

Cette lecture géométrique repose en grande partie sur le principe du plan de meilleur ajustement, qui permet d'approximer un ensemble de points par une surface plane représentative. Ce principe intervient à la fois dans l'estimation des normales locales et dans la détermination d'orientations moyennes à l'échelle d'une portion de paroi. Il constitue donc un lien méthodologique entre les descripteurs locaux dérivés des nuages de points et leur utilisation pour l'analyse structurale et cinématique des parois rocheuses.

Le concept de plan de meilleur ajustement constitue une base importante pour l'extraction de plusieurs descripteurs géométriques à partir des nuages de points. Comme un nuage de points représente une surface réelle sous forme discrète, il est souvent nécessaire d'approximer localement ou régionalement cette surface par une géométrie simple. Le plan de meilleur ajustement correspond alors au plan qui représente le mieux un ensemble de points, en

minimisant globalement les écarts entre les points sélectionnés et la surface plane ajustée (Fernández, 2005; Gallo et al., 2018; Rusu, 2010).

Ce principe peut être décrit à partir d'un ensemble de points recentrés autour de leur centroïde. La distribution des points est analysée afin d'identifier les principales directions d'extension du nuage. Les deux directions associées à la plus grande dispersion définissent le plan ajusté, tandis que la direction de plus faible dispersion correspond au vecteur normal au plan. La Figure 2.25 illustre ce principe : le plan de meilleur ajustement passe par le centre du nuage de points, alors que le vecteur normal représente la direction perpendiculaire à ce plan (Woodcock, 1977 ; Fernández, 2005 ; Gallo et al., 2018).

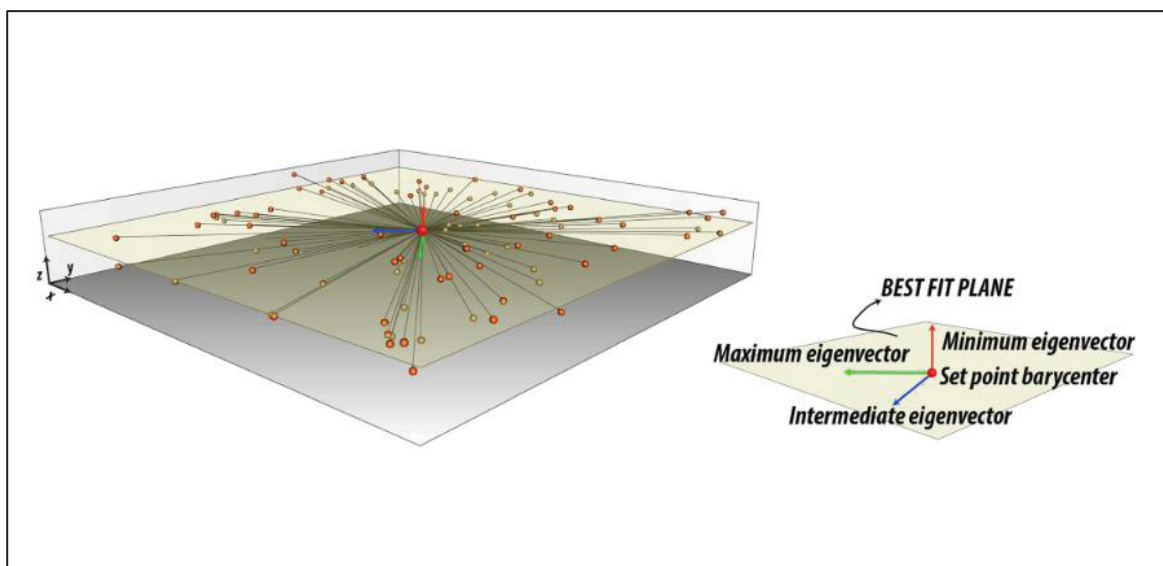


Figure 2.25 Principe du plan de meilleur ajustement appliqué à un nuage de points. Le plan ajusté passe par le centroïde du nuage et est défini par les deux directions principales de dispersion maximale. Le vecteur propre associé à la plus faible dispersion correspond à la normale du plan

Adapté de Gallo et al. (2018)

Dans un espace tridimensionnel, un plan peut être exprimé sous la forme générale suivante :

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2.8)$$

Où (a) , (b) et (c) correspondent aux composantes du vecteur normal au plan, tandis que (d) définit la position du plan dans l'espace. Dans le contexte des nuages de points, l'ajustement du plan vise donc à déterminer une orientation moyenne représentative de la distribution spatiale des points sélectionnés.

Ce principe est directement lié à l'estimation des normales de surface. Pour un point donné, un voisinage local est défini à partir d'un rayon de recherche ou d'un nombre prédéfini de voisins. Un plan de meilleur ajustement est ensuite calculé à partir des points de ce voisinage. La normale locale correspond à la direction perpendiculaire à ce plan. Cette approche permet de transformer une distribution discrète de points en une information d'orientation locale, utile pour produire des cartes d'orientation, identifier des surfaces planes et reconnaître des discontinuités structurales dans les parois rocheuses (Rusu, 2010; Rusu & Cousins, 2011; Aubertin & Hutchinson, 2022).

Le même principe peut également être appliqué à une échelle plus large. Au lieu d'ajuster un plan à un voisinage local autour d'un point, il est possible d'ajuster un plan moyen à une portion représentative d'une paroi rocheuse. Dans ce cas, le plan de meilleur ajustement ne décrit pas une discontinuité individuelle, mais l'orientation moyenne d'un front rocheux ou d'un secteur de paroi. Les paramètres dérivés du plan, notamment le pendage et la direction de pendage, peuvent ensuite être utilisés comme données géométriques d'entrée pour des analyses structurales ou cinématiques.

L'interprétation d'un plan de meilleur ajustement dépend toutefois de la distribution des points et de l'échelle d'analyse. Lorsque les points sont bien répartis sur une surface quasi plane, l'orientation du plan ajusté est généralement mieux contrainte. À l'inverse, lorsque les points sont fortement alignés, dispersés ou répartis sur plusieurs surfaces adjacentes, l'orientation obtenue peut devenir moins représentative. Gallo et al. (2018) soulignent ainsi que la fiabilité d'un plan de meilleur ajustement dépend fortement de la géométrie du nuage de points et de la manière dont les points occupent l'espace.

Ainsi, le plan de meilleur ajustement doit être interprété comme une approximation géométrique dépendante de l'échelle, de la densité, du bruit et de la distribution spatiale des points. Cette limite est particulièrement importante dans les parois rocheuses naturelles, où les discontinuités, les arêtes, les surplombs et les zones fracturées produisent des géométries complexes.

Dans ce mémoire, le concept de plan de meilleur ajustement est mobilisé à deux niveaux. À l'échelle locale, il sert à estimer les normales de surface et à produire des cartes d'orientation des parois rocheuses. À l'échelle des secteurs d'analyse, il permet de déterminer l'orientation moyenne des fronts rocheux à partir des modèles 3D. Cette distinction est essentielle, car l'orientation moyenne d'une paroi ne doit pas être confondue avec l'orientation d'une discontinuité structurale individuelle.

2.4.6 Cartographie structurale virtuelle à partir des modèles 3D

Les modèles 3D issus du LiDAR et de la photogrammétrie permettent de réaliser une cartographie structurale virtuelle des parois rocheuses. Cette approche consiste à identifier et mesurer les discontinuités directement sur le nuage de points ou sur une surface reconstruite. Elle permet de caractériser l'orientation, l'espacement, la continuité apparente et la distribution spatiale des plans structuraux, tout en réduisant les contraintes de sécurité associées aux levés directs au compas-clinomètre (Sturzenegger & Stead, 2009; M. J. Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014).

La cartographie structurale virtuelle peut être réalisée selon plusieurs niveaux d'automatisation. L'interprétation manuelle repose sur l'identification visuelle des plans de discontinuité par un opérateur, qui sélectionne des zones planes et ajuste des plans représentatifs. Cette méthode reste proche de l'expertise géologique de terrain et permet de tenir compte du contexte structural local. Elle peut toutefois être chronophage et dépendre de l'expérience de l'opérateur, surtout lorsque la paroi est complexe ou très étendue.

Les méthodes semi-automatiques et automatiques visent à extraire les discontinuités à partir des propriétés géométriques locales du nuage de points. Elles reposent généralement sur le calcul des normales de surface, l'ajustement de plans locaux et le regroupement des points en facettes coplanaires. Des méthodes telles que RANSAC, la croissance de régions ou les algorithmes de regroupement permettent d'identifier des surfaces planes dominantes et de les classer en familles structurales (M. Lato et al., 2009; M. J. Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014). La Figure 2.26 montre un exemple de nuage de points d'un affleurement rocheux et la superposition de plans de discontinuités identifiés sur la surface analysée.

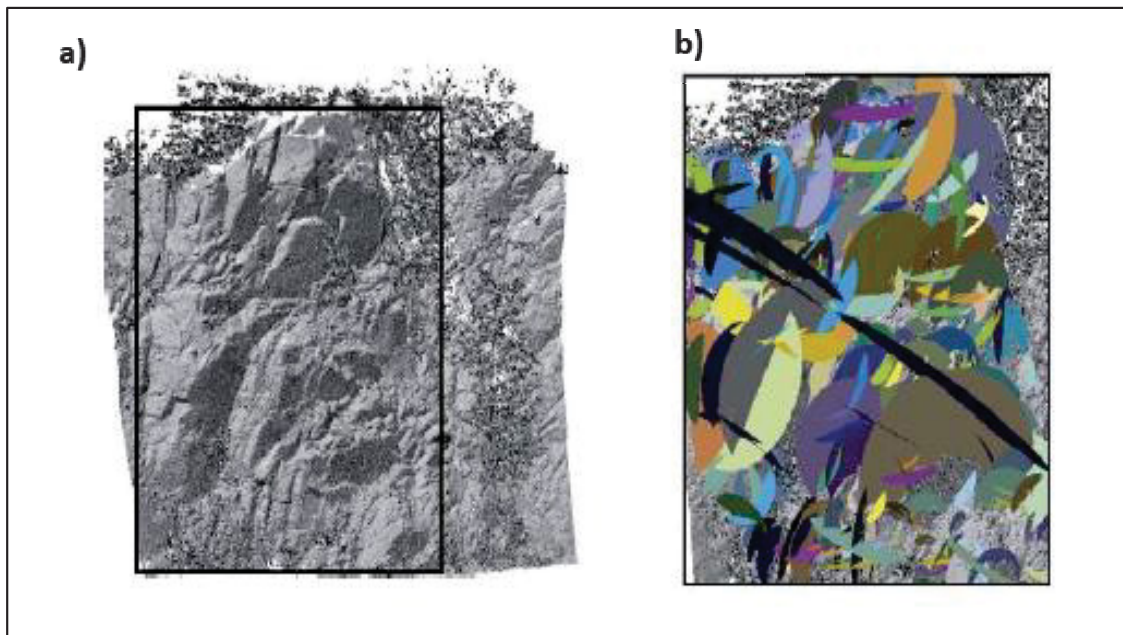


Figure 2.26 (a) Nuage de points tridimensionnel d'un affleurement rocheux et (b) superposition des familles de discontinuités représentées par des plans circulaires caractérisés par leur pendage et leur direction

Tiré de Sturzenegger et Stead (2009)

Ces méthodes permettent de produire des bases de données structurales plus denses que les levés traditionnels. Elles facilitent l'identification des familles de joints, la comparaison entre secteurs, l'analyse statistique des orientations et l'intégration des résultats dans des analyses cinématiques. Elles permettent également de relier les discontinuités à leur position réelle sur

la paroi, ce qui constitue un avantage majeur par rapport aux approches uniquement stéréographiques.

Cependant, l'extraction automatique des discontinuités reste sensible à plusieurs facteurs : densité du nuage de points, bruit, occlusions, végétation, surfaces irrégulières, échelle de calcul des normales et seuils de segmentation. Une validation experte demeure donc nécessaire pour éviter de confondre des surfaces morphologiques non structurales avec de véritables plans de discontinuité. Dans le cadre de ce mémoire, cette limite justifie l'utilisation d'une approche interprétative combinant cartographie structurale virtuelle, analyse cinématique et observation morphologique des parois.

2.4.7 Incertitudes et limites de l'interprétation des nuages de points

L'interprétation quantitative des nuages de points nécessite une prise en compte explicite des incertitudes. Toutes les observations issues de la télédétection sont affectées par des erreurs liées à l'acquisition, au capteur, à la géométrie de mesure, au traitement des données et à l'interprétation. Ces incertitudes déterminent le niveau de confiance accordé aux mesures et aux descripteurs géométriques dérivés (Lague et al., 2013; Fey & Wichmann, 2017).

Les erreurs peuvent être regroupées en deux grandes catégories : les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques. Les erreurs aléatoires correspondent à la variabilité statistique inhérente au processus de mesure. Elles peuvent être liées au bruit du capteur, à la rugosité de surface, à la densité des points ou aux conditions environnementales. Elles influencent principalement la précision des mesures et peuvent être réduites par l'augmentation de la densité d'échantillonnage, la répétition des mesures ou l'application de méthodes de filtrage adaptées.

Les erreurs systématiques, ou biais, correspondent à des décalages persistants qui affectent les mesures dans une direction privilégiée. Elles peuvent provenir d'un mauvais alignement entre plusieurs acquisitions, d'une calibration imparfaite, d'un effet d'occlusion, d'une géométrie de scan défavorable ou d'une mauvaise reconstruction photogrammétrique. Contrairement aux

erreurs aléatoires, les erreurs systématiques ne disparaissent pas par simple moyennage. Elles doivent être identifiées et corrigées avant l'interprétation quantitative.

Dans les levés LiDAR, l'incertitude dépend également de la distance de mesure et de l'angle d'incidence du faisceau laser. Lorsque le faisceau atteint la surface avec un angle très oblique, son empreinte sur la cible peut s'allonger, ce qui réduit la représentativité spatiale du point mesuré par rapport à la surface réelle. Cette géométrie d'acquisition peut influencer la qualité du signal retourné, la distribution des points, l'estimation des normales locales, la détection des discontinuités et l'interprétation des variations locales de géométrie (Lague et al., 2013; Fey & Wichmann, 2017; Xu et al., 2017). La Figure 2.27 illustre la relation entre l'angle d'incidence du faisceau laser, la normale à la surface et l'empreinte du laser sur la cible.

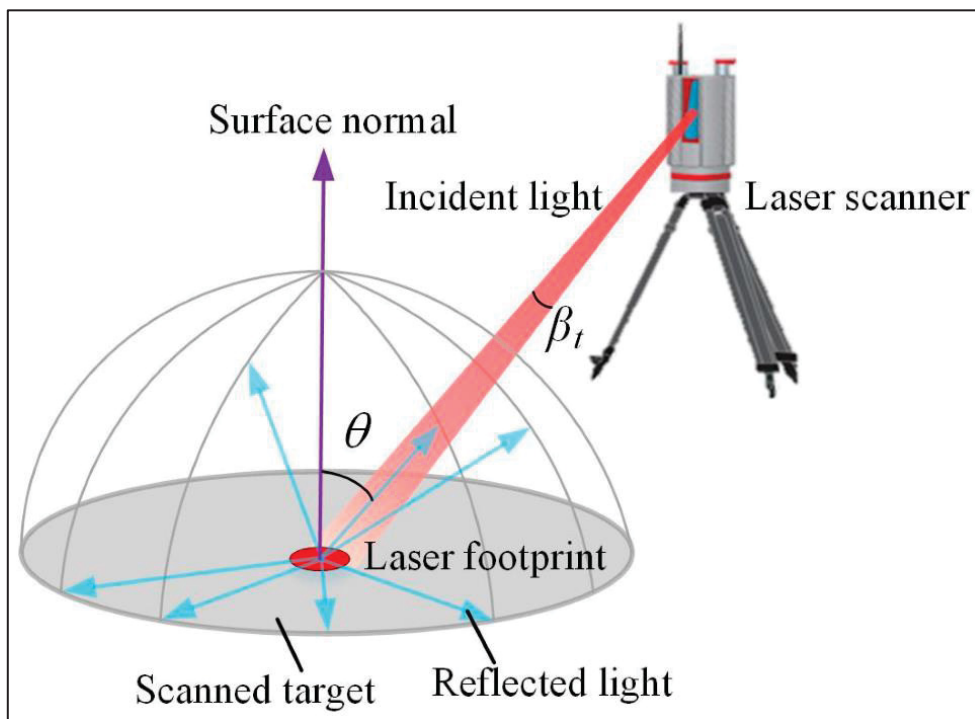


Figure 2.27 Schéma illustrant la relation entre l'angle d'incidence du faisceau laser, la normale à la surface et l'empreinte du laser sur la cible, montrant l'influence de la géométrie d'acquisition sur l'incertitude de mesure

Adapté de Xu et al. (2017)

Des occlusions peuvent également apparaître derrière les surplombs, les blocs saillants ou les irrégularités de la paroi, ce qui crée des zones incomplètes dans le modèle 3D. Dans les modèles photogrammétriques, les incertitudes sont davantage liées à la qualité des images, au recouvrement entre les prises de vue, à l'éclairage, à la texture des surfaces et au géoréférencement. Les surfaces homogènes, ombragées, mouillées ou peu contrastées peuvent réduire la qualité de l'appariement des points et générer des artefacts. Ces limites expliquent l'intérêt de combiner les données LiDAR, les images RGB, les observations de terrain et l'expertise géologique.

Ainsi, les modèles 3D constituent des supports puissants pour l'analyse des parois rocheuses, mais ils ne doivent pas être interprétés comme des représentations parfaites de la réalité. Leur utilisation exige un contrôle de qualité, une sélection prudente des paramètres de traitement et une interprétation tenant compte des incertitudes. Cette prudence est particulièrement importante lorsque les modèles servent à identifier des éléments d'instabilité apparente ou à préparer une évaluation comparative du géorisque apparent.

2.5 Systèmes de cotation des talus rocheux

Les systèmes de cotation des talus rocheux ont été développés afin de fournir des outils opérationnels d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion des instabilités rocheuses. Leur objectif principal est de hiérarchiser des secteurs selon leur niveau relatif de dangerosité, à partir de critères observables tels que la hauteur de la paroi, la géométrie du talus, les conditions géologiques, l'état des discontinuités, la taille potentielle des blocs, la présence d'eau, les conditions climatiques et l'historique de chutes de blocs (Pierson et al., 1990a; Pierson & Van Vickle, 1993; Budetta, 2004 ; Hoek, 2006). Ces systèmes ne constituent pas des analyses mécaniques détaillées de stabilité. Ils fournissent plutôt une évaluation comparative permettant de prioriser les inspections, les études complémentaires ou les mesures de mitigation.

Parmi les systèmes les plus connus, le Rockfall Hazard Rating System (RHRS) a été développé pour l'évaluation du danger de chutes de blocs le long des infrastructures linéaires. Ce système repose sur une grille semi-quantitative où chaque critère est associé à une classe de score. Les paramètres considérés incluent notamment la hauteur de la pente, l'efficacité du fossé de captage, le risque d'exposition des usagers, la distance de visibilité, la largeur de la route, le caractère géologique, la taille des blocs, la quantité de matériau susceptible de tomber, les conditions climatiques et hydriques, ainsi que l'historique des chutes de blocs (Pierson et al., 1990a; Pierson & Van Vickie, 1993; Hoek, 2006). La Figure 2.28 présente un exemple de grille RHRS utilisée pour classer les talus rocheux selon différents critères observables.

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

Figure 2.28 Grille de cotation du Rockfall Hazard Rating System pour l'évaluation du danger de chutes de blocs

Tiré de Hoek (2006), d'après Pierson et al. (1990)

L'intérêt du RHRS réside dans sa simplicité et dans sa capacité à transformer des observations de terrain en un score comparatif. Certains critères sont directement liés à la géométrie du talus

et au contexte d'exposition, comme la hauteur de la pente, l'efficacité du fossé de captage ou la largeur de la route. D'autres critères sont davantage liés au massif rocheux, comme l'orientation des discontinuités, leur continuité, la friction des surfaces, la présence de remplissage argileux ou de surfaces lustrées, ainsi que la taille et la quantité des blocs susceptibles de se détacher. Cette organisation montre que les systèmes de cotation classiques cherchent à intégrer à la fois les conditions géologiques, les mécanismes potentiels de rupture et les conséquences possibles des chutes de blocs.

Les chutes de blocs peuvent être initiées par plusieurs facteurs, notamment l'augmentation des pressions d'eau dans les discontinuités, l'érosion des matériaux environnants, les cycles de gel-dégel, l'altération chimique ou météorique de la roche et certaines actions mécaniques liées aux activités humaines (Hoek, 2006). Ces facteurs sont importants, car ils montrent que l'instabilité d'une paroi rocheuse ne dépend pas uniquement de sa géométrie, mais aussi de l'évolution progressive de l'état des discontinuités et des conditions environnementales. Cette idée rejoint les mécanismes présentés dans les sections précédentes, où l'eau, l'altération, la rugosité, l'ouverture et le remplissage des joints influencent directement la stabilité du massif rocheux (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Hoek, 2006).

Le critère « caractère géologique » du RHRS est particulièrement pertinent pour l'analyse des parois rocheuses. Il distingue deux situations principales. La première concerne les pentes où les discontinuités, les plans de stratification ou les autres surfaces structurales contrôlent les mécanismes de rupture. Dans ce cas, les orientations défavorables peuvent favoriser des mécanismes de type glissement planaire, glissement en coin ou basculement. La seconde concerne les pentes où l'érosion différentielle ou la perte de support constitue le facteur dominant. Cette distinction montre que les instabilités rocheuses peuvent résulter soit d'un contrôle structural direct, soit d'une dégradation progressive de la surface ou du support rocheux (Pierson et al., 1990a; Hoek, 2006).

Malgré leur utilité, les systèmes classiques de cotation présentent plusieurs limites lorsqu'ils sont appliqués à des parois rocheuses complexes. Ils reposent souvent sur des observations

visuelles globales, réalisées depuis le sol ou depuis une infrastructure accessible. Cette approche peut limiter la représentativité des observations lorsque les parois sont hautes, irrégulières, partiellement masquées ou difficiles d'accès. De plus, les scores sont généralement attribués à l'échelle d'un tronçon ou d'une paroi entière, ce qui peut masquer la variabilité spatiale des formes d'instabilité. Une zone localement très fracturée, un surplomb, une cicatrice de rupture ou un bloc ouvert peuvent ainsi être dilués dans une cotation globale.

Les modèles 3D issus du LiDAR et de la photogrammétrie offrent une possibilité de dépasser certaines de ces limites. Ils permettent de documenter spatialement les formes visibles sur les parois et de les organiser sous forme d'objets cartographiques. Ces objets peuvent correspondre à des cicatrices de rupture, des surplombs, des joints persistants, des blocs ouverts, des masses fracturées, des surfaces altérées ou des zones influencées par le suintement. Leur cartographie permet de comparer les secteurs de manière plus détaillée et de relier les observations morphologiques aux mécanismes structuraux ou aux processus de dégradation progressive (Jaboyedoff et al., 2012; M. J. Lato & Vöge, 2012).

2.6 Carrières urbaines, dépôts de neige et contraintes opérationnelles

Les parois rocheuses situées en milieu urbain ou dans des sites opérationnels présentent des conditions d'évolution différentes de celles des talus naturels ou des coupes routières classiques. Elles sont souvent héritées d'anciennes excavations, puis réutilisées pour de nouvelles fonctions urbaines, industrielles ou de gestion des matériaux. Dans ce type de contexte, la stabilité des parois ne dépend pas seulement de la structure géologique du massif rocheux. Elle peut aussi être influencée par les usages du site, les modifications du drainage, les charges temporaires, les cycles saisonniers et les interventions humaines répétées.

Les anciennes carrières urbaines constituent des environnements particuliers, car elles combinent des parois souvent hautes et abruptes, une géométrie imposée par l'excavation initiale et une proximité avec des infrastructures ou des activités humaines. Les fronts rocheux peuvent présenter des discontinuités persistantes, des banquettes, des surplombs, des zones

fracturées et des surfaces altérées. Ces caractéristiques peuvent favoriser localement des mécanismes d'instabilité, notamment lorsque la géométrie de la paroi est compatible avec des mécanismes de glissement planaire, de glissement en coin ou de basculement (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

2.6.1 Rôle de l'eau et des cycles gel-dégel

Dans ces environnements, les conditions hydriques jouent un rôle déterminant dans l'évolution de la stabilité des parois rocheuses. L'eau peut s'infiltrer dans les discontinuités, diminuer la résistance effective au cisaillement, accélérer l'altération des surfaces rocheuses et favoriser l'ouverture progressive de certaines fractures. Lorsqu'elle s'accumule dans les joints, elle peut également générer des pressions interstitielles susceptibles de réduire la stabilité de blocs déjà individualisés (Hoek & Bray, 1981 ; Wyllie & Mah, 2004). Ainsi, les zones de suintement, les traces d'écoulement et les surfaces humides visibles sur les parois peuvent être considérées comme des indices de circulation préférentielle de l'eau au sein du massif rocheux.

Les cycles de gel-dégel constituent un autre facteur important dans les environnements froids. Lorsque l'eau pénètre dans les fissures et les discontinuités, les variations de température autour du point de congélation peuvent favoriser la fragmentation progressive de la roche et l'ouverture des fractures. Ces processus peuvent agir de manière répétée sur les surfaces exposées et contribuer à la dégradation progressive des parois, en particulier dans les zones où l'humidité est persistante (Matsuoka & Murton, 2008). Le gel-dégel ne doit donc pas être considéré uniquement comme un facteur déclencheur ponctuel, mais aussi comme un processus pouvant contribuer à l'évolution graduelle de l'état des discontinuités.

2.6.2 Effets des neiges urbaines, des sels et des eaux de fonte

Dans les sites urbains soumis à des opérations hivernales, la neige accumulée peut constituer une source importante d'eau de fonte. La neige urbaine peut contenir des chlorures, des particules fines, des hydrocarbures, des métaux et d'autres contaminants issus du trafic routier, de l'abrasion des chaussées, des matériaux de déglacage et des dépôts atmosphériques

(Viklander, 1999; Reinosdotter & Viklander, 2007 ; Borris et al., 2021). Lors de la fonte, une partie de ces substances peut être transportée par l'eau et circuler vers les zones basses, les sols, les drains ou les discontinuités présentes dans les parois rocheuses.

L'utilisation de sels de déglacage peut également modifier la composition chimique des eaux de fonte. Les chlorures augmentent la conductivité de l'eau et peuvent influencer la mobilité de certains éléments dissous. Des études sur la neige urbaine ont montré que les sels peuvent contribuer à la libération de certaines phases dissoutes, notamment dans les eaux de fonte contaminées par les activités routières (Reinosdotter & Viklander, 2007). Dans le contexte des parois rocheuses, ces eaux peuvent contribuer à des processus d'altération ou à la dégradation progressive des surfaces de discontinuité, même si leur influence exacte dépend fortement de la lithologie, de la minéralogie, du drainage et de la durée de contact eau–roche.

2.6.3 Influence des pratiques opérationnelles sur les parois rocheuses

Les pratiques de stockage ou de déversement de neige peuvent modifier localement les conditions d'humidité et de drainage. Lorsque la neige demeure en contact prolongé avec une paroi ou avec une banquette rocheuse, la fonte peut produire des apports d'eau concentrés pendant certaines périodes de l'année. Ces apports peuvent favoriser l'écoulement le long des discontinuités, accentuer les zones de suintement, maintenir certaines surfaces humides et contribuer à l'altération progressive des joints ou des plans de faiblesse. Ces effets ne signifient pas nécessairement qu'une rupture est directement causée par les dépôts de neige. Ils indiquent plutôt que les pratiques opérationnelles peuvent modifier l'environnement hydrique et chimique dans lequel les parois évoluent.

Les opérations humaines peuvent aussi influencer les parois par des effets mécaniques ou géométriques. La circulation d'engins, les dépôts temporaires de matériaux, les vibrations, les surcharges localisées et les modifications du drainage de surface peuvent changer les conditions d'équilibre de certains blocs ou accélérer la dégradation de zones déjà fragilisées. Dans les parois rocheuses fracturées, ces effets doivent être interprétés en relation avec la

structure du massif. Un secteur fortement fracturé, comportant des discontinuités persistantes ou des blocs partiellement ouverts, peut-être plus sensible à des modifications hydriques ou mécaniques qu'un secteur massif et peu fracturé.

2.7 Sommaire et lacunes

La revue de littérature montre que l'analyse des instabilités en parois rocheuses repose sur plusieurs approches complémentaires. Les méthodes géomécaniques classiques permettent de caractériser la roche intacte, les discontinuités et le massif rocheux. Les analyses structurales et cinématiques permettent ensuite d'identifier les mécanismes géométriquement admissibles, tels que le glissement planaire, le glissement en coin ou le basculement. Les systèmes de cotation, quant à eux, permettent de hiérarchiser des secteurs selon leur niveau relatif de dangerosité à partir de critères observables, comme la hauteur de la pente, le caractère géologique, la taille des blocs, la présence d'eau, les conditions climatiques et l'historique de chutes de blocs (Hoek & Bray, 1981; Pierson et al., 1990b ; Wyllie & Mah, 2004;; Hoek, 2006).

Malgré leur utilité, ces approches présentent certaines limites lorsqu'elles sont appliquées à des parois rocheuses complexes. L'analyse cinématique permet d'identifier des mécanismes possibles à partir de l'orientation des discontinuités et de la géométrie de la paroi, mais elle ne montre pas directement où ces mécanismes s'expriment spatialement sur la surface rocheuse. Ainsi, un mécanisme peut être cinématiquement admissible sans être clairement visible dans la morphologie de la paroi. À l'inverse, une forme morphologique observable peut résulter d'une rupture passée, d'une altération progressive ou d'une modification locale du drainage, sans correspondre nécessairement à une instabilité active.

Les systèmes de cotation classiques présentent également une limite d'échelle. Ils sont souvent appliqués à l'échelle d'un tronçon, d'un talus ou d'une paroi entière. Cette approche est utile pour la gestion opérationnelle, mais elle peut masquer la variabilité spatiale des formes d'instabilité. Une zone localement très fracturée, un surplomb, une cicatrice de rupture, un bloc ouvert ou une zone de suintement peuvent être dilués dans un score global. Ces méthodes

conservent donc difficilement l'information morphologique détaillée nécessaire pour comparer finement différents secteurs d'une paroi.

Les modèles 3D issus du LiDAR et de la photogrammétrie ont profondément amélioré la capacité d'observation des parois rocheuses. Ils permettent de représenter la géométrie des surfaces, d'extraire des orientations structurales, de mesurer des discontinuités et de cartographier des éléments difficilement accessibles par les méthodes de terrain classiques (Jaboyedoff et al., 2012; Sturzenegger & Stead, 2009; M. J. Lato & Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014). Toutefois, leur utilisation reste souvent centrée sur la caractérisation structurale ou géométrique. Leur potentiel pour organiser les formes visibles d'instabilité sous forme d'objets morphologiques cartographiés demeure moins systématisé.

Cette lacune est importante, car les parois rocheuses peuvent présenter une grande diversité de formes associées à des processus géomécaniques différents. Les cicatrices de rupture peuvent témoigner d'une libération passée de matériau. Les surplombs, les blocs ouverts et les joints persistants peuvent traduire une prédisposition structurale. Les surfaces altérées, les traces de suintement, les zones humides ou les zones de dégradation peuvent indiquer des processus progressifs liés à l'eau, à l'altération ou aux cycles gel-dégel (Dorren, 2003; Matsuoka & Murton, 2008; Hungr et al., 2014). Ces formes ne doivent pas être interprétées de manière uniforme, car elles ne correspondent pas toutes au même niveau d'instabilité ni au même type de processus.

Il existe donc un besoin méthodologique pour relier trois niveaux d'information : la structure du massif rocheux, les mécanismes cinématiquement admissibles et les formes morphologiques visibles dans les modèles 3D. Cette intégration permettrait de passer d'une lecture globale des parois à une analyse plus spatialisée, fondée sur des objets cartographiques localisés. Elle permettrait également de mieux distinguer les indices de libération, les indices de prédisposition structurale et les indices de dégradation progressive. Cette distinction est essentielle pour éviter de confondre l'expression morphologique observable avec l'aléa réel ou le risque complet.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE : CARRIÈRE FRANCON

3.1 Préambule

La carrière Francon est située dans le quartier Saint-Michel, à Montréal. Cette ancienne carrière de calcaire présente une profondeur d'environ 60 à 70 m, des parois abruptes, une organisation en paliers et une proximité directe avec des secteurs résidentiels, industriels et municipaux. Depuis la fin des activités d'extraction, le site a été progressivement reconverti en dépôt de neige, ce qui introduit des conditions d'exposition saisonnières particulières liées aux accumulations de neige usée, aux eaux de fonte, aux sels de déglçage et aux cycles de gel–dégel (Tremblay et al., 2019; SNC-Lavalin inc, 2023b).

Ce chapitre vise à établir le cadre contextuel nécessaire à l'interprétation des analyses développées dans les chapitres suivants. Il présente d'abord la localisation, la morphologie et l'organisation interne de la carrière. Il décrit ensuite l'historique d'exploitation du site et sa conversion en dépôt de neige. Le chapitre introduit par la suite le cadre géologique régional, la lithostratigraphie locale, les intrusions magmatiques et les principales structures contrôlant la segmentation du massif rocheux. Les conditions opérationnelles et hydroclimatiques liées au dépôt de neige sont ensuite décrites afin de préciser leur rôle potentiel dans l'évolution des parois. Enfin, une synthèse des processus de dégradation potentiels et des indices morphologiques observables est présentée afin de préparer la cartographie des éléments d'instabilité apparente à partir des modèles LiDAR et photogrammétriques.

3.2 Localisation et morphologie de la carrière

3.2.1 Localisation et contexte urbain

La carrière Francon est située dans le quartier Saint-Michel, au sein de l'arrondissement de Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension, à Montréal, Québec, Canada. Ses coordonnées géographiques approximatives sont 45°34'20" N et 73°36'50" O, et le site est localisé sur la carte topographique nationale 31 H/12 (Tarasoff, 2006). La carrière occupe un vaste quadrilatère urbain délimité au nord par le boulevard Industriel et la voie ferrée, à l'est par le boulevard Pie-IX, au sud par la rue Jarry Est, et à l'ouest par les 15e, 16e et 17e Avenues. Cette localisation est présentée à la Figure 3.1.



Figure 3.1 Localisation de la carrière Francon. (a) Situation de Montréal dans la province de Québec. (b) Position de la carrière sur l'île de Montréal. (c) Vue rapprochée du site et de ses limites urbaines

Tiré de Google Maps, imagerie satellite, consultée le 13 juillet 2026

Il convient de préciser qu'une confusion géographique peut parfois exister entre la carrière Francon du quartier Saint-Michel et l'ancienne carrière Francon située à Montréal-Est, également associée historiquement à la compagnie Francon (1966) Limitée. Cette dernière correspond aujourd'hui à la carrière Lafarge Montréal-Est et constitue un site distinct, localisé à environ 8 km au nord-est. Afin d'éviter toute ambiguïté, le site étudié dans ce mémoire correspond à la carrière Francon du quartier Saint-Michel, située dans la partie centrale de l'île de Montréal (Tarassoff, 2006).

Le positionnement de la carrière dans un milieu densément urbanisé constitue une caractéristique importante du site. La fosse est bordée par des secteurs résidentiels, industriels et commerciaux, ainsi que par plusieurs axes de circulation majeurs. Cette proximité avec les infrastructures et les usages urbains confère au site une contrainte particulière pour la gestion des parois rocheuses, des accès, du drainage et des risques associés aux instabilités locales.

3.2.2 Morphologie générale et organisation interne de la fosse

Du point de vue morphologique, la carrière Francon forme une excavation allongée, caractérisée par des parois abruptes et des paliers successifs. Sa longueur est d'environ 1 900 m selon l'axe principal de la fosse, tandis que sa largeur atteint environ 500 m dans sa portion centrale. La superficie totale du site est estimée entre 91 et 94 ha (Le Groupe S.M. International inc, 2007; Vivre Saint-Michel en santé, 2018; Tremblay et al., 2019).

La géométrie interne de la carrière est structurée en trois principaux plateaux étagés, illustrés à la Figure 3.2. Le Plateau 1, situé dans la partie sud du site, correspond au niveau le plus élevé, avec une altitude géodésique d'environ +32 m. Il présente une profondeur approximative de 10 m par rapport au sommet moyen de la carrière et accueille actuellement des usages municipaux. Le Plateau 2 est subdivisé en deux sous-niveaux, avec des altitudes approximatives de +10 m pour le Plateau 2a et de +4 m pour le Plateau 2b. Le Plateau 3, localisé dans la partie nord de la fosse, correspond au niveau le plus profond, avec une altitude d'environ -26 m. Les secteurs les plus encaissés atteignent localement des altitudes plus

basses, jusqu'à environ -38 m, ce qui correspond à une profondeur maximale d'environ 80 m (Vivre Saint-Michel en santé, 2018).

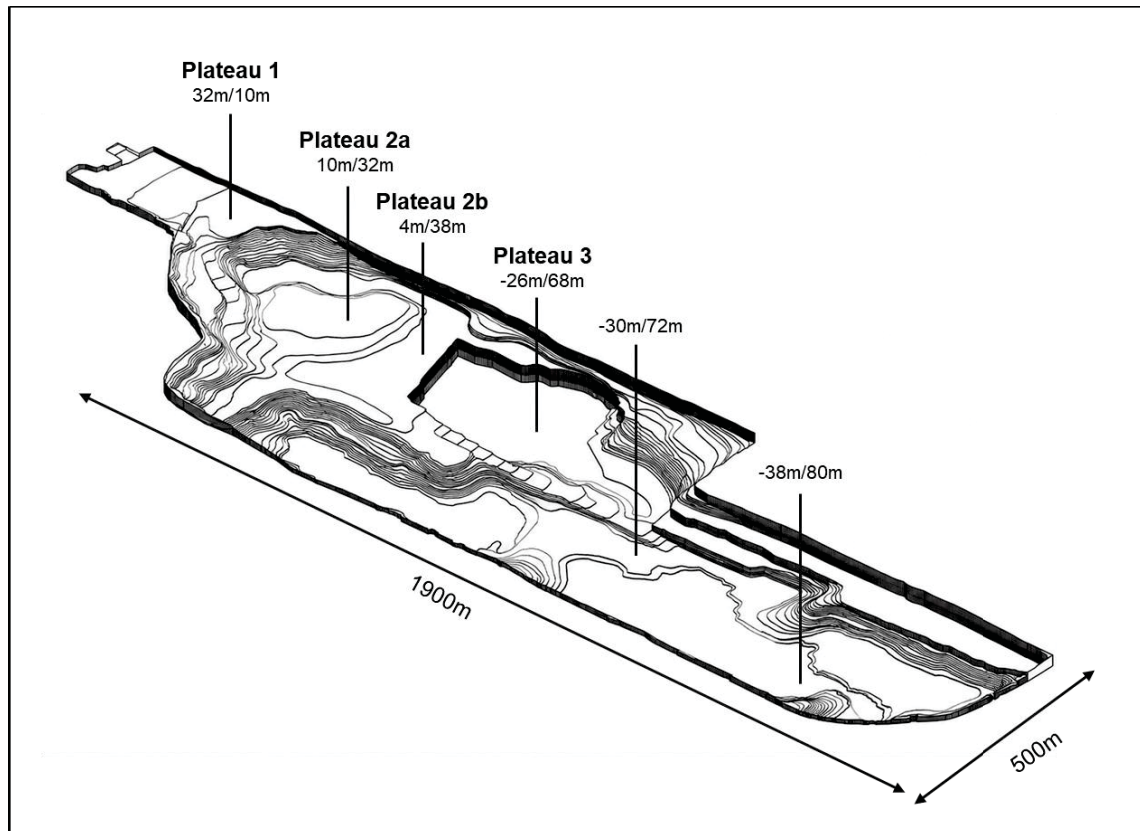


Figure 3.2 Dimensions principales et organisation morphologique en plateaux de la carrière Francon. Vue axonométrique de la fosse montrant les principaux plateaux, les variations altimétriques et les dimensions générales du site. Les altitudes indiquées correspondent aux élévations géodésiques, tandis que les profondeurs sont évaluées par rapport au sommet moyen de la carrière, estimé à 42 m au-dessus du niveau de la mer

Tiré de Tremblay et al. (2019)

La coupe topographique A–A' présentée à la Figure 3.3 confirme la morphologie étagée de la carrière et met en évidence la position basse du Plateau 3, où se situe la station de pompage. Cette organisation topographique influence directement la gestion des eaux de surface et des eaux de fonte, puisque les écoulements tendent à converger vers les secteurs les plus profonds de la fosse. La partie sud-est de la carrière accueille également deux lacs artificiels, alimentés

par les précipitations et les eaux de fonte. Leur superficie et leur profondeur varient de manière saisonnière en fonction des conditions météorologiques, du régime de fonte, de l'évaporation et de l'évacuation vers le réseau d'assainissement municipal (Vivre Saint-Michel en santé, 2018).

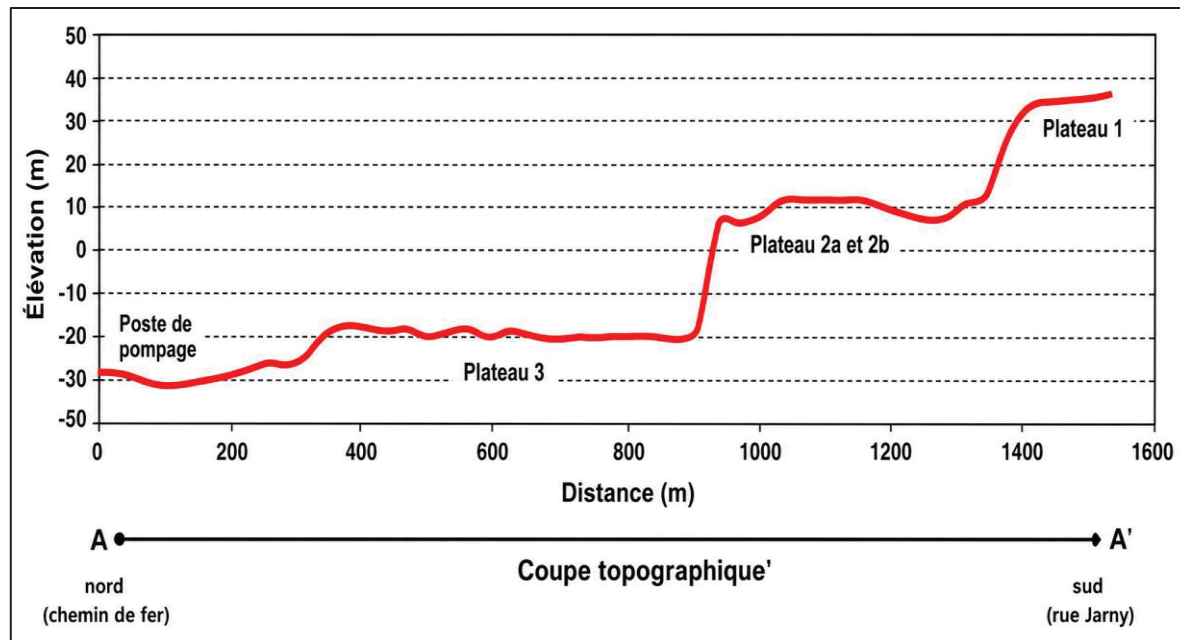


Figure 3.3 Coupe topographique A–A' de la carrière Francon. La coupe montre l'organisation étagée des plateaux, la variation des élévations entre le Plateau 3 et le Plateau 1, ainsi que la position basse du secteur associé à la station de pompage

Tiré de Le Groupe S.M. International inc, 2007

Les parois rocheuses exposées peuvent atteindre environ 70 m de hauteur, alors que la profondeur maximale de la fosse atteint localement près de 80 m par rapport au niveau de la rue environnante (Vivre Saint-Michel en santé, 2018). Comme l'illustre la Figure 3.4 ces parois sont organisées en banquettes superposées, séparées par des bermes de largeur variable. La stratification calcaire subhorizontale est généralement bien visible sur les fronts rocheux et contribue à l'organisation en paliers de la carrière. Cette morphologie crée des surfaces rocheuses hautes, difficilement accessibles et localement affectées par des discontinuités, des surplombs, des zones fracturées et des traces d'altération.



Figure 3.4 Vue représentative des parois rocheuses de la carrière Francon. Les photographies illustrent l'organisation des fronts rocheux en banquettes superposées, la présence de bermes végétalisées, le plan d'eau en pied de paroi ainsi que la stratification calcaire subhorizontale visible sur les parois. (a) Vue générale d'un front rocheux. (b) Vue rapprochée montrant les paliers, les bermes et les discontinuités visibles

3.3 Historique et conversion en dépôt de neige

3.3.1 Historique d'exploitation et évolution morphologique

L'exploitation des calcaires de l'île de Montréal remonte à plusieurs siècles et a contribué de manière importante au développement urbain de la ville. Dans le secteur Saint-Michel, la présence de gisements calcaires a favorisé l'implantation d'activités extractives dès le début du XXe siècle. L'exploitation de la carrière Francon aurait débuté vers 1925 sous la compagnie Quinlan and Robertson, bien que certaines sources situent les premières activités dès 1914 (Tarasoff, 2006; Vivre Saint-Michel en santé, 2018). Le nom « Francon » provient de la contraction des premières lettres du nom Franceschini, associé à l'un des exploitants du site, et du mot anglais Concrete (Tremblay et al., 2019).

L'évolution morphologique de la carrière au cours du XXe siècle est illustrée à la Figure 3.5. La mosaïque de photographies aériennes montre la progression de l'excavation entre 1930 et 1973, période durant laquelle l'emprise de la fosse s'étend progressivement dans le tissu urbain. Après la fin des activités d'extraction, l'empreinte générale du site se stabilise, tandis que des plans d'eau apparaissent progressivement dans la partie sud-est de la fosse à partir des années 1990. Cette évolution témoigne du passage d'un site principalement extractif vers une fosse urbaine réutilisée pour de nouvelles fonctions municipales.

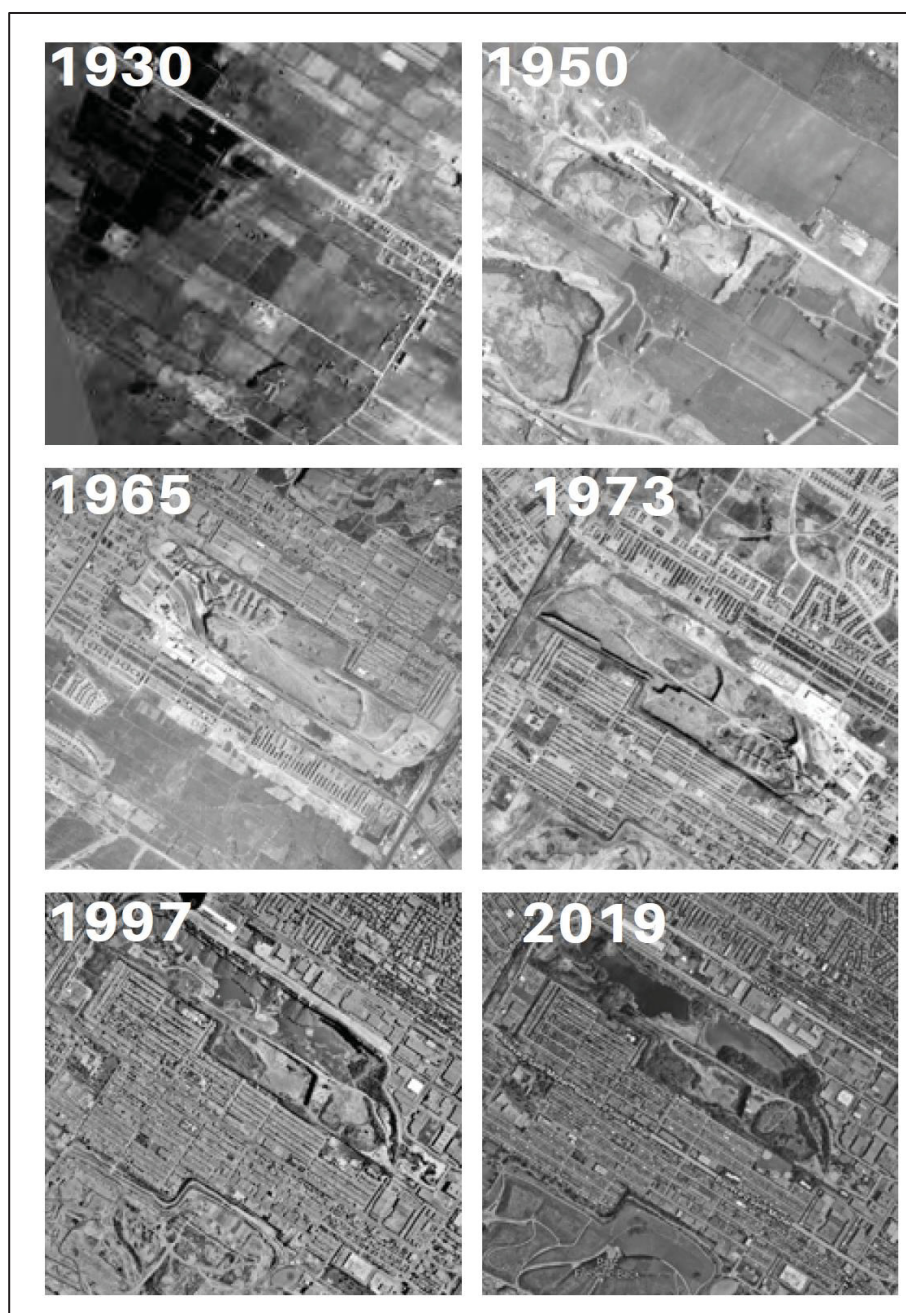


Figure 3.5 Évolution aérienne de la carrière Francon de 1930 à 2019. Mosaïque de photographies aériennes illustrant la progression de l'excavation entre 1930 et 1973, la stabilisation de l'empreinte après la fin de l'exploitation et l'apparition progressive des lacs de fonte dans la partie sud-est du site

Tiré de Tremblay et al. (2019)

3.3.2 Conversion en dépôt de neige et usage opérationnel actuel

Un tournant majeur dans l'histoire du site survient en 1981, lorsque la Ville de Montréal fait l'acquisition de la carrière. L'exploitation se poursuit temporairement jusqu'à sa cessation définitive en décembre 1986, après quoi la fosse est progressivement convertie en dépôt de neige municipal (Le Groupe S.M. International inc, 2007; Vivre Saint-Michel en santé, 2018). Cette reconversion tire parti de la grande capacité volumétrique de la carrière, de sa profondeur et de sa localisation au sein du territoire montréalais.

L'usage actuel du site repose sur le déversement saisonnier de neige usée collectée dans la ville. Des quais de déchargement sont aménagés au sommet de certaines parois afin de permettre aux camions de déverser la neige directement dans la fosse. La carrière reçoit une part importante de la neige collectée à Montréal, estimée à environ 40 % du volume municipal, ce qui en fait un équipement important pour la gestion hivernale de la ville (Vivre Saint-Michel en santé, 2018). La Figure 3.6 illustre l'ampleur des accumulations de neige usée dans la fosse en période hivernale.



Figure 3.6 Accumulations de neige usée dans la carrière Francon en période hivernale

Cette conversion donne au site un statut particulier. La carrière Francon n'est pas seulement une ancienne excavation abandonnée ; elle demeure un espace municipal actif, soumis à des opérations saisonnières répétées. Cet usage actuel doit donc être pris en compte pour interpréter l'évolution des parois rocheuses. Les effets liés aux eaux de fonte, aux sels de déglacage, aux matériaux abrasifs et aux conditions hivernales sont présentés plus en détail à la section 3.7.

3.4 Contexte géologique régional de la carrière

3.4.1 Plate-forme du Saint-Laurent et contexte structural régional

La carrière Francon s'inscrit dans le contexte géologique de la région de Montréal, laquelle appartient à la plate-forme du Saint-Laurent. Cette plate-forme correspond à une province sédimentaire paléozoïque composée principalement de roches cambriennes et ordoviciennes reposant en discordance sur le socle précambrien de la Province de Grenville (Globensky, 1987; Brisebois et al., 2003). À l'échelle du Québec méridional, elle s'étend approximativement de la région d'Ottawa vers celle de Charlevoix. Elle est limitée au nord-ouest par le socle grenvillien et au sud-est par la ligne de Logan, qui marque le front structural des Appalaches (Globensky, 1987; Rocher & Tremblay, 2001). La position de la plate-forme du Saint-Laurent dans le contexte géologique régional est présentée à la Figure 3.7.

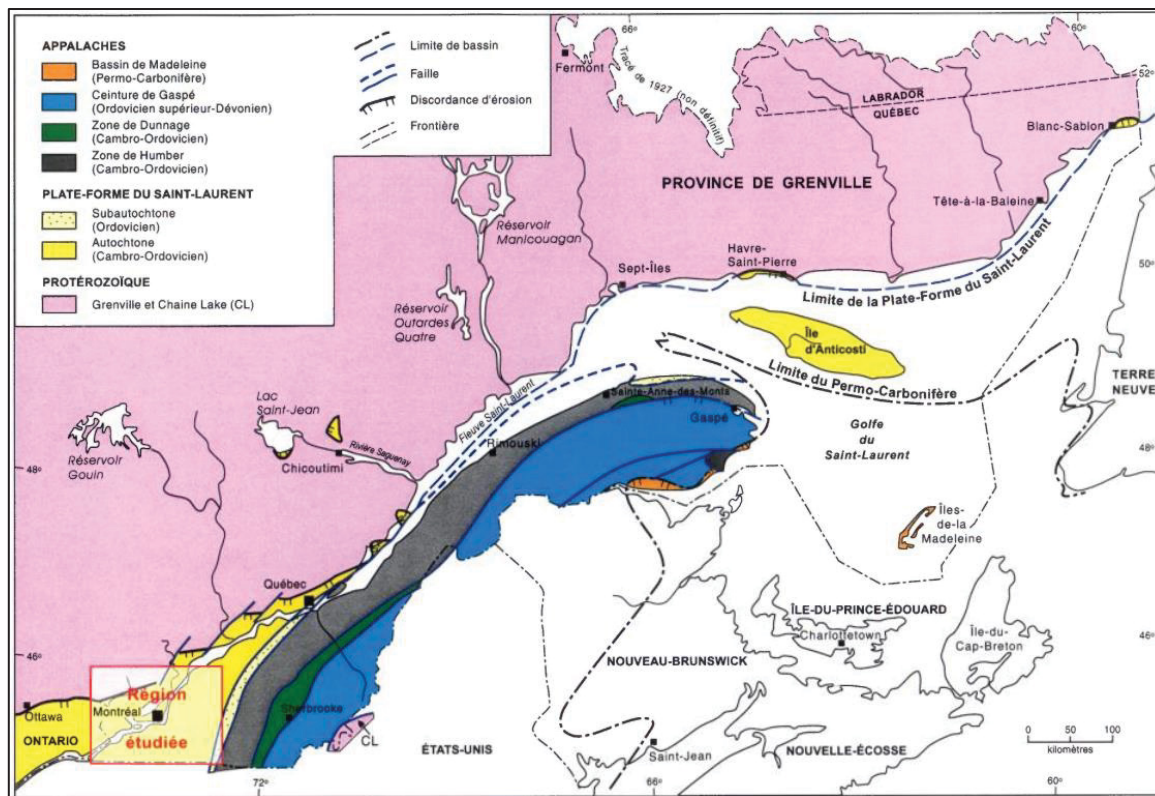


Figure 3.7 Carte géologique simplifiée du Québec situant la plate-forme du Saint-Laurent entre le socle grenvillien protérozoïque au nord-ouest et les zones appalachiennes au sud-est.

Tiré de Brisebois et al. (2003)

Dans la région montréalaise, la plate-forme occupe une position structurale particulière, à proximité de la jonction entre le rift d'Ottawa-Bonnechère, le système structural du Saint-Laurent et l'avant-pays appalachien (Clark, 1972; Brisebois et al., 2003). Ces structures résultent de plusieurs épisodes tectoniques anciens, notamment de l'ouverture de l'océan Iapetus à la fin du Protérozoïque et au début du Paléozoïque, puis des phases de déformation qui ont marqué l'évolution géologique subséquente de la région (Kumarapeli, 1985 ; Rocher & Tremblay, 2001). Dans la région de Montréal, cette histoire géologique se traduit par une succession sédimentaire généralement faiblement inclinée, localement recoupée par des failles et par des intrusions plus récentes.

La coupe structurale NW–SE présentée à la Figure 3.8 illustre l’organisation générale de la plate-forme dans la grande région de Montréal. Elle montre l’empilement des unités sédimentaires cambro-ordoviciennes sur le socle grenvillien, ainsi que leur relation avec les nappes appalachiennes situées plus à l’est. Cette configuration régionale est importante pour situer la carrière Francon dans un ensemble géologique plus large, où les formations carbonatées exploitées appartiennent aux unités ordoviciennes de la plate-forme du Saint-Laurent.

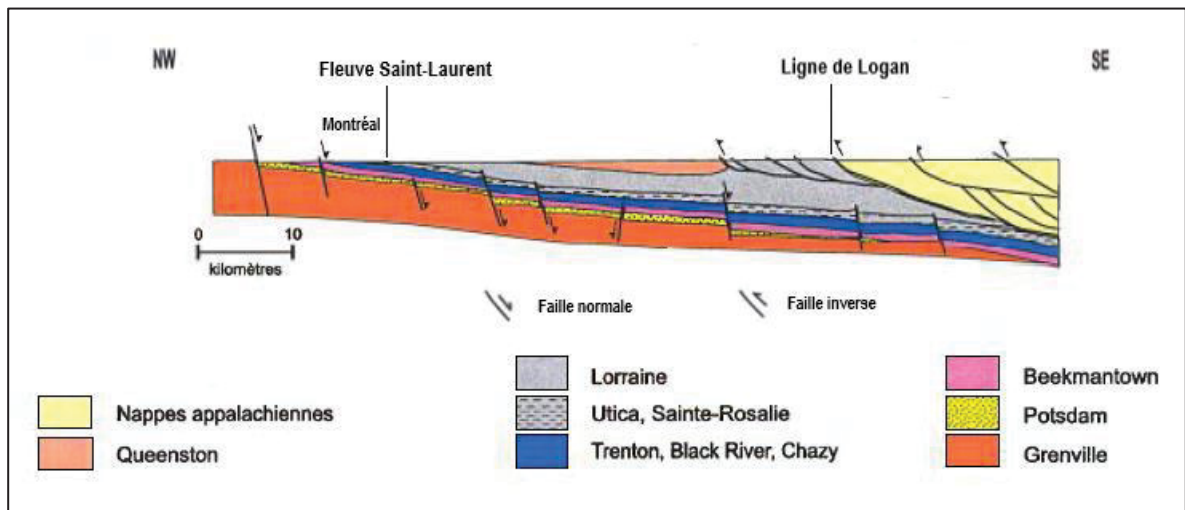


Figure 3.8 Coupe schématique structurale NW–SE de la plate-forme du Saint-Laurent dans la grande région de Montréal, montrant l’empilement des unités sédimentaires cambro-ordoviciennes sur le socle grenvillien et leur relation avec les nappes appalachiennes à l’est. Les unités carbonatées Trenton–Black River–Chazy correspondent aux formations exposées dans les parois de la carrière Francon

Tiré de Rocher et Tremblay, (2001)

3.4.2 Succession stratigraphique et unités carbonatées de la région de Montréal

La succession stratigraphique de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Montréal comprend un assemblage de roches sédimentaires détritiques, carbonatées et argileuses d’âge Cambrien supérieur à Ordovicien supérieur. Son épaisseur varie selon les secteurs, mais elle peut atteindre plusieurs milliers de mètres dans certaines parties du bassin (Globensky, 1987;

Brisebois et al., 2003). Cette succession débute par les grès et conglomérats du Groupe de Potsdam, associés aux premières phases de sédimentation sur le socle grenvillien. Elle se poursuit avec les dolomies du Groupe de Beekmantown, puis avec les unités carbonatées des groupes de Chazy, Black River et Trenton, qui traduisent le développement d'une plate-forme marine carbonatée durant l'Ordovicien (Clark, 1972; Brisebois & Brun, 1994).

Les unités carbonatées du Black River et du Trenton sont particulièrement importantes dans le cadre de ce mémoire, car elles correspondent aux formations exposées dans les parois de la carrière Francon. Ces unités sont dominées par des calcaires et des calcaires argileux organisés en bancs, localement recoupés par des discontinuités. Leur stratification subhorizontale contribue à l'organisation en paliers des fronts rocheux et constitue un contrôle géométrique important pour l'interprétation des formes visibles sur les parois. La colonne stratigraphique présentée à la Figure 3.9 situe ces unités dans la succession régionale de la plate-forme du Saint-Laurent.

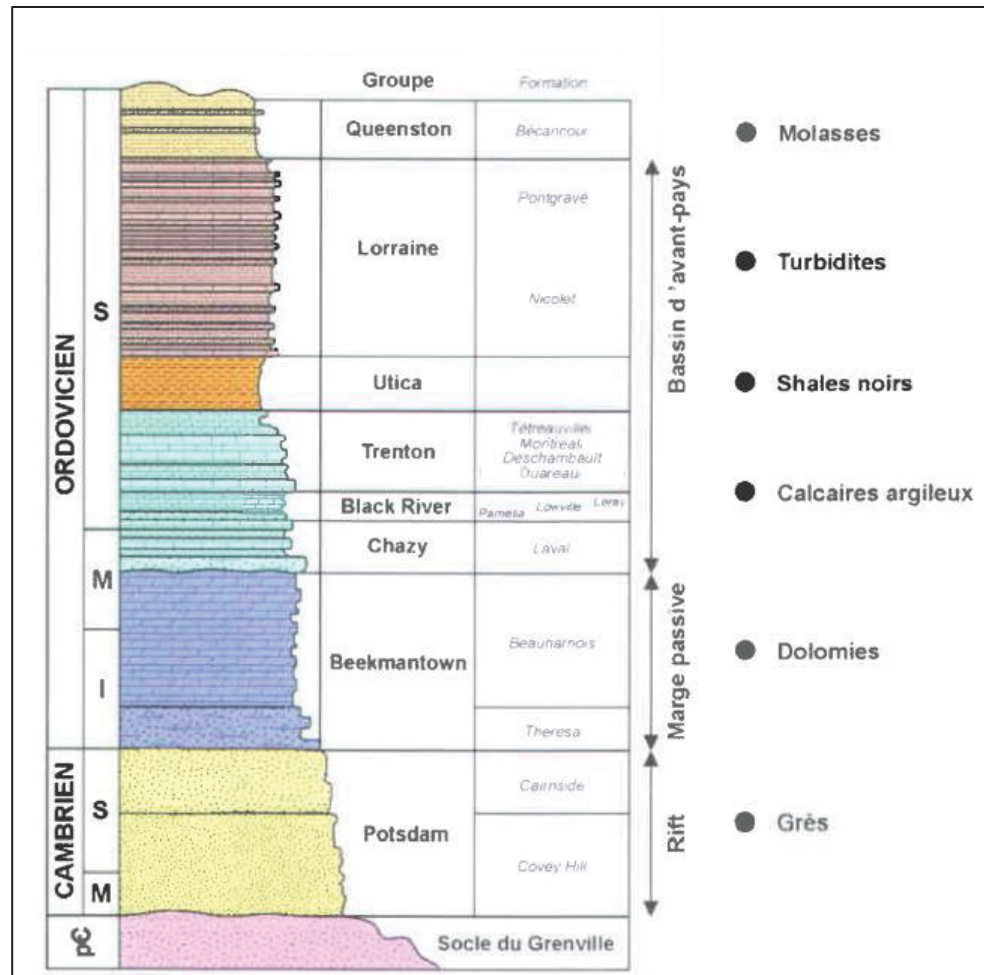


Figure 3.9 Colonne stratigraphique de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Montréal. La succession débute par les grès du Groupe de Potsdam, d'âge cambrien, et se termine par les molasses du Groupe de Queenston, d'âge ordovicien supérieur. Les unités carbonatées du Black River et du Trenton, encadrées en pointillé, correspondent aux formations exposées dans les parois de la carrière Francon

Tiré de Ducat (2022)

Vers la fin de l'Ordovicien moyen et supérieur, la fermeture progressive de l'océan Iapetus et le développement de l'orogénèse taconienne entraînent la mise en place de dépôts de bassin d'avant-pays. Ceux-ci comprennent notamment les shales noirs du Groupe d'Utica, les dépôts argilo-gréseux du Groupe de Lorraine et les molasses rouges du Groupe de Queenston (Julien & Hubert, 1975; Brisebois et al., 2003). Dans la région de Montréal, cette évolution se

manifeste surtout par une inclinaison régionale faible des couches et par des déformations ouvertes de faible amplitude. Pour l'analyse de la carrière Francon, l'élément le plus important demeure toutefois la présence d'une séquence carbonatée stratifiée, dont les bancs et les discontinuités contrôlent une partie de la morphologie des parois.

3.4.3 Intrusions montréalaises et implications pour la carrière Francon

À l'échelle régionale, la séquence sédimentaire paléozoïque est recoupée par des intrusions ignées crétacées associées à la province alcaline des Collines montréalaises. Ces intrusions, âgées d'environ 97 à 140 Ma, sont liées à un épisode d'extension crustale attribué à l'ouverture de l'océan Atlantique et à la réactivation de structures profondes héritées du rift d'Ottawa–Bonnechère (Kumarapeli, 1985; Currie, 1976; Eby, 1987). Elles comprennent de grands plutons, ainsi que des dykes et des filons-couches qui recoupent localement la séquence sédimentaire cambro-ordovicienne.

Dans la région de Montréal, ces intrusions sont abondantes et ont été décrites dans plusieurs anciennes carrières, notamment les carrières Francon, Miron et Montréal-Est (Clark, 1952; Tarasoff, 2006). La carte géologique présentée à la Figure 3.10 montre la position de la carrière Francon dans le Groupe de Trenton, à proximité de plusieurs sills associés à la province montréalaise. Cette relation géologique est importante, car les intrusions peuvent créer des contrastes lithologiques, des contacts mécaniques et des hétérogénéités structurales susceptibles d'influencer localement la fracturation, l'altération et la segmentation du massif rocheux.

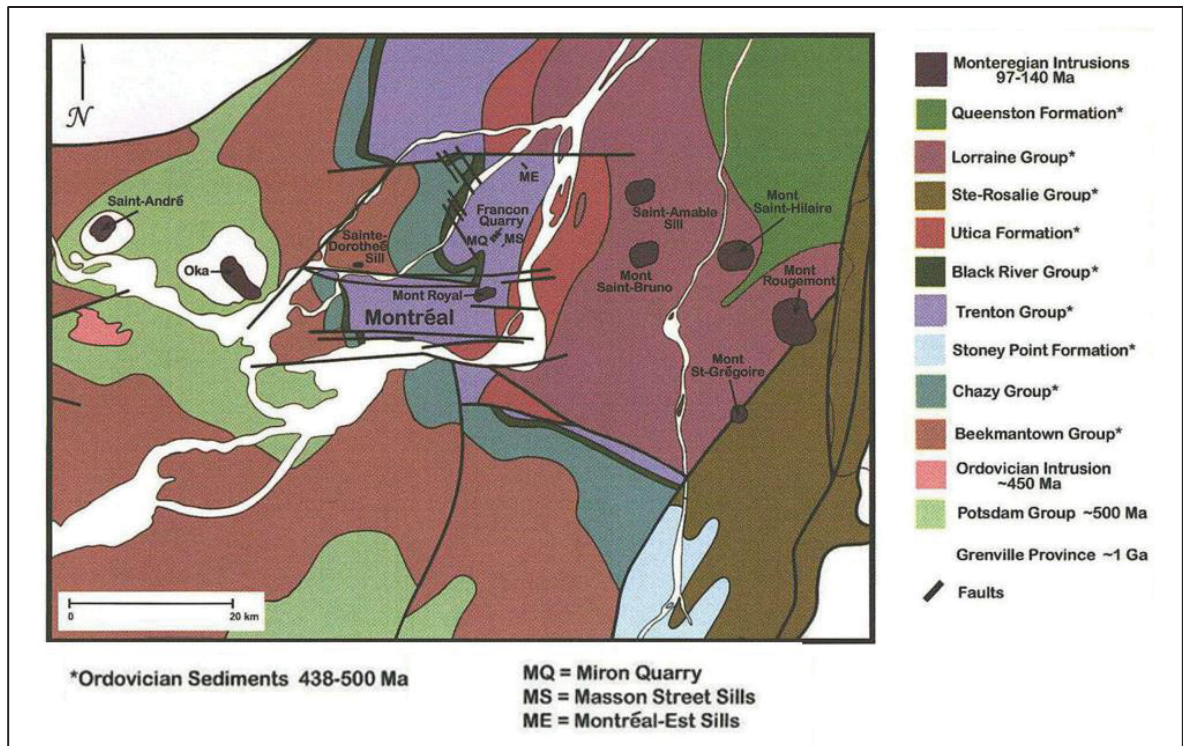


Figure 3.10 Carte géologique de la région de Montréal montrant les principales unités sédimentaires ordoviciennes, les grands plutons montereégiens et les sills majeurs. La carrière Francon est localisée dans le Groupe de Trenton, à proximité des sills de la carrière Miron, de la rue Masson et de Montréal-Est. Les intrusions montereégiennes, indiquées en brun foncé, recoupent la séquence sédimentaire cambro-ordovicienne

Tiré de Ducat (2022)

La carrière Francon s'insère donc dans un cadre géologique marqué par la superposition de deux héritages principaux : une succession sédimentaire carbonatée ordovicienne et des intrusions ignées mésozoïques. Cette combinaison contribue à la diversité lithologique et structurale observée dans les parois rocheuses. Dans le cadre de ce mémoire, ce contexte géologique est essentiel, car il fournit le cadre d'interprétation des familles de discontinuités, des contacts lithologiques, des surfaces de stratification, des zones altérées et des formes d'instabilité apparente cartographiées à partir des modèles 3D.

3.5 Contexte géologique local de la carrière

3.5.1 Lithostratigraphie locale

La carrière Francon expose une succession de roches sédimentaires ordoviciennes appartenant principalement aux unités carbonatées de la plate-forme du Saint-Laurent. Cette succession est dominée par des calcaires stratifiés, localement interstratifiés avec des niveaux plus argileux ou schisteux. Elle est également recoupée par des intrusions magmatiques, notamment des sills subhorizontaux et un dyke subvertical. L'ensemble forme un massif rocheux hétérogène, dans lequel la stratification, les joints et les contacts lithologiques contribuent à la segmentation des parois rocheuses. La Figure 3.11 présente une colonne géologique simplifiée de la carrière Francon, montrant l'organisation générale des calcaires, des sills et du dyke observé dans la paroi.

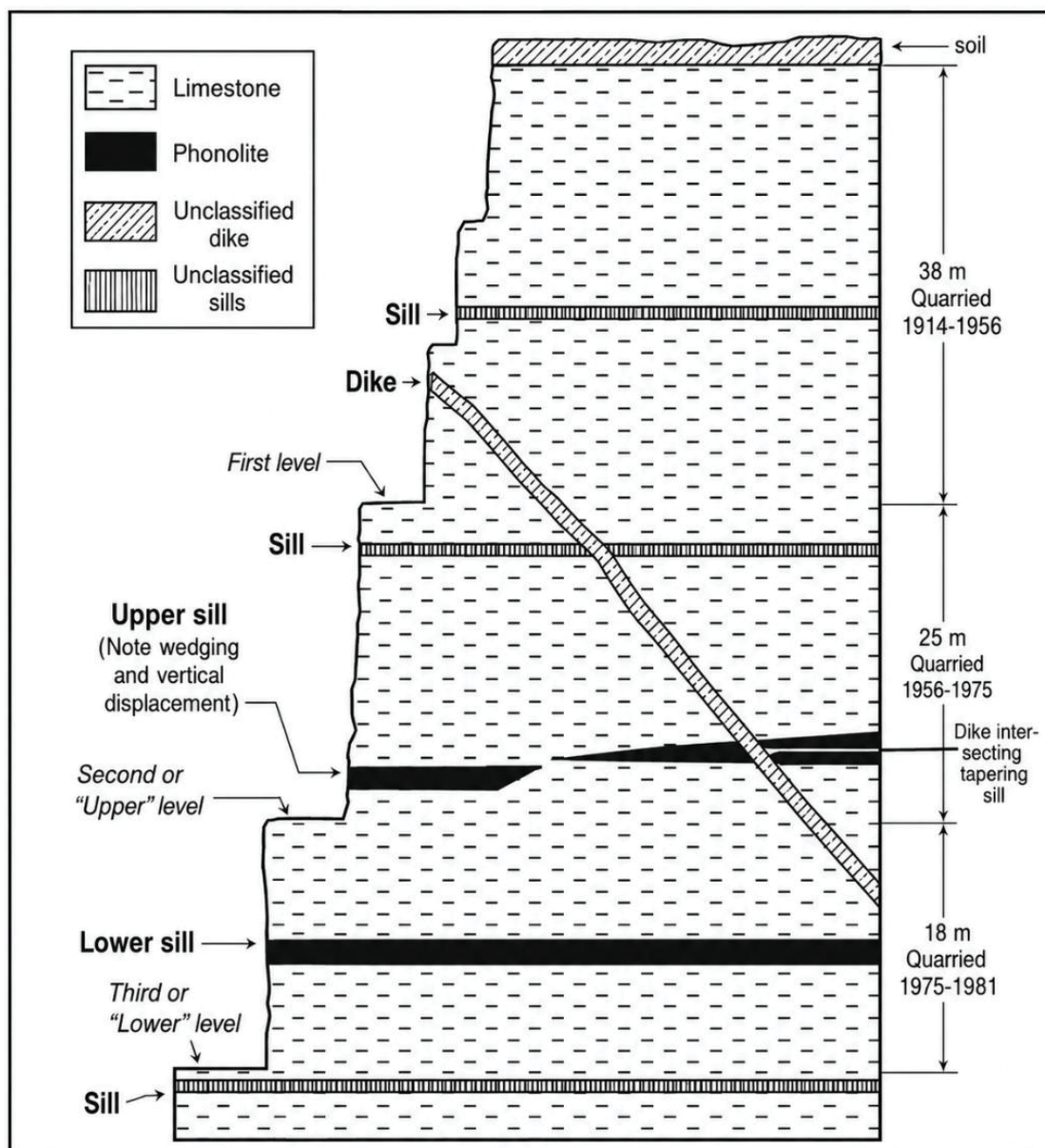


Figure 3.11 Colonne géologique simplifiée de la carrière Francon montrant la succession calcaire, les sills subhorizontaux et un dyke recoupant la paroi

Tiré de Tarasoff et al. (2006)

Les niveaux les plus profonds de la carrière peuvent exposer localement des unités associées au Groupe de Chazy et au Groupe de Black River (Clark, 1952; Tarasoff, 2006). Ces unités

sont composées de calcaires, de dolomies et de niveaux argileux ou schisteux. Leur exposition demeure toutefois limitée aux secteurs les plus bas de la fosse et n'est pas nécessairement observable de manière continue sur l'ensemble des parois. Elles constituent néanmoins la base stratigraphique locale sur laquelle reposent les unités carbonatées sus-jacentes.

La partie principale des parois rocheuses appartient à la Formation de Montréal du Groupe de Trenton. Cette formation comprend notamment les membres de Saint-Michel et de Rosemont, qui constituent les unités les plus importantes pour l'interprétation géologique et géomécanique du site. Le Membre de Saint-Michel est généralement décrit comme un calcaire gris à grain fin, bien stratifié, fossilifère, localement accompagné d'interlits de shale calcaire. Ces interlits produisent une alternance lithologique qui peut influencer la continuité des surfaces de litage, la circulation de l'eau et la dégradation progressive des surfaces exposées (Clark, 1952).

Le Membre de Rosemont occupe les niveaux supérieurs de la succession locale. Il est également composé de calcaires gris à grain fin ou cristallins, localement argileux, avec des interlits centimétriques de shale calcaire. Il présente des caractéristiques lithologiques proches de celles du Membre de Saint-Michel, bien que certaines différences de texture, de contenu argileux et de degré de fossilisation puissent être observées localement (SIGEOM, 2022). Ces deux membres appartiennent à la même formation et présentent des comportements géomécaniques globalement comparables à l'échelle de la carrière.

La stratification subhorizontale constitue l'un des éléments structuraux les plus visibles dans les parois de la carrière. Elle contrôle l'organisation en bancs, la géométrie des paliers et certaines formes de dégradation observables sur les fronts rocheux. Les interlits plus argileux ou schisteux peuvent localement agir comme des niveaux de faiblesse, surtout lorsqu'ils sont exposés à l'eau, à l'altération ou aux cycles de gel-dégel. Cette organisation est visible directement sur les fronts rocheux, où les bancs calcaires subhorizontaux sont recoupés par des discontinuités subverticales et localement associés à des zones fracturées ou altérées.

Au-dessus du socle rocheux, une couverture discontinue de dépôts meubles est présente dans certains secteurs de l'île de Montréal. La cartographie régionale de Prest et Hode-Keyser (1975) montre que la zone de la carrière Francon se situe dans un secteur caractérisé par la juxtaposition d'affleurements rocheux et de dépôts meubles principalement associés aux épisodes glaciaires et postglaciaires (Figure 3.12). Ces dépôts ne constituent pas l'objet principal de ce mémoire, mais leur présence peut influencer localement le ruissellement, l'infiltration ainsi que les conditions de drainage en crête et en bordure des parois. Compte tenu de l'échelle régionale de la carte, leur nature et leur épaisseur exactes à la carrière doivent toutefois être interprétées avec prudence et confirmées par des observations locales (Prest & Hode-Keyser, 1982).

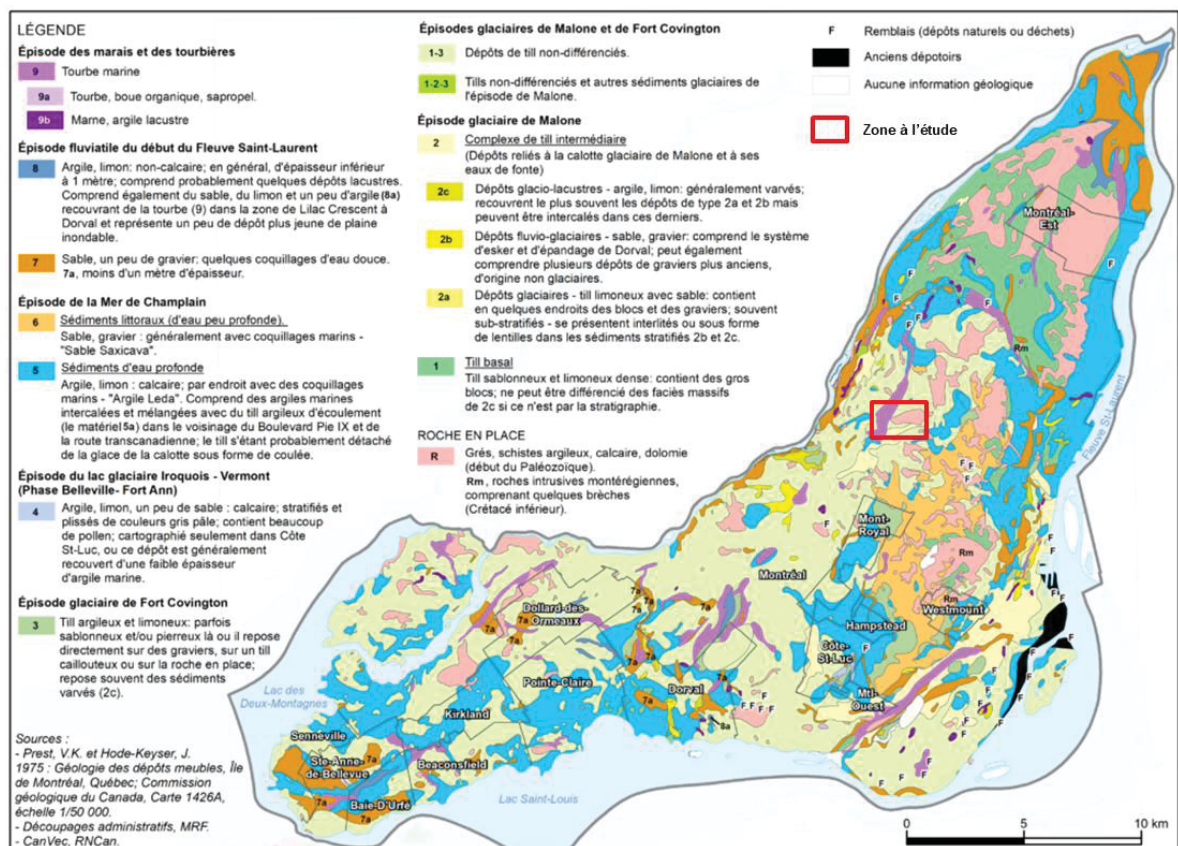


Figure 3.12 Carte des dépôts meubles de l'île de Montréal et localisation de la zone à l'étude, indiquée par l'encadré rouge. Adapté de Prest et Hode-Keyser (1975)

3.5.2 Intrusions magmatiques et contacts lithologiques

La carrière Francon est également marquée par la présence d'intrusions magmatiques d'âge crétacé, associées à la province alcaline des Collines montérégiennes. Ces intrusions recoupent la séquence sédimentaire ordovicienne sous forme de sills subhorizontaux et de dykes subverticaux (Clark, 1952 ; Tarassoff, 2006). Elles constituent un élément important du contexte géologique local, car elles introduisent des contrastes lithologiques et mécaniques dans le massif calcaire.

Les sills Saint-Michel représentent les intrusions les plus remarquables observées dans la carrière. Ils apparaissent sous forme de corps tabulaires subhorizontaux interstratifiés dans la séquence calcaire. Leur contact avec le calcaire encaissant est généralement net, ce qui crée des interfaces lithologiques bien définies. Ces contacts peuvent influencer localement la fracturation, la circulation de l'eau, l'altération différentielle et la segmentation des parois rocheuses (Steady & Jambor, 1969; Jambor et al., 1976).

Les dykes subverticaux sont également présents localement. Ils recoupent la stratification calcaire de manière oblique ou subverticale et peuvent interrompre la continuité des bancs. Leur présence ajoute une hétérogénéité supplémentaire au massif rocheux, en créant des contrastes de compétence et des zones de contact susceptibles d'influencer la propagation des fractures ou la localisation de certaines formes d'altération (Clark, 1952).

Des exemples de contacts lithologiques et de niveaux intrusifs observables dans les parois de la carrière sont présentés à la Figure 3.133. Ces éléments permettent de visualiser la relation entre les calcaires stratifiés et les intrusions, ainsi que leur rôle potentiel dans l'organisation morphologique des fronts rocheux.

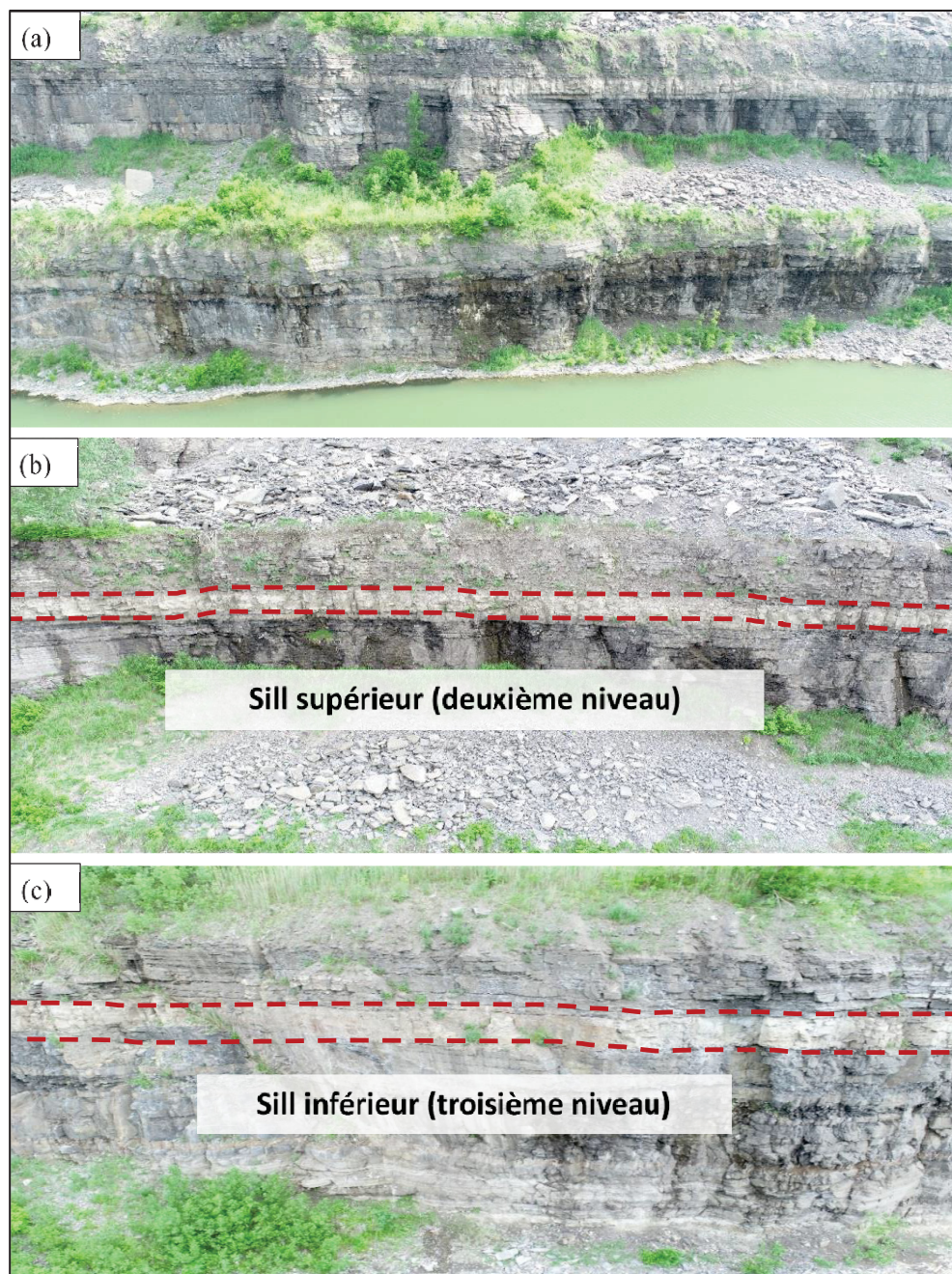


Figure 3.13 Exemples d'intrusions et de contacts lithologiques observés dans les parois de la carrière Francon. Les vues montrent le contraste entre les niveaux intrusifs et les calcaires encaissants, ainsi que leur relation avec la stratification locale et la segmentation du massif

Dans le cadre de ce mémoire, les intrusions magmatiques et leurs contacts avec les calcaires encaissants sont interprétés comme des éléments structuraux et lithologiques importants. Ils ne doivent pas être considérés uniquement comme des particularités pétrographiques. Ils peuvent aussi contribuer à la compartimentation du massif, à l'organisation des discontinuités et à l'expression morphologique de certaines instabilités apparentes. Cette influence est particulièrement pertinente pour l'interprétation des contacts intrusifs, des zones fracturées, des surfaces altérées et des masses rocheuses à blocs ouverts cartographiées à partir des modèles 3D.

3.6 Contexte structural de la carrière

Le contexte structural de la carrière Francon est principalement contrôlé par la combinaison d'une stratification calcaire subhorizontale et de familles de joints subverticaux. Cette organisation est caractéristique des massifs carbonatés de la région montréalaise, où les plans de litage faiblement inclinés sont recoupés par des réseaux de fractures raides. Ces structures jouent un rôle central dans la segmentation du massif rocheux, la géométrie des blocs et la prédisposition à certains mécanismes d'instabilité.

À l'échelle de la carrière, la stratification est globalement subhorizontale. Ce caractère peu incliné est cohérent avec la position de la carrière dans les unités carbonatées de la plate-forme du Saint-Laurent, où les couches sédimentaires présentent généralement de faibles pendages régionaux. Selon Clark (1952), les lits calcaires de la carrière présentent un pendage de quelques degrés. Les données de SNC-Lavalin inc, 2023a confirment également un pendage moyen très faible, de l'ordre de 2°, ce qui confère à la stratification son caractère essentiellement horizontal à l'échelle du massif.

La stratification constitue ainsi une discontinuité majeure dans l'organisation du massif rocheux. Elle contrôle la disposition en bancs, la géométrie des paliers et certaines formes de dégradation visibles sur les fronts rocheux. Elle peut également influencer la circulation de l'eau, l'altération différentielle et la localisation de surfaces de faiblesse, en particulier lorsque

des interlits plus argileux ou schisteux sont présents. Cette organisation est directement visible dans les parois de la carrière, où les bancs calcaires forment des niveaux subhorizontaux continus. La Figure 3.14 illustre cette disposition en bancs et son expression morphologique sur les fronts rocheux.

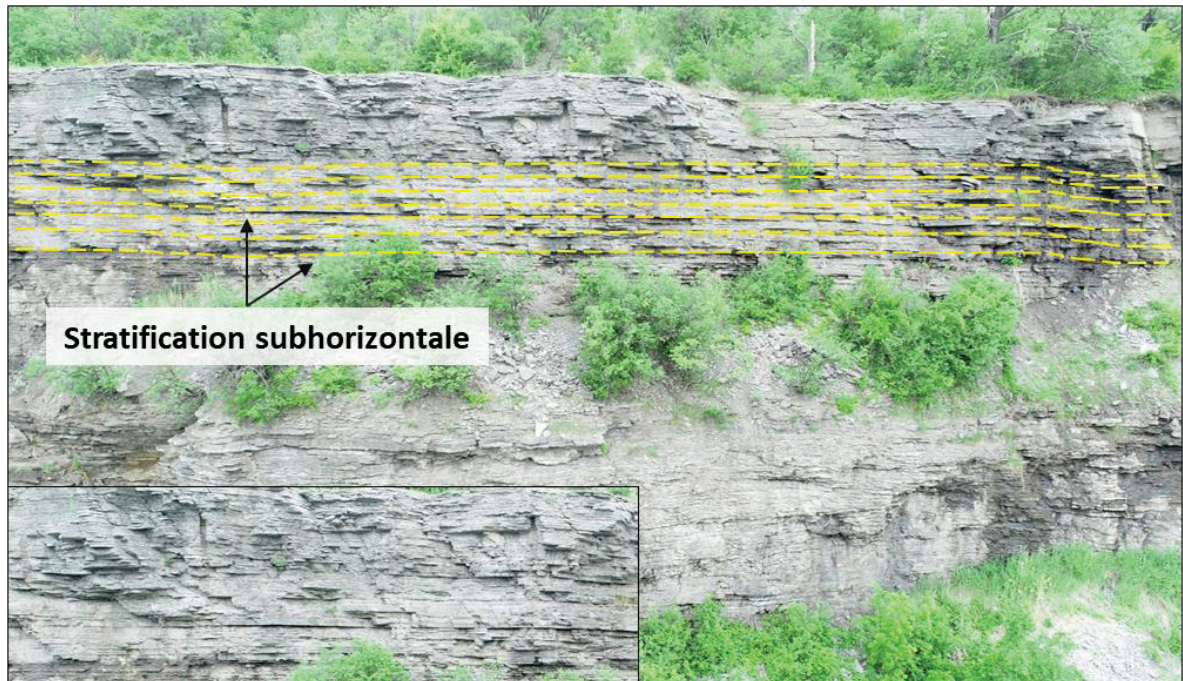


Figure 3.14 Stratification subhorizontale des bancs calcaires ordoviciens exposés dans les parois de la carrière Francon

En plus de la stratification, le massif rocheux est recoupé par plusieurs familles de joints subverticaux. Les études antérieures décrivent principalement deux familles de joints raides, quasi orthogonales, qui segmentent les calcaires en blocs de géométrie subrectangulaire (SNC-Lavalin inc, 2023a). Les orientations mesurées varient légèrement selon les secteurs et les méthodes de mesure, mais elles indiquent de manière générale la présence de discontinuités fortement inclinées et persistantes à l'échelle des parois. Des exemples de ces joints subverticaux sont présentés à la Figure 3.15, où les discontinuités raides recoupent les bancs calcaires et participent à la compartimentation du massif.

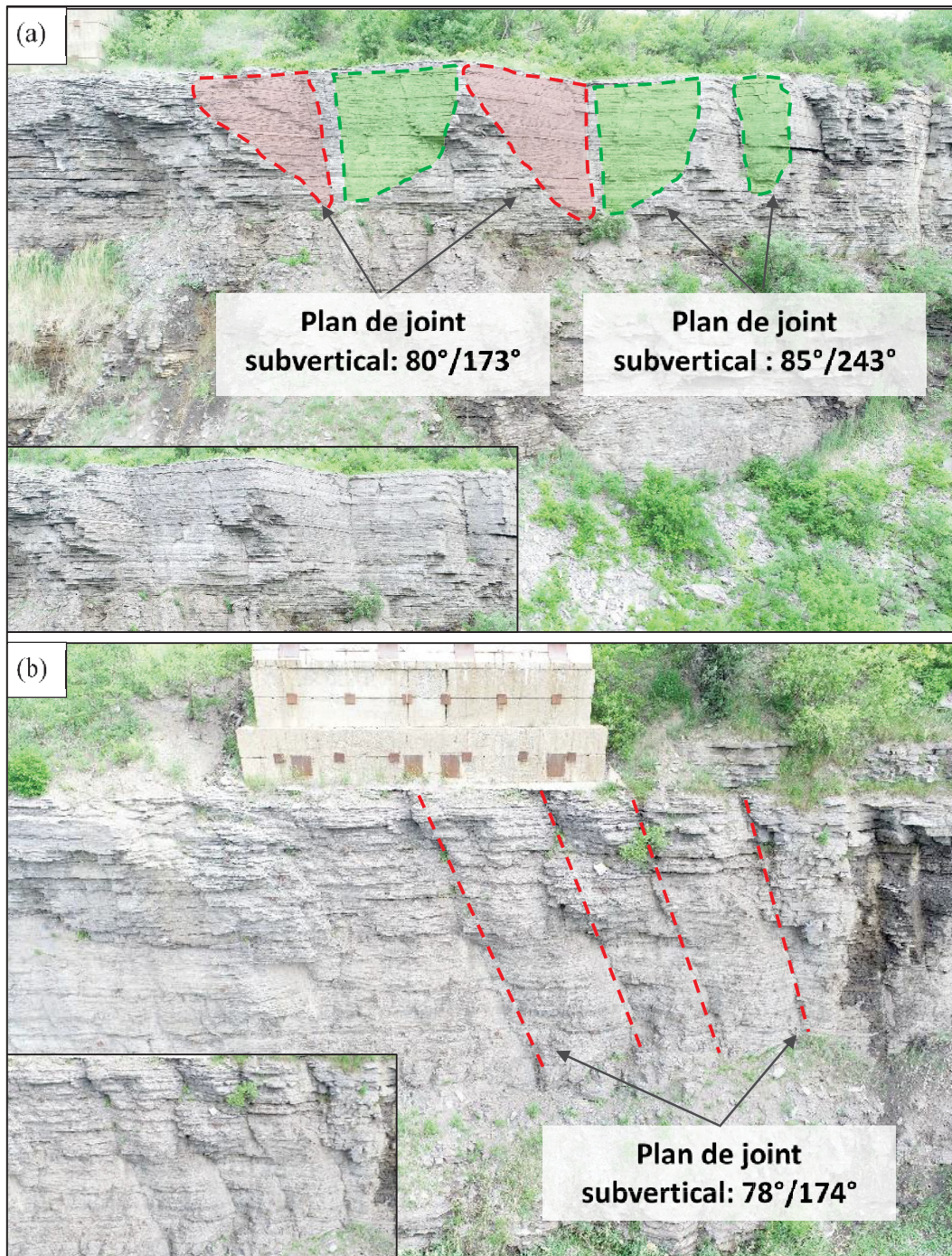


Figure 3.15 Exemples de joints subverticaux observés dans les parois de la carrière Francon. Les discontinuités raides recoupent la stratification calcaire et contribuent à la segmentation du massif en blocs

La combinaison entre la stratification subhorizontale et les joints subverticaux produit une architecture en blocs bien visible sur les fronts rocheux. Cette architecture est importante du point de vue géomécanique, car elle contrôle la forme des volumes potentiellement mobilisables et la possibilité de certains mécanismes cinématiques. Les intersections entre familles de joints raides peuvent former des géométries compatibles avec des ruptures en coin, tandis que la stratification et certains plans de faiblesse peuvent favoriser localement des surfaces de décollement ou de dégradation.

Cette segmentation structurale est illustrée à la Figure 3.16. Les blocs délimités par les joints et par les surfaces de stratification traduisent le caractère discontinu du massif rocheux. Cette configuration explique pourquoi l'analyse structurale et l'analyse cinématique sont nécessaires pour interpréter les formes d'instabilité apparente cartographiées dans les modèles LiDAR et photogrammétriques.



Figure 3.16 Segmentation structurale du massif rocheux dans la carrière Francon. Les vues montrent l'interaction entre la stratification subhorizontale et les familles de joints subverticaux, qui délimitent des blocs rocheux de géométrie variable

Ainsi, le contexte structural de la carrière Francon repose principalement sur l'interaction entre les plans de stratification et les familles de joints subverticaux. Ces discontinuités contrôlent la compartimentation du massif, la géométrie des blocs et l'expression de plusieurs formes morphologiques observées sur les parois, notamment les zones fracturées, les blocs partiellement individualisés, les surfaces altérées et les surplombs. Cette organisation structurale constitue donc une base essentielle pour les analyses cinématiques et l'interprétation du géorisque apparent développées dans les chapitres suivants.

3.7 Conditions opérationnelles et hydroclimatiques du dépôt de neige

3.7.1 Contexte climatique et cycles gel–dégel

La carrière Francon est située dans le contexte climatique de Montréal, caractérisé par un climat continental humide froid, avec des hivers longs, des précipitations neigeuses fréquentes et de nombreux cycles de gel–dégel entre la fin de l'automne et le début du printemps. Ces conditions climatiques sont importantes pour l'analyse des parois rocheuses, car elles favorisent l'alternance entre gel, fonte, infiltration et regel dans les discontinuités du massif. En moyenne, environ 190 cm de neige tombent chaque hiver sur l'île de Montréal, mais cette valeur peut être largement dépassée lors de saisons exceptionnelles, comme durant l'hiver 2007–2008 où près de 300 cm de neige ont été enregistrés (Environnement Canada, 2020; Ville de Montréal, 2018; Tremblay et al., 2019).

Dans une carrière profonde, ces conditions climatiques peuvent être amplifiées par la morphologie même de la fosse. Les parois rocheuses exposées, les zones végétalisées, les accumulations de neige et les différences d'altitude entre les paliers créent des contrastes thermiques importants. La Figure 3.17 présente le plan thermique de la carrière en conditions estivales et hivernales. Elle montre que les parois rocheuses exposées constituent les secteurs les plus chauds en été, tandis qu'en hiver, la température diminue avec la profondeur de la fosse et avec la présence d'accumulations de neige dans certains secteurs.

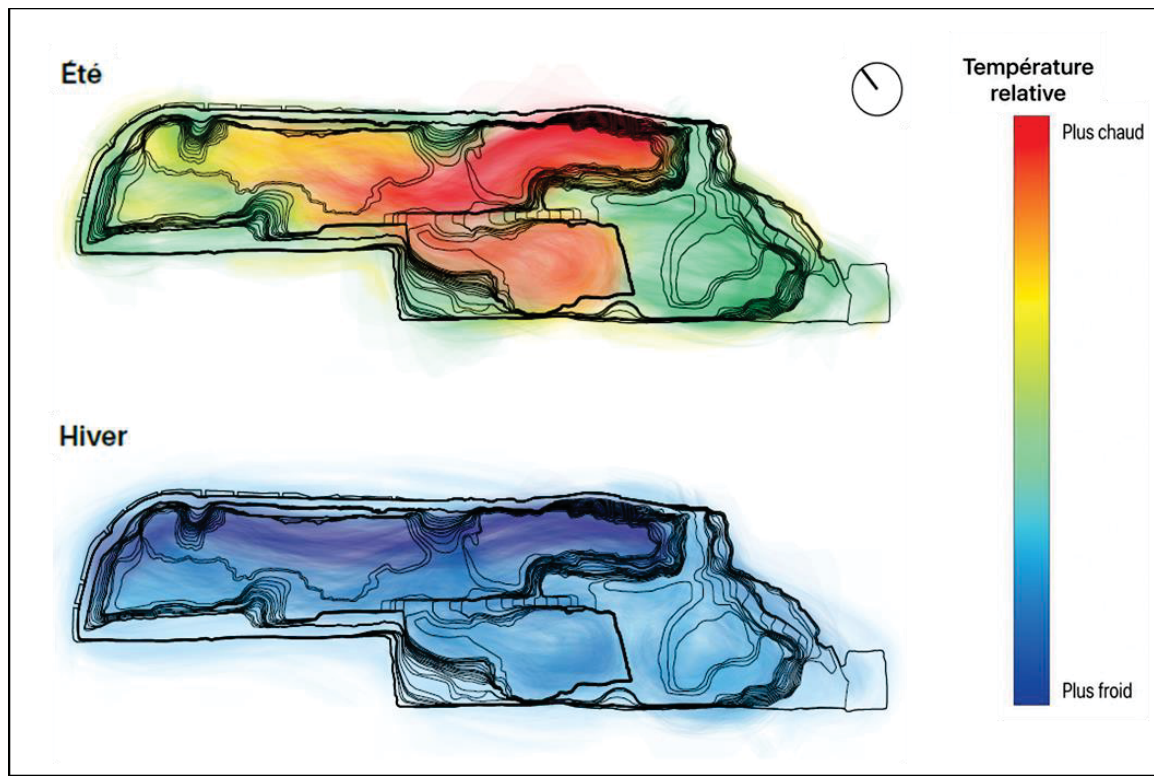


Figure 3.17 Plan thermique de la carrière Francon en conditions estivales et hivernales. En été, les parois rocheuses exposées constituent les zones les plus chaudes du site, tandis que les zones végétalisées demeurent plus fraîches. En hiver, la température diminue avec la profondeur de la fosse et les accumulations de neige accentuent le refroidissement de certains paliers. Ces contrastes thermiques conditionnent l'intensité des cycles de gel–dégel agissant sur les discontinuités des parois rocheuses

Tiré de Tremblay et al. (2019)

Ces variations thermiques saisonnières constituent une condition importante pour l'interprétation des formes d'altération et de dégradation visibles sur les parois. Les cycles répétés de gel–dégel peuvent favoriser l'ouverture progressive des discontinuités, la désagrégation superficielle des niveaux plus faibles et l'évolution de certaines surfaces fracturées ou altérées. Dans le cadre de ce mémoire, ces conditions sont considérées comme un facteur environnemental pouvant influencer l'expression des instabilités apparentes cartographiées sur les modèles 3D.

3.7.2 Organisation des opérations de dépôt de neige

Depuis l'arrêt des activités d'exploitation, la carrière Francon est utilisée comme site majeur de dépôt de neige pour la Ville de Montréal. Elle reçoit une part importante de la neige collectée sur le territoire montréalais, estimée à environ 40 % de la neige ramassée sur l'île. Sa grande capacité de stockage, de l'ordre de plusieurs millions de mètres cubes, en fait un site stratégique pour la gestion hivernale de la neige urbaine (Vivre Saint-Michel en santé, 2018; Tremblay et al., 2019; SNC-Lavalin inc, 2023b).

Les volumes déposés peuvent être très importants. En 2018, environ 120 000 voyages de camions ont été enregistrés, correspondant à près de 4,4 millions de mètres cubes de neige déposée dans la carrière. Dans certains secteurs, des volumes résiduels de neige peuvent persister après la saison de fonte, ce qui témoigne de l'ampleur des accumulations et de leur durée d'interaction avec le site (Tremblay et al., 2019).

Les opérations de déversement sont organisées autour de quais et de plateformes aménagés en bordure de la fosse. Les camions reculent jusqu'aux points de déchargement et déversent la neige par gravité vers l'intérieur de la carrière. Ce mode d'opération produit des cônes de neige au contact des banquettes et des parois rocheuses. La Figure 3.18 montre plusieurs exemples de déversement gravitaire depuis les quais et la formation de cônes de neige en appui contre les fronts rocheux.



Figure 3.18 Opérations de déversement de neige usée à la carrière Francon. Les vues illustrent le déversement gravitaire depuis les quais, la formation de cônes de neige au contact des parois rocheuses et leur distribution spatiale le long des bermes de la carrière

La circulation des camions, les zones de dépôt, les quais de déversement, les bassins de rétention et les chemins d'écoulement des eaux sont organisés selon une logique opérationnelle précise. Cette organisation spatiale est importante pour le mémoire, car elle permet d'identifier les secteurs où les sollicitations liées au dépôt de neige sont les plus concentrées.

3.7.3 Nature de la neige usée et évolution saisonnière des charges

La neige déposée dans la carrière ne correspond pas à un matériau naturel homogène. Elle est composée d'un mélange de neige, de glace, de sels de déglacage, d'abrasifs, de sable, de gravier, de résidus urbains et de contaminants transportés depuis les rues, ruelles et infrastructures de la ville. Cette composition est importante, car elle modifie les conditions chimiques et hydriques auxquelles les parois rocheuses peuvent être exposées lors de la fonte (Tremblay et al., 2019).

Durant l'hiver, les accumulations se construisent progressivement. Les premiers dépôts se concentrent généralement vers les zones basses et les banquettes inférieures, puis les volumes augmentent au fil des épisodes de tempête. À mesure que les piles de neige se développent, les charges peuvent s'appuyer contre certains segments de parois ou de banquettes. Cette évolution saisonnière entraîne une variation temporelle des sollicitations mécaniques et hydriques appliquées au massif rocheux.

Les secteurs directement en contact avec les cônes de neige peuvent ainsi être soumis à des conditions particulières : charge temporaire, maintien prolongé de l'humidité, infiltration d'eaux de fonte, concentration de sels et alternance gel-dégel. Ces conditions ne signifient pas automatiquement qu'une rupture est active ou imminente, mais elles peuvent contribuer à la dégradation progressive de certaines discontinuités, surtout lorsque les plans de stratification, les joints subverticaux ou les contacts lithologiques sont déjà ouverts ou altérés.

Dans le cadre de ce mémoire, cette évolution saisonnière est importante, car elle permet de distinguer les secteurs simplement contrôlés par la structure géologique de ceux qui sont également influencés par les opérations de dépôt de neige. Elle fournit donc un élément d'interprétation pour relier les observations morphologiques visibles sur les modèles 3D aux conditions environnementales et opérationnelles du site.

3.7.4 Eaux de fonte, drainage et conditions hydrogéologiques

Au printemps et durant la période de fonte, les accumulations de neige libèrent de grandes quantités d'eau. Ces eaux peuvent ruisseler vers les zones basses de la carrière, s'accumuler dans les bassins de rétention, s'infiltrer dans les dépôts meubles ou circuler localement dans les discontinuités du massif rocheux. Les eaux de fonte transportent également des sels, des abrasifs et des contaminants issus de la neige urbaine, ce qui peut modifier les conditions chimiques au contact des parois.

La gestion des eaux de fonte repose sur un système de bassins de rétention et de pompage. Les eaux sont dirigées vers les zones basses de la carrière, puis évacuées vers le réseau municipal lorsque nécessaire. Le fonctionnement saisonnier de ce système est présenté à la Figure 3.19, qui schématise l'accumulation de neige en hiver, la fonte au printemps et le drainage des eaux vers les bassins et les stations de pompage.

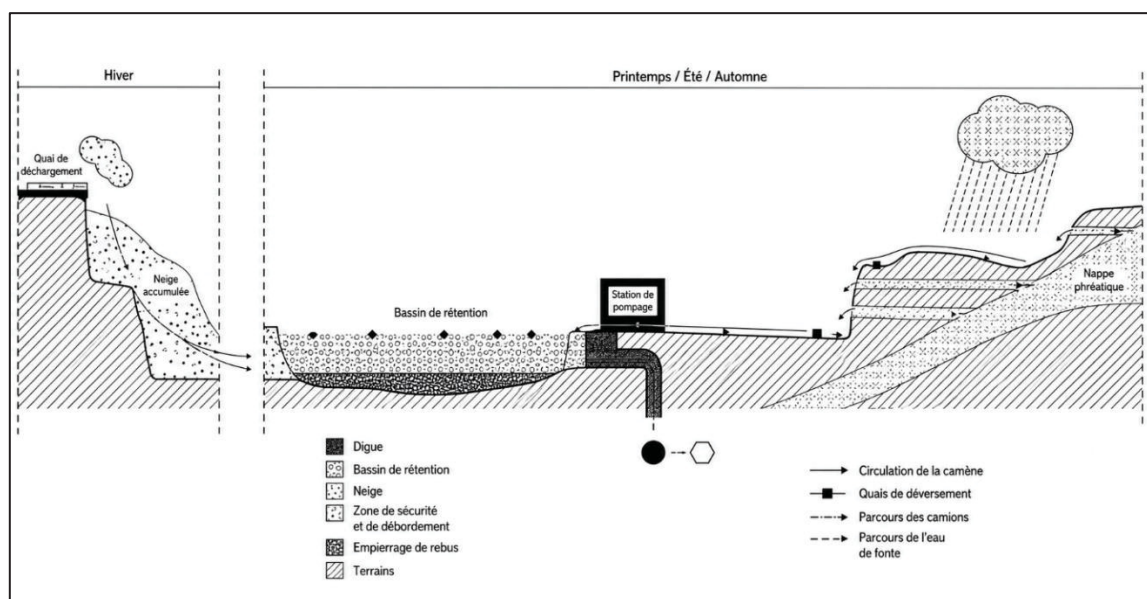


Figure 3.19 Schéma du ruissellement, de la gestion des contaminants et de l'évacuation des eaux à la carrière Francon selon les saisons. En hiver, la neige s'accumule contre les parois rocheuses et les eaux s'écoulent vers les bassins de rétention. Au printemps et en été, la fonte libère les contaminants, qui sont contenus par les bassins puis pompés vers le réseau municipal

Tiré de Tremblay et al. (2019)

Les données hydrogéologiques disponibles indiquent également la présence de niveaux d'eau souterraine et de zones de suintement observées le long de certaines banquettes. Ces suintements sont importants pour l'analyse des parois, car ils peuvent indiquer des chemins préférentiels de circulation d'eau dans les joints, les contacts lithologiques ou les niveaux plus perméables. Dans les calcaires fracturés, l'eau peut circuler à travers les discontinuités et

contribuer à la réduction locale de la résistance au cisaillement, à l'altération des surfaces ou à l'augmentation temporaire des pressions interstitielles.

La combinaison entre l'eau de fonte, la salinité liée aux sels de déglacage, les cycles de gel–dégel et les discontinuités du massif constitue donc une condition environnementale importante pour l'évaluation des parois rocheuses. SNC-Lavalin (2023) a d'ailleurs retenu une hypothèse conservatrice de pression d'eau à 100 % dans les joints dans certaines analyses de stabilité, ce qui souligne l'importance de considérer les conditions hydriques dans l'évaluation du comportement du massif.

Ainsi, les conditions opérationnelles et hydroclimatiques du dépôt de neige ne doivent pas être interprétées comme un facteur isolé. Elles interagissent avec la géologie locale, la structure du massif, la présence de joints et les contacts lithologiques. Cette interaction constitue un élément essentiel pour comprendre la distribution des surfaces altérées, des zones de suintement, des formes de dégradation et des instabilités apparentes observées dans les modèles LiDAR et photogrammétriques.

3.8 Processus de dégradation des parois rocheuses et distinction entre contrôles naturels et opérationnels

Les sections précédentes ont présenté le contexte géologique, structural, opérationnel et hydroclimatique de la carrière Francon. Ces éléments définissent les conditions dans lesquelles les parois rocheuses évoluent. La présente section vise à décrire les principaux processus susceptibles d'influencer l'état morphologique des parois, sans chercher à quantifier leur distribution spatiale ni à attribuer chaque forme observée à une cause unique. Cette distinction est importante, car la quantification des éléments d'instabilité apparente cartographiés et leur comparaison spatiale sont développées dans les chapitres suivants.

Les formes visibles sur les parois peuvent résulter de plusieurs contrôles qui agissent simultanément. La stratification, les familles de joints, les contacts lithologiques, les infiltrations d'eau, les cycles de gel–dégel et les opérations de dépôt de neige peuvent tous

contribuer, à différents degrés, à l'évolution des surfaces rocheuses. Dans le cadre de ce mémoire, ces formes sont donc considérées comme des indices morphologiques observables. Elles ne constituent pas nécessairement des preuves de rupture active ou imminente, mais elles fournissent un contexte visuel et géomécanique utile pour comprendre les classes d'éléments d'instabilité apparente cartographiées par la suite sur les modèles 3D. Cette lecture contextuelle constitue une étape nécessaire avant la cartographie systématique des éléments d'instabilité apparente cartographiés, car elle permet d'identifier les principaux types d'indices morphologiques susceptibles d'être reconnus sur les modèles LiDAR et photogrammétriques.

3.8.1 Rôle de la géologie structurale dans la segmentation des parois

La géologie structurale du massif joue un rôle déterminant dans l'organisation et l'évolution des parois de la carrière Francon. Les joints subverticaux, combinés à la stratification subhorizontale des bancs calcaires, segmentent le massif rocheux en compartiments et en blocs localement individualisés. Cette organisation structurale influence la morphologie des parois et peut favoriser, selon la géométrie locale, l'ouverture de fractures, le détachement progressif de fragments rocheux ou le développement de zones plus fragilisées.

La Figure 3.20 montre des exemples de parois où les joints subverticaux recoupent les bancs calcaires stratifiés. Ces discontinuités constituent des plans de faiblesse naturels qui peuvent contrôler localement la forme des parois et la distribution des secteurs plus fracturés. Leur interaction avec la stratification contribue à expliquer certaines formes de dégradation observées, sans que celles-ci soient nécessairement liées directement aux opérations actuelles de dépôt de neige.

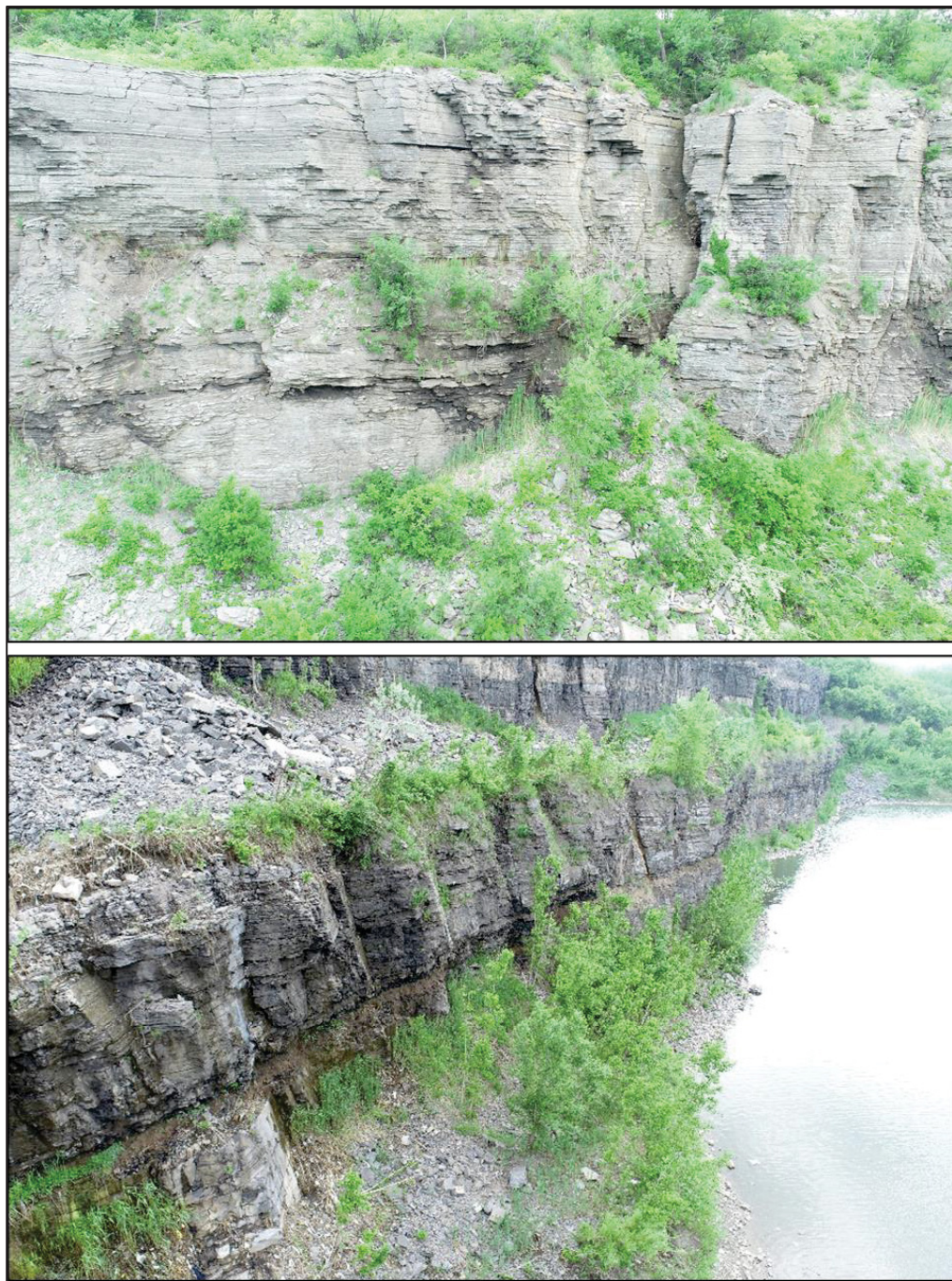


Figure 3.20 Exemples de segmentation structurale des parois rocheuses de la carrière Francon. Les joints subverticaux recoupent les bancs calcaires subhorizontaux et contribuent à individualiser localement des blocs rocheux, influençant ainsi la morphologie et la dégradation des parois

L'intersection de ces familles de joints avec la stratification horizontale génère un profil de crête caractéristique en dents de scie, directement observable sur les parois de la carrière (Figure 3.21). Ce profil morphologique constitue un indicateur visuel de l'état de fracturation du massif et de l'avancement des processus de dégradation structurale.

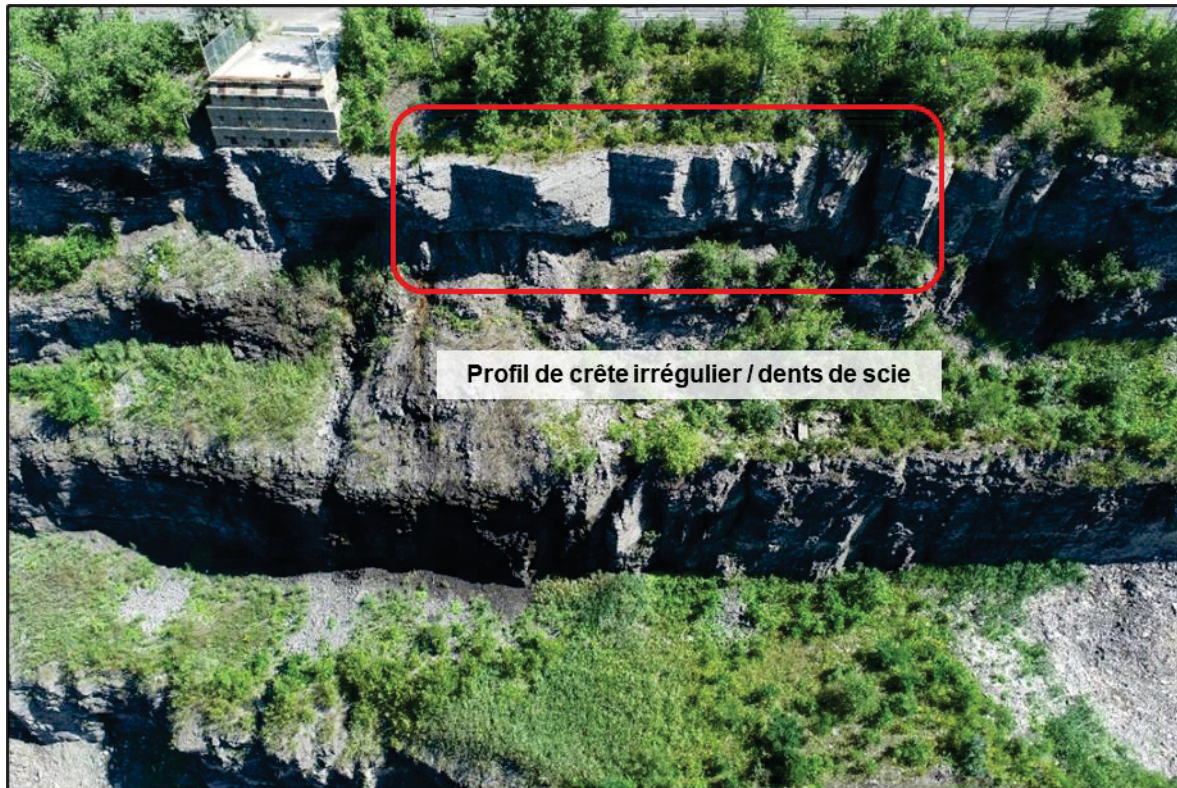


Figure 3.21 Morphologie de crête irrégulière contrôlée par des plans structuraux subverticaux à la carrière Francon. Les joints recoupent les bancs calcaires subhorizontaux et contribuent à former un profil localement en dents de scie, illustrant la segmentation structurale de la paroi rocheuse

3.8.2 Conditions des joints, infiltration et altération locale

Les parois calcaires de la carrière Francon sont naturellement influencées par la combinaison entre la stratification subhorizontale, les familles de joints subverticaux et la circulation de l'eau. Les joints recoupent les bancs calcaires et peuvent délimiter des blocs ou des colonnes

rocheuses. Les plans de stratification, quant à eux, forment des surfaces de faiblesse potentielles, surtout lorsque des niveaux plus argileux ou schisteux sont présents entre les bancs calcaires.

L'eau joue un rôle important dans cette organisation. Elle peut circuler le long des joints, des surfaces de stratification ou des contacts lithologiques, puis favoriser l'altération des surfaces exposées. En période froide, l'eau présente dans les discontinuités peut également être soumise à des cycles répétés de gel et de dégel, contribuant à l'ouverture progressive des fractures, à l'écaillage superficiel et à la désagrégation des niveaux plus faibles.

La Figure 3.22 illustre cette relation entre structure du massif et circulation de l'eau. Les vues montrent des joints subverticaux, des bancs calcaires subhorizontaux et des traces sombres associées à l'humidité ou à des écoulements préférentiels le long des discontinuités.

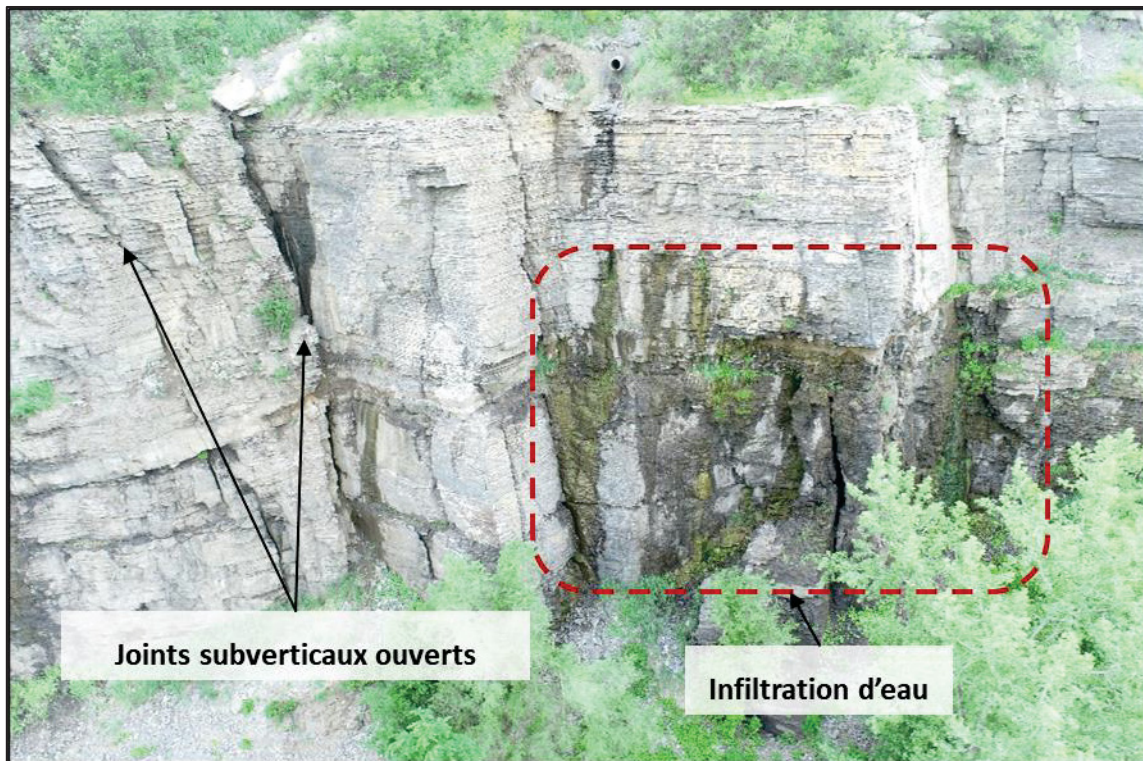


Figure 3.22 Structures géologiques et indices d'humidité observables sur les parois rocheuses de la carrière Francon. Les vues montrent l'interaction entre les joints subverticaux, la stratification calcaire subhorizontale et les traces sombres associées à l'infiltration ou au suintement le long des discontinuités

Ces observations permettent de situer les processus hydromécaniques dans le contexte naturel du massif. Elles ne permettent toutefois pas, à elles seules, de déterminer si une instabilité est active. Elles indiquent plutôt des conditions favorables à l'altération progressive ou à la dégradation de certaines surfaces structurales.

L'alternance entre bancs calcaires plus compétents et niveaux plus argileux, schisteux ou altérés peut favoriser une érosion différentielle des parois. Les niveaux plus faibles sont généralement plus sensibles à l'eau, au lessivage et aux cycles climatiques. Leur retrait progressif peut produire des renforcements horizontaux dans la paroi, tandis que les bancs calcaires plus résistants demeurent plus saillants.

La Figure 3.23 montre des exemples de renforcements horizontaux associés à cette érosion différentielle. Ces formes traduisent l'expression visible de contrastes lithologiques ou d'altération entre des niveaux de résistance différente.

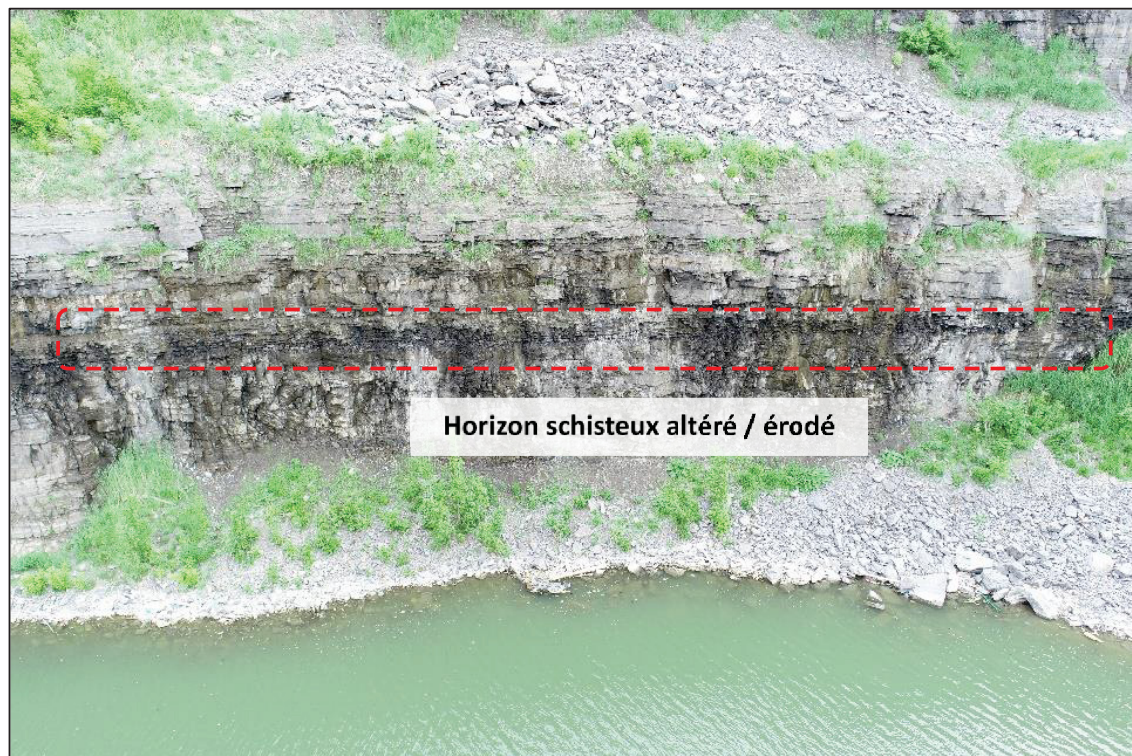


Figure 3.23 Exemples d'érosion différentielle des horizons plus faibles dans les parois de la carrière Francon. Les vues montrent des renforcements horizontaux et des zones sombres associées au lessivage préférentiel de niveaux argileux, schisteux ou altérés intercalés entre des bancs calcaires plus résistants

Les observations de terrain montrent la présence d'horizons sombres subhorizontaux intercalés dans la séquence calcaire, correspondant aux contacts avec les sills observés dans la carrière Francon (Figure 3.24). Ces niveaux contrastent nettement avec les bancs calcaires gris clair encaissants. Les contacts sont continus latéralement et soulignent des interfaces lithologiques bien marquées dans la paroi. Certaines surfaces présentent des teintes brunâtres, orangées et verdâtres, indiquant une altération locale et une oxydation possible des minéraux ferri-fères. La végétation observée le long de plusieurs horizons suggère également des zones où l'humidité

peut être davantage retenue. Ces contacts constituent donc des discontinuités lithologiques importantes, susceptibles d'influencer localement la circulation de l'eau, l'altération différentielle et la segmentation des parois rocheuses.

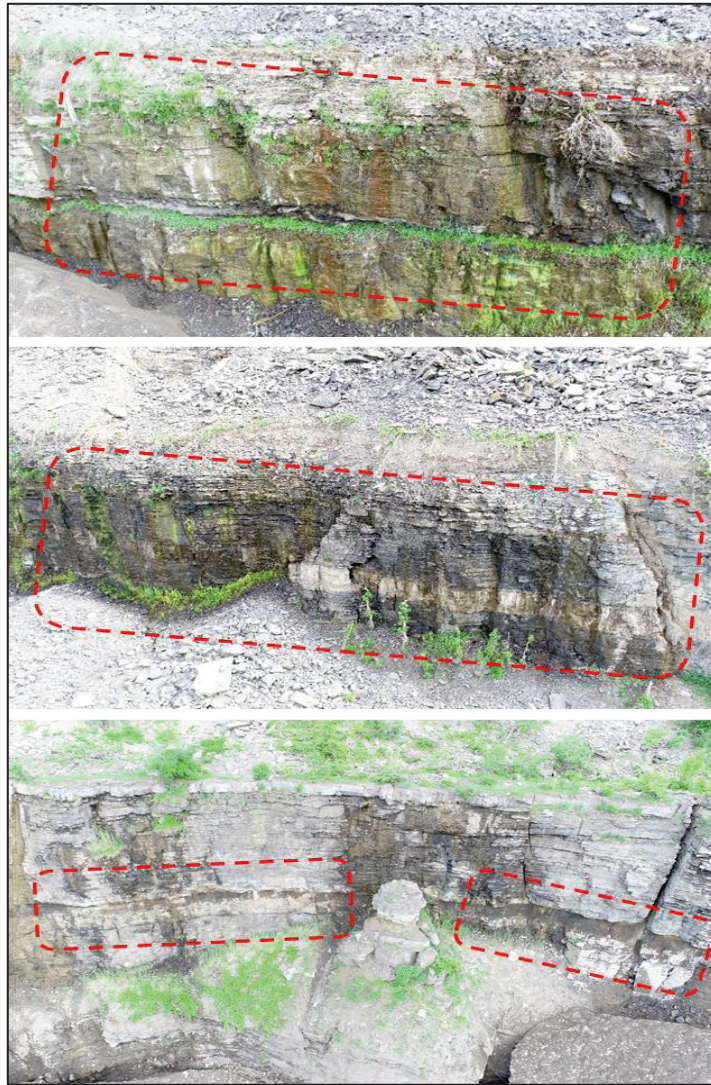


Figure 3.24 Exemples de contacts entre les bancs calcaires et les sills dans la carrière Francon. Les horizons sombres subhorizontaux contrastent avec les calcaires gris clair encaissants et présentent localement des teintes d'altération, d'oxydation et une végétation associée aux zones plus humides

3.8.3 Mécanismes de détachement contrôlés par la structure

Les observations morphologiques indiquent que plusieurs formes de dégradation des parois suivent l'organisation structurale du massif rocheux. Les plans de détachement apparents s'alignent fréquemment avec les familles de joints subverticaux et avec les surfaces de stratification subhorizontales. Cette relation montre que la géométrie des discontinuités influence directement la forme des blocs, des cicatrices de détachement et des zones de rupture observées sur les parois (Figure 3.25).

La Figure 3.25a montre une cicatrice de détachement délimitée par des plans structuraux bien marqués. Cette forme suggère que le détachement suit en partie le réseau naturel de discontinuités, notamment les joints subverticaux et les surfaces de stratification. Dans ce type de configuration, la gravité peut favoriser le détachement de volumes rocheux lorsque les plans structuraux individualisent suffisamment les blocs.

La Figure 3.25b illustre un sous-cavage érosif développé le long d'un horizon plus faible. Lorsque l'érosion différentielle retire une partie du support basal sous les bancs calcaires, des porte-à-faux ou des surplombs peuvent se former localement. Cette perte de support peut augmenter la sensibilité des blocs au détachement, surtout lorsque les joints subverticaux sont déjà bien exprimés dans la paroi.

Ces observations montrent que les formes de dégradation ne sont pas uniquement liées aux conditions opérationnelles actuelles. Elles sont d'abord fortement contrôlées par la structure héritée du massif rocheux. Les joints, la stratification et les horizons plus faibles définissent des surfaces préférentielles le long desquelles les blocs peuvent se détacher ou évoluer progressivement. L'eau, l'altération, le gel-dégel et les opérations actuelles peuvent ensuite accentuer localement ces processus en fragilisant les discontinuités et les niveaux plus sensibles.

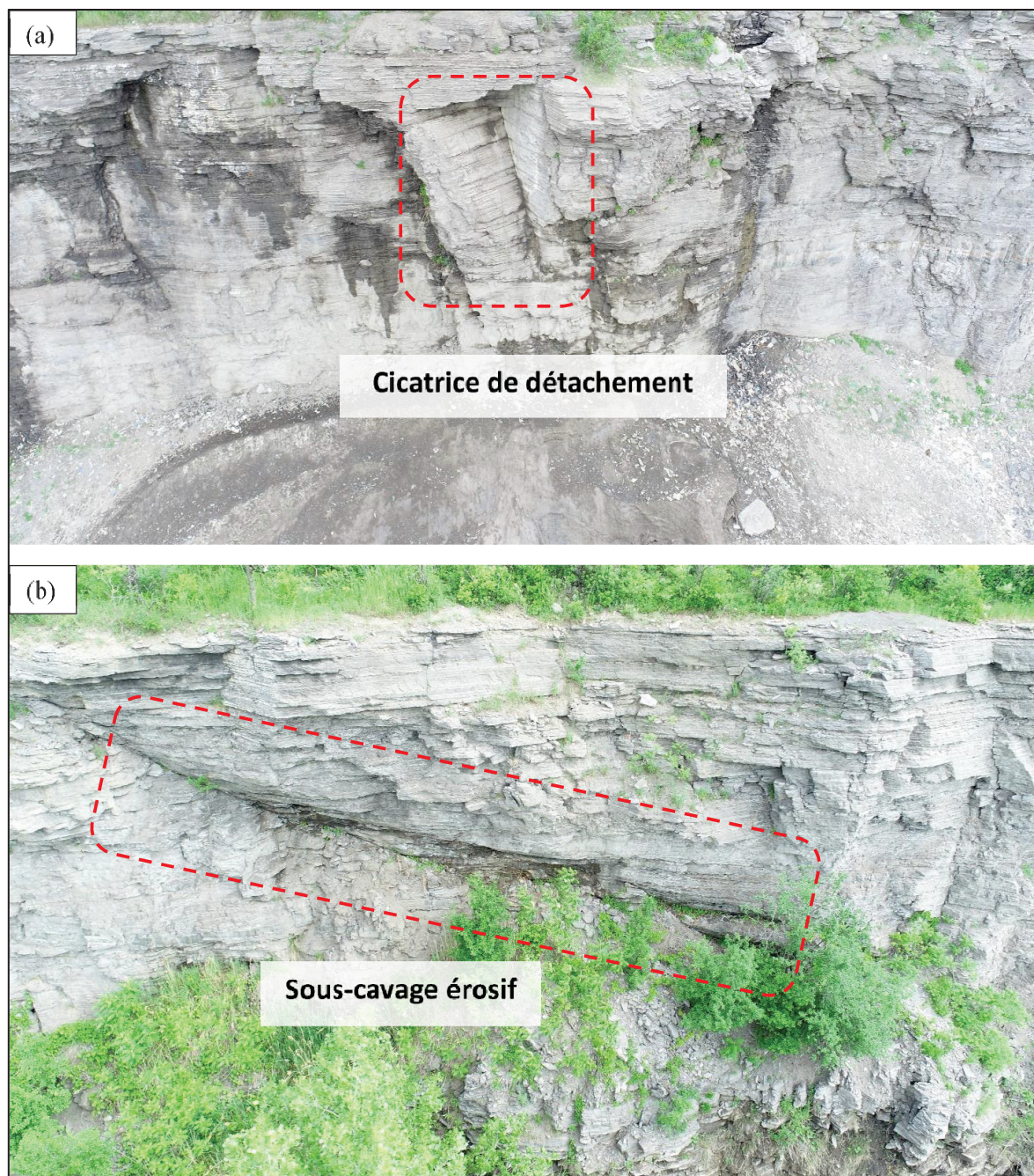


Figure 3.25 Exemples de mécanismes de détachement contrôlés par la structure dans les parois de la carrière Francon : (a) cicatrice de détachement délimitée par des plans structuraux ; (b) sous-cavage érosif associé à l'érosion différentielle d'un horizon plus faible

3.8.4 Effets potentiels des opérations de dépôt de neige sur les parois

Les opérations de dépôt de neige peuvent modifier localement les conditions d'exposition des parois rocheuses. Le déversement gravitaire depuis les quais, l'accumulation de cônes de neige, le contact prolongé entre la neige et la paroi, ainsi que la fonte saisonnière peuvent créer des conditions mécaniques et hydriques particulières. Ces conditions peuvent accentuer certains processus déjà présents dans le massif, notamment l'érosion de surface, l'humidité prolongée, l'infiltration dans les discontinuités et le lessivage de niveaux plus faibles.

Dans certains secteurs, les surfaces situées directement sous les points de déversement présentent une morphologie différente des parois voisines. La Figure 3.26a montre des pentes dégradées localisées sous les zones de déversement, principalement dans la partie supérieure des parois, à proximité des quais. Ces formes semblent suivre la trajectoire des apports de neige, de matériaux abrasifs et des eaux de fonte, plutôt que l'organisation structurale naturelle du massif rocheux.

La Figure 3.26b montre que cette dégradation peut se répéter le long de plusieurs points de déversement. Les zones érodées apparaissent localement alignées avec les trajectoires de déversement et non avec les plans de stratification ou les joints dominants. Cette différence d'orientation constitue un indice morphologique important pour distinguer les formes principalement contrôlées par la structure géologique de celles pouvant être influencées par les opérations de dépôt.



Figure 3.26 Effets morphologiques potentiels des opérations de dépôt de neige sur les parois de la carrière Francon : (a) pentes dégradées sous les points de déversement ; (b) répétition de zones érodées en partie haute de la paroi, près des quais. Ces formes sont compatibles avec une influence opérationnelle locale, sans constituer une preuve directe de causalité

Au-delà de l'effet mécanique direct, les opérations de dépôt de neige peuvent aussi entraîner des perturbations hydrologiques susceptibles d'influencer l'évolution des parois rocheuses. La fonte progressive de la neige déposée génère des volumes d'eau importants, dont l'évacuation est localement contrainte par la géométrie de la carrière. Dans certains secteurs, la configuration topographique favorise l'accumulation de l'eau de fonte dans des zones confinées ou peu drainées, où elle peut demeurer piégée pendant une période prolongée avant d'être évacuée par infiltration ou évaporation.

Ces conditions peuvent modifier localement le drainage, accroître l'humidité au contact des parois et favoriser des écoulements concentrés entre les talus d'éboulis et la roche en place. Les opérations de déversement peuvent également perturber les matériaux de surface, modifier les chemins de ruissellement sur les bermes et augmenter la rétention d'eau au-dessus de certains horizons moins perméables. Comme l'illustre la Figure 3.27, de telles conditions sont observables dans plusieurs secteurs de la carrière Francon, où des zones d'eau piégée et des écoulements concentrés apparaissent le long de la paroi.

La Figure 3.27a montre un exemple d'accumulation d'eau de fonte dans une zone confinée du mur nord, où l'écoulement semble canalisé entre le talus d'éboulis et la face rocheuse. La Figure 3.27b montre un cas similaire sur le mur nord-est, où plusieurs zones d'eau piégée sont visibles au pied de la paroi. Ces observations suggèrent que la concentration locale des écoulements peut contribuer à maintenir des conditions humides favorables au lessivage, à l'altération et à la dégradation progressive de certaines surfaces rocheuses.

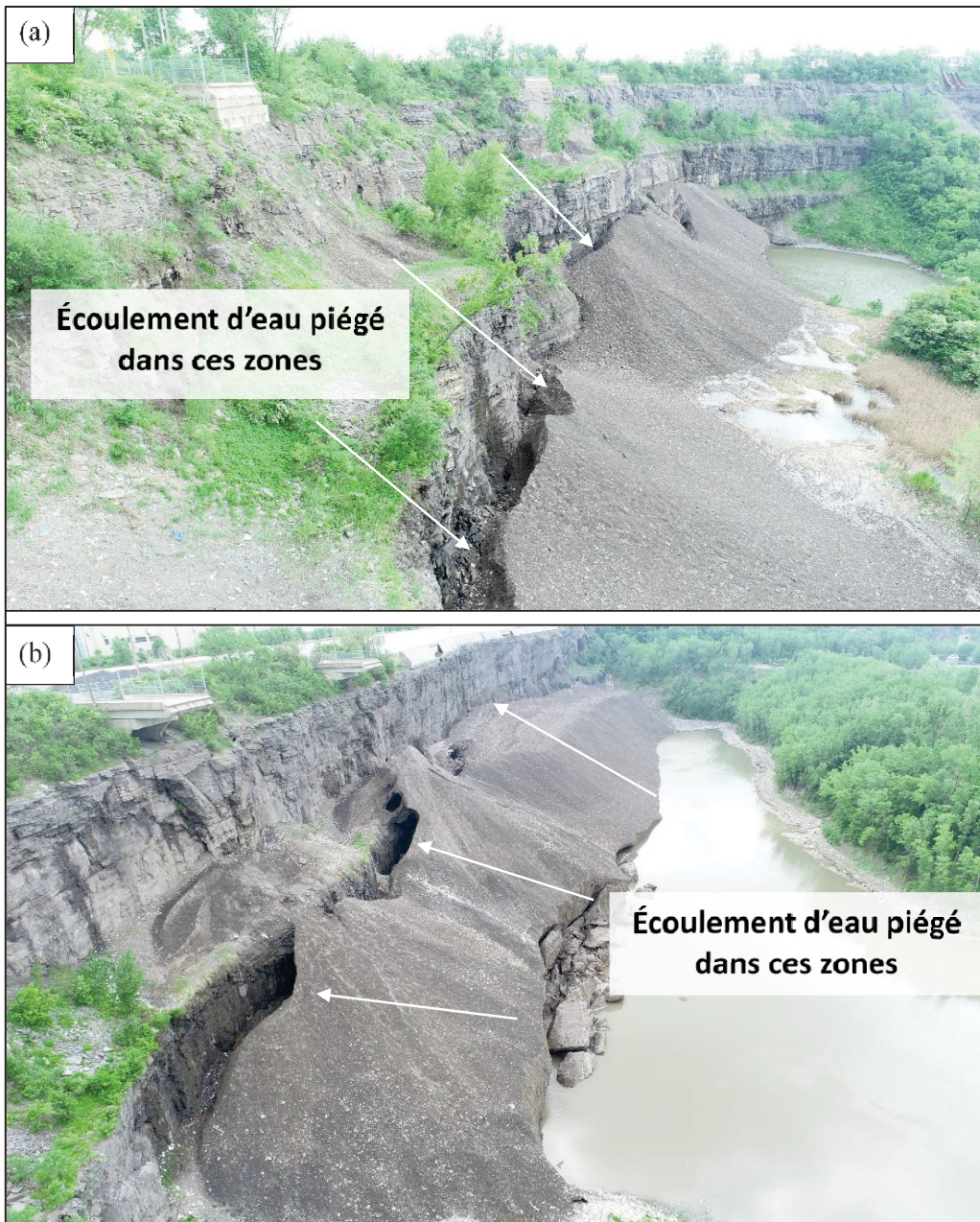


Figure 3.27 Exemples d'accumulation et d'écoulement d'eau de fonte piégés dans des zones confinées de la carrière Francon. (a) Vue du mur nord montrant un écoulement concentré entre le talus d'éboulis et la face rocheuse. (b) Vue du mur nord-est illustrant plusieurs zones où l'eau de fonte demeure piégée au pied de la paroi. Ces conditions sont susceptibles de favoriser localement le maintien de l'humidité, le lessivage et l'altération progressive des surfaces rocheuses

Dans la continuité de ces observations, certains secteurs exposés aux écoulements présentent des marques d'érosion visibles directement sur les faces rocheuses. Ces marques prennent la forme de lignes verticales ou subverticales, localement associées à des traces plus sombres et à des zones de lessivage sur la paroi (Figure 3.28). Elles indiquent les trajectoires préférentielles suivies par l'eau de fonte lors de son ruissellement depuis les zones de déversement ou depuis les bermes supérieures.

La Figure 3.28a montre plusieurs lignes d'érosion développées sous les zones de déversement, tandis que la Figure 3.28b illustre une vue rapprochée de traces similaires sur une portion de paroi. Ces formes constituent des indices morphologiques complémentaires aux zones d'eau piégée présentées précédemment. Elles permettent d'identifier les secteurs où le ruissellement peut contribuer au lessivage, à l'altération superficielle et à la dégradation progressive des horizons plus sensibles.



Figure 3.28 Exemples de lignes d'érosion observées sur les parois de la carrière Francon. (a) Vue d'ensemble montrant plusieurs traces de ruissellement sous les zones de déversement. (b) Vue rapprochée illustrant des marques d'érosion sur la face rocheuse. Ces formes indiquent des trajectoires préférentielles d'écoulement susceptibles de favoriser le lessivage et l'altération superficiel

3.9 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a permis de situer la carrière Francon dans son contexte géographique, géologique, morphologique, hydrologique et opérationnel. L'analyse du site montre que les parois rocheuses résultent à la fois de l'organisation naturelle du massif et de l'évolution anthropique de la carrière, depuis son exploitation jusqu'à sa reconversion en site municipal de dépôt de neige. La géométrie des fronts, l'organisation en paliers et en bermes, la stratification, les

discontinuités, les intrusions magmatiques et les conditions de drainage constituent ainsi le cadre général dans lequel doivent être interprétées les formes visibles sur les parois.

Les observations présentées montrent également que les conditions d'exposition ne sont pas uniformes à l'échelle de la carrière. Les parois peuvent être soumises à des apports variables de neige, de matériaux granulaires et d'eau de fonte, selon leur position par rapport aux quais et aux secteurs de déversement. Les accumulations de neige, leur redistribution, leur contact prolongé avec la roche et les écoulements associés à la fonte peuvent modifier localement l'humidité, les chemins de ruissellement et les conditions de drainage au voisinage des parois.

Plusieurs indices morphologiques compatibles avec une influence opérationnelle locale ont été observés. Ils comprennent notamment des surfaces dégradées situées sous certains points de déversement, des zones d'érosion répétées dans la partie supérieure des parois, des accumulations d'eau dans des secteurs confinés et des traces verticales ou subverticales de ruissellement. Leur distribution semble, dans certains cas, davantage associée à la position des quais, à la topographie des bermes et aux trajectoires d'écoulement qu'à l'orientation de la stratification ou des principales familles de discontinuités.

Ces observations ne permettent toutefois pas d'établir une relation causale directe entre les opérations de dépôt et la détérioration des parois. Les formes observées peuvent résulter de l'interaction de plusieurs facteurs, notamment la structure du massif rocheux, l'altération, la fracturation, les cycles de gel-dégel, les précipitations naturelles, la circulation de l'eau et l'historique d'excavation. Les opérations de dépôt doivent donc être considérées comme une composante possible du contexte d'exposition, et non comme un facteur explicatif unique.

Le site d'étude présente ainsi une combinaison de contrôles naturels et opérationnels qui justifie une approche de caractérisation intégrée. Il est nécessaire de distinguer les formes principalement organisées par la structure géologique de celles dont la distribution spatiale est compatible avec une influence hydrique, topographique ou opérationnelle. Cette distinction constitue un enjeu central pour l'interprétation des instabilités apparentes et pour la comparaison ultérieure des différents secteurs de la carrière.

Le chapitre suivant présente les outils et les méthodes employés pour documenter ces conditions à partir de données LiDAR, photogrammétriques et RGB. Il décrit les étapes d'acquisition, de préparation et de traitement des modèles tridimensionnels, ainsi que les procédures utilisées pour caractériser la géométrie des parois, extraire les orientations structurales et construire le référentiel spatial nécessaire à la cartographie des formes d'instabilité apparentes.

CHAPITRE 4

OUTILS ET MÉTHODES

4.1 Préambule

Ce chapitre présente le cadre méthodologique adopté pour l'acquisition, la préparation et le traitement des données tridimensionnelles utilisées dans ce mémoire. Il vise à décrire les outils, les sources de données et les principales étapes de traitement permettant de produire des représentations numériques fiables des parois rocheuses de la carrière Francon. Ces modèles constituent la base géométrique nécessaire aux analyses structurales, morphologiques et de géorisque apparent développées dans les chapitres suivants.

La démarche méthodologique repose principalement sur l'exploitation de données LiDAR acquises par UAV, de modèles photogrammétriques, d'images RGB, d'observations de terrain et de documents techniques existants. L'utilisation conjointe des nuages de points LiDAR et des modèles photogrammétriques est largement reconnue pour la caractérisation des parois rocheuses, l'extraction de paramètres géométriques et l'appui à l'analyse structurale des massifs rocheux (Sturzenegger & Stead, 2009 ; Jaboyedoff et al., 2012 ; Westoby et al., 2012).

Dans le cadre de ce mémoire, la complémentarité de ces sources permet de documenter la géométrie des parois, de soutenir l'identification des éléments morphologiques visibles associés aux instabilités apparentes et de préparer les nuages de points en vue des analyses spatiales et structurales réalisées aux étapes suivantes.

4.2 Acquisition des données LiDAR et photogrammétriques

L'acquisition des données tridimensionnelles constitue une étape centrale de la démarche méthodologique, puisqu'elle détermine la qualité géométrique, la couverture spatiale et le niveau de détail des modèles 3D produits par la suite. Dans ce mémoire, les données principales

ont été acquises à l'aide d'une plateforme UAV équipée d'un capteur LiDAR, complétée par des images RGB et des données photogrammétriques utilisées pour l'interprétation visuelle des parois rocheuses.

Le recours à une plateforme UAV est adapté au contexte de la carrière Francon, où les parois sont hautes, irrégulières et parfois difficiles d'accès depuis le sol. Les méthodes conventionnelles de levé, comme les mesures directes au compas-clinomètre ou à la station totale, peuvent offrir une précision locale, mais elles demeurent limitées lorsque les surfaces sont abruptes, instables, partiellement masquées ou difficiles à atteindre. Les acquisitions par UAV permettent de réduire ces contraintes en offrant des points de vue aériens et obliques, tout en améliorant la couverture des secteurs élevés ou difficilement accessibles (Jaboyedoff et al., 2012; M. J. Lato & Vöge, 2012).

4.2.1 Plateforme UAV et capteurs utilisés

Les acquisitions ont été réalisées à l'aide d'un drone quadricoptère DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur LiDAR Zenmuse L1. Cette plateforme a été retenue en raison de sa stabilité en vol, de sa capacité à embarquer un système de cartographie LiDAR et de son adéquation avec les contraintes opérationnelles d'un environnement de carrière. Le Matrice 300 RTK constitue une plateforme professionnelle adaptée aux levés en conditions exigeantes, notamment grâce à sa résistance aux intempéries, son autonomie de vol, son positionnement RTK et son système de détection d'obstacles. Ces caractéristiques sont particulièrement importantes pour les acquisitions à proximité de parois subverticales, où la sécurité du vol, la stabilité de la trajectoire et la précision du positionnement influencent directement la qualité des données acquises (Matrice, 2020).

Dans le contexte de la carrière Francon, l'utilisation d'une plateforme UAV permet d'acquérir des données à partir de points de vue variables, notamment des vues obliques adaptées à la caractérisation de parois rocheuses hautes, irrégulières ou difficilement accessibles depuis le sol. Cette flexibilité est essentielle pour limiter les zones d'ombre, améliorer la couverture des

surfaces subverticales et documenter les secteurs où les levés terrestres seraient moins efficaces ou moins sécuritaires.

Le capteur Zenmuse L1 intègre trois composantes principales : un scanner LiDAR, une unité de mesure inertielle et une caméra RGB. Le scanner LiDAR fonctionne selon le principe du temps de vol et permet d'obtenir des mesures directes de distance afin de produire des nuages de points tridimensionnels représentant la géométrie des parois. Selon les spécifications du fabricant, le capteur peut générer un nombre élevé de points par seconde et atteindre plusieurs centaines de mètres de portée dans des conditions favorables, ce qui le rend adapté aux applications de cartographie et d'inspection topographique.

La Figure 4.1 présente le système d'acquisition LiDAR UAV utilisé dans ce mémoire, incluant la plateforme DJI Matrice 300 RTK, le capteur Zenmuse L1 et son utilisation en contexte de terrain à la carrière Francon.



Figure 4.1 Système d'acquisition LiDAR UAV utilisé dans ce mémoire : (a) DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur LiDAR Zenmuse L1 ; (b) opération de terrain du même système lors de l'acquisition des données tridimensionnelles à la carrière Francon

L'unité de mesure inertielle, combinée au positionnement GNSS/RTK, permet d'estimer la position et l'orientation du capteur pendant le vol. Cette information est essentielle pour assurer la cohérence spatiale des points acquis, en particulier lorsque le capteur est embarqué sur une plateforme mobile. La caméra RGB intégrée fournit quant à elle des images géoréférencées utiles pour compléter l'information géométrique fournie par le LiDAR. Ces images appuient l'interprétation des textures, des zones altérées, des traces d'humidité, des dépôts superficiels et des éléments non rocheux visibles sur les parois.

La combinaison du LiDAR, du positionnement GNSS/RTK, de l'IMU et de l'imagerie RGB permet ainsi de produire des nuages de points colorisés et spatialement cohérents. Chaque point peut être associé à des coordonnées spatiales et, selon les produits générés, à des attributs complémentaires tels que l'intensité du signal laser et les valeurs colorimétriques RGB. Cette

structuration facilite les étapes ultérieures de visualisation, de nettoyage, de filtrage, de segmentation et de préparation des modèles 3D.

Les données LiDAR acquises sont structurées sous forme de nuages de points contenant des coordonnées spatiales et, selon les produits générés, des attributs complémentaires tels que l'intensité du signal laser et les valeurs colorimétriques RGB. Cette structuration facilite leur exploitation dans les environnements de traitement, notamment pour les opérations de visualisation, de nettoyage, de filtrage, de segmentation et de préparation des modèles 3D.

4.2.2 Stratégie d'acquisition et principe de l'acquisition UAV-LiDAR

La stratégie d'acquisition a été définie afin d'obtenir une couverture suffisante des parois rocheuses étudiées, tout en tenant compte de la géométrie complexe de la carrière Francon. Les parois subverticales, les banquettes, les surplombs, les fronts irréguliers et les zones concaves peuvent générer des zones d'ombre ou des lacunes dans les nuages de points lorsque les acquisitions sont réalisées selon des trajectoires inadéquates. Pour limiter ces effets, une stratégie hybride a été adoptée, combinant des trajectoires automatisées obliques et des acquisitions manuelles ciblées.

Le principe de l'acquisition UAV-LiDAR est illustré à la Figure 4.2. Contrairement aux approches photogrammétriques, qui reconstruisent la géométrie à partir d'images, le LiDAR repose sur des mesures directes de distance tridimensionnelles entre le capteur et la surface visée. Le capteur embarqué sur drone émet des impulsions laser et enregistre le signal réfléchi par la surface rocheuse afin de produire un nuage de points 3D représentant la géométrie de la paroi. Cette approche est particulièrement bien adaptée aux applications géotechniques et au suivi des versants, car elle permet d'obtenir des données géométriques précises, de documenter des surfaces abruptes ou difficiles d'accès et de mieux représenter les variations topographiques fines (Baltsavias, 1999; Höfle & Rutzinger, 2011; Jaboyedoff et al., 2012; Lague & Feldmann, 2020).

L'utilisation de systèmes UAV-LiDAR s'est fortement développée pour la détection et le suivi des instabilités de versant, notamment en raison de leur capacité à acquérir des données denses à haute résolution spatiale, avec une grande flexibilité opérationnelle et des intervalles de revisite adaptés au suivi multi-temporel (Lague & Feldmann, 2020; Tsachouridis et al., 2025; Zhou et al., 2024). Dans le cas de la carrière Francon, cette approche permet de documenter efficacement des parois rocheuses subverticales, de réduire les effets d'ombre et d'améliorer la couverture des secteurs difficiles à observer depuis le sol.

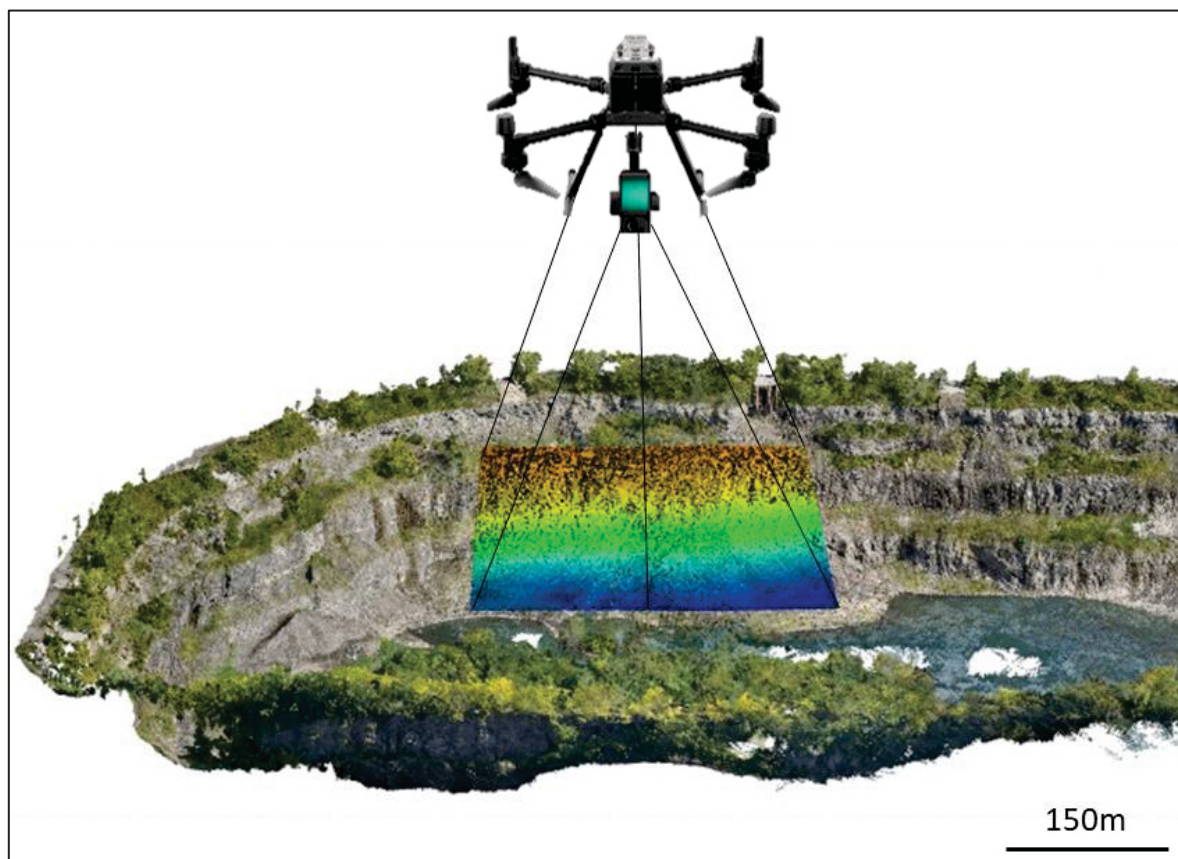


Figure 4.2 Principe de l'acquisition UAV-LiDAR

Les acquisitions automatisées ont été planifiées selon des trajectoires obliques, avec une orientation du capteur adaptée à la géométrie des fronts rocheux. Cette configuration visait à améliorer l'interception du faisceau laser sur les surfaces subverticales et à augmenter la continuité spatiale des nuages de points. La Figure 4.3a présente la planification des trajectoires de vol et la couverture spatiale des acquisitions sur le site de la carrière Francon. Lors de ces

acquisitions, une distance moyenne d'environ 20 m entre le drone et la paroi a été maintenue afin d'assurer un compromis entre la sécurité du vol, la stabilité de l'acquisition et la couverture globale du site.

Des acquisitions manuelles rapprochées ont ensuite été réalisées dans les secteurs où la géométrie locale nécessitait une couverture plus détaillée. Comme l'illustre la Figure 4.3b, ces acquisitions ont été effectuées à proximité des parois rocheuses afin de mieux documenter les surfaces subverticales, les zones fracturées, les surplombs, les crêtes et les interfaces structurales marquées. Elles ont été réalisées à une distance moyenne d'environ 4 m de la paroi rocheuse. Le pilotage manuel a permis d'ajuster la trajectoire du drone en fonction de la géométrie locale et de réduire les lacunes dans les secteurs difficiles à couvrir par les trajectoires automatisées.

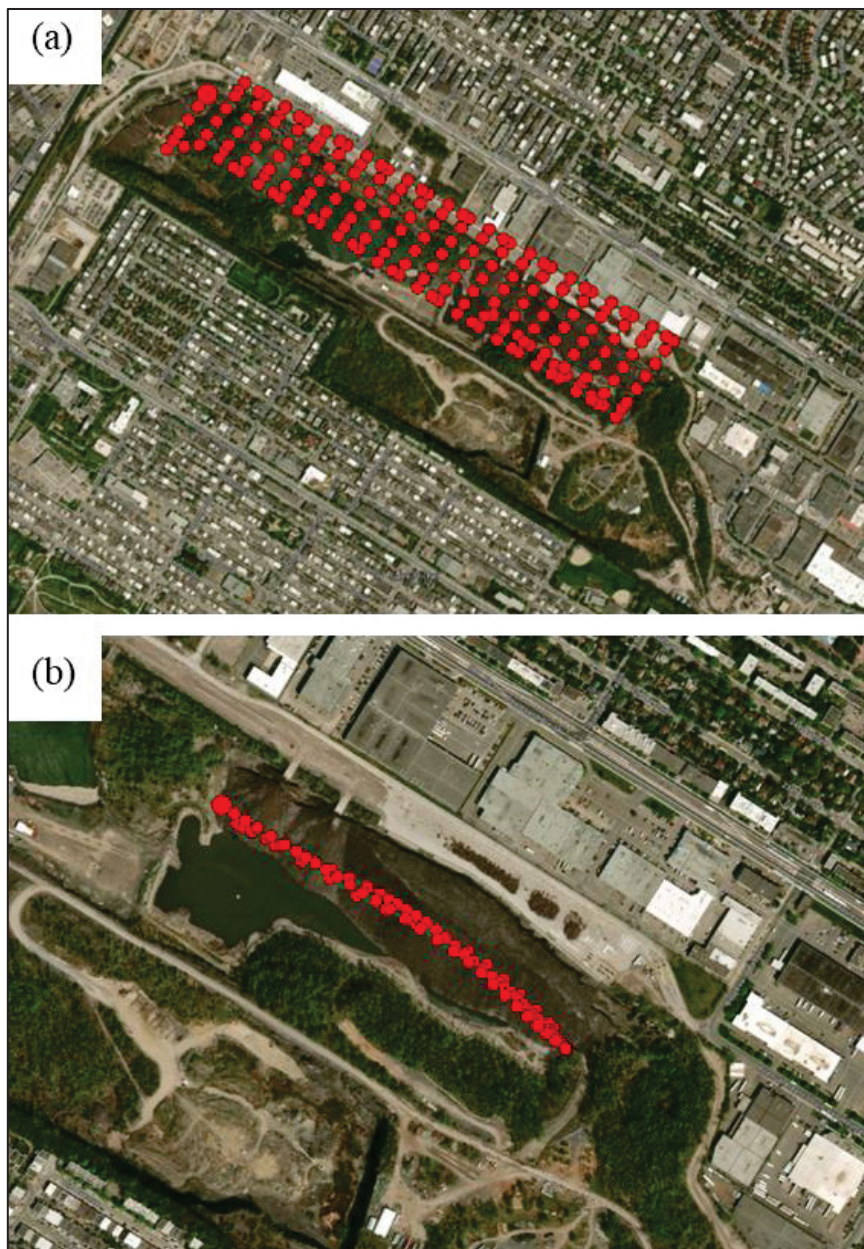


Figure 4.3 Planification et configuration des acquisitions UAV-LiDAR à la carrière Francon :
(a) trajectoires de vol automatisées et couverture spatiale du site générées à partir de Pix4D ;
(b) exemple d'acquisition manuelle rapprochée réalisée à proximité d'une paroi rocheuse afin
d'améliorer la couverture des surfaces subverticales et des secteurs morphologiquement
complexes

4.2.3 Paramètres d'acquisition et qualité attendue des données UAV-LiDAR

La qualité des données acquises par UAV-LiDAR dépend à la fois des caractéristiques intrinsèques du capteur et des conditions réelles d'acquisition sur le terrain. Dans le cadre de cette étude, le capteur Zenmuse L1 embarqué sur la plateforme DJI Matrice 300 RTK a été retenu en raison de ses performances adaptées à la cartographie tridimensionnelle de parois rocheuses abruptes et difficilement accessibles. Les paramètres les plus pertinents pour ce mémoire sont ceux qui influencent directement la précision géométrique des nuages de points, leur densité, la couverture des surfaces subverticales et la qualité de l'interprétation visuelle associée.

Le Tableau 4.1 présente les principaux paramètres techniques du système UAV-LiDAR utilisés pour apprécier la qualité attendue des données acquises à la carrière Francon.

Tableau 4.1 Paramètres techniques du capteur DJI Zenmuse L1 les plus pertinents pour les acquisitions UAV-LiDAR réalisées à la carrière Francon d'après les spécifications techniques du DJI Zenmuse L1

Paramètre	Valeur
Précision de distance LiDAR	3 cm à 100 m
Débit de points	Jusqu'à 240 000 pts/s en retour simple ; 480 000 pts/s en retours multiples
Espacement moyen entre les points / résolution spatiale estimée	Environ 1,17 à 1,90 cm selon le secteur étudié
Champ de vue LiDAR	70,4° horizontal × 77,2° vertical en mode non répétitif
Caméra RGB intégrée	20 MP

Ces caractéristiques confèrent au système une capacité théorique adéquate pour produire des nuages de points détaillés et spatialement cohérents. La précision de distance LiDAR permet

une représentation géométrique fine des fronts rocheux, tandis que le débit de points soutient l'acquisition de nuages suffisamment denses pour documenter les formes morphologiques d'intérêt, telles que les discontinuités visibles, les ruptures de pente, les surplombs, les cicatrices de détachement et les blocs individualisés. De plus, le large champ de vue du capteur améliore la couverture des parois subverticales lorsque les acquisitions sont réalisées suivant des trajectoires obliques, ce qui constitue un avantage important dans un contexte de carrière.

La qualité effective des données ne dépend toutefois pas uniquement des spécifications instrumentales. Elle est également influencée par plusieurs facteurs opérationnels, notamment la distance entre le drone et la paroi, l'angle de visée, le recouvrement entre les trajectoires, la vitesse de déplacement, la complexité géométrique des fronts rocheux, ainsi que la présence de végétation ou de zones d'ombre. Dans cette étude, la combinaison d'acquisitions automatisées à moyenne distance et d'acquisitions manuelles rapprochées a permis d'améliorer la couverture des surfaces rocheuses et d'augmenter localement la densité des données dans les secteurs plus complexes.

Ainsi, la qualité attendue des données UAV-LiDAR acquises à la carrière Francon est jugée compatible avec les objectifs du mémoire. Ces données permettent de générer des modèles tridimensionnels adaptés à la cartographie structurale virtuelle, à l'identification des formes morphologiques visibles sur les parois et à l'interprétation des éléments d'instabilité apparente. Les sections suivantes présentent plus en détail la génération des nuages de points, les traitements appliqués ainsi que les caractéristiques des modèles 3D issus de ces acquisitions.

Au total, les campagnes de levé ont été réalisées entre octobre 2023 et novembre 2025, en combinant des levés LiDAR aéroportés, LiDAR terrestres, photogrammétriques, automatisés et manuels. Cette série d'acquisitions a permis de documenter les parois de la carrière Francon dans des conditions saisonnières et opérationnelles variables. La Figure 4.4 présente des exemples d'images acquises lors de différentes campagnes, illustrant les variations visuelles de la paroi au cours de la période de suivi. Les données acquises constituent la base des

traitements 3D, de la cartographie morphologique et de l'interprétation des éléments d'instabilité apparente.

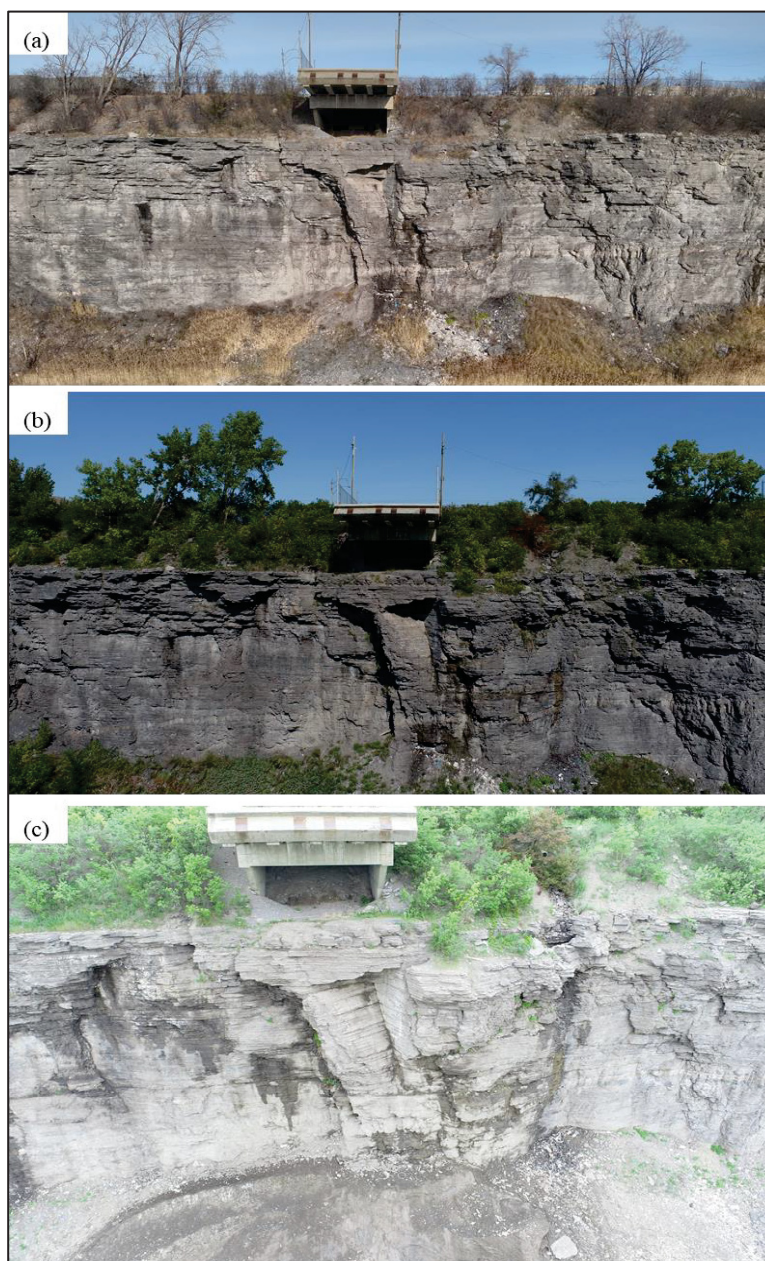


Figure 4.4 Série temporelle d'images aériennes acquises par UAV illustrant différentes campagnes de levé réalisées à la carrière Francon : (a) 14 novembre 2024; (b) 11 septembre 2024 ; (c) 11 juin 2025

4.3 Traitement des données 3D recueillies

Le traitement des données 3D recueillies constitue l'étape permettant de transformer les acquisitions UAV-LiDAR et les images associées en modèles exploitables des parois rocheuses de la carrière Francon. Cette étape vise à produire une représentation tridimensionnelle cohérente du site, tout en tenant compte de la géométrie complexe des parois, des zones d'occlusion, de la végétation locale et de la présence possible d'éléments non rocheux.

Les données brutes ont d'abord été traitées afin de générer des nuages de points géoréférencés et colorisés. Elles ont ensuite été importées dans CloudCompare pour être inspectées, filtrées, sous-échantillonnées et préparées pour les analyses structurales et morphologiques. Les traitements réalisés ont permis d'améliorer la lisibilité des modèles, d'isoler les secteurs d'intérêt et de produire des supports adaptés aux étapes suivantes, notamment les vues RGB, les représentations orthographiques, les normales de surface et les cartes d'orientation.

4.3.1 Génération des nuages de points et des modèles de surface

La génération des nuages de points constitue la première étape du traitement des données 3D recueillies. Les données LiDAR brutes acquises lors des campagnes de survol comprennent les retours laser, les informations de trajectoire GNSS/IMU et les images RGB associées. Ces données doivent être combinées et traitées afin de produire une représentation tridimensionnelle géoréférencée et cohérente des parois rocheuses de la carrière Francon.

Le traitement initial a été réalisé dans DJI Terra. Ce logiciel permet d'intégrer les mesures LiDAR, les données de positionnement GNSS/RTK et les informations d'orientation fournies par l'unité de mesure inertielle du capteur Zenmuse L1. Cette combinaison permet de reconstruire la position des points dans l'espace et de générer des nuages de points représentant la géométrie des parois rocheuses. L'intégration des images RGB acquises simultanément permet également de produire des nuages de points colorisés, ce qui facilite l'inspection

visuelle des surfaces et l'identification des contrastes lithologiques, des discontinuités visibles, des zones altérées et des traces d'humidité.

Les nuages de points générés constituent la base des modèles de surface utilisés dans la suite de la méthodologie. Ils permettent de visualiser la géométrie générale des fronts rocheux, des banquettes, des surplombs, des ruptures de pente et des irrégularités morphologiques. Ces modèles servent ensuite de support aux étapes de préparation, d'inspection, de filtrage, de segmentation et d'interprétation morphologique.

Comme l'illustre la Figure 4.5, les nuages de points générés permettent d'obtenir une représentation tridimensionnelle continue d'une partie importante des parois rocheuses de la carrière Francon. Le modèle présenté couvre une étendue approximative de 1,2 km et sert de support à l'organisation des secteurs d'analyse, à la préparation des données et à l'interprétation morphologique des surfaces rocheuses.

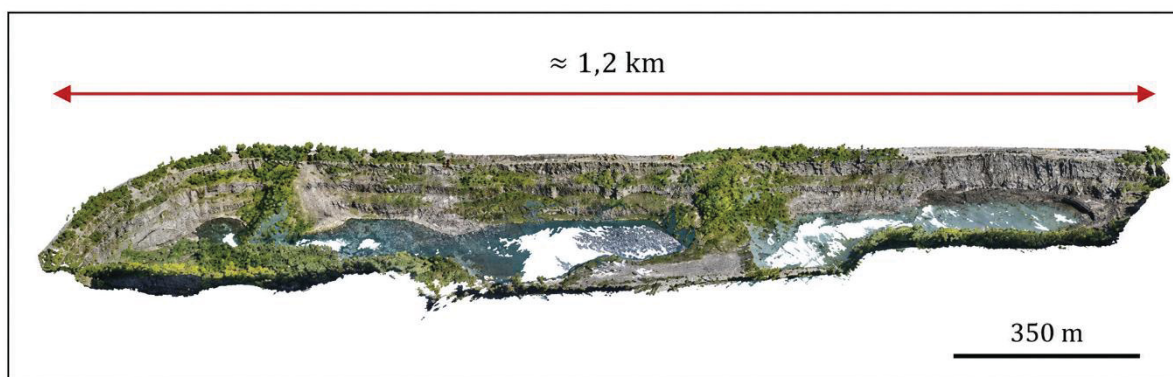


Figure 4.5 Modèle tridimensionnel de la carrière Francon généré à partir des nuages de points LiDAR acquis par drone DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur Zenmuse L1. La flèche indique l'étendue approximative du modèle, soit environ 1,2 km de parois rocheuses couvertes

Chaque point du nuage peut être associé à plusieurs attributs, notamment ses coordonnées spatiales, une valeur d’intensité du retour laser et des valeurs colorimétriques RGB lorsque la colorisation est disponible. Cette structure permet d’exploiter les données à la fois comme information géométrique et comme support visuel pour l’analyse des parois rocheuses. Le Tableau 4.2 présente un exemple simplifié de la structure des données issues d’un nuage de points LiDAR.

Tableau 4.2 Structure des données issues des nuages de points LiDAR
Tiré de J. D. Aubertin (2020)

X-coordinate	Y-coordinate	Z-coordinate	Red (0–255)	Green (0–255)	Blue (0–255)	Intensity (0–1)
<i>Data point 1</i>						
<i>Data point 2</i>						
<i>[...]</i>						
<i>Data point n</i>						

4.3.2 Mise en place d’un chaînage longitudinal de référence

Afin de faciliter la localisation des observations le long de la carrière Francon, un chaînage longitudinal de référence a été établi à partir du modèle tridimensionnel global généré après traitement initial des données LiDAR. Ce chaînage constitue un repère spatial complémentaire aux coordonnées géoréférencées du nuage de points et permet d’associer les portions de paroi, les plateformes de déversement et les observations morphologiques à une position relative commune le long du front rocheux.

Le chaînage a été défini en suivant la continuité longitudinale principale de la crête des parois étudiées. Les positions sont exprimées sous la forme 0+000, 0+100, 0+200, etc., selon une progression métrique le long de la carrière. Cette convention permet de localiser plus

précisément les observations dans l'espace et d'éviter une description uniquement qualitative des secteurs étudiés.

Ce référentiel longitudinal ne remplace pas les coordonnées spatiales du modèle 3D. Il fournit plutôt un repère de lecture complémentaire, plus directement adapté à la description longitudinale de la carrière. Il permet ainsi de situer les observations le long du front rocheux, de documenter leur position relative et de faciliter leur comparaison entre différentes portions de paroi.

Le chaînage a notamment été utilisé pour positionner les principales plateformes de déversement ponctuelles observées le long de la crête et pour identifier leur relation spatiale avec les portions de paroi correspondantes. Il permet ainsi de relier les observations issues du modèle 3D aux contextes opérationnels analysés dans les chapitres suivants, notamment les plateformes de déversement ponctuelles, les plateformes de déversement étendues et les secteurs sans déversement direct.

Dans le cadre de ce mémoire, ce référentiel est particulièrement utile pour documenter la distribution longitudinale des points de déversement et pour faciliter le croisement entre les observations morphologiques et les configurations opérationnelles. Il permet de localiser les éléments étudiés de manière plus précise, sans supposer que les secteurs opérationnels constituent des unités géomécaniques homogènes.

La Figure 4.6 présente le chaînage longitudinal établi sur le modèle tridimensionnel de la carrière Francon. Elle montre la progression du repère métrique le long de la crête et fournit une base spatiale commune pour localiser les observations, les plateformes de déversement et les secteurs opérationnels utilisés dans les chapitres suivants.

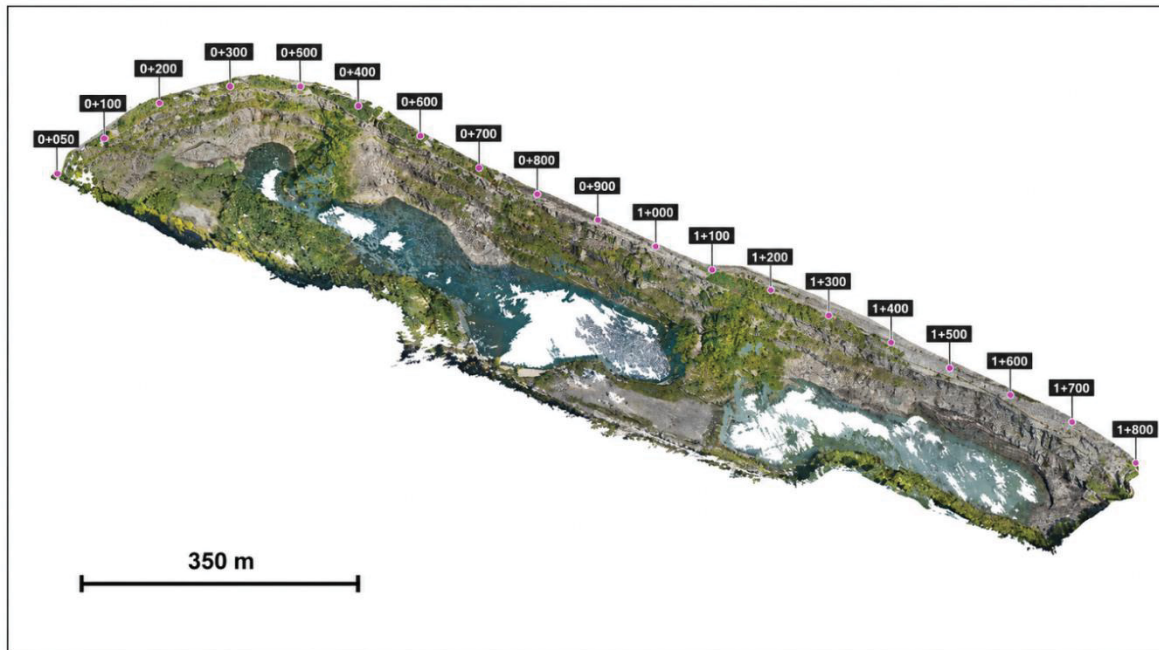


Figure 4.6 Chaînage longitudinal de référence établi sur le modèle tridimensionnel de la carrière Francon. Les repères métriques permettent de localiser les observations et les plateformes de déversement le long de la crête principale des parois étudiées

La Figure 4.7 présente également la localisation des principales plateformes de déversement ponctuelles selon ce chaînage. Les positions indiquées permettent d'associer chaque plateforme à une position longitudinale précise et de préparer leur intégration dans l'analyse comparative des contextes opérationnels.

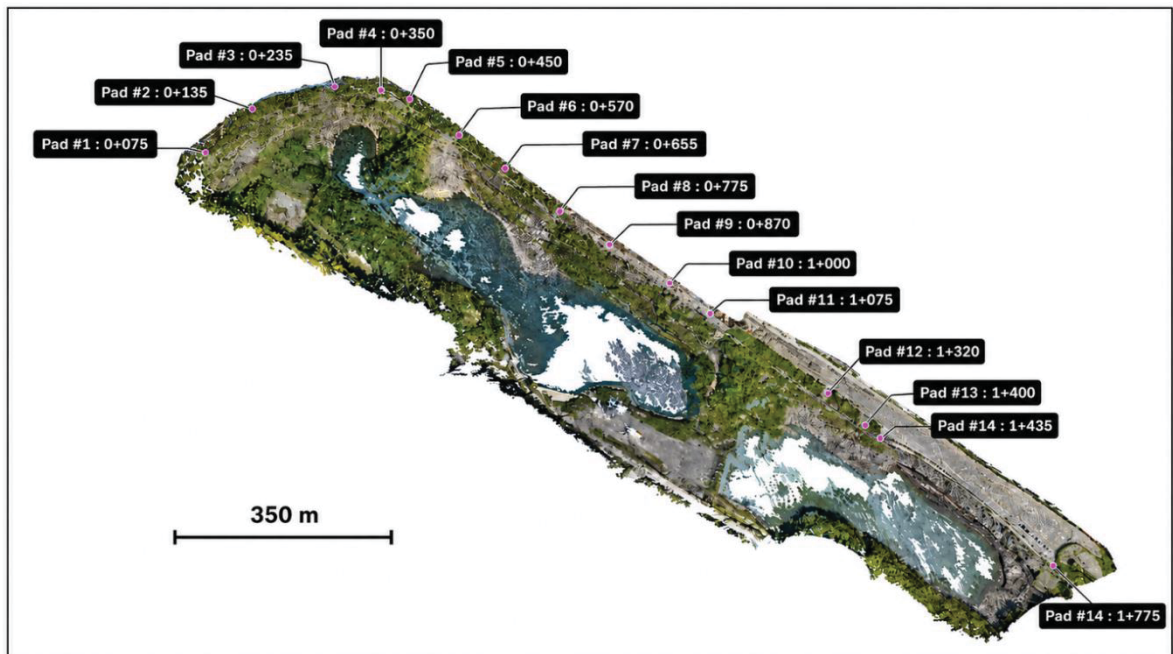


Figure 4.7 Localisation des principales plateformes de déversement ponctuelles selon le chaînage longitudinal de référence

4.3.3 Organisation du modèle en secteurs A, B et C

Après la mise en place du chaînage longitudinal de référence, les jeux de données ont été organisés en secteurs d'analyse afin de structurer les traitements et les interprétations ultérieures. Cette organisation permet de tenir compte des variations de géométrie, de couverture et de lisibilité des parois à l'échelle de la carrière.

Les acquisitions réalisées à la carrière Francon ne correspondent pas à un levé unique couvrant uniformément l'ensemble du site. Elles constituent plutôt un ensemble de jeux de données complémentaires, acquis à différentes dates et selon différentes configurations de vol. Cette organisation s'explique par la géométrie complexe de la carrière, la hauteur des parois, la présence de zones d'occlusion, la végétation locale ainsi que les contraintes opérationnelles liées à l'accès au site.

Après la génération initiale des nuages de points, les modèles disponibles ont été comparés afin d'identifier les jeux de données les plus représentatifs pour les analyses ultérieures. Cette comparaison a été réalisée à partir de plusieurs critères, notamment la couverture spatiale des parois, la densité locale des points, l'espacement moyen entre les points, la qualité de la colorisation RGB, la lisibilité des formes morphologiques ainsi que la présence éventuelle de zones d'ombre ou de lacunes.

Afin de structurer cette sélection, la carrière a été subdivisée en trois secteurs principaux d'analyse, désignés A, B et C, dont les limites ont été définies à partir du chaînage longitudinal de référence. Le secteur A s'étend du chaînage 0+050 au chaînage 0+400, le secteur B du chaînage 0+400 au chaînage 1+200, tandis que le secteur C couvre l'intervalle compris entre les chaînages 1+200 et 1+800. Ces limites assurent une correspondance spatiale cohérente entre les modèles tridimensionnels, les observations de terrain et les analyses réalisées le long des parois.

Cette subdivision constitue ainsi un cadre méthodologique permettant d'organiser les jeux de données 3D, de sélectionner les acquisitions les plus exploitables et de préparer les analyses structurales et morphologiques présentées dans les chapitres suivants. La Figure 4.8 présente l'organisation spatiale des secteurs à l'échelle de la carrière ainsi que leurs intervalles de chaînage respectifs. La justification géométrique détaillée de cette zonation, fondée notamment sur l'orientation des parois, leur continuité morphologique et l'analyse des plans de meilleur ajustement, est présentée au chapitre 5.

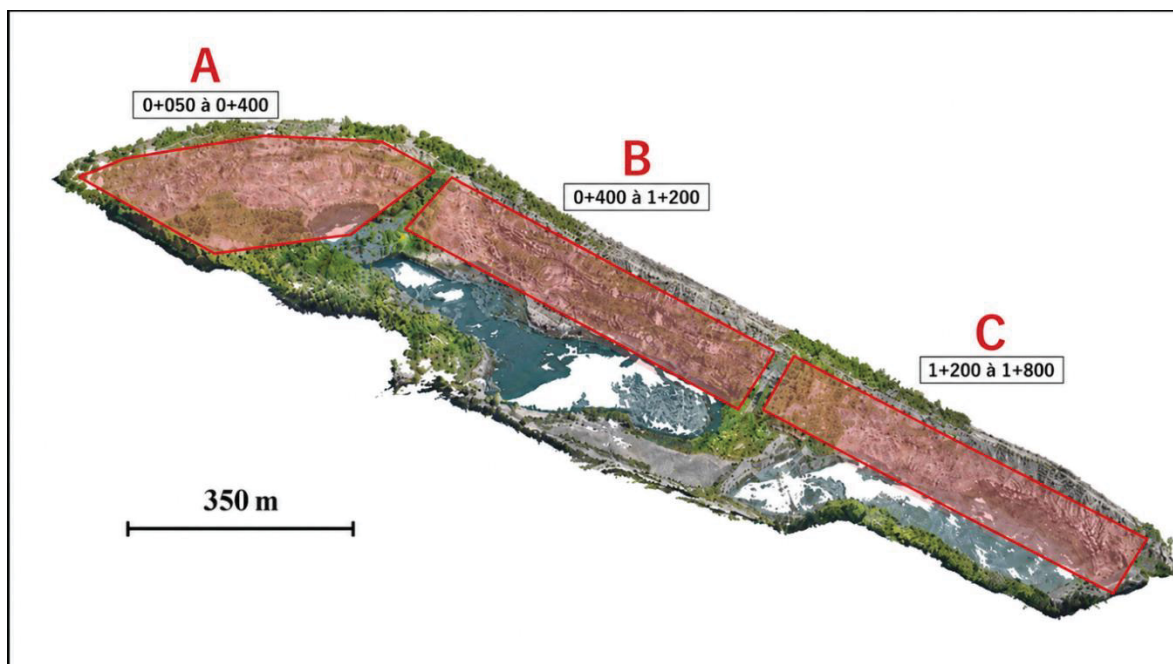


Figure 4.8 Organisation spatiale et chaînage des secteurs d'analyse A, B et C de la carrière Francon. Le secteur A s'étend du chaînage 0+050 au chaînage 0+400, le secteur B du chaînage 0+400 au chaînage 1+200 et le secteur C du chaînage 1+200 au chaînage 1+800

Pour chacun de ces secteurs, le modèle présentant la meilleure combinaison entre couverture, densité, résolution et lisibilité morphologique a été retenu comme modèle représentatif. La Figure 4.9 montre les modèles 3D sélectionnés pour les zones A, B et C. Les scans retenus ont été acquis le 11 juin 2025 et correspondent aux jeux de données les plus adaptés pour documenter la qualité spatiale des modèles et appuyer les analyses réalisées dans ce mémoire.

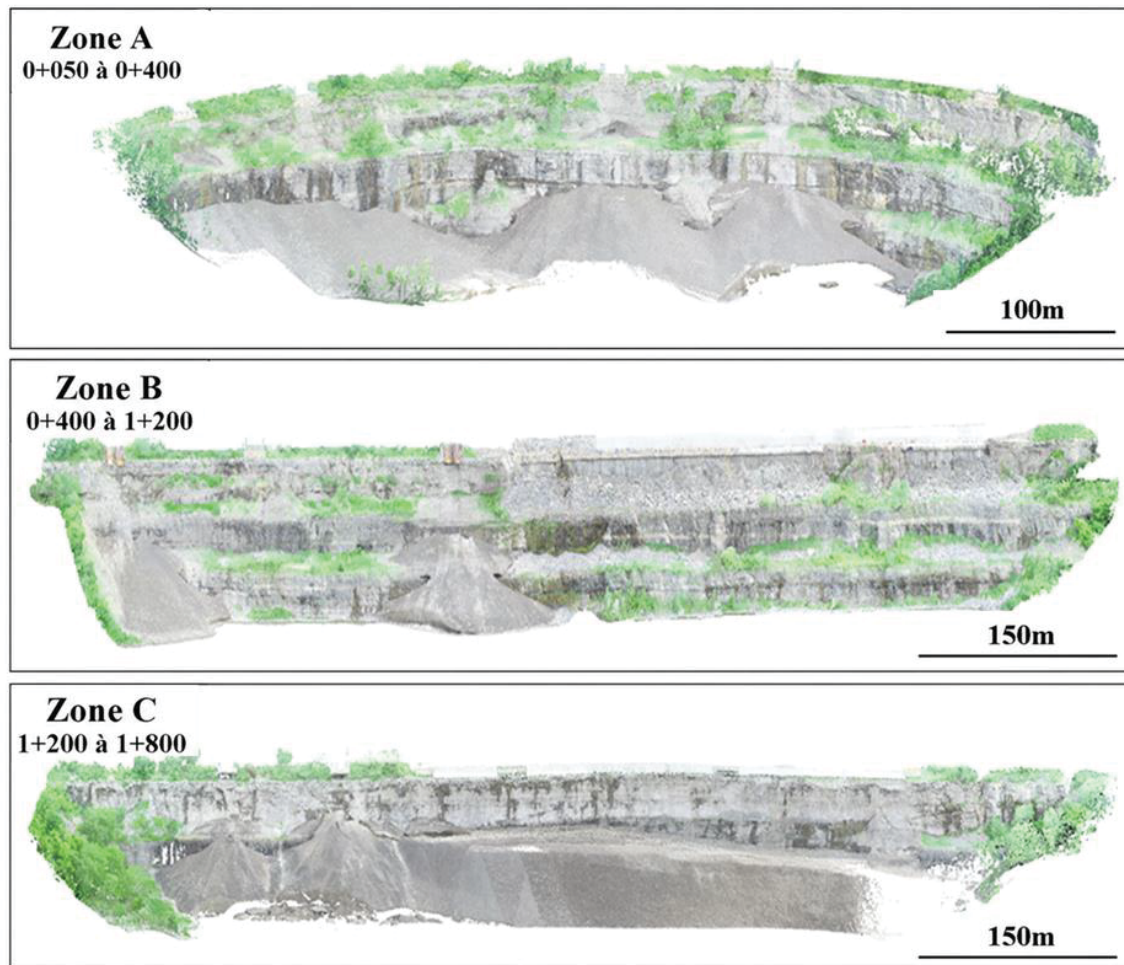


Figure 4.9 Modèles 3D représentatifs retenus pour les secteurs A, B et C de la carrière Francon

Le Tableau 4.3 synthétise les modèles retenus pour les zones A, B et C, ainsi que leur densité moyenne, leur espacement moyen entre points.

Tableau 4.3 Modèles 3D représentatifs retenus pour les principaux secteurs d'analyse de la carrière Francon

Secteur	Modèle ou scan retenu	Date d'acquisition	Densité moyenne	Espacement moyen entre points / résolution estimée
Zone A	ZoneA_2025.06.11	11 juin 2025	$\approx 7\,258 \text{ pts/m}^2$	$\approx 1,17 \text{ cm}$
Zone B	ZoneB_2025.06.11	11 juin 2025	$\approx 3\,001 \text{ pts/m}^2$	$\approx 1,83 \text{ cm}$
Zone C	ZoneC_2025.06.11	11 juin 2025	$\approx 2\,757 \text{ pts/m}^2$	$\approx 1,90 \text{ cm}$
Note. Les densités moyennes ont été calculées dans CloudCompare avec un rayon de voisinage de 0,2 m. L'espacement moyen entre points correspond à la résolution moyenne estimée, calculée selon $\sqrt{(1/D)}$, où D est la densité exprimée en points/m ² .				

Les valeurs obtenues indiquent que les modèles sélectionnés présentent une résolution spatiale élevée, compatible avec l'identification des principales discontinuités visibles, des ruptures de pente, des surplombs, des cicatrices de détachement et des formes morphologiques associées à la dégradation apparente des parois. La zone A présente la densité moyenne la plus élevée, avec un espacement moyen d'environ 1,17 cm, tandis que les zones B et C présentent respectivement des espacements moyens d'environ 1,83 cm et 1,90 cm. Ces valeurs demeurent suffisantes pour les objectifs de cartographie structurale et morphologique poursuivis dans ce mémoire.

Ces valeurs ne doivent toutefois pas être interprétées comme des résolutions uniformes applicables à l'ensemble de la carrière. La densité et la résolution peuvent varier localement selon la distance d'acquisition, l'angle d'incidence du faisceau laser, la présence de végétation, les zones d'ombre, les occlusions et la complexité géométrique des parois. Les modèles retenus sont donc considérés comme des représentations optimales pour chaque secteur, utilisées afin d'assurer une base cohérente pour les traitements 3D, la cartographie structurale, l'analyse morphologique et l'identification des éléments d'instabilité apparente.

4.3.4 Classification de la végétation par CANUPO et nettoyage complémentaire des nuages de points

Les nuages de points bruts acquis à la carrière Francon contiennent, en plus des surfaces rocheuses d'intérêt, différents éléments non représentatifs de la géométrie de la roche en place. Ceux-ci comprennent principalement la végétation, les accumulations de neige résiduelle, les dépôts granulaires et les débris présents au pied ou sur les banquettes, certaines surfaces d'eau ainsi que des points aberrants associés au bruit de mesure, aux limites des objets, aux effets d'occlusion ou aux conditions locales d'acquisition.

La présence de ces éléments peut affecter la lisibilité des modèles tridimensionnels et perturber les traitements géométriques réalisés par la suite. La végétation peut notamment produire des distributions locales de points fortement irrégulières ou volumiques, susceptibles d'influencer le calcul des normales, la mesure de la rugosité, l'extraction des orientations et l'identification des surfaces rocheuses. Les dépôts granulaires, la neige et les débris peuvent quant à eux masquer localement la paroi ou introduire des surfaces temporaires ne correspondant pas à la géométrie structurale du massif rocheux.

Afin de réduire l'influence de ces éléments, une procédure hybride a été adoptée. Elle combine une classification semi-automatisée de la végétation à l'aide de CANUPO et un nettoyage manuel complémentaire dans CloudCompare. CANUPO a été utilisé afin d'évaluer son efficacité pour reconnaître la végétation à partir de sa signature géométrique multiscalaire et pour réduire la part du traitement manuel. Les autres éléments non rocheux, notamment les débris, les dépôts meubles, la neige résiduelle, les surfaces d'eau et les points aberrants, ont ensuite été retirés manuellement à l'aide de l'outil de segmentation de CloudCompare.

4.3.4.1 Principe de la classification géométrique multiscalaire

CANUPO est un outil de classification supervisée conçu pour différencier des objets présents dans un nuage de points tridimensionnel à partir de leur géométrie locale. La méthode repose sur l'analyse multiscalaire de la structure du voisinage de chaque point afin de caractériser sa

dimensionnalité locale, c'est-à-dire son comportement dominant de type linéaire (1D), planaire (2D) ou volumique (3D) (Brodu & Lague, 2012).

Le principe général consiste à définir, autour d'un point P_i , un voisinage sphérique de rayon s , correspondant à une échelle d'analyse donnée. Les coordonnées des points contenus dans ce voisinage sont ensuite soumises à une analyse en composantes principales (ACP), à partir de laquelle trois valeurs propres sont obtenues et ordonnées de la manière suivante :

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (4.1)$$

Les proportions de variance associées aux trois directions principales sont définies par :

$$p_i = \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \text{ pour } j = 1, 2, 3 \quad (4.2)$$

Lorsque la première valeur propre domine largement, l'organisation spatiale des points est essentiellement linéaire, ce qui correspond à une structure de type 1D. Lorsque les deux premières valeurs propres dominent et que la troisième demeure faible, la distribution est principalement planaire, ce qui correspond à une structure de type 2D. Enfin, lorsque les trois valeurs propres présentent des amplitudes comparables, la structure du voisinage est considérée comme volumique, ce qui correspond à un comportement de type 3D.

L'intérêt fondamental de CANUPO réside dans le fait que cette analyse n'est pas effectuée à une seule échelle, mais à plusieurs échelles successives. En pratique, un même objet peut présenter une signature géométrique différente selon la taille du voisinage considéré. Ainsi, une branche ou une tige végétale peut apparaître localement comme une structure linéaire, tandis qu'un ensemble de feuilles, de branches et d'arbustes, observé à une échelle plus grande, peut présenter une organisation beaucoup plus volumique. À l'inverse, une surface rocheuse relativement régulière tend généralement à conserver une signature principalement planaire, même lorsque l'échelle d'observation augmente.

La Figure 4.10 illustre ce principe général. La partie (a) montre que l'analyse s'effectue à partir de voisinages sphériques de taille croissante autour d'un point du nuage. La partie (b) présente le domaine de dimensionnalité locale obtenu à partir des proportions normalisées des valeurs propres, permettant de situer un voisinage entre les comportements 1D, 2D et 3D. Enfin, la partie (c) montre l'évolution multiscalaire des signatures géométriques : à mesure que l'échelle augmente, la végétation tend à se déplacer vers une signature plus 3D, tandis qu'une surface rocheuse reste majoritairement proche du domaine 2D.

Cette approche multiscalaire constitue l'élément central de la méthode, car elle permet de distinguer des classes dont la géométrie locale pourrait paraître similaire à une seule échelle, mais qui se différencient nettement lorsqu'elles sont observées sur plusieurs niveaux de voisinage. Dans le cadre de cette étude, ce principe est particulièrement pertinent pour séparer la végétation des surfaces rocheuses, puisque ces deux types d'objets présentent des comportements géométriques distincts lorsque leur structure est analysée de manière multiscalaire.

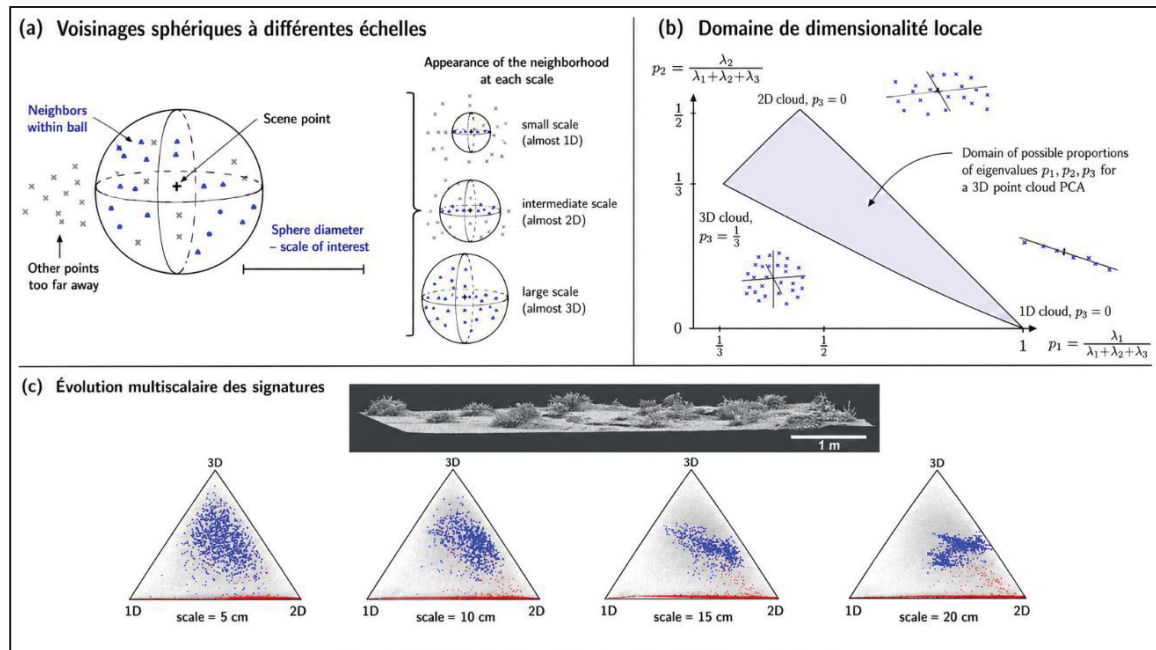


Figure 4.10 Principe de la classification géométrique multiscalaire utilisée par CANUPO : (a) définition de voisinages sphériques de dimensions croissantes autour d'un point du nuage; (b) domaine de dimensionnalité locale obtenu à partir des proportions normalisées des valeurs propres issues de l'analyse en composantes principales; (c) évolution multiscalaire des signatures géométriques

Figure reconstruite et adaptée de Brodu et Lague (2012)

4.3.4.2 Construction des classes d'apprentissage

La mise en œuvre de CANUPO repose sur la définition préalable de classes d'apprentissage représentatives des objets à distinguer dans le nuage de points. Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal était d'évaluer la capacité de l'outil à détecter et à filtrer la végétation présente sur les parois de la carrière Francon. Deux classes d'apprentissage ont donc été constituées manuellement dans CloudCompare : une classe correspondant aux surfaces non végétales et une classe correspondant à la végétation.

La zone utilisée pour l'apprentissage a été sélectionnée de manière à contenir simultanément une portion rocheuse bien exposée et une bande végétalisée clairement identifiable. Ce choix

visait à fournir au classificateur des exemples représentatifs des deux classes, tout en conservant un contexte géométrique réaliste caractérisé par la présence de surfaces rocheuses irrégulières, de ruptures morphologiques et d'amas végétaux distribués le long de la paroi. La Figure 4.11a montre la localisation de la zone d'apprentissage à l'intérieur du nuage de points global, tandis que la Figure 4.11b présente la vue RGB détaillée de la portion retenue.

La première classe, désignée classe 1 : surfaces non végétales, regroupe principalement les portions visibles de la paroi rocheuse. Cette appellation a été préférée à celle de roche au sens strict, puisque certains points inclus dans cette classe peuvent correspondre localement à d'autres surfaces non végétales présentes dans la scène. La seconde classe, désignée classe 2 : végétation, comprend les arbres, les arbustes et les amas végétaux présents sur les banquettes, les replats et certaines portions de la paroi.

La Figure 4.11c montre la superposition des deux classes d'apprentissage, les surfaces non végétales étant représentées en bleu et la végétation en rouge. Les Figures 4.11d et 4.11e présentent respectivement les deux classes isolées. Cette séparation permet de vérifier visuellement que les échantillons retenus correspondent aux objets ciblés et qu'ils couvrent une gamme suffisante de géométries locales.

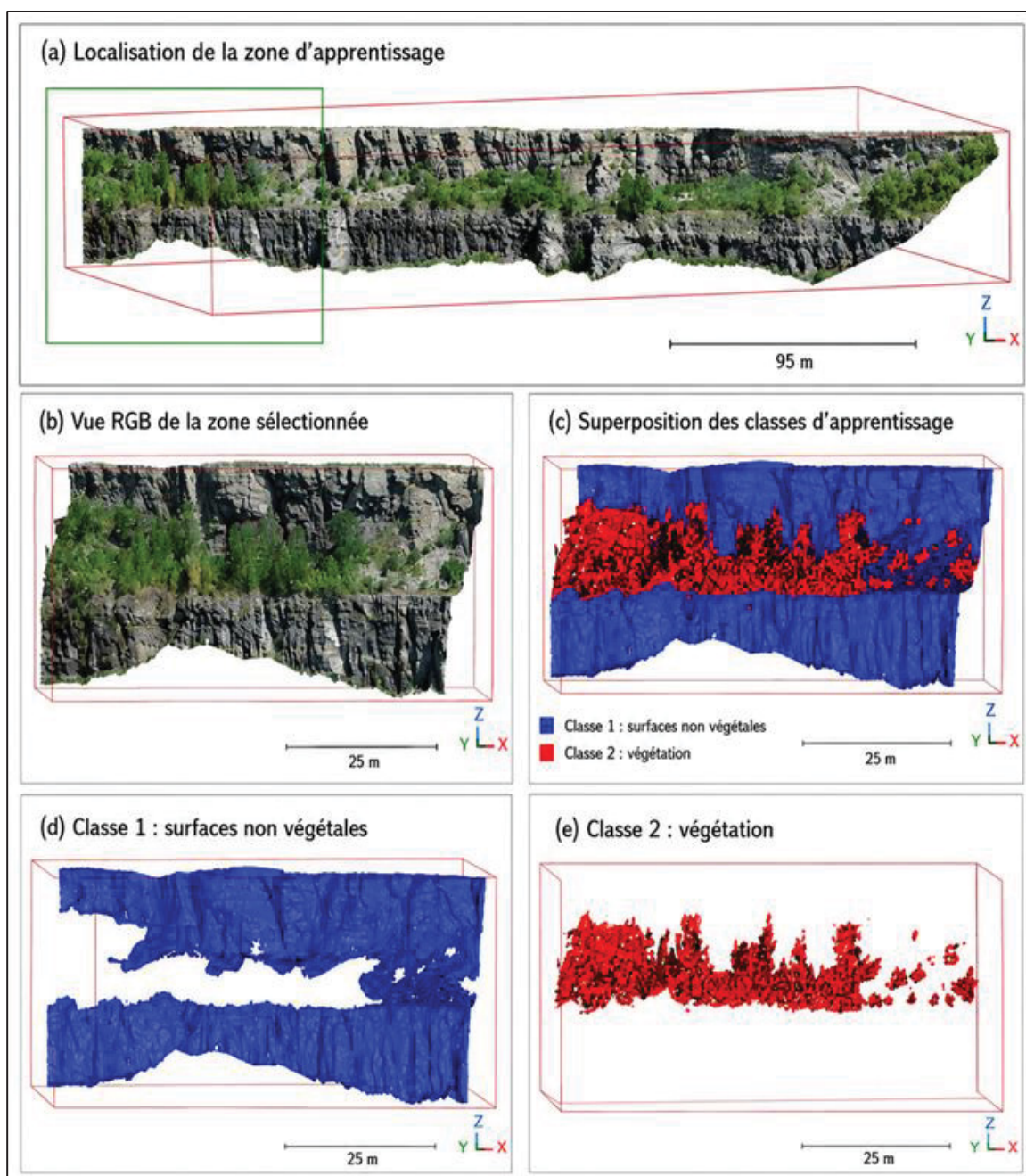


Figure 4.11 Construction des classes d'apprentissage utilisées pour le classificateur CANUPO : (a) localisation de la zone d'apprentissage dans le nuage de points global; (b) vue RGB de la portion sélectionnée; (c) superposition des classes d'apprentissage, avec la classe 1 correspondant aux surfaces non végétales en bleu et la classe 2 à la végétation en rouge; (d) visualisation isolée de la classe 1; (e) visualisation isolée de la classe 2

Les échantillons ont été définis manuellement à partir du nuage de points colorisé en RGB afin de faciliter l'identification des objets et de limiter les ambiguïtés lors de la sélection. Une attention particulière a été portée à la représentativité géométrique de chaque classe. Pour la végétation, les zones sélectionnées incluaient des ensembles de densité et de structure variables, depuis des amas relativement compacts jusqu'à des secteurs plus diffus. Pour les surfaces non végétales, les échantillons comprenaient à la fois des portions relativement régulières et des secteurs localement plus rugueux ou fracturés. Cette diversité visait à mieux représenter la variabilité géométrique réelle des parois et à réduire le risque que le classificateur assimile systématiquement les irrégularités rocheuses à de la végétation.

La qualité de cette étape est déterminante, puisque CANUPO construit le classificateur à partir des signatures géométriques multiscalaires des points sélectionnés. Des échantillons trop homogènes, trop restreints ou peu représentatifs pourraient limiter la capacité du modèle à reconnaître la végétation dans d'autres secteurs de la carrière. À l'inverse, une sélection couvrant plusieurs configurations géométriques améliore la capacité du classificateur à tenir compte de la variabilité interne de chaque classe.

Il convient toutefois de préciser que les classes ont été construites dans le but spécifique d'évaluer l'efficacité de CANUPO pour le filtrage de la végétation. Le classificateur n'a pas été entraîné à distinguer séparément les autres éléments non rocheux présents dans la carrière, notamment les débris, les dépôts meubles, la neige résiduelle, les surfaces d'eau ou certains artefacts d'acquisition. Ces éléments ont donc été retirés manuellement lors des étapes complémentaires de nettoyage du nuage de points.

La construction des classes d'apprentissage constitue ainsi une phase essentielle de la procédure. Elle permet de fournir au classificateur des exemples contrôlés des objets à reconnaître, tout en maintenant une validation visuelle directe des données utilisées. L'approche retenue s'inscrit dans une logique de classification supervisée contrôlée, combinant l'automatisation partielle offerte par CANUPO et l'expertise de l'opérateur nécessaire à l'interprétation de parois rocheuses naturelles et géométriquement complexes.

4.3.4.3 Paramètres du classificateur

Après la constitution des deux classes d'apprentissage, les paramètres du classificateur CANUPO ont été définis dans CloudCompare afin de caractériser leur géométrie locale et de construire la frontière de décision permettant de distinguer la végétation des surfaces non végétales. La classification a été réalisée au moyen d'un classificateur binaire supervisé fondé sur le critère de dimensionnalité géométrique multiscalaire.

La classe 1 correspondait aux surfaces non végétales, principalement associées aux portions visibles de la paroi rocheuse, tandis que la classe 2 regroupait la végétation. Le nombre maximal de points centraux (core points) retenu pour l'apprentissage a été fixé à 20 000 par classe, soit un maximum de 40 000 points pour les deux classes. L'utilisation d'un effectif identique permet de maintenir un apprentissage équilibré et de limiter l'influence d'une différence d'abondance entre les classes.

Les points centraux correspondent aux positions pour lesquelles les descripteurs géométriques multiscalaires sont calculés. Leurs voisinages sont néanmoins déterminés à partir du nuage de points original; les points non retenus comme points centraux continuent donc de contribuer à la description de la géométrie locale. Compte tenu des 48 échelles d'analyse présentées ci-après, l'utilisation d'un maximum de 40 000 points centraux limite à 1 920 000 le nombre maximal de couples point-échelle considérés durant l'apprentissage, comparativement à $48N$ si les N points disponibles dans les deux classes étaient tous retenus comme points centraux. Le nombre de couples point-échelle évités est donc estimé à $48(N-40\,000)$, ce qui correspond à une réduction relative de $100(1-40\,000/N) \%$. Ce gain concerne uniquement la construction du classificateur et ne correspond pas nécessairement à une réduction proportionnelle du temps total de traitement, lequel dépend également de la recherche des voisinages, de la densité du nuage et de l'implémentation des calculs dans CANUPO. En l'absence d'un essai chronométré comparatif, le gain est exprimé en nombre théorique de couples point-échelle évités plutôt qu'en durée d'exécution.

Le paramètre de classification sélectionné dans CANUPO était la dimensionnalité. Pour chaque point central, la distribution des points voisins est analysée à différentes échelles afin d'évaluer son comportement dominant de type linéaire, planaire ou volumique. Les signatures obtenues aux différentes échelles sont ensuite combinées et projetées dans un espace discriminant dans lequel la séparation entre les classes est maximisée.

La gamme d'échelles utilisée s'étend de 0,05 à 2,40 m, avec un incrément de 0,05 m :

$$s = \{0,05; 0,10; 0,15; \dots, 2,40\} m \quad (4.3)$$

Cette configuration correspond à un total de 48 échelles d'analyse. Elle permet de caractériser la géométrie locale sur un intervalle allant des structures fines aux assemblages végétaux d'extension métrique. Les plus petites échelles décrivent notamment les variations locales associées aux branches, aux tiges, aux amas de feuillage et à la microgéométrie des surfaces. Les échelles plus grandes permettent quant à elles de représenter l'organisation volumique des arbustes, des couronnes et des bandes végétalisées présentes sur les parois.

Certains arbres observés dans la carrière peuvent atteindre une hauteur approximative de 20 m. La hauteur totale de la végétation ne constitue toutefois pas directement l'échelle à utiliser dans CANUPO. Le classificateur ne reconnaît pas un arbre à partir de ses dimensions globales, mais à partir de l'évolution de la géométrie locale autour de chacun de ses points. Un arbre de grande taille peut ainsi être caractérisé efficacement à partir de voisinages submétriques et plurimétriques décrivant ses branches, son feuillage, sa couronne et les interfaces avec la paroi rocheuse.

Le choix de la gamme de 0,05 à 2,40 m repose donc sur la signature géométrique locale des objets plutôt que sur leur hauteur totale. Cette gamme permet de couvrir plusieurs niveaux de structure sans intégrer des voisinages excessivement grands susceptibles de regrouper simultanément la végétation, la roche et d'autres objets présents dans la scène. Des échelles de plusieurs dizaines de mètres pourraient en effet inclure différentes surfaces au sein d'un même voisinage et réduire la spécificité des descripteurs.

Une gamme plus large, comprise entre 1 et 15 m, avait initialement été examinée. Cependant, la configuration de 0,05 à 2,40 m a produit une meilleure séparation interne des classes d'apprentissage. La précision équilibrée est passée de 95,25 % pour la première configuration à 99,05 % pour la configuration finalement retenue. Cette amélioration indique que la différenciation entre la végétation et les surfaces non végétales dépend principalement des structures locales et intermédiaires, plutôt que de la dimension globale des arbres.

Le Tableau 4.4 présente les paramètres définitifs retenus pour la construction du classificateur.

Tableau 4.4 Paramètres utilisés pour l'apprentissage et l'application du classificateur CANUPO

Paramètre	Valeur retenue
Type de classification	Classification binaire supervisée
Classe 1	Surfaces non végétales
Classe 2	Végétation
Descripteur de classification	Dimensionnalité géométrique multiscalaire
Échelle minimale	0,05 m
Incrément entre les échelles	0,05m
Échelle maximale	2,40 m
Échelles analysées	0,05; 0,10; 0, 15.....; 2,40 m
Nombre maximal de points centraux par classe	20 000
Données utilisées pour le calcul des voisinages	Nuage de points original
Logiciel	CloudCompare, module CANUPO

Les paramètres retenus constituent un compromis entre la résolution des nuages de points, la taille des structures végétales ciblées, la variabilité géométrique des parois et le temps de calcul. Les échelles les plus fines demeurent supérieures à l'espacement moyen entre les points des modèles utilisés, ce qui permet de disposer d'un nombre suffisant de voisins pour calculer

les descripteurs locaux. Les échelles les plus grandes permettent quant à elles de caractériser des structures végétales volumineuses sans englober une portion excessive de la paroi.

La configuration retenue ne doit toutefois pas être considérée comme universelle. La performance d'un classificateur CANUPO dépend de la densité du nuage, de la taille des objets, de la géométrie des surfaces et de la représentativité des échantillons d'apprentissage. Les paramètres choisis sont donc spécifiquement adaptés aux données UAV-LiDAR de la carrière Francon et à l'objectif de filtrage de la végétation poursuivi dans cette étude.

Enfin, le classificateur demeure binaire. Il attribue chaque point soit à la classe des surfaces non végétales, soit à celle de la végétation. Il n'a pas été entraîné à reconnaître séparément les débris, la neige résiduelle, les dépôts granulaires, les surfaces d'eau ou les artefacts d'acquisition. Ces éléments ont donc été traités au cours du nettoyage manuel complémentaire présenté dans les sous-sections suivantes.

4.3.4.4 Séparabilité des classes et performance interne de l'apprentissage

À l'issue de la phase d'apprentissage, CANUPO projette les signatures géométriques multiscalaires des deux classes dans un espace discriminant bidimensionnel. Cette représentation permet d'évaluer la capacité du classificateur à distinguer les surfaces non végétales de la végétation à partir des descripteurs calculés entre 0,05 et 2,40 m.

Comme l'illustre la Figure 4.11, les points de la classe 1, correspondant aux surfaces non végétales, sont représentés en bleu, tandis que ceux de la classe 2, associés à la végétation, sont représentés en rouge. La ligne magenta correspond à la frontière de décision déterminée par CANUPO. Les deux distributions occupent des domaines globalement distincts, avec une zone de recouvrement limitée à proximité de cette frontière.

La distribution des classes observée à la Figure 4.11 est cohérente avec leurs différences géométriques. Les surfaces non végétales, principalement associées aux portions visibles de la

paroi rocheuse, présentent généralement une organisation locale plus planaire. La végétation se caractérise par une structure plus hétérogène et volumique, liée à la présence de tiges, de branches, de feuillage et d'amas végétaux. L'analyse de cette géométrie à plusieurs échelles permet ainsi de différencier les deux classes, même lorsque certaines portions présentent localement des formes similaires.

La distribution de la végétation apparaît plus étendue que celle des surfaces non végétales. Cette dispersion traduit la variabilité interne de la classe, qui comprend des arbres, des arbustes et des amas végétaux présentant des dimensions, des densités et des organisations spatiales différentes. La classe des surfaces non végétales forme un regroupement plus compact, bien que certains points se rapprochent également de la frontière de décision en raison de la présence de surfaces rocheuses rugueuses, fracturées ou géométriquement complexes.

Les statistiques internes produites par CANUPO permettent de quantifier la qualité de cette séparation. Pour chacune des deux classes, 20 000 points centraux ont été utilisés pendant l'apprentissage. Parmi les 20 000 points représentant les surfaces non végétales, 19 771 ont été correctement attribués à la classe 1, tandis que 229 ont été classés comme végétation. Le taux de classification correcte de cette classe est donc :

$$A_1 = \frac{19\,771}{20\,000} \times 100 = 98,86\% \quad (4.4)$$

Pour la classe 2, 19 850 points représentant la végétation ont été correctement classés, tandis que 150 points ont été attribués aux surfaces non végétales. Le taux de classification correcte de cette classe est donc :

$$A_2 = \frac{19\,850}{20\,000} \times 100 = 99,25\% \quad (4.5)$$

Les performances internes sont donc élevées pour les deux classes. Le taux légèrement supérieur obtenu pour la végétation indique que, dans les échantillons retenus, sa signature multiscalaire est particulièrement bien distinguée de celle des surfaces non végétales. Ce résultat est cohérent avec le caractère volumique des amas végétaux et avec la gamme

d'échelles utilisée, qui permet de représenter les structures fines et intermédiaires composant la végétation.

La précision équilibrée, ou balanced accuracy, correspond à la moyenne des taux de classification correcte des deux classes :

$$BA = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (4.6)$$

$$BA = \frac{98,86 + 99,25}{2} = 99,05\% \quad (4.7)$$

La précision équilibrée obtenue lors de l'apprentissage atteint ainsi 95,25 %. Cette métrique est particulièrement appropriée dans le cadre d'une classification binaire, puisqu'elle accorde une importance équivalente aux deux classes, indépendamment de leur abondance relative dans le nuage de points.

CANUPO fournit également le rapport de discrimination de Fisher, ou Fisher Discriminant Ratio (FDR), qui mesure la séparation entre les distributions des classes relativement à leur dispersion interne. Il peut être exprimé sous la forme :

$$FDR = \frac{(\mu_2 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4.8)$$

Où μ_1 et μ_2 représentent les positions moyennes des classes dans la direction discriminante, tandis que σ_1^2 et σ_2^2 représentent leurs variances respectives.

Pour le classificateur retenu, le rapport de discrimination de Fisher atteint :

$$FDR = 5,33 \quad (4.9)$$

Cette valeur indique que la distance entre les centres des deux classes est importante par rapport à leur dispersion interne. Elle confirme que les signatures géométriques multiscalaires des

surfaces non végétales et de la végétation sont suffisamment distinctes pour construire une frontière de décision efficace.

Le Tableau 4.5 résume les statistiques internes obtenues à l'issue de l'apprentissage du classificateur.

Tableau 4.5 Résultats internes de l'apprentissage du classificateur CANUPO

Classe	Nombre total de points centraux	Correctement classés	Incorrectement classés	Taux de classification correcte
Classe 1 : surfaces non végétales	20 000	19 771	229	98,86 %
Classe 2 : végétation	20 000	19 850	150	99,25 %
Précision équilibrée				99,05 %
Rapport de discrimination de Fisher				5,33

Malgré ces résultats élevés, la séparation n'est pas parfaite. Le recouvrement visible près de la frontière de décision à la Figure 4.12 correspond à des points dont les signatures géométriques sont intermédiaires. Parmi les surfaces non végétales, ces points peuvent être associés à des bordures de blocs, à des surplombs, à des zones fortement fracturées ou à des portions de faible densité présentant localement une organisation plus volumique. Inversement, certaines branches isolées, une végétation clairsemée ou des éléments plaqués contre la paroi peuvent présenter une géométrie plus proche d'une surface plane.

Il importe également de distinguer ces résultats internes de la performance du classificateur sur des données indépendantes. La précision équilibrée de 99,05 % et le FDR de 5,33 sont calculés à partir des échantillons ayant servi à construire la frontière de décision. Ils évaluent donc la cohérence de l'apprentissage et la séparabilité des classes sélectionnées, mais ne suffisent pas à démontrer la capacité du classificateur à généraliser à d'autres portions de la carrière.

Une validation indépendante a par conséquent été réalisée en comparant les classes prédites par CANUPO à une classification manuelle de référence sur une portion distincte du nuage de points. Cette validation permet d'évaluer les performances réelles du classificateur en dehors des données utilisées pour l'apprentissage et fait l'objet de la sous-section suivante.

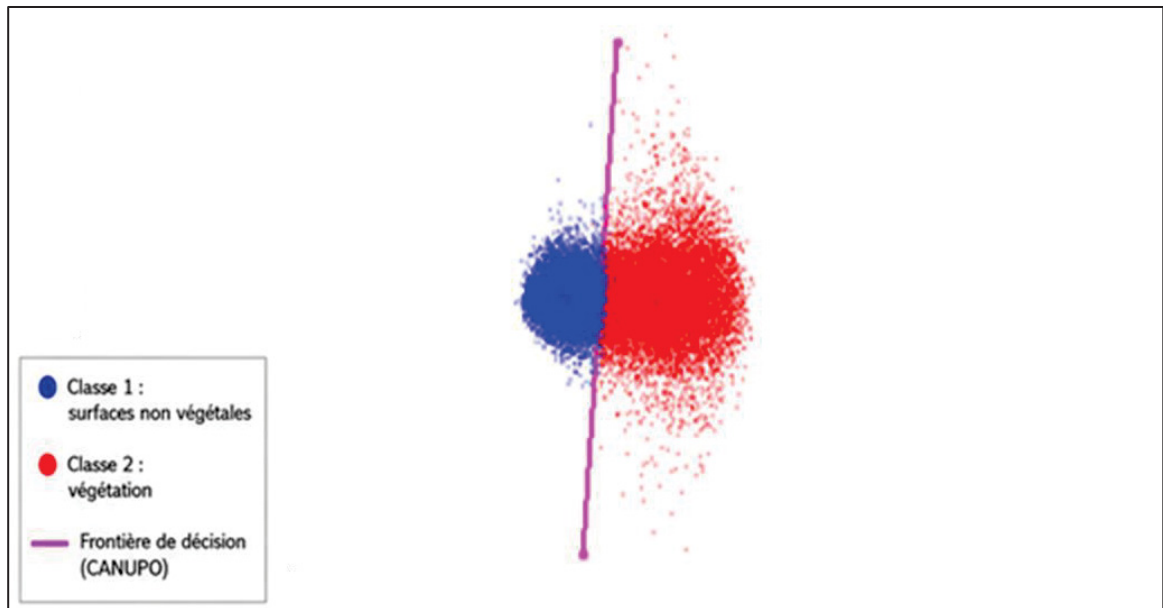


Figure 4.12 Séparabilité des classes d'apprentissage dans l'espace discriminant obtenu par CANUPO. Les points de la classe 1, correspondant aux surfaces non végétales, sont représentés en bleu, tandis que les points de la classe 2, correspondant à la végétation, sont représentés en rouge. La ligne magenta correspond à la frontière de décision déterminée par le classificateur

4.3.4.5 Validation sur une portion distincte du nuage de points

Les statistiques internes obtenues lors de l'apprentissage permettent d'évaluer la séparabilité des classes utilisées pour construire le classificateur, mais elles ne suffisent pas à démontrer sa capacité à reconnaître correctement la végétation dans une portion du nuage qui n'a pas participé à l'entraînement. Une validation indépendante a donc été réalisée pour le classificateur retenu, configuré avec des échelles comprises entre 0,05 et 2,40 m, selon un incrément de 0,05 m.

La procédure suivie reprend la démarche générale proposée dans l'article fondateur de CANUPO. Elle consiste à construire le classificateur à partir d'un premier ensemble d'échantillons manuellement étiquetés, puis à évaluer ses performances sur un ensemble

distinct qui n'a pas été utilisé pendant l'apprentissage. Cette séparation entre données d'apprentissage et données de validation permet d'évaluer la capacité du modèle à généraliser à une géométrie différente et de limiter une interprétation trop optimiste des performances internes (Brodu & Lague, 2012).

Dans la présente étude, une portion du nuage de points spatialement distincte du jeu d'apprentissage a été sélectionnée pour la validation. Les points de cette portion ont été attribués manuellement à deux catégories, soit les surfaces non végétales et la végétation, à partir de l'inspection conjointe de leur géométrie tridimensionnelle et de leur coloration RGB. Ce jeu de données interprété manuellement a été utilisé comme référence pour évaluer les classifications produites par CANUPO. Sa portée demeure toutefois limitée par la part d'interprétation inhérente à la classification manuelle et par l'absence d'une vérification exhaustive de chaque point sur le terrain. Il constitue néanmoins un jeu de validation de référence, spatialement indépendant du jeu d'apprentissage et adapté à l'évaluation comparative du classificateur.

Le classificateur a ensuite été appliqué à cette même portion. Les étiquettes prédites par CANUPO ont été comparées point par point aux étiquettes manuelles de référence. La démarche de validation peut ainsi être résumée par la séquence suivante :

1. Classification manuelle de référence;
2. Application du classificateur CANUPO;
3. Association point par point;
4. Matrice de confusion;
5. Calcul des indicateurs de performance;

Le jeu de validation comprenait 2 000 000 de points, répartis comme suit :

- 1 212 507 points classés manuellement comme surfaces non végétales;
- 787 493 points classés manuellement comme végétation.

Les résultats de la comparaison ont été traités au moyen d'un script Python utilisant les fonctions d'évaluation de la bibliothèque scikit-learn. Les classes prédites et les classes manuelles ont été harmonisées afin d'assurer la correspondance entre les étiquettes, puis une matrice de confusion ainsi que les indicateurs de précision, de rappel, de score F1 et d'exactitude globale ont été calculés.

Le jeu de validation comprenait 2 000 000 de points, dont 1 212 507 points classés manuellement comme surfaces non végétales et 787 493 points classés comme végétation.

La Figure 4.13 présente la matrice de confusion obtenue par comparaison entre les classes manuelles de référence et les classes prédites par CANUPO. Les cellules situées sur la diagonale principale correspondent aux points correctement classés, tandis que les cellules hors diagonale représentent les erreurs de classification.

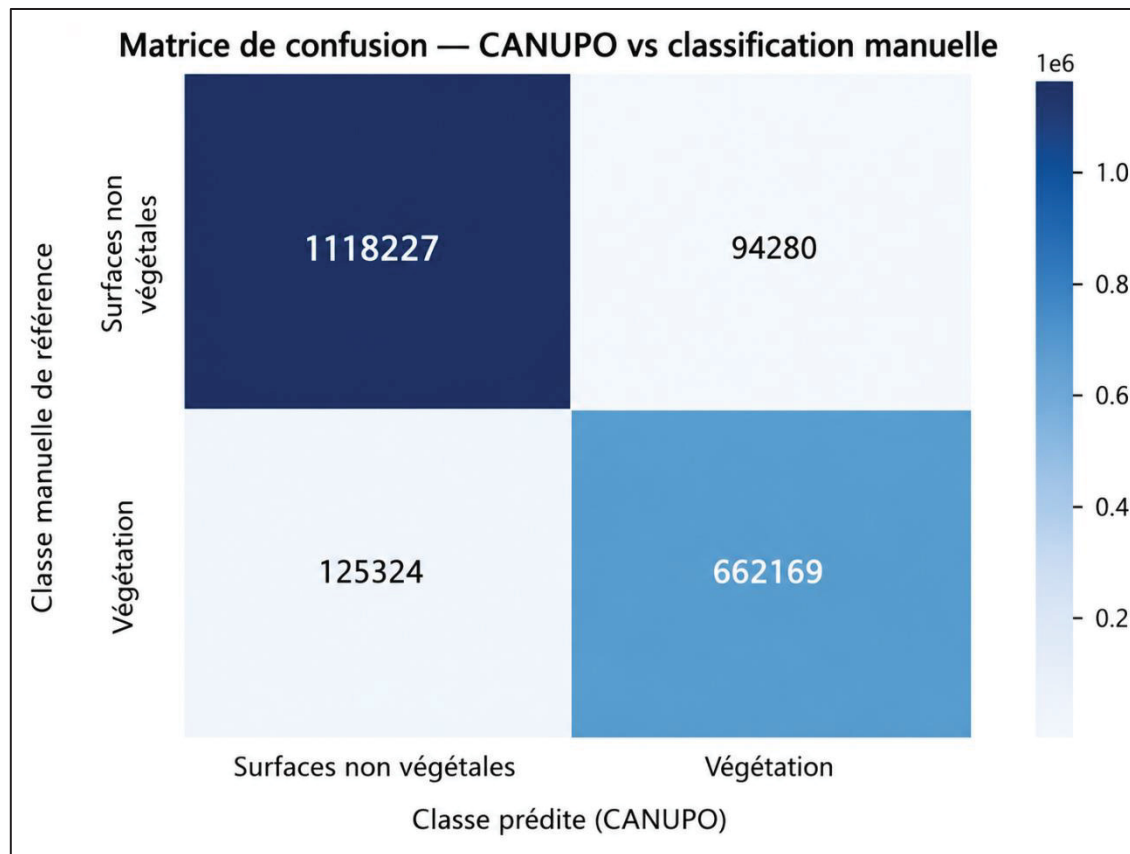


Figure 4.13 Matrice de confusion obtenue par comparaison entre la classification manuelle de référence et les classes prédites par CANUPO sur un ensemble indépendant de 2 000 000 de points. Les valeurs situées sur la diagonale correspondent aux points correctement classés, tandis que les valeurs hors diagonale représentent les erreurs de classification. L'exactitude globale obtenue est de 89,02 %

Comme l'indiquent la Figure 4.13 et le Tableau 4.6, parmi les 1 212 507 points correspondant aux surfaces non végétales dans la classification manuelle, 1 118 227 points ont été correctement reconnus par CANUPO, tandis que 94 280 points ont été attribués à la végétation. Pour la classe végétation, 662 169 points sur 787 493 ont été correctement détectés, alors que 125 324 points ont été classés comme surfaces non végétales.

Le Tableau 4.6 résume l'ensemble des résultats de la matrice de confusion et permet de comparer directement les effectifs correctement et incorrectement classés pour chacune des deux classes.

Tableau 4.6 Matrice de confusion obtenue sur le jeu de validation indépendant

Classe manuelle de référence	Prédit comme surface non végétale	Prédit comme végétation	Total
Surfaces non végétales	1 118 227	94 280	1 212 507
Végétation	125 324	662 169	787 493
Total	1 243 551	756 449	2 000 000

L'exactitude globale correspond à la proportion de points correctement classés parmi l'ensemble des points du jeu de validation :

$$A = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \quad (4.10)$$

Dans le cas présent :

$$A = \frac{1\,118\,227 + 662\,169}{2\,000\,000} = 0,8902 \quad (4.11)$$

Le classificateur atteint donc une exactitude globale de :

$$A = 89,02 \% \quad (4.12)$$

Au total, 1 780 396 points ont été correctement classés, contre 219 604 points dont la classe prédite diffère de la classification manuelle de référence.

Afin de caractériser plus précisément le comportement du classificateur pour chacune des classes, la précision, le rappel et le score F1 ont également été calculés. La précision représente la proportion de points attribués à une classe qui appartiennent effectivement à cette classe :

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.13)$$

Le rappel représente la proportion des points réellement associés à une classe qui ont été correctement détectés :

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.14)$$

Le score F1 correspond à la moyenne harmonique de la précision et du rappel :

$$F1 = 2 \frac{P \times R}{P + R} \quad (4.15)$$

Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 Résultats de l'évaluation des performances du classificateur CANUPO

Classe	Précision	Rappel	Score F1	Nombre de points
Surfaces non végétales	0,90	0,92	0,91	1 212 507
Végétation	0,88	0,84	0,86	787 493
Exactitude globale			0,8902	2 000 000
Moyenne macro	0,89	0,88	0,88	2 000 000
Moyenne pondérée	0,89	0,89	0,89	2 000 000

La précision équilibrée a été calculée à partir de la moyenne des rappels obtenus pour les deux classes :

$$BA = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (4.16)$$

À partir des valeurs non arrondies issues de la matrice de confusion :

$$R_1 = \frac{1\,118\,227}{1\,212\,507} \approx 0.922 \quad (4.17)$$

$$R_2 = \frac{662\ 169}{787\ 493} \approx 0.849 \quad (4.18)$$

Ainsi :

$$BA = \frac{0,9222 + 0,8409}{2} \approx 0,8816 \quad (4.19)$$

La précision équilibrée de 88,16 % obtenue sur le jeu de validation spatialement indépendant est directement comparable à la précision équilibrée interne de 99,05 % obtenue durant l'apprentissage, puisqu'elles reposent sur le même indicateur. Elle ne doit toutefois pas être comparée directement à la valeur de 99,25 %, qui correspond uniquement au taux de classification correcte de la classe « végétation » dans les données d'apprentissage. L'écart de 10,89 points de pourcentage entre les deux précisions équilibrées s'explique notamment par le fait que les données d'apprentissage ont directement contribué à la construction de la frontière de décision, tandis que le jeu de validation présente des configurations géométriques nouvelles et plus diversifiées. La valeur de 88,16 % constitue ainsi une estimation plus représentative de la capacité de généralisation du classificateur.

Pour les surfaces non végétales, le rappel de 0,92 indique que la grande majorité des surfaces identifiées manuellement ont été correctement conservées par le classificateur. Ce résultat est particulièrement important dans le contexte de cette étude, puisque les surfaces rocheuses constituent les données nécessaires au calcul des normales, à l'extraction des orientations structurales et à l'interprétation morphologique.

Pour la végétation, la précision de 0,88 montre que la majorité des points identifiés par CANUPO comme végétation correspondent effectivement à des éléments végétaux. Le rappel de 0,84 indique que le classificateur a détecté environ 84 % de la végétation présente dans le jeu de référence. Une partie de la végétation demeure donc incluse dans la classe des surfaces non végétales, notamment lorsque sa géométrie locale ressemble à celle de la paroi.

Cette configuration traduit un compromis favorable à la préservation des surfaces rocheuses. Dans le contexte de la préparation des modèles géométriques, il est préférable de conserver

une certaine quantité de végétation résiduelle, qui peut ensuite être retirée manuellement, plutôt que de supprimer de manière excessive des portions de roche susceptibles de contenir des informations structurales ou morphologiques pertinentes.

L'écart entre la précision équilibrée interne de l'apprentissage, qui atteint 99,05 %, et celle de la validation indépendante, d'environ 88,16 %, est attendu. Les données utilisées pendant l'apprentissage ont directement contribué à la construction de la frontière de décision, tandis que la portion de validation présente une plus grande diversité de configurations géométriques. Cette différence confirme l'importance de distinguer la performance interne du classificateur de sa capacité de généralisation sur des données indépendantes.

Les erreurs de classification observées peuvent principalement être associées :

- Aux interfaces entre la végétation et la roche;
- Aux branches fines ou isolées;
- À la végétation peu dense ou plaquée contre la paroi;
- Aux surfaces rocheuses fortement fracturées;
- Aux bordures de blocs et aux surplombs;
- Aux variations locales de densité du nuage de points;
- À certaines géométries intermédiaires entre les comportements planaires et volumiques.

La méthode originale souligne également que les surfaces rocheuses en surplomb ou les bordures de blocs peuvent occasionnellement présenter une signature multiscalaire proche de celle de la végétation. Elle recommande l'utilisation d'un contrôle du niveau de confiance et d'une vérification par l'utilisateur afin d'améliorer la qualité finale de la classification.

Dans l'ensemble, l'exactitude globale de 89,02 %, la précision de 0,88 pour la végétation et le rappel de 0,92 pour les surfaces non végétales montrent que le classificateur retenu fournit un

préfiltrage efficace. Il permet d'éliminer une part importante de la végétation tout en préservant la majorité des surfaces non végétales nécessaires aux traitements subséquents.

Conformément à la logique semi-supervisée de CANUPO, les résultats de la classification n'ont pas été considérés comme un produit final entièrement automatisé. Ils ont été soumis à une inspection visuelle dans CloudCompare, puis complétés par une segmentation manuelle afin de corriger les erreurs résiduelles et d'éliminer les autres éléments non pertinents, notamment les débris, les dépôts granulaires, la neige résiduelle, les surfaces d'eau et certains points aberrants.

4.3.4.6 Application du classificateur et retrait de la végétation

Après son apprentissage et sa validation, le classificateur CANUPO a été appliqué aux portions du nuage de points présentant une couverture végétale importante. L'objectif de cette étape était de retirer une grande partie de la végétation avant les traitements géométriques et structuraux, tout en conservant les surfaces rocheuses nécessaires à l'analyse.

La Figure 4.14 illustre cette procédure pour la zone A, entre les chaînages 0+050 et 0+400. La Figure 4.14a montre la vue RGB initiale du nuage de points avant classification. Après application de CANUPO, chaque point a été attribué soit à la classe des surfaces non végétales, représentée en bleu, soit à la classe de la végétation, représentée en rouge (Figure 4.14b). Les points classés comme végétation ont ensuite été isolés afin de visualiser explicitement les éléments détectés par le classificateur (Figure 4.14c). La Figure 4.14d présente les surfaces non végétales conservées après retrait de la végétation, tandis que la Figure 4.14e montre la vue RGB obtenue après nettoyage.

Comme le montre la Figure 4.14b, CANUPO permet d'identifier une proportion importante des arbres, arbustes et bandes végétalisées présentes au sommet des parois, sur les banquettes et dans certaines zones intermédiaires. L'isolement de la végétation à la Figure 4.14c met en évidence la distribution spatiale des éléments détectés, tandis que la comparaison entre les

Figures 4.14a et 4.14e montre clairement l'amélioration de la lisibilité des surfaces rocheuses après retrait de la végétation. Cette amélioration facilite l'observation des bancs, des limites morphologiques, des discontinuités visibles et des ruptures de pente.

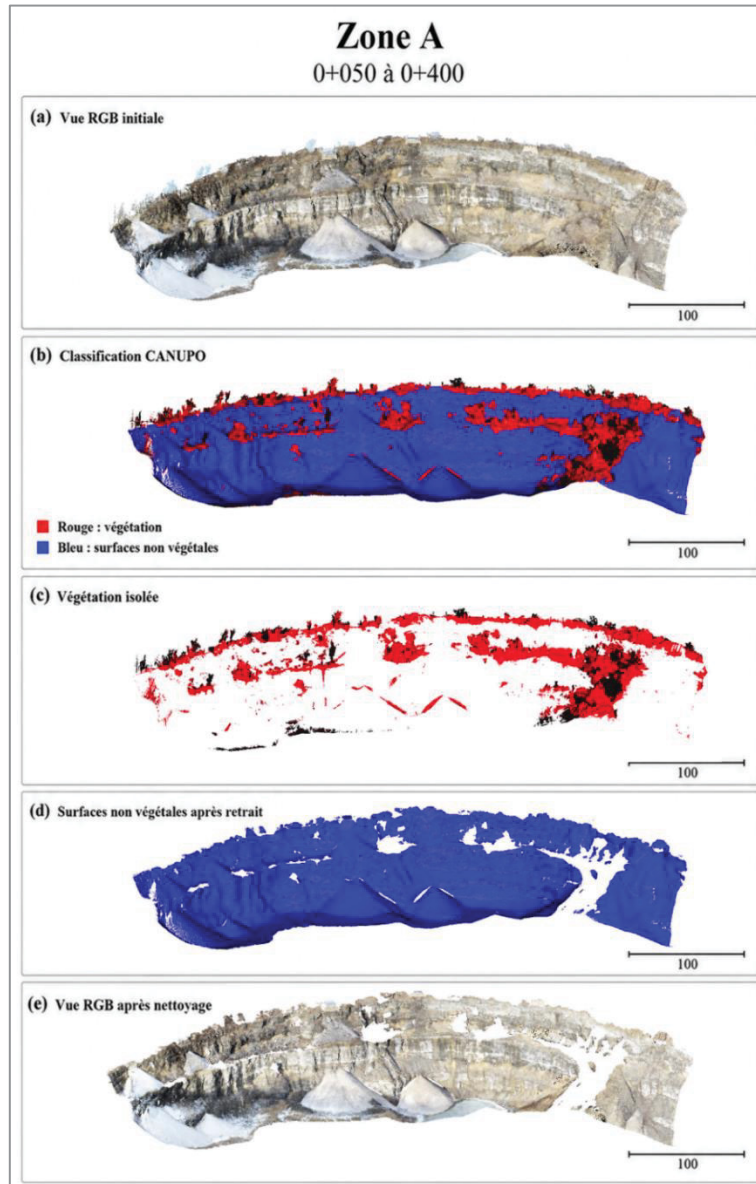


Figure 4.14 Application du classificateur CANUPO à la zone A, entre les chaînages 0+050 et 0+400 : (a) vue RGB initiale du nuage de points; (b) résultat de la classification, avec la végétation en rouge et les surfaces non végétales en bleu; (c) végétation isolée après classification; (d) surfaces non végétales conservées après retrait de la végétation; (e) vue RGB après nettoyage

La classification n'étant toutefois pas parfaite, les résultats ont été vérifiés visuellement dans CloudCompare. Certaines surfaces rocheuses localement rugueuses, fracturées ou situées en bordure de blocs peuvent présenter une signature géométrique proche de celle de la végétation et être classées de manière erronée. Inversement, une partie de la végétation peut demeurer incluse dans la classe des surfaces non végétales, notamment lorsqu'elle est clairsemée, peu dense ou étroitement associée à la paroi. Pour cette raison, les résultats de CANUPO ont été considérés comme une étape de préfiltrage semi-automatisé, et non comme un nettoyage entièrement automatique.

Après l'application du classificateur, un contrôle manuel complémentaire a donc été réalisé afin de corriger les erreurs résiduelles. Les surfaces rocheuses classées à tort comme végétation ont été conservées, tandis que la végétation non détectée a été retirée manuellement. Il convient également de préciser que le classificateur a été entraîné uniquement pour distinguer la végétation des surfaces non végétales. Les autres éléments indésirables, notamment les débris, les dépôts meubles, la neige résiduelle, les surfaces d'eau et certains points aberrants, n'étaient pas distingués comme classes séparées et ont donc également nécessité une intervention manuelle complémentaire.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que CANUPO constitue un outil pertinent pour améliorer l'efficacité et la reproductibilité du prétraitement des nuages de points. Son utilisation a permis de réduire de manière importante le volume de segmentation manuelle requis, tout en conservant la majorité des surfaces rocheuses utiles aux analyses structurales et morphologiques. L'approche retenue repose ainsi sur une combinaison entre classification supervisée multiscalaire et vérification manuelle, de manière à bénéficier de l'automatisation partielle offerte par CANUPO sans compromettre la qualité géométrique des modèles finaux.

4.3.4.7 Nettoyage manuel complémentaire

Après l'application de CANUPO et le retrait de la majorité de la végétation, une inspection visuelle des nuages de points a été réalisée dans CloudCompare. Cette étape visait à corriger les erreurs résiduelles de classification et à éliminer les éléments non rocheux qui n'avaient pas été pris en compte par le classificateur binaire.

Le nettoyage complémentaire a été effectué à l'aide de l'outil Segment. Les éléments retirés comprenaient principalement la végétation résiduelle, les débris, les dépôts granulaires et meubles, les accumulations de neige, certaines surfaces d'eau ainsi que les points aberrants associés au bruit de mesure, aux effets d'occlusion ou aux limites des modèles.

Une attention particulière a été portée aux surfaces rocheuses attribuées à tort à la végétation. Les bordures de blocs, les surplombs, les secteurs fortement fracturés et les zones de faible densité ont été vérifiés afin de préserver les formes structurales et morphologiques nécessaires aux analyses ultérieures.

CANUPO a ainsi été utilisé comme une étape de préfiltrage semi-automatisé, tandis que la segmentation manuelle a permis de compléter et de sécuriser le nettoyage. Cette approche hybride était nécessaire, puisque le classificateur avait été entraîné uniquement pour distinguer la végétation des surfaces non végétales et ne permettait pas d'identifier séparément l'ensemble des autres éléments non pertinents présents dans la carrière.

À l'issue de cette étape, les nuages de points présentaient une meilleure lisibilité des surfaces rocheuses et une réduction importante des éléments susceptibles de perturber le calcul des normales, l'extraction des orientations structurales et la cartographie morphologique.

4.3.5 Calcul des normales de surface et des cartes d'orientation

Après le nettoyage initial, les nuages de points filtrés ont été utilisés comme données d'entrée pour le calcul des normales de surface. Cette étape vise à caractériser l'orientation locale des parois rocheuses à partir de la géométrie du modèle 3D. Une normale correspond à un vecteur perpendiculaire à une portion locale de surface ; elle permet donc de décrire les variations d'orientation présentes sur les fronts rocheux et de mettre en évidence les contrastes entre surfaces planes, ruptures de pente et discontinuités visibles.

Le calcul des normales a été réalisé dans CloudCompare à partir du voisinage spatial des points. Pour les modèles utilisés dans ce mémoire, l'approximation locale de la surface repose sur un modèle planaire et sur un rayon de voisinage fixé à 0,5 m. Ce rayon a été retenu comme un compromis entre la conservation des variations morphologiques pertinentes et la réduction de l'influence du bruit résiduel à très petite échelle. Un rayon plus faible aurait rendu les normales davantage sensibles aux irrégularités locales et au bruit, tandis qu'un rayon plus élevé aurait pu lisser les discontinuités et les ruptures de pente. Une analyse de sensibilité systématique à différentes valeurs de rayon n'a toutefois pas été réalisée. Les orientations calculées demeurent donc, dans une certaine mesure, dépendantes de ce paramètre. Une comparaison de plusieurs rayons de voisinage, par exemple 0,25, 0,50, 0,75 et 1,00 m, constituerait une étape complémentaire pertinente pour évaluer la stabilité des orientations extraites.

Cette opération permet de passer d'un nuage de points filtré à une représentation géométrique plus interprétable. Les normales calculées facilitent l'identification des changements d'orientation, des surfaces relativement planes, des ruptures de pente, des joints apparents et des limites morphologiques. Elles constituent également une étape préalable importante pour la génération des cartes d'orientation utilisées dans l'analyse structurale virtuelle.

À partir des normales calculées, des cartes d'orientation ont ensuite été générées afin de visualiser la distribution spatiale des orientations de surface. Ces cartes permettent de représenter les variations locales de direction et de pendage sur les parois rocheuses, en

associant les orientations à une échelle de couleurs. Elles servent de support pour guider la lecture structurale du modèle, repérer les familles de surfaces dominantes et préparer la sélection des plans utilisés dans les analyses ultérieures.

Comme l'illustre la Figure 4.15, cette étape permet de comparer le nuage de points filtré et la représentation obtenue après calcul des normales. La figure met en évidence le passage d'une donnée géométrique colorisée à un produit dérivé facilitant l'interprétation des variations d'orientation et des structures visibles sur la paroi.

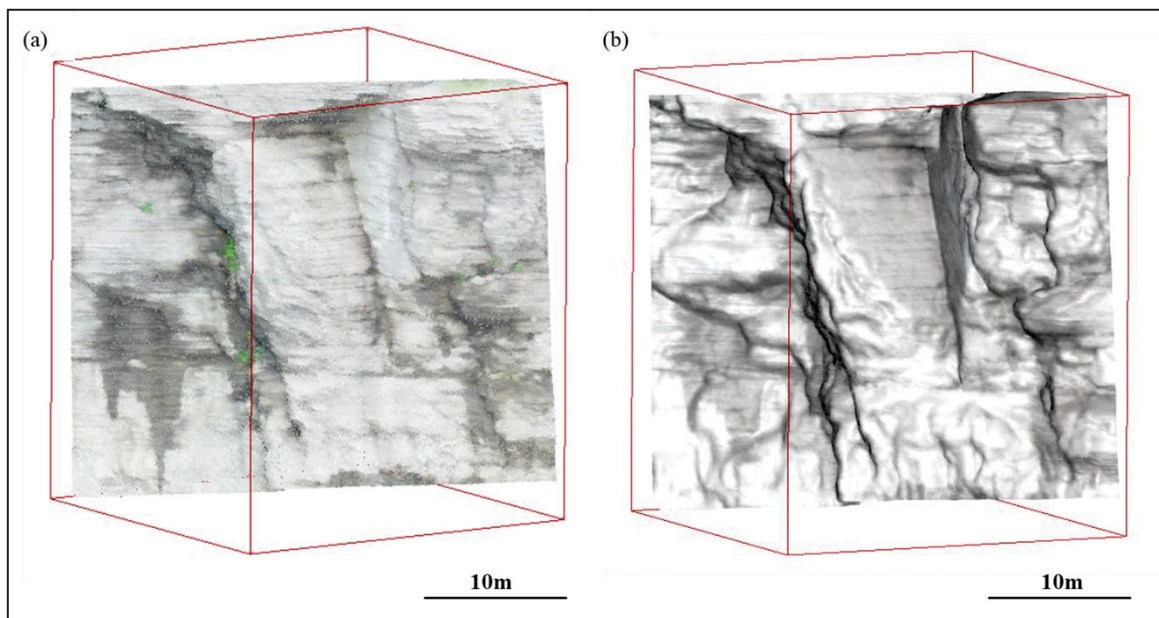


Figure 4.15 Exemple de calcul des normales de surface dans CloudCompare : (a) nuage de points filtré et colorisé ; (b) représentation dérivée après calcul des normales, mettant en évidence les variations d'orientation et les discontinuités visibles de la paroi

4.4 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a présenté les données, les outils et les méthodes utilisés pour l'acquisition, la préparation et le traitement des modèles tridimensionnels de la carrière Francon. La démarche repose sur l'intégration de levés UAV-LiDAR, de données photogrammétriques et d'images

RGB afin de produire une représentation détaillée des parois rocheuses et de leurs principales caractéristiques géométriques et visuelles.

Les différentes étapes de traitement ont permis de transformer les données brutes en modèles adaptés aux analyses géomécaniques. Elles comprennent la génération et le nettoyage des nuages de points, la sélection des surfaces rocheuses pertinentes ainsi que l'organisation des modèles en unités spatiales cohérentes. Une procédure hybride combinant la classification géométrique multiscalaire par CANUPO et une segmentation manuelle dans CloudCompare a notamment été mise en œuvre. CANUPO a servi au préfiltrage semi-automatisé de la végétation, tandis que le contrôle visuel complémentaire a permis de corriger les erreurs résiduelles et de retirer les autres éléments non pertinents, notamment la neige, les débris, les dépôts meubles, les surfaces d'eau et certains points aberrants. Cette préparation visait à réduire l'influence du bruit tout en conservant les portions les plus représentatives de la roche en place.

Le calcul des normales de surface et la production des cartes d'orientation ont fourni les principaux descripteurs nécessaires à la reconnaissance des surfaces planes et à l'analyse de leur géométrie. Ces outils permettent de visualiser les variations locales d'orientation, d'appuyer l'extraction des directions et des pendages et de préparer la lecture structurale des parois. Les images RGB complètent cette information géométrique en facilitant l'identification des variations de texture, de coloration, d'altération et de suintement.

Un chaînage longitudinal de référence a également été établi afin de localiser de manière uniforme les observations, les portions de paroi et les plateformes de déversement. Ce référentiel assure la correspondance entre les modèles 3D, la zonation géométrique et les contextes opérationnels qui seront mobilisés dans les analyses suivantes.

Dans l'ensemble, les traitements présentés dans ce chapitre établissent une base technique cohérente pour la caractérisation structurale, cinématique, morphologique et spatiale des parois rocheuses. Le chapitre suivant s'appuie sur ces modèles afin d'identifier la stratification et les principales familles de discontinuités, puis d'évaluer leur compatibilité géométrique avec les mécanismes potentiels de rupture.

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION STRUCTURALE ET ANALYSE CINÉMATIQUE DIRECTIONNELLE DES PAROIS ROCHEUSES

5.1 Préambule

L'objectif de ce chapitre est d'établir le cadre structural et géométrique nécessaire à l'interprétation des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la suite du mémoire. La démarche repose sur l'exploitation des modèles tridimensionnels préparés au chapitre 4 afin de déterminer les orientations représentatives des parois, d'extraire les discontinuités visibles, d'identifier les principales familles structurales et d'évaluer les mécanismes d'instabilité cinématiquement admissibles.

L'analyse est organisée selon les secteurs A, B et C définis à partir du modèle tridimensionnel global. En raison de sa courbure longitudinale, le secteur A est subdivisé en trois sous-secteurs, A1, A2 et A3, afin de représenter plus fidèlement les variations de l'orientation de la paroi. Les orientations moyennes obtenues pour ces secteurs constituent les paramètres géométriques utilisés dans l'analyse cinématique directionnelle.

Le chapitre suit trois étapes principales. La première consiste à définir les secteurs d'analyse et à déterminer les orientations représentatives des parois à partir des normales de surface et de plans de meilleur ajustement. La deuxième porte sur l'extraction des orientations structurales et l'identification des principales familles de discontinuités. La troisième intègre les orientations des familles structurales et celles des parois afin d'évaluer la faisabilité géométrique du glissement planaire, du glissement en coin et du basculement.

Les résultats obtenus ne représentent ni une probabilité de rupture ni une évaluation absolue de la stabilité des parois. Ils définissent plutôt un cadre de compatibilité géométrique permettant de déterminer les mécanismes cinématiquement admissibles selon l'orientation des différents secteurs. Ce cadre sera mobilisé au chapitre suivant pour interpréter les éléments

d'instabilité apparente cartographiés et examiner leur cohérence avec la structure du massif rocheux.

5.2 Secteurs d'analyse et orientations représentatives des parois

Les données mobilisées dans ce chapitre correspondent aux modèles tridimensionnels représentatifs sélectionnés et préparés au chapitre 4. Ces modèles sont issus des acquisitions UAV-LiDAR et photogrammétriques réalisées à la carrière Francon, puis des opérations de génération, de géoréférencement, de colorisation et de nettoyage des nuages de points. Ils constituent le support géométrique de la cartographie structurale virtuelle et de l'analyse cinématique directionnelle présentées dans ce chapitre.

Les modèles retenus offrent un niveau de détail compatible avec l'identification des principales surfaces structurales visibles, des changements d'orientation du front rocheux et des discontinuités suffisamment planes pour permettre l'ajustement de plans. Leur densité moyenne, leur espacement moyen entre les points et les principales limites liées à la couverture ont été présentés au chapitre 4. Lorsque cela était nécessaire, des versions de travail homogénéisées ont été utilisées afin de faciliter la visualisation et l'extraction des orientations, tout en maintenant une résolution adaptée aux objectifs de caractérisation structurale.

Afin d'organiser spatialement l'analyse, les parois étudiées ont été réparties en trois secteurs principaux, désignés A, B et C. Cette organisation permet de tenir compte des variations d'orientation, de continuité et de géométrie observées le long du front rocheux. Elle constitue le cadre spatial utilisé pour regrouper les mesures structurales, déterminer les orientations représentatives des parois et comparer leur compatibilité avec les mécanismes cinématiquement admissibles. Le chaînage longitudinal défini au chapitre 4 fournit, en complément, un repère commun pour localiser les secteurs et les observations le long de la carrière.

5.2.1 Orientation représentative des sous-secteurs A1, A2 et A3

Le secteur A se distingue par une courbure longitudinale marquée de la paroi, qui s'accompagne d'une variation progressive de sa direction de pendage. Dans ce contexte, l'utilisation d'une orientation moyenne unique pour l'ensemble du secteur aurait été insuffisante pour représenter fidèlement sa géométrie. Afin de mieux prendre en compte cette variabilité directionnelle dans les analyses subséquentes, le secteur A a donc été subdivisé en trois sous-secteurs, désignés A1, A2 et A3.

La détermination des orientations représentatives a été réalisée à partir des nuages de points nettoyés préparés selon la démarche présentée au chapitre 4. Les normales de surface ont d'abord été calculées dans CloudCompare à l'aide d'un modèle local planaire et d'un rayon de voisinage de 0.5 m. Elles ont ensuite été converties en champs scalaires de pendage et de direction de pendage, de manière à visualiser la distribution spatiale des orientations sur la paroi et à mieux identifier les transitions géométriques le long du secteur.

Sur cette base, des plans de meilleur ajustement ont été appliqués à des portions de paroi jugées représentatives de chacun des trois sous-secteurs. Dans ce cas, ces plans ne visent pas à caractériser des discontinuités individuelles, mais à résumer l'orientation moyenne du front rocheux à l'échelle de chaque sous-secteur. Les orientations ainsi obtenues sont d'environ $86^{\circ}/137^{\circ}$ pour A1, $83^{\circ}/160^{\circ}$ pour A2 et $85^{\circ}/194^{\circ}$ pour A3.

La Figure 5.1 présente les éléments ayant servi à cette détermination. La vue d'ensemble illustrée à la Figure 5.1a montre la subdivision du secteur A, l'emplacement des plateformes de déversement ponctuelles le long du chaînage longitudinal ainsi que les orientations moyennes associées aux portions représentatives retenues. La Figure 5.1b présente la carte de direction de pendage dérivée des normales de surface, qui met en évidence la variation progressive de l'orientation de la paroi entre les sous-secteurs A1, A2 et A3.

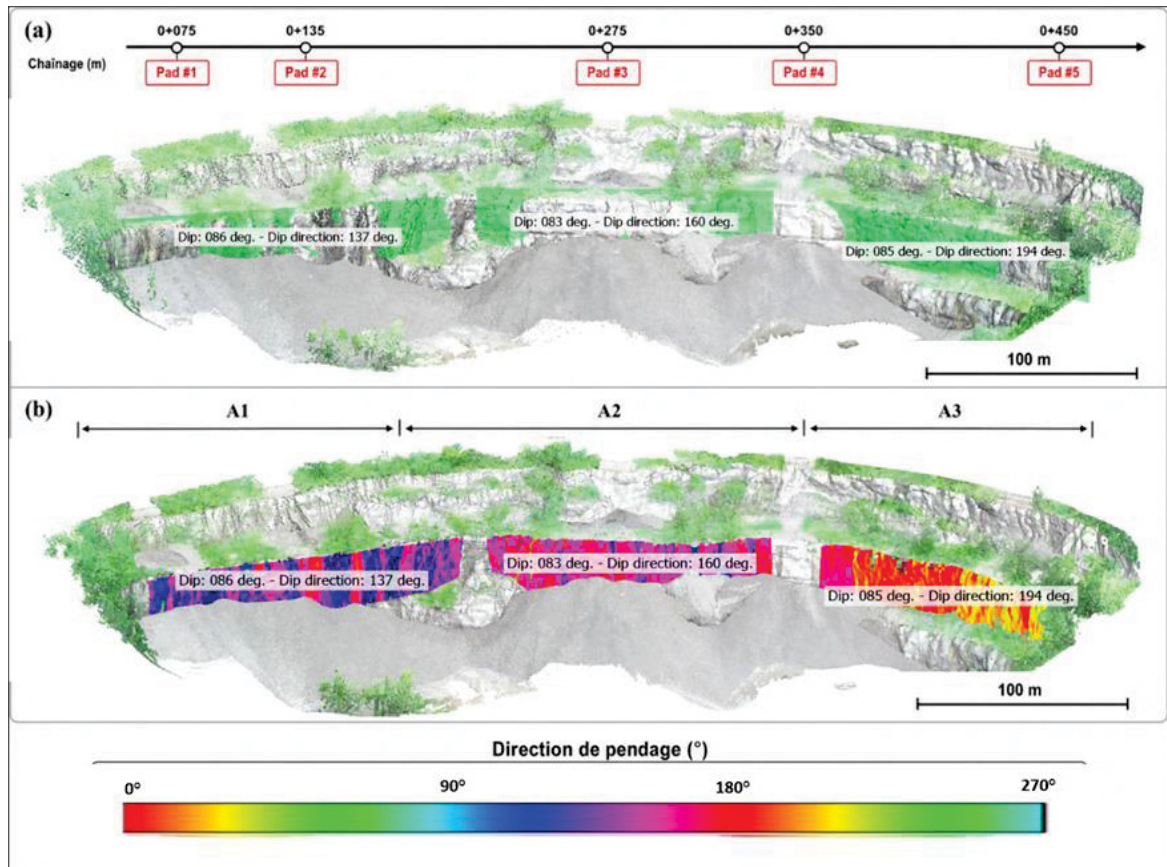


Figure 5.1 Orientation représentative des sous-secteurs A1, A2 et A3 du secteur A. (a) vue générale du modèle tridimensionnel montrant la subdivision du secteur, le chaînage longitudinal, la localisation des plateformes de déversement ponctuelles et les orientations moyennes dérivées des plans de meilleur ajustement; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, mettant en évidence la variation longitudinale de l'orientation de la paroi

5.2.2 Orientation représentative du secteur B

À l'échelle du secteur étudié, la paroi du secteur B présente une géométrie globalement continue et plus régulière que celle observée dans le secteur A. Bien que des variations locales soient visibles en lien avec la rugosité de surface, les discontinuités et certaines irrégularités morphologiques, ces variations ne traduisent pas un changement directionnel suffisamment marqué pour justifier une subdivision interne du secteur. Le secteur B a donc été conservé

comme une unité principale d'analyse pour la détermination de l'orientation représentative de la paroi.

L'orientation représentative a été déterminée à partir du nuage de points nettoyé, selon la même démarche que celle appliquée au secteur A. Les normales de surface ont d'abord été calculées dans CloudCompare à l'aide d'un modèle local planaire et d'un rayon de voisinage de 0.5m. Ces normales ont ensuite été converties en champs scalaires de pendage et de direction de pendage afin de visualiser la distribution spatiale des orientations sur la paroi. Enfin, un plan de meilleur ajustement a été appliqué à une portion jugée représentative du front rocheux afin d'en résumer la géométrie moyenne. Dans ce contexte, ce plan ne vise pas à caractériser une discontinuité particulière, mais bien à représenter l'orientation moyenne de la paroi à l'échelle du secteur.

L'orientation moyenne ainsi obtenue pour le secteur B est d'environ $81^{\circ}/213^{\circ}$. Cette valeur indique une paroi très raide, dont la direction de pendage est orientée vers le sud-ouest. La carte de direction de pendage confirme que cette orientation demeure globalement cohérente à l'échelle de l'ensemble du secteur, malgré certaines variations locales attribuables à la fracturation, à la morphologie de la paroi et aux irrégularités topographiques.

La Erreur ! Source du renvoi introuvable. présente les éléments utilisés pour établir cette orientation représentative. La vue générale du modèle 3D montre la portion de paroi analysée, l'emprise du plan représentatif, ainsi que le chaînage longitudinal et la position des plateformes Pad #6 (0+570), Pad #7 (0+655) et Pad #8 (0+775). Elle met également en évidence la zone dynamitée au niveau du mur de la banquette supérieure, afin de replacer l'interprétation dans son contexte morphologique et opérationnel. La carte de direction de pendage illustre, quant à elle, la continuité générale de l'orientation de la paroi et les variations locales observées à l'intérieur du secteur.

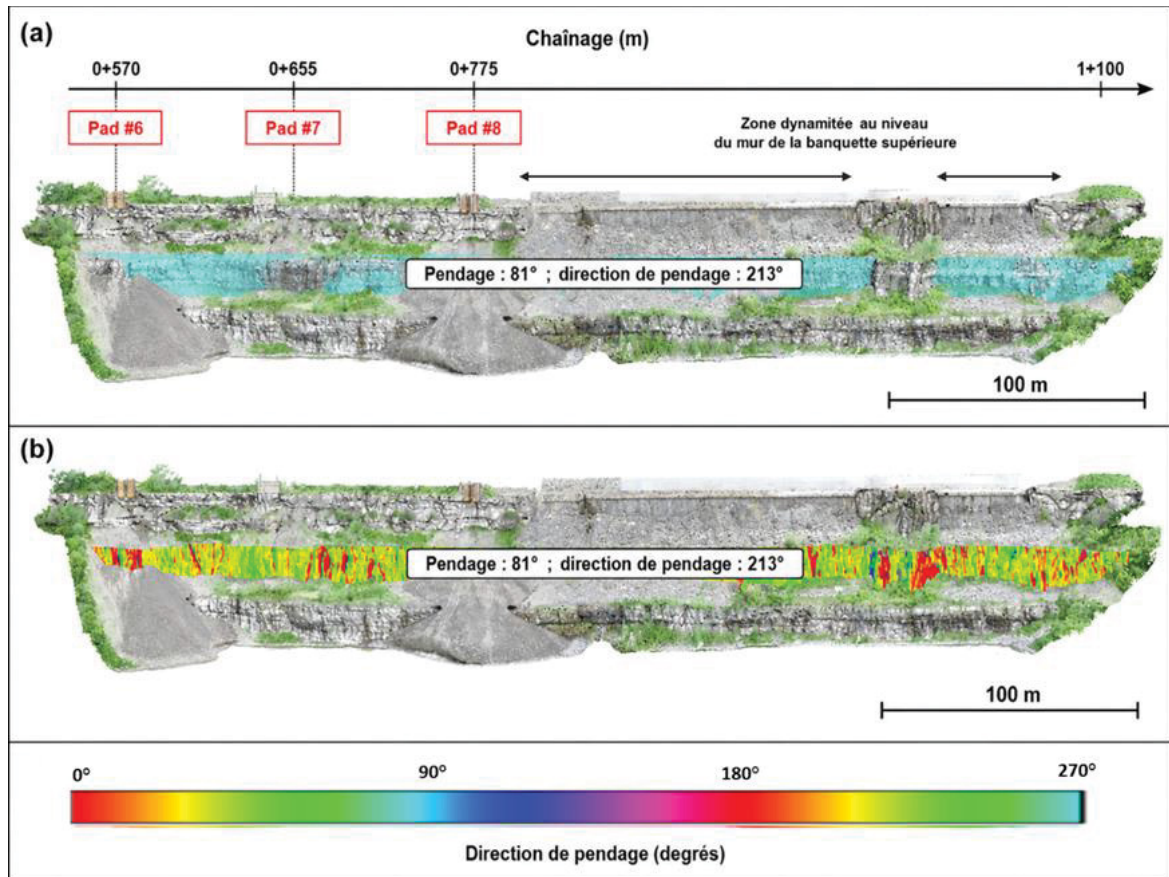


Figure 5.2 Détermination de l'orientation représentative du secteur B. (a) Vue générale du modèle tridimensionnel du secteur B montrant le chaînage longitudinal, la localisation des plateformes Pad #6, Pad #7 et Pad #8, la zone dynamitée au niveau du mur de la banquette supérieure, ainsi que l'orientation moyenne de la paroi dérivée d'un plan de meilleur ajustement; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, illustrant la continuité générale de l'orientation de la paroi et ses variations locales

5.2.3 Orientation représentative du secteur C

Le secteur C présente, à l'échelle de la portion analysée, une géométrie globalement régulière et latéralement continue. Contrairement au secteur A, où la courbure de la paroi justifiait une subdivision en sous-secteurs, les variations locales observées dans le secteur C ne sont pas

suffisamment marquées pour nécessiter une subdivision interne. Le secteur C a donc été conservé comme une unité unique d'analyse structurale et cinématique.

La détermination de son orientation représentative a été réalisée selon la même démarche que pour les autres secteurs. Un plan de meilleur ajustement a ensuite été appliqué à une portion représentative du front rocheux afin d'en résumer la géométrie moyenne. L'orientation ainsi obtenue est d'environ $90^\circ/213^\circ$. Dans ce contexte, ce plan ne vise pas à caractériser une discontinuité particulière, mais à définir une orientation moyenne représentative de la paroi, utilisée comme paramètre d'entrée pour l'analyse cinématique directionnelle.

Comme l'illustre la Figure 5.3, la représentation en direction de pendage confirme la continuité générale de cette orientation le long du secteur C, malgré certaines variations locales liées à la rugosité de surface, aux irrégularités morphologiques et à l'expression de structures visibles dans la paroi. Ces variations demeurent secondaires à l'échelle du secteur et ne remettent pas en cause l'orientation moyenne retenue. La figure intègre également le chaînage longitudinal ainsi que la position des pads et de l'emprise de la plateforme de déversement étendue, ce qui permet de situer spatialement le secteur analysé dans son contexte opérationnel, sans modifier l'unité géométrique retenue pour la présente étape.

Les orientations moyennes dérivées pour les secteurs A, B et C constituent la base géométrique utilisée dans la suite du chapitre pour l'analyse cinématique directionnelle des mécanismes de glissement planaire, de glissement en coin et de basculement.

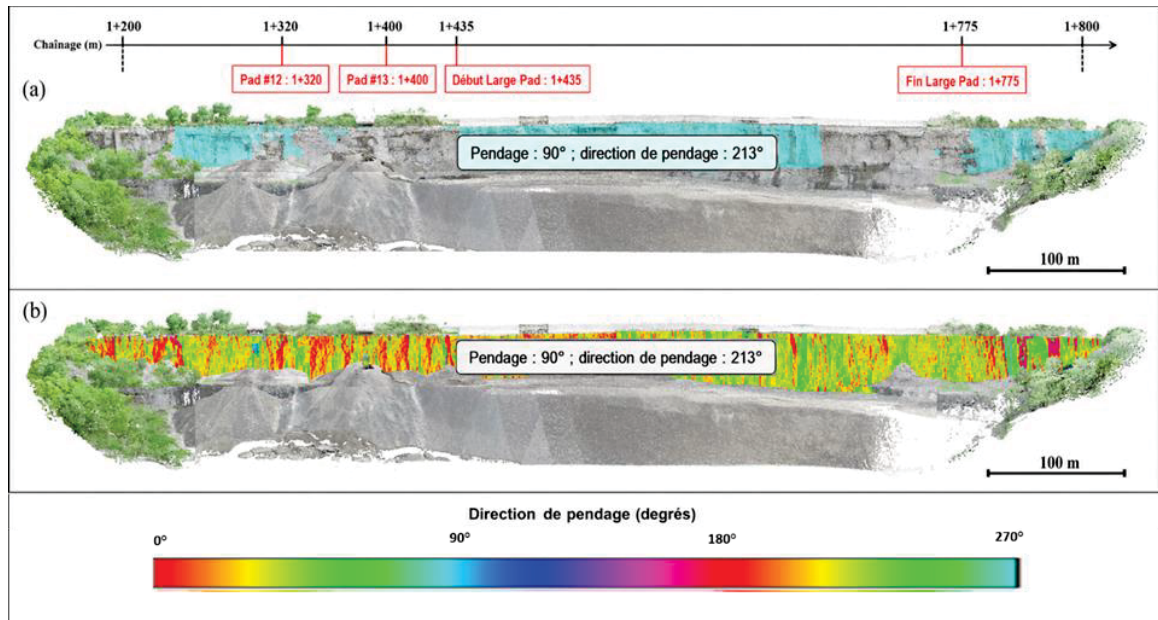


Figure 5.3 Détermination de l'orientation représentative du secteur C : (a) vue générale du modèle tridimensionnel montrant l'orientation moyenne de la paroi dérivée d'un plan de meilleur ajustement, ainsi que le chaînage longitudinal et les principales références opérationnelles; (b) carte de direction de pendage obtenue après calcul des normales de surface et conversion en champ scalaire dans CloudCompare, mettant en évidence la continuité générale de l'orientation de la paroi et les variations locales observées

5.2.4 Orientations retenues pour l'analyse cinématique

Les orientations moyennes déterminées à partir des modèles tridimensionnels constituent les paramètres géométriques de référence pour l'analyse cinématique directionnelle. Elles permettent de représenter les variations de direction observées le long des parois de la carrière Francon tout en conservant un nombre limité d'unités d'analyse cohérentes. Les sous-secteurs A1, A2 et A3 sont ainsi caractérisés par des directions de pendage respectives de 137°, 160° et 194°, tandis que les secteurs B et C présentent une direction de pendage moyenne commune de 213°.

Les pendages moyens mesurés à partir des plans de meilleur ajustement varient entre 81° et 90°, ce qui confirme le caractère très abrupt des fronts rocheux étudiés. Toutefois, afin

d'uniformiser les conditions géométriques de comparaison et de concentrer l'analyse sur l'effet de la direction de pendage, un pendage de paroi de 90° a été adopté pour l'ensemble des secteurs dans les analyses réalisées avec le logiciel Dips. Cette simplification représente une configuration conservatrice compatible avec la géométrie subverticale des parois, mais elle ne signifie pas que chaque portion du front rocheux présente localement un pendage exactement égal à 90° .

Les directions de pendage dérivées des plans de meilleur ajustement ont, quant à elles, été conservées, puisqu'elles constituent le principal facteur de différenciation géométrique entre les secteurs. Les orientations introduites dans l'analyse cinématique sont donc $90^\circ/137^\circ$ pour A1, $90^\circ/160^\circ$ pour A2, $90^\circ/194^\circ$ pour A3, ainsi que $90^\circ/213^\circ$ pour les secteurs B et C. Le Tableau 5.1 présente la correspondance entre les orientations moyennes mesurées dans les modèles tridimensionnels et les orientations simplifiées retenues pour l'analyse.

Tableau 5.1 Orientations moyennes des parois et orientations retenues pour l'analyse cinématique directionnelle

Secteur	Orientations moyennes mesurées	Orientations retenues pour l'analyse cinématique
A1	$86^\circ/137^\circ$	$90^\circ/137^\circ$
A2	$83^\circ/160^\circ$	$90^\circ/160^\circ$
A3	$85^\circ/194^\circ$	$90^\circ/194^\circ$
B	$81^\circ/213^\circ$	$90^\circ/213^\circ$
C	$90^\circ/213^\circ$	$90^\circ/213^\circ$

Les orientations sont exprimées sous la forme pendage/direction de pendage. Les directions de pendage proviennent des plans de meilleur ajustement appliqués aux portions représentatives des parois. Un pendage uniforme de 90° a été adopté dans l'analyse cinématique afin de

représenter une configuration conservatrice et de faciliter la comparaison directionnelle entre les secteurs.

Cette distinction entre les orientations mesurées et les orientations retenues doit être maintenue dans l'interprétation des résultats. Les orientations mesurées décrivent la géométrie moyenne observée dans les modèles 3D, tandis que les orientations simplifiées constituent des paramètres analytiques utilisés pour évaluer, dans des conditions comparables, la compatibilité géométrique des familles de discontinuités avec les mécanismes de glissement planaire, de glissement en coin et de basculement.

Les orientations retenues ne représentent donc pas une description exhaustive de toutes les variations locales de la paroi. Elles constituent des orientations représentatives à l'échelle des secteurs, utilisées pour établir une comparaison directionnelle cohérente. Les irrégularités locales, les changements ponctuels d'orientation et les variations morphologiques demeurent visibles dans les modèles tridimensionnels, mais ne sont pas intégrés individuellement à cette étape de l'analyse.

Les paramètres structuraux et géométriques ainsi définis sont mobilisés dans les sections suivantes pour caractériser les principales familles de discontinuités et examiner leur compatibilité avec les mécanismes cinématiquement admissibles. Cette démarche fournit le cadre nécessaire pour distinguer la prédisposition géométrique des parois des formes d'instabilité apparente effectivement observées et cartographiées sur les modèles 3D.

5.3 Cartographie structurale et analyse cinématique

Cette section présente la deuxième phase de l'analyse, consacrée à la caractérisation structurale virtuelle des parois rocheuses et à l'évaluation des mécanismes d'instabilité cinématiquement admissibles. Elle s'appuie sur les modèles tridimensionnels nettoyés, organisés selon les secteurs A, B et C et associés aux orientations représentatives déterminées à la section précédente.

La démarche repose sur trois étapes complémentaires. La première consiste à extraire, directement dans les modèles 3D, les orientations des discontinuités visibles sur les surfaces rocheuses exposées. La deuxième vise à regrouper les orientations mesurées afin d'identifier les principales familles structurales présentes à l'échelle de la carrière. La troisième consiste à intégrer ces familles de discontinuités aux orientations représentatives des parois afin d'évaluer leur compatibilité géométrique avec les principaux mécanismes considérés, soit le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement.

Cette organisation permet de passer d'une lecture géométrique locale des surfaces visibles à une interprétation structurale globale du massif, puis à une analyse comparative de la faisabilité cinématique des mécanismes d'instabilité. Les résultats obtenus ne constituent ni une évaluation de la probabilité de rupture ni une mesure absolue de la stabilité des parois. Ils fournissent plutôt un cadre de compatibilité structurale et cinématique qui sera mobilisé dans le chapitre suivant pour interpréter les éléments d'instabilité apparente cartographiés.

5.3.1 Extraction des orientations structurales

L'extraction des orientations structurales a été réalisée à partir des modèles 3D nettoyés de la carrière Francon. Cette étape vise à identifier les discontinuités visibles sur les parois rocheuses et à mesurer directement leur orientation dans le nuage de points. Les procédures d'acquisition, de nettoyage et de préparation des modèles ayant été décrites au chapitre 4, la présente section se concentre sur leur utilisation pour la cartographie structurale virtuelle.

L'extraction a été effectuée le long des principales portions de paroi analysées dans les secteurs A, B et C. Cette couverture permet de constituer une base structurale représentative des différentes géométries de paroi observées sur le site, tout en tenant compte des variations locales d'orientation, de rugosité et de lisibilité des surfaces rocheuses. Les orientations obtenues ne correspondent donc pas à un relevé ponctuel isolé, mais à un ensemble de mesures

spatialement distribuées sur les fronts rocheux jugés interprétables dans les modèles tridimensionnels.

Dans un premier temps, les normales de surface calculées dans CloudCompare ont été utilisées comme support de lecture géométrique. Ces normales ont été converties en champs scalaires de pendage et de direction de pendage afin de visualiser les variations d'orientation à l'échelle des parois. Cette représentation colorée facilite la distinction entre les surfaces structurales dominantes, les changements locaux d'orientation ainsi que les secteurs où la structuration du massif apparaît plus marquée.

Les discontinuités ont ensuite été extraites à l'aide du plugin Compass intégré à CloudCompare. La procédure consiste à sélectionner manuellement des ensembles de points appartenant à des surfaces planes clairement identifiables sur le modèle 3D, puis à ajuster un plan moyen à chacune de ces sélections. Chaque plan extrait est ainsi associé à une orientation structurale exprimée en pendage et direction de pendage, tout en conservant sa localisation spatiale sur la paroi et son contexte morphologique immédiat.

La Figure 5.4 présente un exemple d'extraction des orientations structurales dans le secteur C. Le panneau (a) montre un zoom sur un segment de la paroi, où la carte de direction de pendage sert de support à l'identification visuelle des discontinuités et à l'affichage des orientations extraites. Le panneau (b) replace ce segment dans la vue d'ensemble de la paroi à l'aide du chaînage longitudinal, ce qui permet de situer spatialement la zone illustrée entre les repères opérationnels du secteur. Le panneau (c) présente la vue contextuelle tridimensionnelle de la paroi du secteur C, accompagnée de l'orientation moyenne retenue pour ce secteur, soit un pendage de 90° et une direction de pendage de 213° , utilisée comme paramètre géométrique dans l'analyse cinématique directionnelle.

Cette approche permet d'obtenir une base d'orientations structurales directement dérivées des modèles 3D nettoyés. Les orientations extraites ne constituent pas une caractérisation exhaustive de toutes les discontinuités du massif rocheux, mais un ensemble d'observations

structurales spatialement localisées, limitées aux surfaces visibles, suffisamment planes et lisibles dans les nuages de points. Elles fournissent néanmoins un référentiel robuste pour l'identification des principales familles de discontinuités et pour l'analyse cinématique développée dans les sections suivantes.

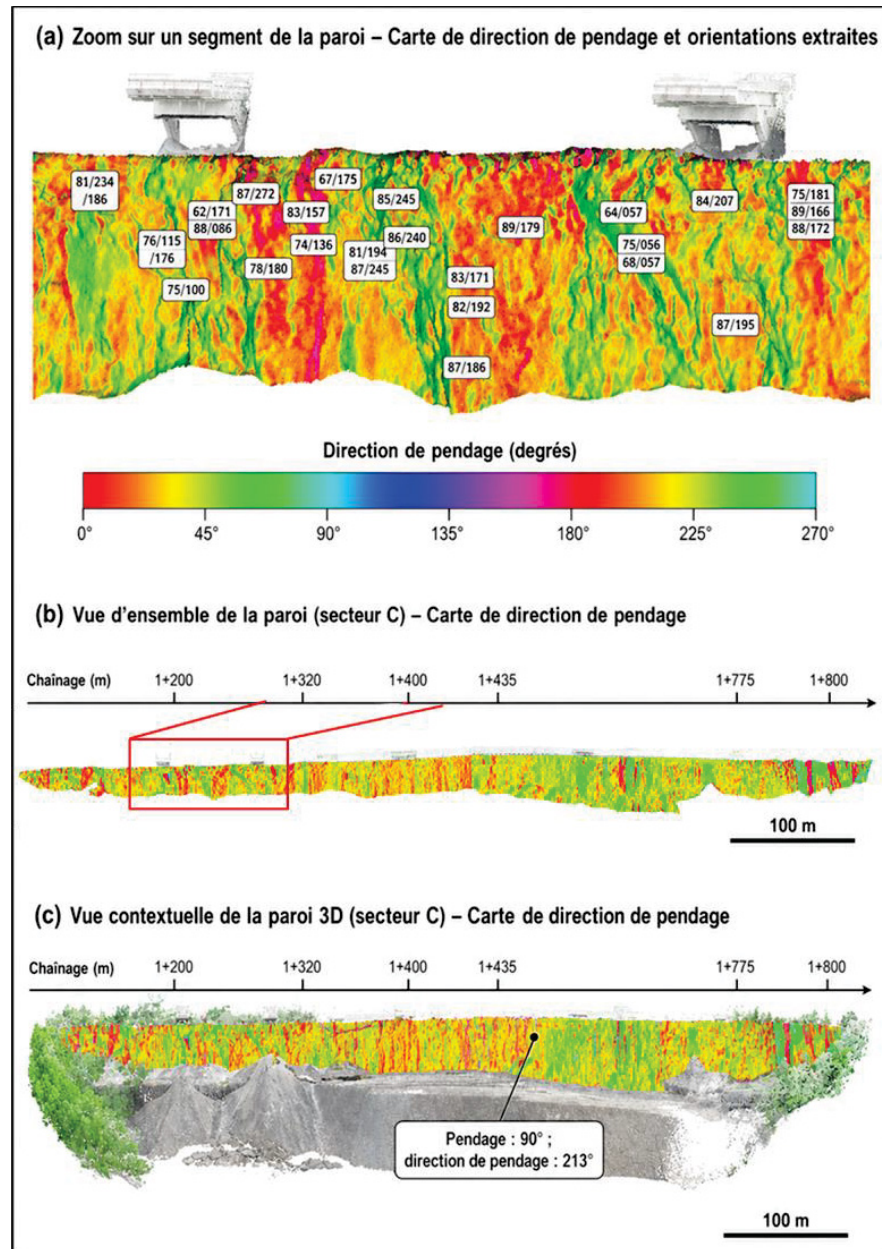


Figure 5.4 Exemple d'extraction des orientations structurales dans le secteur C à partir du modèle 3D nettoyé. (a) Zoom sur un segment de la paroi montrant la carte de direction de pendage et les orientations structurales extraites; (b) vue d'ensemble de la paroi du secteur C avec localisation du segment illustré au moyen du chaînage longitudinal; (c) vue contextuelle tridimensionnelle de la paroi montrant la carte de direction de pendage et l'orientation moyenne de la paroi retenue pour l'analyse cinématique directionnelle

5.3.2 Familles structurales identifiées

Une cartographie structurale virtuelle manuelle a été réalisée dans les différents secteurs étudiés à l'aide du plugin Compass intégré à CloudCompare, version 2.14. Les orientations extraites ont ensuite été importées dans le logiciel Dips, où les pôles des plans mesurés ont été projetés sur un diagramme stéréographique de Schmidt, selon une projection sur l'hémisphère inférieur. Cette démarche permet de regrouper les orientations présentant des caractéristiques directionnelles similaires et d'identifier les principales familles de discontinuités exprimées dans les modèles tridimensionnels.

L'analyse stéréographique réalisée à l'échelle de la carrière met en évidence quatre familles structurales principales : une famille de stratification faiblement inclinée, notée S0, et trois familles de joints à fort pendage, désignées F1, F2 et F3. Comme le montre la Figure 5.5, les pôles des discontinuités forment des concentrations distinctes plutôt qu'une distribution uniformément dispersée. Cette organisation traduit l'existence de directions structurales dominantes dans le massif rocheux.

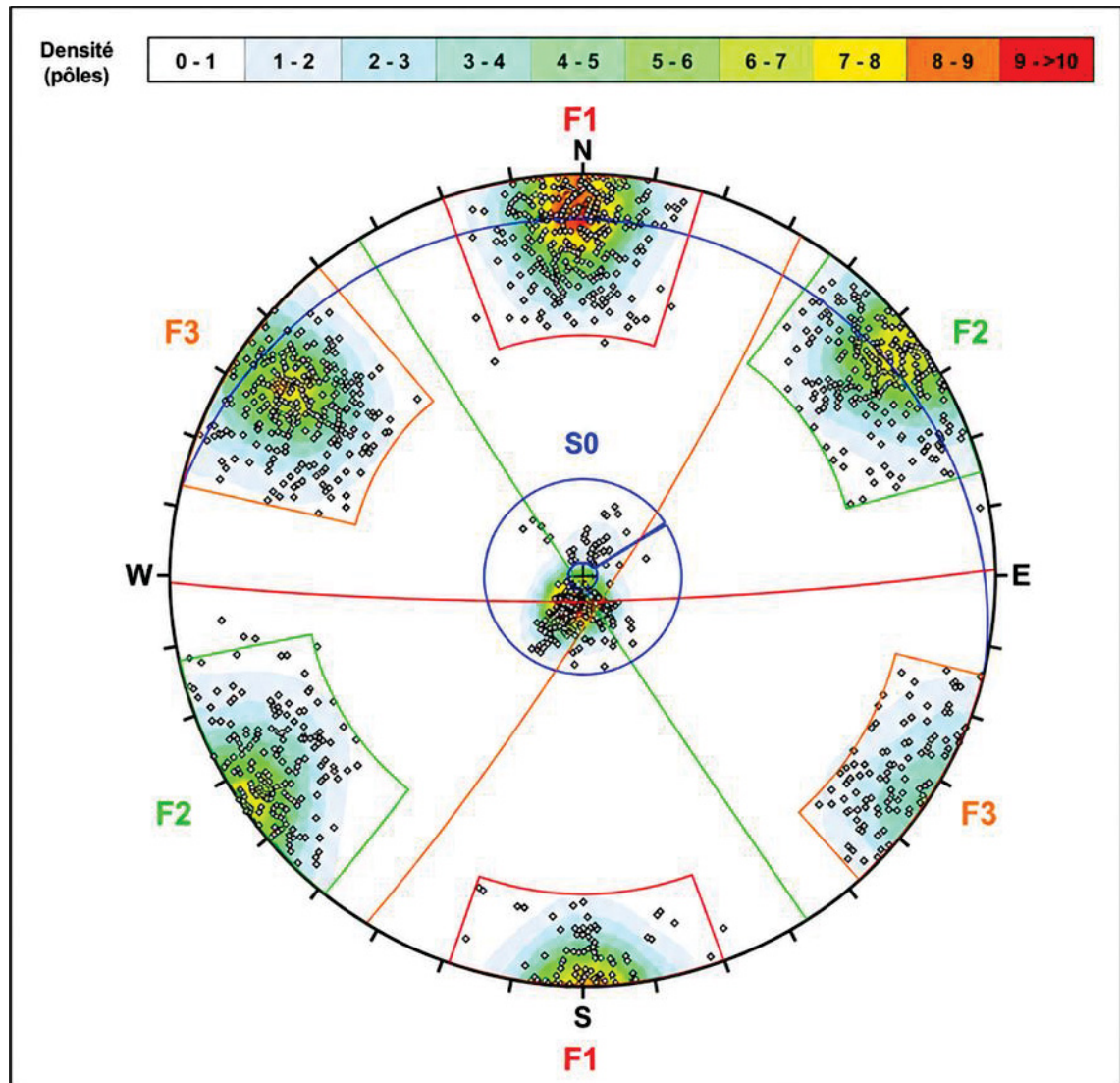


Figure 5.5 Diagramme stéréographique global des orientations structurales extraites des modèles tridimensionnels de la carrière Francon. Les regroupements de pôles mettent en évidence une famille de stratification faiblement inclinée, S0, et trois familles de joints à fort pendage, F1, F2 et F3

Les orientations moyennes et les principales caractéristiques descriptives des familles identifiées sont présentées au Tableau 5.2. Les paramètres de persistance et d'espacement complètent l'interprétation géométrique issue du diagramme stéréographique et permettent de préciser le rôle potentiel de chaque famille dans la segmentation du massif rocheux. Pour les

familles S0, F1 et F2, les valeurs de persistance et d'espacement proviennent des rapports géotechniques disponibles. Pour la famille F3, elles ont été estimées à partir de l'observation des modèles 3D et des images RGB. Ces valeurs doivent donc être considérées comme des ordres de grandeur représentatifs plutôt que comme des mesures systématiques de chaque discontinuité.

Tableau 5.2 Orientations moyennes et caractéristiques descriptives des familles de discontinuités identifiées à l'échelle de la carrière Francon

Type de discontinuité	Famille	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Persistance (m)	Espacement (m)
Stratification	S0	07	012	> 20 m	0,1–0,5 m
Joint subvertical	F1	83	179	3-10 m	0,5 - > 3
Joint subvertical	F2	88	237	3-10 m	1 - > 3
Joint subvertical	F3	82	122	3-10 m	1 - > 3

La famille S0 présente une orientation moyenne d'environ 7°/12°. Elle correspond à la stratification faiblement inclinée des bancs calcaires et se distingue par une persistance élevée, supérieure à 20 m. Sa continuité latérale contribue à organiser le massif en niveaux rocheux successifs et à individualiser les bancs selon des interfaces subhorizontales. Cette famille peut ainsi constituer une surface de séparation entre les niveaux calcaires et contribuer à la fragmentation du massif lorsqu'elle interagit avec les familles de joints à fort pendage. Son orientation est cohérente avec les descriptions lithologiques et structurales antérieures de la carrière Saint-Michel, qui indiquent une séquence calcaire à litage généralement subhorizontal (SNC-Lavalin inc., 2023a, 2023b).

Les familles F1, F2 et F3 correspondent à des joints à fort pendage recoupant la stratification. Elles présentent des pendages moyens compris entre 82° et 88° , mais se distinguent par leurs directions de pendage. La famille F1 est orientée en moyenne à $83^{\circ}/179^{\circ}$, la famille F2 à $88^{\circ}/237^{\circ}$ et la famille F3 à $82^{\circ}/122^{\circ}$. Ces familles participent à la compartimentation du massif en délimitant des volumes rocheux entre les plans de stratification et les joints subverticaux.

Les familles F1 et F2 présentent une correspondance étroite avec les principales familles de joints raides documentées dans les études géotechniques antérieures. L'analyse structurale réalisée par CIMA+ et reprise dans les rapports de SNC-Lavalin identifie notamment une famille orientée approximativement vers 160° à 180° , avec un pendage voisin de 80° , ainsi qu'une autre famille orientée approximativement vers 50° à 70° , avec un pendage proche de 90° (SNC-Lavalin inc., 2023a, 2023b). Les relevés issus des forages inclinés et de la géocaméra indiquent également des orientations moyennes proches de $84^{\circ}/175^{\circ}$ et de $84^{\circ}/244^{\circ}$. Ces correspondances montrent que les familles F1 et F2 représentent les directions de fracturation les plus clairement exprimées dans les modèles 3D et les mieux documentées dans les données géotechniques disponibles.

La famille F3 complète la fabrique structurale du massif par une troisième direction de joints à fort pendage, orientée en moyenne à $82^{\circ}/122^{\circ}$. Cette famille est moins explicitement décrite dans les études antérieures, lesquelles mettent principalement l'accent sur deux familles de joints raides et sur la stratification subhorizontale. Sa représentation plus faible dans certains relevés antérieurs pourrait être liée à un biais de visibilité associé à la relation entre l'orientation des discontinuités et celle des parois observées. Une famille subparallèle à une portion de front rocheux peut en effet être moins exposée et, par conséquent, moins facilement mesurable. L'identification de F3 doit donc être considérée comme un résultat complémentaire de la cartographie structurale virtuelle réalisée à l'échelle des différents secteurs de la carrière.

Les valeurs de persistance et d'espacement présentées au Tableau 5.2 doivent être interprétées avec prudence. Pour les familles S0, F1 et F2, elles s'appuient sur les informations

géotechniques disponibles, tandis que celles attribuées à F3 proviennent principalement de l'interprétation visuelle des modèles 3D et des images RGB. Elles permettent de caractériser l'ordre de grandeur de la continuité et du degré de répétition des familles, mais ne remplacent pas un relevé systématique réalisé pour chaque discontinuité.

La combinaison de la stratification S0 et des trois familles de joints à fort pendage produit une fabrique rocheuse fortement segmentée. La stratification organise le massif en bancs faiblement inclinés, tandis que les familles F1, F2 et F3 recoupent ces bancs selon plusieurs directions. Leurs intersections peuvent délimiter des blocs, des colonnes ou des volumes en coin dont la possibilité de mouvement dépend également de l'orientation de la paroi et des conditions de résistance au cisaillement des discontinuités.

Les familles S0, F1, F2 et F3 constituent ainsi le cadre structural de référence retenu pour l'analyse cinématique directionnelle présentée à la section suivante. Elles seront intégrées aux orientations représentatives des parois afin d'évaluer leur compatibilité géométrique avec les mécanismes de glissement planaire, de glissement en coin et de basculement.

5.3.3 Analyse cinématique directionnelle

L'analyse cinématique directionnelle repose sur l'intégration des orientations représentatives des familles de discontinuités et des orientations moyennes des parois rocheuses. Les familles structurales S0, F1, F2 et F3, définies à la Section 5.3.2, sont représentées sous forme de plans moyens caractérisés par leur pendage et leur direction de pendage. Elles constituent le cadre structural de référence utilisé pour évaluer la compatibilité géométrique des principaux mécanismes d'instabilité.

Les orientations de paroi utilisées dans l'analyse correspondent aux valeurs retenues à la Section 5.3.1. Les directions de pendage ont été déterminées à partir des plans de meilleur ajustement appliqués aux portions représentatives des parois, puis vérifiées à l'aide des cartes de direction de pendage dérivées des normales de surface. Les sous-secteurs A1, A2 et A3 sont

ainsi représentés respectivement par des directions de pendage de 137° , 160° et 194° , tandis que les secteurs B et C sont représentés par une direction de pendage de 213° .

L'analyse a été réalisée dans le logiciel Dips à l'aide d'une projection stéréographique de Schmidt sur l'hémisphère inférieur. Les mécanismes considérés comprennent le glissement planaire, le glissement en coin et le basculement, incluant les modes direct, oblique et fléchissant. Pour chacun de ces mécanismes, des critères géométriques spécifiques ont été appliqués. Ces critères reposent notamment sur la relation angulaire entre les plans de discontinuité et l'orientation de la paroi, sur la compatibilité des directions de pendage ainsi que sur la comparaison entre l'inclinaison des structures et l'angle de friction adopté.

Dans cette analyse, la direction de pendage de la paroi constitue le principal paramètre de différenciation entre les secteurs, puisqu'elle contrôle directement la relation géométrique entre les discontinuités et la face libre. Bien que les pendages moyens mesurés varient légèrement d'un secteur à l'autre, le pendage des parois a été fixé à 90° afin de représenter une configuration conservatrice adaptée aux fronts rocheux abrupts et d'uniformiser les conditions de comparaison. Les orientations utilisées sont donc $90^\circ/137^\circ$ pour A1, $90^\circ/160^\circ$ pour A2, $90^\circ/194^\circ$ pour A3, ainsi que $90^\circ/213^\circ$ pour les secteurs B et C.

Un angle de friction de 30° a été adopté pour les discontinuités. Une variation de $\pm 5^\circ$ a également été considérée afin d'examiner la sensibilité des résultats à cette hypothèse. Ce paramètre est utilisé comme seuil géométrique dans l'analyse cinématique et ne constitue pas une mesure directe de la résistance au cisaillement de chaque discontinuité individuelle.

Afin de dépasser une analyse fondée uniquement sur les cinq orientations représentatives, une analyse de sensibilité directionnelle a été réalisée. La direction de pendage de la paroi a été variée de 0° à 355° , selon un incrément angulaire de 5° . Le pendage de la paroi, les orientations des familles structurales et l'angle de friction ont été maintenus constants. Pour chaque direction testée, le logiciel calcule la proportion de discontinuités ou d'intersections de discontinuités satisfaisant les critères cinématiques associés à chaque mécanisme.

Les résultats sont exprimés sous forme de fréquences relatives de structures cinématiquement admissibles pour chacune des directions de paroi testées. Ces pourcentages ne représentent ni une probabilité de rupture, ni un facteur de sécurité, ni un niveau absolu d'aléa ou de risque. Ils correspondent uniquement à la proportion des structures mesurées qui satisfont les conditions géométriques du mécanisme considéré. Ils sont donc utilisés comme indicateurs comparatifs de compatibilité cinématique entre les différentes orientations de paroi.

La Figure 5.6 présente les résultats sous forme de diagrammes polaires de sensibilité directionnelle. Dans ces diagrammes, la position angulaire correspond à la direction de pendage de la paroi testée, tandis que la distance radiale représente la fréquence relative des structures satisfaisant les critères du mécanisme considéré. Les directions représentatives des sous-secteurs A1, A2 et A3 ainsi que des secteurs B et C sont reportées sur les diagrammes afin de situer leur position par rapport aux domaines de compatibilité cinématique.

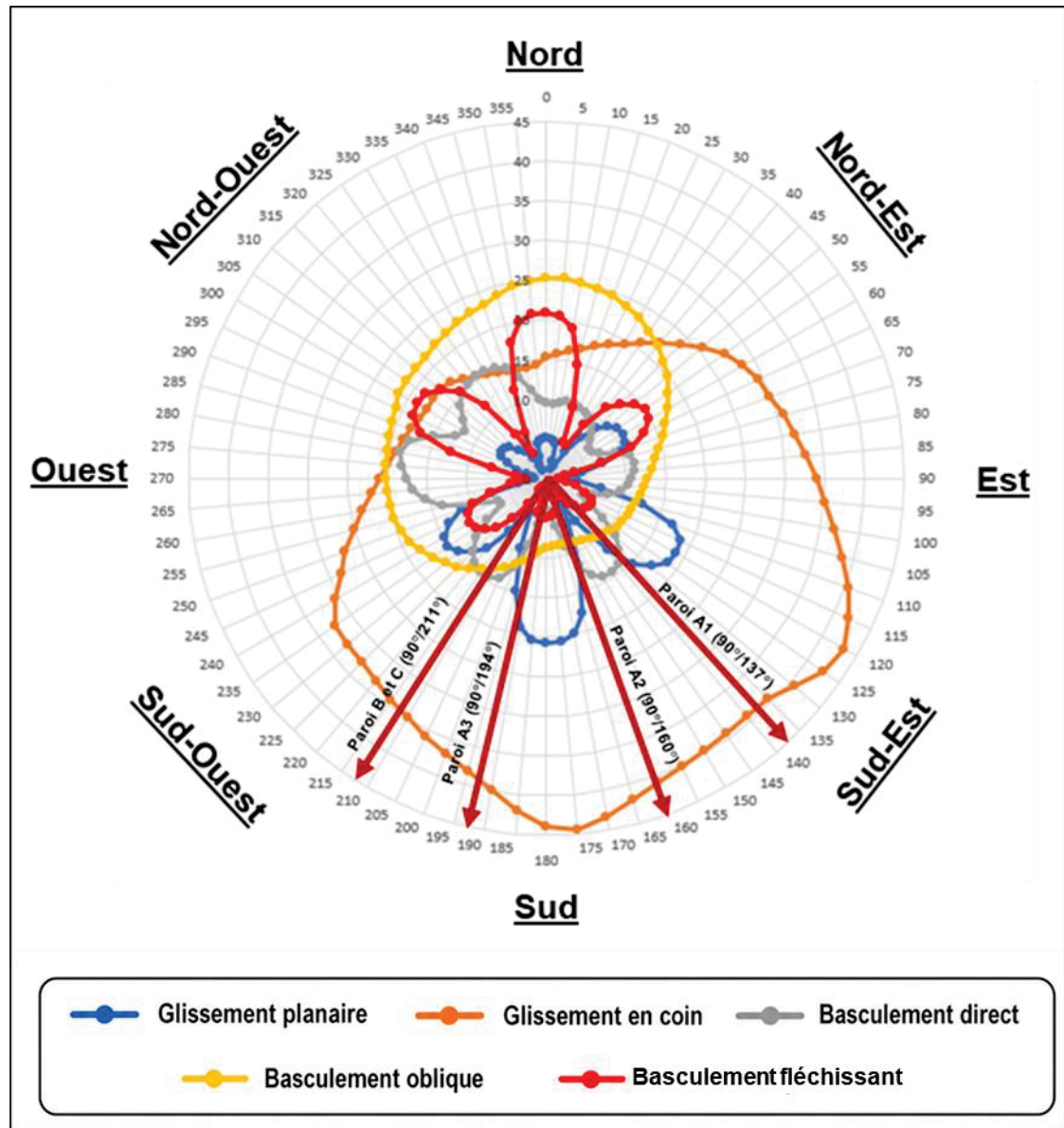


Figure 5.6 Diagrammes polaires de sensibilité directionnelle montrant la fréquence relative des structures satisfaisant les critères de compatibilité cinématique pour les différents mécanismes, selon la direction de pendage de la paroi. Un pendage uniforme de 90° est utilisé, tandis que les directions représentatives des secteurs sont indiquées comme suit : A1 = 137° , A2 = 160° , A3 = 194° , B = 213° et C = 213° . Les pourcentages correspondent à des fréquences relatives de structures géométriquement admissibles et non à des probabilités de rupture

Les résultats montrent que le glissement en coin présente la compatibilité cinématique la plus élevée à l'échelle de la carrière. Ce mécanisme se distingue par les fréquences relatives les plus importantes et par une sensibilité directionnelle marquée. Les valeurs les plus élevées sont principalement concentrées dans les directions comprises entre le sud-est et le sud-ouest, domaine qui englobe les orientations représentatives des sous-secteurs A1, A2 et A3 ainsi que celles des secteurs B et C.

La fréquence relative des structures compatibles avec le glissement en coin dépasse localement 30 %. Cette réponse élevée traduit le rôle des intersections entre les familles de joints à fort pendage F1, F2 et F3. Ces intersections produisent des lignes de plongement dont l'orientation peut être compatible avec une sortie vers les quadrants sud lorsque la paroi présente une direction favorable. Cette configuration explique la réponse plus importante observée pour les fronts orientés vers le sud-est, le sud et le sud-ouest.

Le glissement planaire présente une compatibilité plus limitée et davantage dépendante de la direction de pendage de la paroi. Les fréquences relatives les plus élevées sont observées pour les orientations proches du sud, mais elles demeurent généralement inférieures à celles obtenues pour le glissement en coin. Cette réponse traduit les conditions géométriques plus restrictives du glissement planaire, qui requiert notamment un alignement suffisant entre la direction de pendage d'une famille de discontinuités et celle de la paroi. Ce mécanisme apparaît ainsi plus pertinent pour les sous-secteurs A2 et A3.

Les mécanismes de basculement présentent des réponses plus diffuses. Le basculement oblique montre une compatibilité modérée sur une plage directionnelle relativement étendue, tandis que les modes de basculement direct et fléchissant sont associés à des domaines plus localisés. Ces mécanismes peuvent donc être admissibles dans certaines configurations locales, mais ils ne présentent pas la compatibilité dominante à l'échelle globale de la carrière.

La comparaison entre les diagrammes polaires et les orientations représentatives permet de préciser la réponse de chaque secteur. Le sous-secteur A1, représenté par une orientation de

90°/137°, se situe en bordure du domaine sud-est favorable au glissement en coin. Le sous-secteur A2, représenté par 90°/160°, appartient à un domaine favorable au glissement en coin et présente également une compatibilité secondaire avec le glissement planaire. Le sous-secteur A3, représenté par 90°/194°, se situe dans l'un des domaines où les compatibilités avec le glissement en coin et le glissement planaire sont les plus marquées. Les secteurs B et C, tous deux représentés par 90°/213°, se trouvent dans le domaine sud-ouest, où le glissement en coin demeure le mécanisme le plus compatible, tandis que le basculement oblique peut-être admissible de manière secondaire.

La synthèse des mécanismes présentant la compatibilité cinématique la plus élevée dans chaque secteur est présentée au Tableau 5.3. Dans l'ensemble, le glissement en coin constitue le mécanisme géométriquement le plus favorable à l'échelle de la carrière Francon. Le glissement planaire apparaît comme un mécanisme secondaire dans les sous-secteurs orientés vers le sud, tandis que le basculement oblique présente une compatibilité secondaire dans les secteurs orientés vers le sud-ouest.

Tableau 5.3 Synthèse des orientations de paroi utilisées et des mécanismes cinématiquement admissibles par secteur

Secteur	Orientations de paroi	Mécanisme dominant	Mécanisme secondaire
A1	90°/137°	Glissement en coin	Glissement planaire local
A2	90°/160°	Glissement en coin	Glissement planaire
A3	90°/194°	Glissement en coin	Glissement planaire
B	90°/213°	Glissement en coin	Basculement oblique
C	90°/213°	Glissement en coin	Basculement oblique

Cette hiérarchie fournit un cadre de référence pour l'interprétation des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans le chapitre suivant. Elle permet d'examiner si les formes visibles présentent une organisation spatiale cohérente avec les familles structurales et les mécanismes

géométriquement admissibles. Elle ne démontre toutefois ni l'occurrence actuelle d'un mécanisme, ni une relation causale directe entre la structure et chaque forme observée. Elle constitue plutôt une étape intermédiaire entre la caractérisation structurale du massif et l'interprétation morphologique des éléments cartographiés.

5.4 Synthèse du cadre structural et cinématique

La caractérisation structurale virtuelle réalisée à partir des modèles tridimensionnels de la carrière Francon a permis de définir les orientations représentatives des parois et d'identifier une fabrique rocheuse structurée par la stratification faiblement inclinée S0 et par trois familles de joints à fort pendage, F1, F2 et F3. L'analyse cinématique directionnelle montre que le glissement en coin présente la compatibilité géométrique la plus élevée pour la majorité des orientations étudiées. Le glissement planaire demeure davantage dépendant de l'orientation locale des parois, tandis que les mécanismes de basculement présentent une compatibilité plus localisée.

La Figure 5.7 synthétise la géologie structurale de la carrière Francon au moyen de stéréogrammes et met en relation les principales familles de discontinuités, les orientations représentatives des parois et les mécanismes de rupture cinématiquement admissibles dans les zones A, B et C.

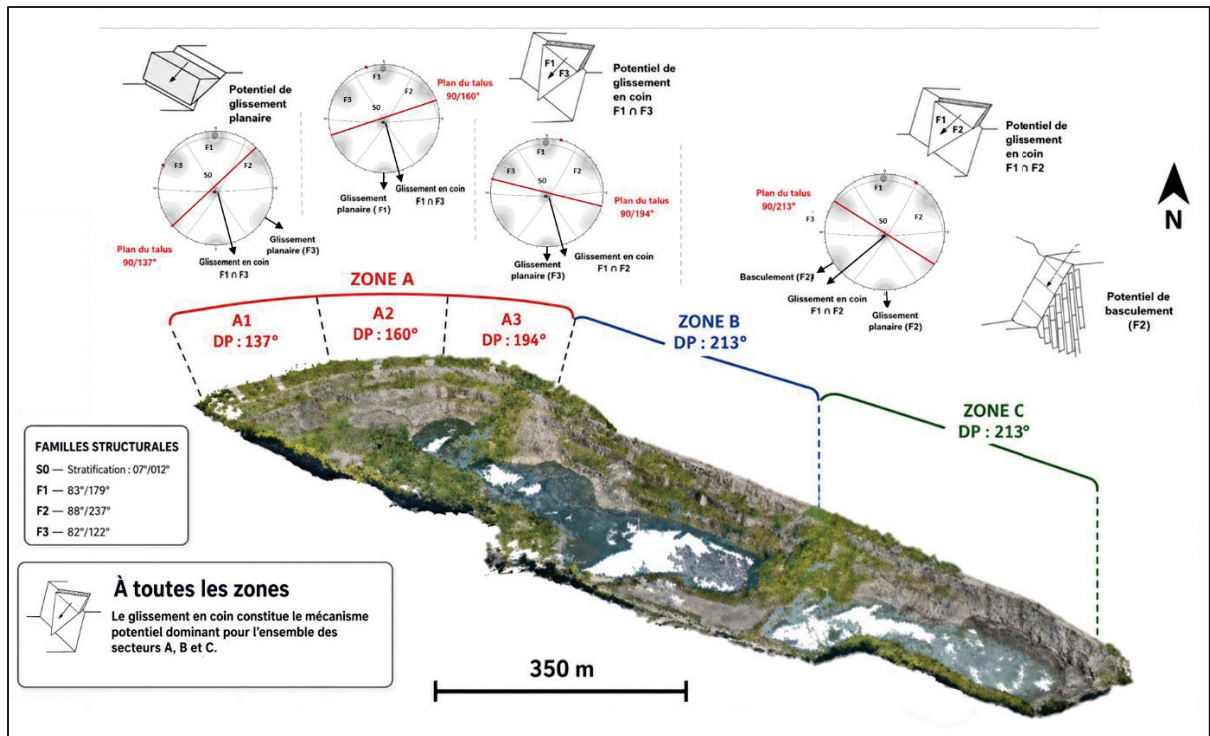


Figure 5.7 Synthèse du cadre structural et cinématique de la carrière Francon montrant les familles de discontinuités, les orientations représentatives des parois et les principaux mécanismes de rupture cinématiquement admissibles selon les zones étudiées

Ces résultats établissent un cadre structural et cinématique de référence, sans constituer une mesure de la probabilité de rupture ni une évaluation de la stabilité réelle des parois. Le chapitre suivant mobilise ce cadre pour construire l'inventaire des éléments d'instabilité apparente, définir les classes morphologiques observées dans les modèles 3D et examiner leurs relations spatiales avec les familles structurales et les mécanismes cinématiquement admissibles.

CHAPITRE 6

CONSTRUCTION ET ANALYSE D'UN INVENTAIRE MORPHOLOGIQUE DES ÉLÉMENTS D'INSTABILITÉ APPARENTE

6.1 Préambule

Une version condensée des travaux présentés dans ce chapitre a été soumise à la conférence Geohazards 9 sous le titre *A Rock Slope Geohazard Intensity Rating System Based on Discernible Topographical Features Tested at a Montréal Snow Storage Facility*. Le présent chapitre en constitue une version développée en français, adaptée aux objectifs généraux de ce mémoire et centrée sur la construction, la quantification et l'interprétation d'un inventaire morphologique des éléments d'instabilité apparente observés sur les parois rocheuses de la carrière Francon.

En s'appuyant sur le cadre structural et cinématique établi au chapitre précédent, ce chapitre vise à transformer les observations issues des modèles 3D, des images RGB, des cartes d'orientation et des données de terrain disponibles en un jeu de données spatialement structuré. Chaque élément cartographié est associé à une localisation, à une classe morphologique et à un groupe fonctionnel et, lorsque sa géométrie le permet, à un contrôle structural potentiel et à une étiquette de compatibilité cinématique.

La démarche comprend la définition des classes morphologiques, la délimitation et la classification des éléments d'instabilité apparente, leur quantification par points classifiés ainsi que l'analyse de leur distribution dans les zones A, B et C. Les proportions obtenues décrivent la composition relative de l'inventaire et ne correspondent ni à des proportions surfaciques exactes, ni à des probabilités de rupture, ni à des indices de stabilité, d'aléa ou de risque. L'interprétation repose donc sur une lecture conjointe de la nature des formes, de leur organisation spatiale, de leur fonction dominante et de leur contexte structural.

6.2 Cadre de cartographie des éléments d'instabilité apparente

Cette section présente la troisième phase de la démarche méthodologique, consacrée à l'identification, à la classification et à la cartographie des éléments d'instabilité apparente observés sur les parois rocheuses de la carrière Francon. Elle s'appuie sur les modèles 3D nettoyés, les images RGB, les cartes d'orientation dérivées des normales de surface, ainsi que sur les observations de terrain disponibles.

Cette étape vise d'abord à inventorier les formes visibles sur les parois, sans leur attribuer immédiatement un mécanisme de rupture unique. Les éléments cartographiés correspondent à des signatures morphologiques ou structurales observables dans les modèles 3D. Ils peuvent traduire une libération de matériau déjà survenue, une prédisposition structurale du massif ou une manifestation de dégradation progressive.

L'objectif est donc de transformer l'observation visuelle des parois en un jeu de données spatialement structuré. Pour cela, les éléments d'instabilité apparente sont d'abord définis et classés selon des critères morphologiques, puis délimités manuellement sur les surfaces rocheuses exposées afin de constituer des entités cartographiques individualisées. L'association de ces éléments aux contrôles structuraux et cinématiques est traitée séparément à la Section 5.6, afin de distinguer clairement la cartographie morphologique initiale de son interprétation géomécanique ultérieure.

6.2.1 Définition et classes morphologiques des éléments d'instabilité apparente

L'identification des éléments d'instabilité apparente a été réalisée à partir des images RGB, des modèles tridimensionnels issus des acquisitions UAV-LiDAR et photogrammétriques, des cartes d'orientation dérivées des normales de surface ainsi que des observations de terrain disponibles. Cette démarche s'inscrit dans une approche de cartographie virtuelle structurée, dans laquelle l'interprétation morphologique est encadrée par des critères géométriques, structuraux et texturaux appliqués de manière cohérente aux différentes zones étudiées.

Dans ce mémoire, le terme élément d'instabilité apparente désigne une forme morphologique ou structurale visible à la surface d'une paroi rocheuse et susceptible de renseigner sur l'état apparent du massif. Il ne correspond pas nécessairement à une rupture active, à un mécanisme de défaillance démontré ou à une condition d'instabilité avérée. Il constitue plutôt un indice observable pouvant traduire une libération de matériau déjà exprimée, une configuration structurale favorable à la segmentation du massif ou un processus de dégradation progressive.

L'hypothèse de travail est que les expressions visibles sur les parois fournissent des indications pertinentes sur leur organisation morphologique et structurale. Ces expressions peuvent refléter l'interaction entre la géométrie des discontinuités, la fragmentation du massif, les contrastes lithologiques, l'altération des surfaces, les conditions hydriques et les sollicitations opérationnelles. L'objectif n'est donc pas d'attribuer un mécanisme de rupture certain à partir de la seule morphologie, mais de construire un inventaire reproductible des formes observables avant leur interprétation structurale et cinématique.

Neuf classes morphologiques ont été retenues afin de représenter les principales expressions observées à l'échelle de la carrière : la stratification fracturée, les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage, les zones de joints verticaux persistants, les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, les cicatrices en coin, les contacts intrusifs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Ces classes sont décrites dans la section suivante à partir de critères d'identification explicites et de leur fonction dominante dans l'organisation de l'inventaire.

6.2.2 Organisation fonctionnelle des classes morphologiques

Les neuf classes morphologiques retenues ont été regroupées selon trois rôles fonctionnels complémentaires : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Ce regroupement vise à synthétiser la signification dominante des formes observées, sans supposer qu'une classe possède une fonction unique dans toutes les configurations ni qu'elle corresponde nécessairement à un mécanisme de rupture démontré.

Le premier groupe correspond aux évidences directes de libération de matériau. Il comprend les surplombs, les cicatrices en coin et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Ces formes

présentent une expression morphologique relativement nette, pouvant traduire un détachement déjà survenu, une perte locale de matériau ou l'individualisation avancée de volumes rocheux. Les surplombs se caractérisent par des portions de roche en porte-à-faux ou par des sous-creusements visibles. Les cicatrices en coin correspondent à des cavités angulaires délimitées par des surfaces planes sécantes et constituent des traces morphologiques de libération passée. Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts se distinguent par une segmentation importante du massif et par l'ouverture visible de plusieurs discontinuités. Des exemples de ce groupe sont présentés à la Figure 6.1.

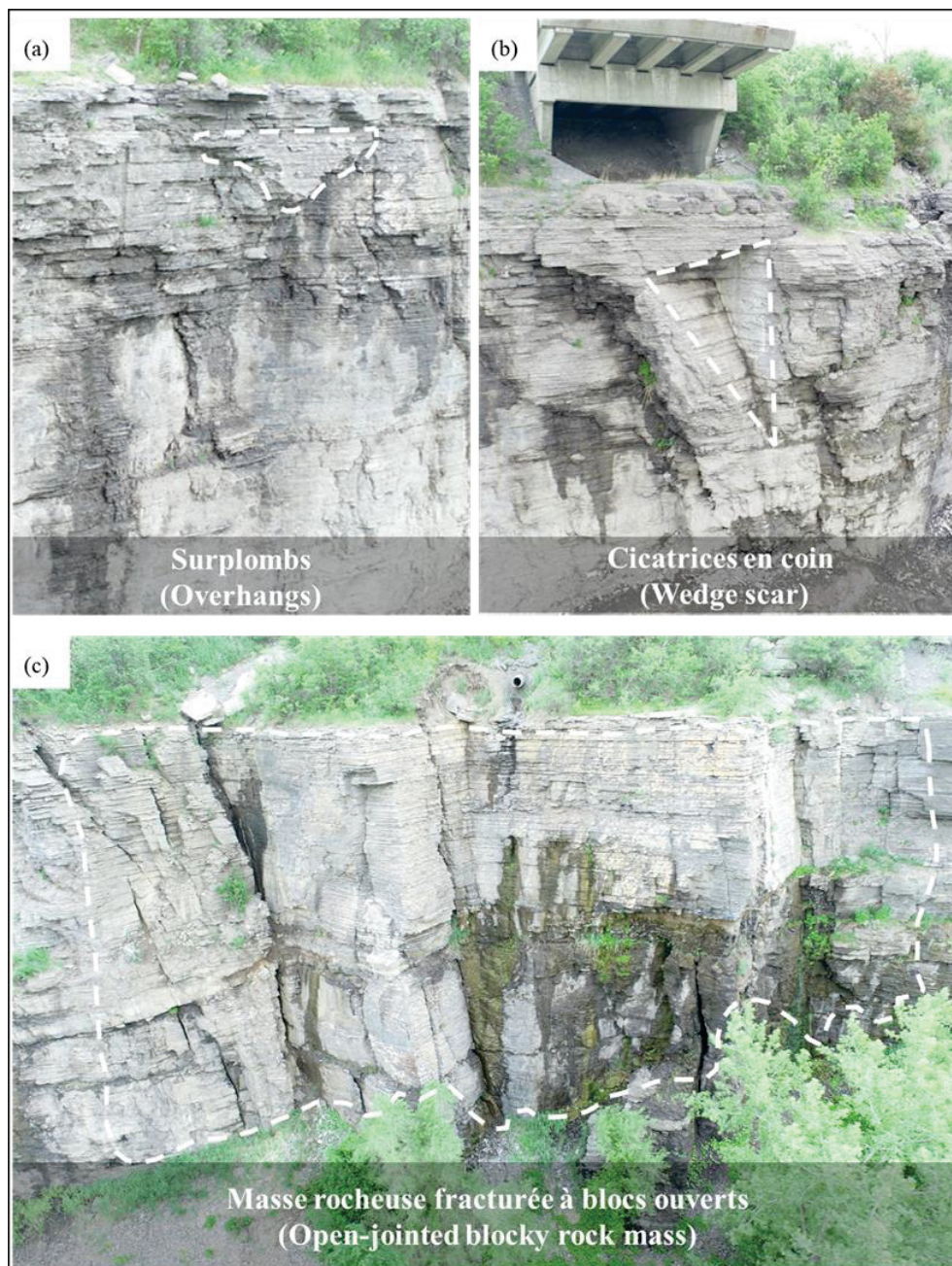


Figure 6.1 Exemples d'éléments associés aux évidences directes de libération de matériau. (a) Surplombs caractérisés par des zones en porte-à-faux et des sous-creusements visibles ; (b) cicatrice en coin délimitée par deux surfaces planes sécantes ; (c) masse rocheuse fracturée à blocs ouverts, marquée par une segmentation importante du massif et l'ouverture visible de plusieurs discontinuités

Le deuxième groupe correspond à la prédisposition structurale du massif. Il comprend les zones de joints verticaux persistants, les discontinuités persistantes à faible pendage, les contacts intrusifs et les zones de stratification fracturée. Ces éléments ne traduisent pas nécessairement une libération de matériau, mais ils participent à la segmentation du massif, à la définition de la géométrie des blocs et à l'organisation des surfaces de faiblesse. Ils peuvent ainsi influencer les formes d'instabilité apparente et les géométries cinématiquement admissibles lorsque leur orientation est favorable par rapport à celle de la paroi.

Les zones de joints verticaux persistants correspondent à des corridors de fractures raides continus sur plusieurs mètres. Les discontinuités persistantes à faible pendage prennent la forme de surfaces planes subhorizontales ou faiblement inclinées. Les zones de stratification fracturée traduisent une fragmentation ou une segmentation progressive des bancs suivant le litage. Enfin, les contacts intrusifs correspondent à des interfaces lithologiques continues, notamment sous forme de sills, susceptibles d'introduire des contrastes de résistance, de texture ou de fracturation. Des exemples de ces éléments sont présentés à la Figure 6.2.



Figure 6.2 Exemples d'éléments associés à la prédisposition structurale du massif rocheux. (a) Discontinuités persistantes à faible pendage ; (b) zones de joints verticaux persistants ; (c) zones de stratification fracturée ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills. Ces éléments structurent le massif, contrôlent la géométrie des blocs et peuvent influencer leur liberté cinématique

Le troisième groupe rassemble les éléments associés à la dégradation progressive. Il comprend les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement. Ces formes traduisent principalement une modification graduelle de l'état de surface du massif, liée notamment à l'altération, à l'action de l'eau, aux dépôts secondaires ou au développement localisé de végétation. Elles ne définissent généralement pas une géométrie de rupture unique, mais elles fournissent des indices importants sur l'évolution morphologique et hydrique des parois.

Les surfaces altérées sont reconnues par leur texture visuellement dégradée, leur rugosité apparente modifiée ou leur contraste avec les surfaces rocheuses plus fraîches. Les zones d'influence par suintement sont identifiées à partir de traces d'humidité, de colorations sombres, de dépôts secondaires ou d'une végétation localisée le long de structures ouvertes. Des exemples sont présentés à la Figure 6.3.

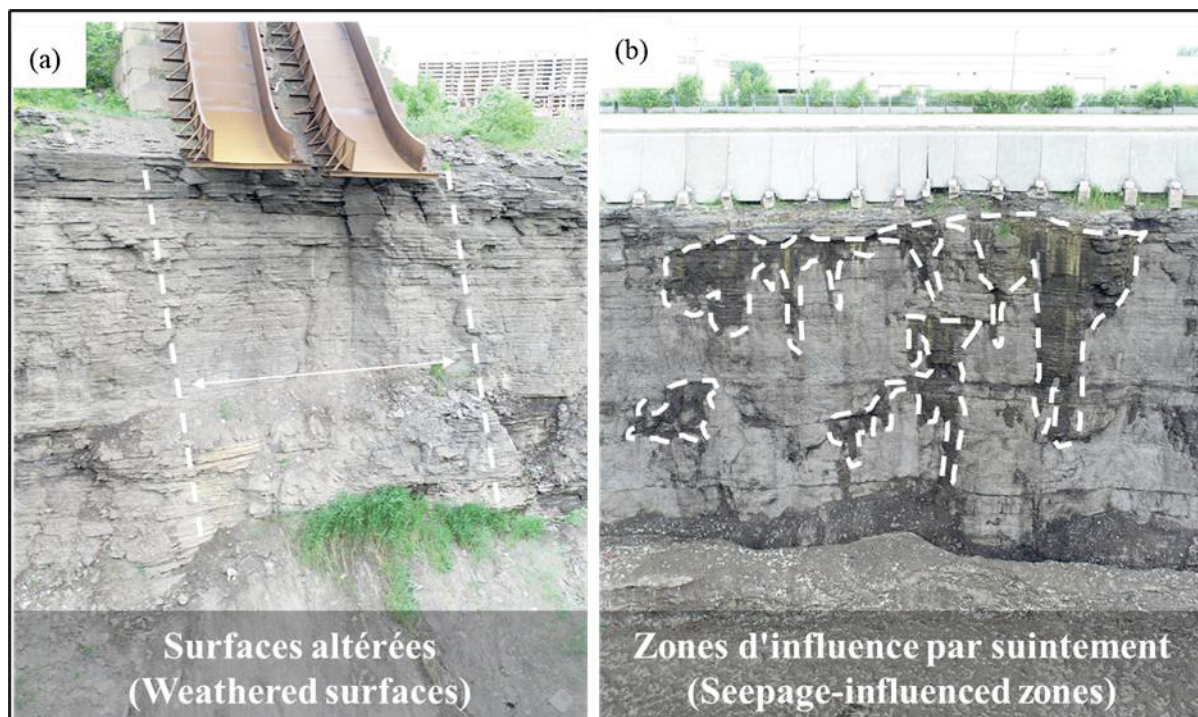


Figure 6.3 Exemples d'éléments associés à la dégradation progressive des parois rocheuses. (a) Surface altérée caractérisée par une texture visuellement dégradée et un contraste avec les surfaces rocheuses voisines ; (b) zone influencée par le suintement, marquée par des traces d'humidité, des colorations et une végétation localisée le long de discontinuités ouvertes

Cette organisation fonctionnelle permet de distinguer les formes traduisant une libération visible de matériau, celles décrivant principalement le cadre structural du massif et celles associées à son évolution progressive. Elle constitue une grille de lecture synthétique de l'inventaire, mais ne remplace pas l'analyse détaillée des neuf classes. Une même zone peut en effet présenter simultanément des éléments appartenant aux trois groupes, et leur signification dépend de leur organisation spatiale ainsi que de leur contexte structural et cinématique.

6.2.3 Critères d'identification des classes morphologiques

Afin de réduire la subjectivité de la cartographie, chaque classe morphologique a été définie à partir de critères visuels, géométriques, structuraux et texturaux explicites. Ces critères ont été appliqués de manière uniforme aux modèles tridimensionnels, aux images RGB et aux cartes d'orientation dérivées des normales de surface. L'unité de classification correspond à un élément morphologique spatialement délimité, et non à l'ensemble du secteur dans lequel il se trouve. Cette approche permet de distinguer les principales formes observées sur les parois sans leur attribuer automatiquement un mécanisme de rupture déterminé.

Les cicatrices en coin sont reconnues par des cavités angulaires ou triangulaires délimitées par deux surfaces planes sécantes. Leur géométrie traduit une libération passée de matériau dont la forme peut être cohérente avec l'intersection de deux discontinuités. Les surplombs correspondent à des volumes rocheux en porte-à-faux, à des sous-creusements ou à des portions de paroi présentant localement une pente négative. Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts sont identifiées par une segmentation marquée du massif, une ouverture visible de plusieurs discontinuités et une désolidarisation partielle des volumes rocheux.

Les zones de joints verticaux persistants correspondent à des corridors de fractures subverticales à verticales, continus sur plusieurs mètres et contribuant à la compartimentation apparente du massif. Les discontinuités persistantes à faible pendage prennent la forme de surfaces planes continues, subhorizontales ou faiblement inclinées, généralement associées au litage ou à des interfaces tabulaires. Les zones de stratification fracturée correspondent à des niveaux où les bancs sont segmentés, fragmentés ou interrompus suivant les plans de stratification. Les contacts intrusifs

sont reconnus par des limites lithologiques continues, souvent visibles sous forme de sills et marquées par un contraste de texture, de couleur ou de comportement morphologique avec la roche encaissante.

Les surfaces altérées sont identifiées par une modification apparente de la texture, de la teinte, de la rugosité ou de l'intégrité de la surface par rapport aux portions rocheuses plus fraîches. Les zones d'influence par suintement sont reconnues à partir de traces d'humidité, de colorations sombres, de dépôts secondaires ou d'une végétation localisée suivant des discontinuités ouvertes ou des structures drainantes.

La reconnaissance d'une classe ne repose pas nécessairement sur un critère unique. Plusieurs indices peuvent être combinés afin de confirmer l'interprétation d'une forme. Par exemple, une zone de suintement peut être reconnue simultanément par un contraste RGB, une végétation localisée et son alignement avec une discontinuité. De même, une cicatrice en coin peut être identifiée à partir de sa forme angulaire, de la présence de surfaces planes sécantes et d'une rupture morphologique nette.

Lorsqu'un secteur comporte plusieurs caractéristiques spatialement distinctes, chaque élément est délimité et classé séparément. Un même secteur peut ainsi comprendre plusieurs classes morphologiques et contribuer à différents groupes fonctionnels. Lorsque plusieurs caractéristiques se superposent sur une même portion de paroi sans pouvoir être distinguées spatialement, la classe retenue correspond à l'expression morphologique dominante au regard des critères précédents; les caractéristiques secondaires sont néanmoins considérées dans l'interprétation qualitative du secteur. Cette règle d'attribution permet d'éviter le double comptage lors de la quantification.

La répétabilité interobservateur de la classification n'a pas été évaluée quantitativement dans le cadre de ce mémoire. L'application uniforme des critères d'identification et des règles d'attribution vise néanmoins à renforcer la cohérence interne de la cartographie et à limiter la variabilité interprétative. Des différences peuvent toutefois subsister entre les observateurs, particulièrement dans la délimitation des contours et le classement des formes de transition. Une validation

interobservateur constitue donc une étape complémentaire pertinente pour évaluer quantitativement la reproductibilité de la méthode.

Les critères d'identification et le rôle fonctionnel associé à chacune des neuf classes sont synthétisés au Tableau 6.1. Ce tableau constitue la référence utilisée pour assurer une application homogène de la classification dans les zones A, B et C.

Tableau 6.1 Classes morphologiques des éléments d'instabilité apparente, critères d'identification et rôle fonctionnel associé

Classe d'élément	Critères d'identification morphologique et géométrique	Rôle fonctionnel
Cicatrices en coin	Cavités angulaires ou triangulaires délimitées par deux surfaces planes sécantes. Géométrie cohérente avec une libération de matériau le long d'une intersection de discontinuités.	Libération directe de matériau
Surplombs	Volumes rocheux en porte-à-faux ou surfaces à pente localement négative. Rupture nette de pente ou sous-creusement visible.	Libération directe de matériau
Zones de joints verticaux persistants	Corridors de fractures subverticales à verticales, continus sur plusieurs mètres. Structures contrôlant la segmentation apparente du massif.	Prédisposition structurale
Discontinuités persistantes à faible pendage	Surfaces planes continues, subhorizontales ou faiblement inclinées. Généralement associées à la stratification ou à des discontinuités tabulaires.	Prédisposition structurale
Masse rocheuse fracturée à blocs ouverts	Volumes rocheux subdivisés en blocs par plusieurs familles de discontinuités. Ouverture visible des joints et désolidarisation partielle des blocs.	Libération directe de matériau
Contacts intrusifs (sills)	Limites lithologiques continues, identifiables par contraste textural ou colorimétrique. Hétérogénéités pouvant influencer la segmentation du massif.	Prédisposition structurale
Zones de stratification fracturée	Stratification étagée, segmentée ou fragmentée par ruptures successives le long des plans de litage.	Prédisposition structurale
Surfaces altérées	Surfaces à texture adoucie, faible rugosité apparente ou contraste visuel avec les surfaces rocheuses fraîches voisines.	Dégradation progressive
Zones d'influence par suintement	Traces d'humidité, dépôts secondaires ou végétation alignée sur des structures ouvertes. Indices de circulation d'eau préférentielle.	Dégradation progressive

6.2.4 Principe de cartographie des éléments d'instabilité apparente

Après la définition des classes morphologiques, les éléments d'instabilité apparente ont été délimités directement sur les modèles tridimensionnels nettoyés des zones A, B et C. Dans ce mémoire, un élément cartographié correspond à une portion de paroi spatialement individualisée et interprétée comme appartenant à une classe morphologique donnée. Cette approche permet de transformer les observations visuelles en entités localisées, traçables et comparables entre les différents secteurs de la carrière.

La cartographie a été réalisée dans CloudCompare à partir des nuages de points préalablement nettoyés. Les éléments ne correspondant pas à la roche en place, notamment la végétation dense, les accumulations de neige, les dépôts meubles, les surfaces d'eau et certains artefacts, ont été exclus lorsque leur présence empêchait une interprétation fiable de la paroi. L'analyse a ainsi été concentrée sur les surfaces rocheuses exposées et suffisamment lisibles.

La délimitation repose sur une interprétation conjointe des images RGB, des cartes d'orientation dérivées des normales, des vues ombrées et des observations de terrain disponibles. Les limites des éléments ont été établies à partir de leur continuité morphologique et de critères tels que les ruptures de pente, les changements d'orientation, les contrastes de texture ou de couleur, l'ouverture des discontinuités, les traces de suintement et les limites lithologiques visibles.

Dans CloudCompare, l'orientation de la vue, le niveau de zoom et les modes d'affichage ont été ajustés afin de suivre au mieux les contours apparents des formes observées. Chaque élément a été délimité manuellement comme une entité morphologique cohérente, puis associé à l'une des neuf classes définies précédemment. Lorsque les limites étaient diffuses, notamment pour les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement, le contour retenu correspondait à la portion où la signature dominante demeurerait clairement identifiable.

À cette étape, la cartographie reste volontairement morphologique. Aucun mécanisme de rupture n'est attribué automatiquement lors de la délimitation initiale. Cette séparation permet de distinguer clairement l'observation de la forme, sa classification et son interprétation structurale

ou cinématique ultérieure. Elle limite ainsi le risque d’orienter la cartographie en fonction d’un mécanisme présumé avant l’examen du contexte géométrique de l’élément.

6.2.5 Délimitation, codification et classification des éléments cartographiés

La délimitation des éléments d’instabilité apparente a été guidée par plusieurs critères visuels et géométriques, notamment les ruptures de pente, les changements d’orientation, les contrastes de texture ou de couleur, les ouvertures de discontinuités, les limites de surfaces altérées, les traces de suintement, les contacts lithologiques et les transitions entre surfaces rocheuses fraîches et dégradées. Lorsque les limites d’un élément étaient diffuses, la délimitation a été réalisée à partir de la signature dominante de la forme observée, afin de conserver une classification cohérente entre les différents secteurs.

Seules les surfaces rocheuses exposées ont été intégrées à l’inventaire. Les accumulations de neige, les dépôts meubles, les débris, les banquettes opérationnelles, les surfaces d’eau, la végétation dense et les autres éléments ne correspondant pas à la géométrie rocheuse en place ont été exclus lorsque leur présence empêchait l’interprétation directe de la paroi. Cette règle permet de réduire les biais liés aux conditions temporaires d’acquisition et de préserver la cohérence de l’inventaire morphologique.

Chaque élément d’instabilité apparente cartographié a été enregistré comme une entité distincte dans la base de données. Un identifiant unique lui a été attribué afin d’assurer sa traçabilité. Les attributs associés décrivent notamment sa zone d’appartenance, sa classe morphologique, son groupe fonctionnel, son importance spatiale et les informations utilisées pour son interprétation.

En complément de cet identifiant unique, les classes morphologiques ont été stockées dans le nuage de points sous forme d’un champ scalaire intitulé Classification. Dans ce champ, chaque classe est associée à une valeur numérique entière, utilisée comme identifiant de classe et représentée par une couleur spécifique dans CloudCompare. Les valeurs 1 à 9 correspondent respectivement à : (1) stratification fracturée, (2) surplombs, (3) discontinuités persistantes à faible pendage, (4) zones de joints verticaux persistants, (5) surfaces altérées, (6) zones d’influence par

suintement, (7) cicatrices en coin, (8) contacts intrusifs, et (9) masse rocheuse fracturée à blocs ouverts.

Il importe ainsi de distinguer l'identifiant unique attribué à chaque élément d'instabilité apparente cartographié de la valeur du champ scalaire Classification. Le premier assure la traçabilité individuelle des entités cartographiées, tandis que la seconde permet leur regroupement par classe morphologique et leur représentation visuelle selon une échelle de couleurs normalisée. Cette structuration facilite ensuite l'extraction d'informations quantitatives par classe et par secteur, notamment le nombre d'éléments cartographiés, le nombre de points associés, la surface cartographiée et la répartition spatiale des éléments.

À cette étape, la cartographie demeure volontairement morphologique. Aucune attribution formelle du contrôle structural ou du mécanisme cinématique n'est appliquée lors de la délimitation initiale des éléments d'instabilité apparente. Cette séparation méthodologique permet de distinguer clairement l'observation morphologique de son interprétation géotechnique ultérieure. Elle limite les biais d'interprétation et assure la traçabilité entre l'élément observé, sa classification morphologique et son association éventuelle à un contrôle structural ou à un mécanisme cinématique, présentée dans les sections suivantes.

La Figure 6.4 illustre le principe de délimitation et de classification des éléments d'instabilité apparente à partir d'un exemple localisé sur un modèle 3D nettoyé. Elle présente successivement la surface rocheuse exposée après nettoyage du nuage de points, la délimitation manuelle des éléments dans CloudCompare, puis leur représentation sous forme de classes morphologiques à partir du champ scalaire Classification. La partie inférieure de la figure présente la légende complète de ce champ scalaire, ainsi que la correspondance entre les valeurs numériques 1 à 9, les couleurs d'affichage et les classes morphologiques associées. Certaines classes ne sont pas nécessairement représentées dans l'exemple localisé illustré, mais elles sont conservées dans la légende afin de documenter la codification complète appliquée à l'ensemble des secteurs cartographiés. Cette figure vise donc à expliquer la méthode de délimitation et de classification des éléments d'instabilité apparente ; les cartes complètes de distribution spatiale par secteur sont présentées dans la section des résultats.

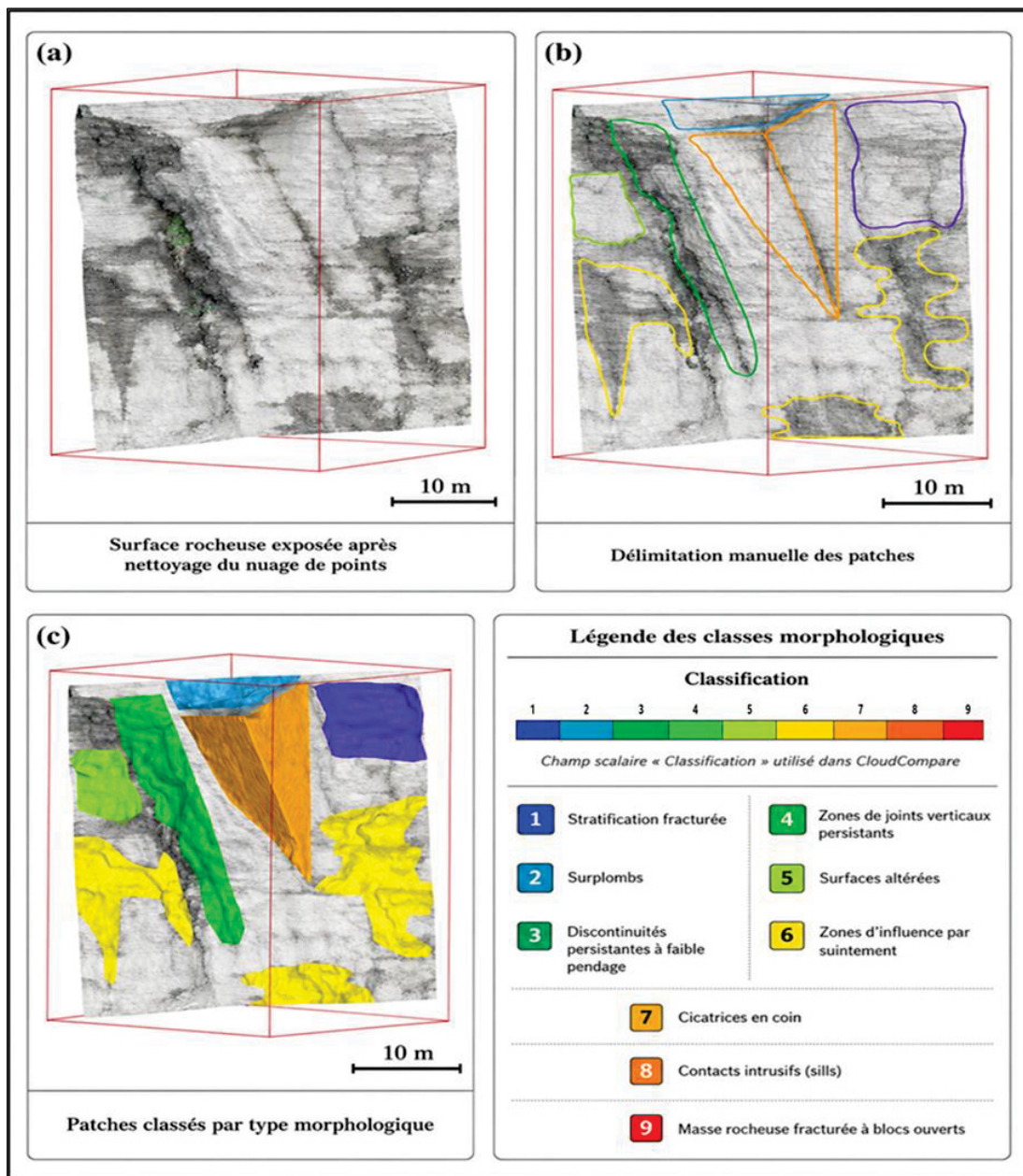


Figure 6.4 Exemple localisé de délimitation manuelle des éléments d'instabilité apparente et légende complète du champ scalaire Classification utilisé pour la cartographie morphologique.

(a) Surface rocheuse exposée après nettoyage du nuage de points. (b) Délimitation manuelle des éléments d'instabilité apparente dans CloudCompare. (c) Représentation des éléments cartographiés selon leur classe morphologique

6.2.6 Critères de délimitation et de validation des éléments d'instabilité apparente

La délimitation des éléments d'instabilité apparente repose sur une interprétation morphologique manuelle des surfaces rocheuses visibles dans les modèles 3D nettoyés. Afin de limiter la subjectivité associée à cette démarche, la cartographie a été encadrée par des critères visuels, géométriques, structuraux et texturaux appliqués de manière cohérente aux zones A, B et C. Ces critères visent à préciser les limites des éléments, à assurer leur homogénéité morphologique et à vérifier que les formes retenues correspondent à des caractéristiques interprétables de la paroi rocheuse.

Un élément a été délimité lorsqu'une portion de paroi présentait une signature suffisamment distincte de celle des surfaces voisines. Cette signature pouvait correspondre à une rupture de pente, à un changement d'orientation, à un contraste de couleur ou de texture, à une discontinuité visible, à une limite lithologique, à une trace de suintement ou à une modification apparente de l'état de surface. Le contour a été tracé de manière à englober la zone où cette signature demeurerait dominante, tout en évitant d'intégrer les surfaces adjacentes présentant une morphologie différente.

Les critères utilisés pour guider la délimitation sont résumés au Tableau 6.2. Ils ont été utilisés de manière complémentaire, puisqu'un même élément peut présenter plusieurs indices simultanément. Une zone d'influence par suintement peut, par exemple, être reconnue par une coloration sombre, une végétation localisée et son alignement avec une discontinuité ouverte. De même, une cicatrice en coin peut être identifiée à partir de sa forme angulaire, de la présence de deux surfaces planes sécantes et d'une rupture morphologique nette.

Tableau 6.2 Critères utilisés pour la délimitation des éléments d'instabilité apparente

Critère	Rôle dans la délimitation
Rupture de couleur RGB	Identifier les contrastes liés à l'altération, à l'humidité, au suintement ou à une surface fraîche.
Rupture de pente ou changement géométrique	Délimiter les surplombs, les cicatrices de détachement, les blocs ouverts et les ruptures morphologiques nettes.
Continuité d'une discontinuité	Délimiter les joints persistants, les plans de stratification fracturés ou les surfaces structurales continues.
Homogénéité texturale	Regrouper une zone altérée, fracturée ou dégradée présentant une texture comparable.
Limite lithologique visible	Identifier et délimiter les contacts intrusifs, les sills ou les transitions lithologiques marquées.
Cohérence avec la carte d'orientation	Vérifier que la forme observée correspond à une variation réelle d'orientation ou à une surface structurale identifiable.
Validation visuelle multi-vues	Réduire les erreurs liées à l'angle de vue, aux ombrages, aux occlusions ou aux artefacts locaux du modèle.

Afin de renforcer la fiabilité de l'inventaire, les éléments ont été vérifiés à partir de plusieurs supports complémentaires, notamment l'image RGB, les cartes de pendage et de direction de pendage, les vues ombrées, les normales de surface et les observations de terrain disponibles. Cette validation multivue permet de limiter l'intégration de formes résultant uniquement d'un effet d'éclairage, d'une végétation résiduelle, d'une variation locale de densité du nuage ou d'un artefact de reconstruction.

Lorsque les limites étaient nettes, le contour suivait directement la géométrie visible de l'élément. Pour les formes à transition plus diffuse, notamment les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement, la délimitation a été établie à partir de la portion où la signature dominante demeurerait clairement reconnaissable. Les transitions trop graduelles ou insuffisamment lisibles ont été traitées avec prudence afin de ne pas surestimer l'étendue des éléments cartographiés.

Un contrôle de qualité a été réalisé après la première phase de cartographie. Il a consisté à réexaminer systématiquement les entités délimitées, à vérifier la cohérence des critères appliqués entre les trois zones et à comparer les classifications avec les différents supports disponibles. Les contours ou les classes ont été ajustés lorsque l'interprétation initiale apparaissait insuffisamment cohérente avec la géométrie ou la texture observée.

Les éléments trop ambigus ont été exclus de l'inventaire lorsqu'ils ne pouvaient pas être distingués de manière suffisamment fiable des zones d'ombre, des lacunes du modèle, de la végétation résiduelle, des dépôts meubles ou des autres matériaux non rocheux. Cette procédure permet de conserver uniquement les éléments dont la signature morphologique est jugée suffisamment robuste pour être intégrée à la base de données et utilisée dans les analyses quantitatives et géomécaniques subséquentes.

6.3 Association structurale et compatibilité cinématique des éléments cartographiés

Après la cartographie et la validation morphologique des éléments d'instabilité apparente, une étape distincte a été consacrée à leur mise en relation avec le cadre structural et cinématique établi au chapitre précédent. Cette étape vise à déterminer, lorsque la géométrie observée le permet, si un élément cartographié peut être associé à une ou plusieurs discontinuités susceptibles d'influencer son organisation morphologique, puis à examiner la compatibilité de cette géométrie avec les mécanismes considérés dans l'analyse cinématique.

L'association est réalisée à l'échelle de chaque élément cartographié, traité comme une entité spatiale indépendante. Elle repose sur l'orientation des surfaces visibles, leur continuité locale, leur correspondance avec les familles structurales S0, F1, F2 et F3 ainsi que sur leur relation avec l'orientation représentative de la paroi. Selon la nature de l'élément, la géométrie retenue peut correspondre à une surface unique, à l'intersection de deux discontinuités, à une famille structurale dominante ou à un ensemble de structures visibles.

Cette étape est volontairement séparée de la cartographie morphologique initiale. L'observation et la classification des formes sont ainsi réalisées avant toute attribution structurale ou cinématique, ce qui permet de limiter les biais liés à un mécanisme présumé. L'association obtenue doit être interprétée comme une relation géométriquement plausible et non comme une démonstration déterministe du mécanisme ayant produit chaque forme.

L'analyse comprend deux volets complémentaires. Le premier porte sur l'association des éléments cartographiés aux discontinuités susceptibles de contrôler ou d'influencer leur expression morphologique. Le second consiste à attribuer, lorsque les informations disponibles sont suffisantes, une étiquette de compatibilité avec le glissement planaire, le glissement en coin ou le basculement. Ces étiquettes correspondent à des tests de cohérence géométrique et ne constituent ni une preuve de rupture active, ni un calcul de stabilité, ni une évaluation de l'aléa ou du risque.

6.3.1 Association des éléments d'instabilité apparente aux discontinuités contrôlantes

L'étape suivante consiste à associer les éléments d'instabilité apparente cartographiés, lorsque leur géométrie le permet, à une ou plusieurs discontinuités susceptibles de contrôler ou d'influencer leur expression morphologique. Cette association établit un lien entre les observations issues de la cartographie tridimensionnelle et le cadre structural défini au chapitre précédent.

L'analyse est réalisée à l'échelle de chaque élément cartographié, considéré comme une unité spatiale indépendante dans la base de données. Pour chacun d'eux, l'association repose sur l'orientation apparente des surfaces visibles, leur continuité locale, leur correspondance avec les familles structurales S0, F1, F2 et F3, ainsi que sur leur relation géométrique avec la paroi. Cette démarche permet de distinguer les éléments directement associés à une structure identifiable de ceux dont l'interprétation demeure plus contextuelle.

Trois principaux types d'association ont été retenus. Une association à une surface unique est utilisée pour les éléments présentant une géométrie plane clairement identifiable, notamment les discontinuités persistantes à faible pendage, certaines zones de stratification fracturée et certaines surfaces limitantes. Une association à deux plans sécants est utilisée pour les cicatrices en coin

lorsque deux surfaces structurales peuvent être reconnues et mesurées. Enfin, une association à une famille ou à un ensemble structural dominant est retenue pour les zones de joints persistants, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et les formes de segmentation plus complexes.

Pour les éléments à expression plus diffuse, notamment les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement, l'association structurale est réalisée de manière contextuelle. Dans ces cas, l'objectif n'est pas d'attribuer une géométrie de rupture précise, mais d'examiner si leur organisation spatiale est cohérente avec la présence d'une discontinuité, d'une interface lithologique ou d'une structure drainante visible.

Les règles générales d'association structurale sont présentées au Tableau 6.3.

Tableau 6.3 Règles d'association structurale des éléments d'instabilité apparente

Type d'élément d'instabilité apparente	Géométrie utilisée	Type d'association structurale	Interprétation
Discontinuité persistante à faible pendage	Plan local mesuré	Surface unique	Contrôle potentiel par un plan de faiblesse
Stratification fracturée	Plan de litage ou interface subhorizontale	Surface dominante	Fragmentation ou affaiblissement le long du litage
Zone de joints verticaux persistants	Orientation dominante de joints	Famille structurale dominante	Compartimentation structurale de la paroi
Cicatrice en coin	Deux plans sécants	Paire de discontinuités	Compatibilité possible avec un glissement en coin
Surplomb	Surface arrière ou discontinuité limitante	Surface ou ensemble structural	Libération potentielle par recul ou détachement local
Masse rocheuse fracturée à blocs ouverts	Plusieurs discontinuités visibles	Ensemble structural dominant	Individualisation locale de volumes rocheux
Contact intrusif	Limite lithologique continue	Interface lithostructurale	Contrôle morphologique ou dégradation préférentielle
Surface altérée	Structure dominante, si identifiable	Association contextuelle	Dégradation de surface, sans mécanisme de rupture unique
Zone d'influence par suintement	Discontinuité ouverte ou structure drainante	Association contextuelle	Circulation d'eau le long de structures ouvertes

La Figure 6.5 illustre cette démarche à partir d'une cicatrice en coin observée dans la zone C. L'élément est d'abord reconnu sur l'image RGB, puis les deux surfaces structurales qui le délimitent sont identifiées sur la carte de direction de pendage. Leurs orientations sont ensuite

extraites afin d'examiner la cohérence entre la géométrie de la cicatrice et l'intersection des discontinuités observées.

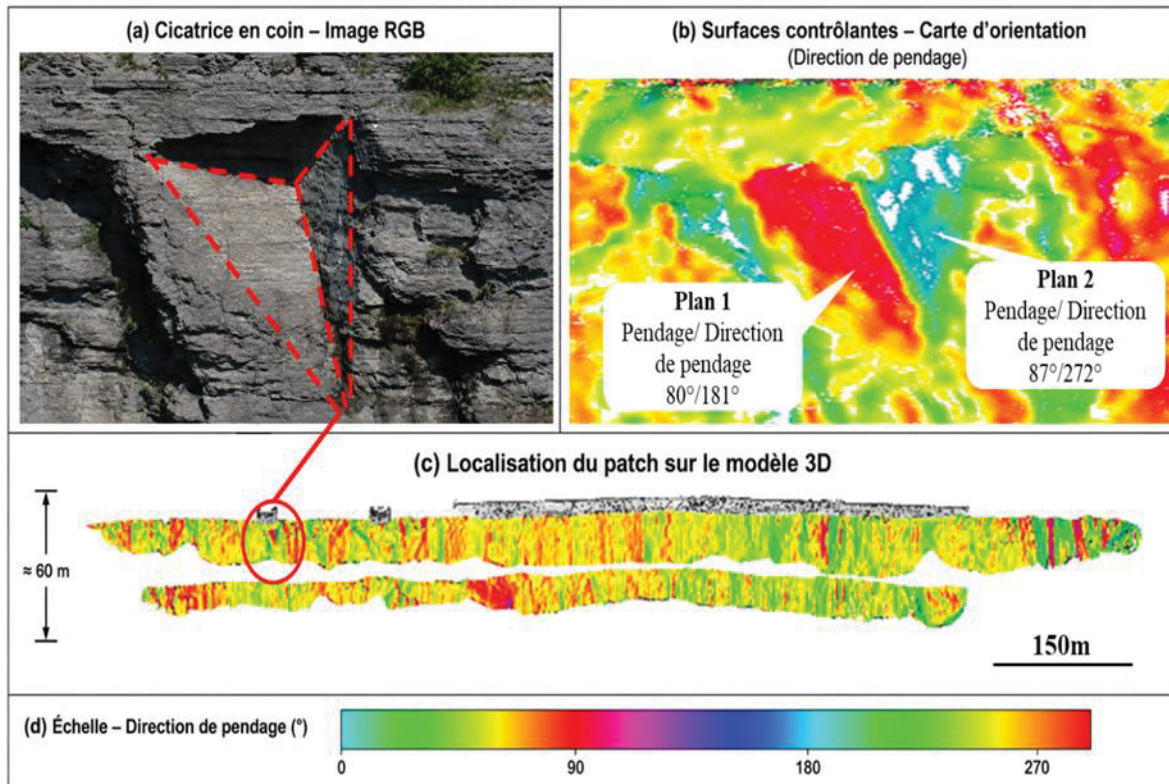


Figure 6.5 Exemple d'association structurale d'une cicatrice en coin dans la zone C. (a) Identification de la cicatrice en coin sur l'image RGB ; (b) repérage des deux surfaces contrôlantes sur la carte d'orientation dérivée du modèle 3D ; (c) localisation de l'élément d'instabilité apparente sur le modèle 3D ; (d) échelle de direction de pendage utilisée pour l'interprétation. Les valeurs indiquées correspondent aux couples pendage/direction de pendage des surfaces contrôlantes. Cette figure illustre la démarche d'association entre un élément d'instabilité apparente et deux discontinuités sécantes, utilisée pour évaluer sa compatibilité avec un mécanisme de glissement en coin

Le niveau de confiance de l'association varie selon la nature de l'élément. Les surfaces planes persistantes et les cicatrices en coin permettent généralement une interprétation plus directe, puisque leur géométrie peut être mesurée dans le modèle 3D. À l'inverse, les surfaces altérées et

les zones d'influence par suintement nécessitent une lecture plus prudente, car elles ne correspondent pas toujours à une structure unique ni à une géométrie de rupture clairement définie.

Cette étape ne vise donc pas à reconstruire de manière déterministe le mécanisme exact à l'origine de chaque élément cartographié. Elle permet plutôt de définir une association structurale plausible, fondée sur les observations disponibles, qui servira de base à l'évaluation de la compatibilité cinématique présentée dans la section suivante.

6.3.2 Étiquetage de compatibilité cinématique

L'étiquetage de compatibilité cinématique constitue l'étape d'intégration entre la cartographie morphologique des éléments d'instabilité apparente, leur association structurale et le cadre cinématique établi au chapitre précédent. Pour chaque élément cartographié, une étiquette est attribuée afin d'indiquer si la géométrie structurale qui lui est associée satisfait les critères d'un des mécanismes considérés dans cette étude, soit le glissement planaire, le glissement en coin ou le basculement.

Cette démarche correspond à un test de cohérence géométrique. Elle ne constitue ni une évaluation de l'aléa, ni un calcul de facteur de sécurité, ni une démonstration de rupture active. La compatibilité cinématique représente une condition nécessaire, mais non suffisante, à l'occurrence d'un mécanisme. La résistance au cisaillement des discontinuités, leur persistance réelle, les ponts rocheux, les pressions d'eau et les conditions de chargement ne sont pas directement évalués à cette étape.

L'analyse est réalisée à l'échelle de chaque élément cartographié, traité comme une unité spatiale indépendante. La géométrie structurale définie à la section précédente constitue l'objet testé. Selon la nature de l'élément, cette géométrie peut correspondre à un plan unique, à une ligne d'intersection entre deux discontinuités ou à une orientation structurale dominante représentative. La géométrie associée à chaque élément est projetée dans le diagramme stéréographique du secteur correspondant, en utilisant l'orientation représentative de la paroi définie au chapitre 5. Elle est ensuite comparée aux enveloppes de faisabilité du glissement planaire, du glissement en coin et

du basculement. Cette procédure permet de vérifier si la structure ou l'intersection considérée satisfait les conditions géométriques de sortie vers la face libre, en tenant compte de l'angle de friction adopté.

Quatre catégories d'étiquettes ont été retenues :

- Compatible avec le glissement planaire;
- Compatible avec le glissement en coin;
- Compatible avec le basculement;
- Non directement attribué.

Les trois premières catégories indiquent que la géométrie testée satisfait les critères du mécanisme considéré. La catégorie non directement attribué regroupe les éléments dont la géométrie est absente, diffuse, insuffisamment définie ou incompatible avec les enveloppes testées. Elle ne signifie pas que l'élément est stable, mais seulement qu'aucun mécanisme ne peut lui être associé avec un niveau de confiance suffisant dans le cadre de l'analyse réalisée. Les règles générales d'attribution sont résumées au Tableau 6.4.

Tableau 6.4 Règles d'étiquetage de compatibilité cinématique des éléments d'instabilité apparente

Étiquette	Géométrie testée	Condition générale	Signification
Compatible avec le glissement planaire	Surface plane unique	Plan orienté vers la paroi et situé dans l'enveloppe de faisabilité du glissement planaire	Géométrie cohérente avec un glissement sur plan
Compatible avec le glissement en coin	Ligne d'intersection entre deux plans	Ligne d'intersection située dans l'enveloppe de faisabilité du glissement en coin	Géométrie cohérente avec un détachement en coin
Compatible avec le basculement	Plan ou famille structurale raide	Orientation compatible avec une rotation ou un basculement vers le vide	Géométrie cohérente avec un mécanisme de basculement
Non directement attribué	Géométrie absente, diffuse ou non compatible	Aucun mécanisme dominant attribuable avec confiance	Élément morphologique visible, mais mécanisme cinématique non déterminé

Les cas situés à proximité des limites des enveloppes cinématiques ont été interprétés avec prudence. Cette précaution tient compte des incertitudes associées aux mesures d'orientation, à la simplification des surfaces structurales et à la variabilité locale de la géométrie des parois. L'étiquette attribuée doit ainsi être comprise comme une classification discrète fondée sur la géométrie disponible, et non comme une détermination absolue du mécanisme.

Pour les formes dominées par la dégradation progressive, notamment les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement, l'étiquetage est généralement contextuel. Dans ces cas, il sert surtout à documenter l'environnement structural dans lequel l'élément se développe, plutôt qu'à lui attribuer un mécanisme de rupture précis.

La Figure 6.6 présente le schéma décisionnel utilisé pour attribuer les étiquettes de compatibilité cinématique. Elle montre le passage de l'élément morphologique cartographié à la géométrie

structurale représentative, puis sa projection dans le diagramme stéréographique du secteur et sa comparaison avec les enveloppes de faisabilité.

Cette étape complète l'enrichissement de la base de données en ajoutant à chaque élément, lorsque cela est possible, une information structurale et cinématique interprétable. Elle permet ainsi de relier la forme observée, la structure du massif et les mécanismes géométriquement admissibles dans un cadre d'analyse commun.

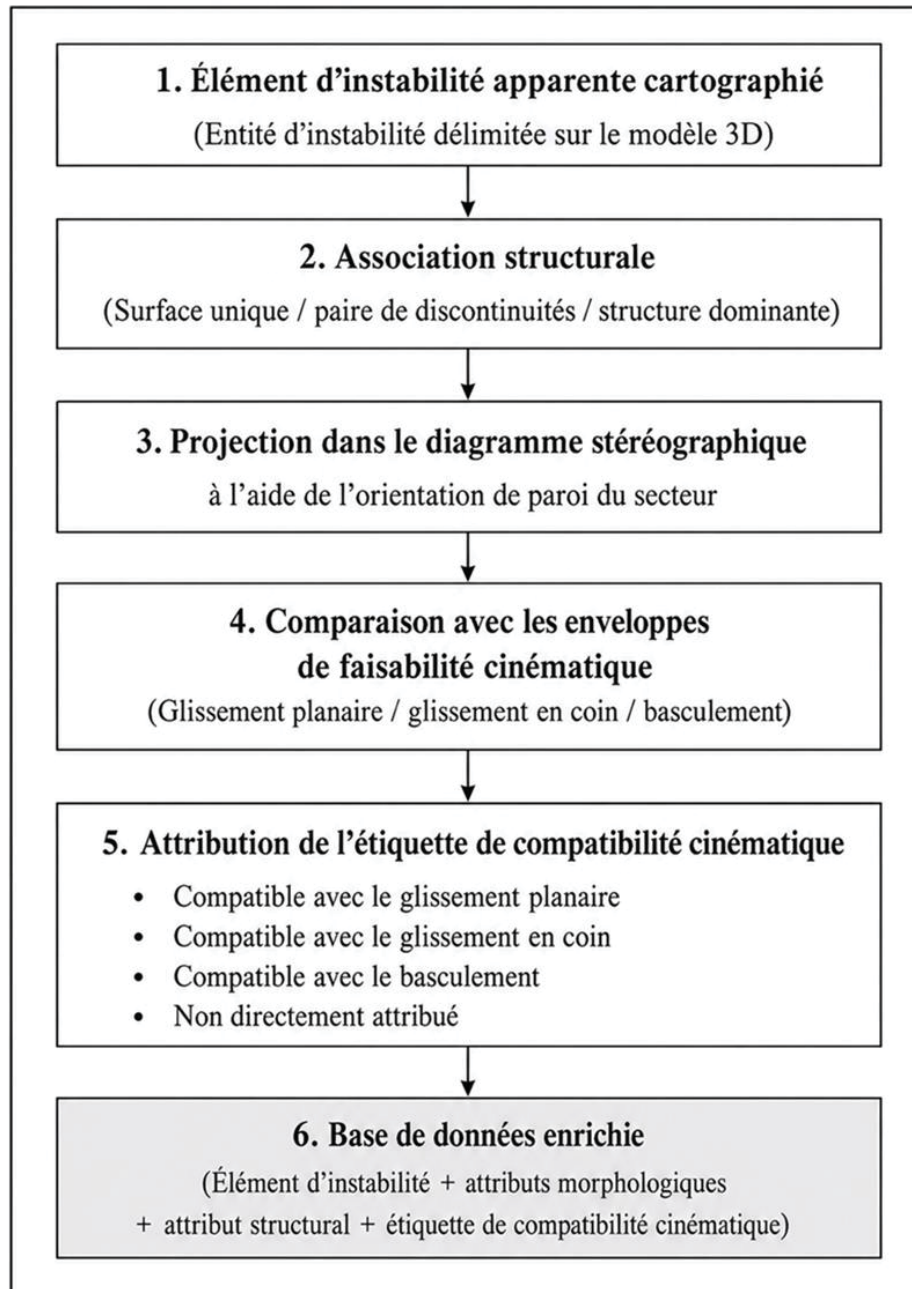


Figure 6.6 Schéma décisionnel d'attribution des étiquettes de compatibilité cinématique aux patches cartographiés. Chaque patch est associé à une géométrie structurale représentative, projeté dans le diagramme stéréographique du secteur, puis comparé aux enveloppes de faisabilité cinématique afin d'attribuer une étiquette de compatibilité

6.4 Construction du jeu de résultats quantitatifs

Les étapes précédentes ont permis de constituer un inventaire spatialement structuré des éléments d'instabilité apparente observés sur les parois de la carrière Francon. Chaque élément cartographié a été délimité et associé à une classe morphologique ainsi qu'à un groupe fonctionnel. Lorsque les observations le permettaient, il a également été enrichi par une association structurale et une étiquette de compatibilité cinématique. La présente section décrit la transformation de cet inventaire en un jeu de résultats quantitatifs comparable entre les zones A, B et C.

La quantification repose sur le nombre de points du nuage associés à chacune des neuf classes morphologiques. Ce choix est directement lié à la structure des données produites dans CloudCompare, puisque chaque point appartenant à un élément cartographié porte une valeur entière dans le champ scalaire Classification. Le comptage des points permet ainsi de conserver une relation traçable entre les formes visibles sur les modèles 3D, leur délimitation morphologique et les résultats numériques utilisés dans l'analyse.

Les nombres bruts de points ne peuvent toutefois pas être comparés directement entre les trois zones. Les modèles diffèrent notamment par l'étendue des surfaces cartographiées, leur géométrie, la densité locale du nuage, les conditions d'acquisition et le nombre total de points classifiés. Une zone plus étendue ou plus densément échantillonnée pourrait donc présenter davantage de points dans une classe sans que celle-ci occupe nécessairement une place proportionnellement plus importante dans sa composition morphologique.

Afin de limiter cet effet, les nombres de points sont convertis en proportions relatives calculées indépendamment pour chaque zone. Ces proportions décrivent la contribution de chaque classe au jeu de données morphologique classifié de la zone considérée. Elles ne correspondent cependant pas à une mesure exacte de la surface réelle occupée sur la paroi, puisque le nombre de points peut être influencé par l'orientation des surfaces, la distance au capteur, les effets d'occlusion et les variations locales de densité.

L'analyse quantitative est réalisée selon deux niveaux complémentaires. Le premier conserve le détail des neuf classes morphologiques afin d'identifier les formes dominantes, secondaires ou plus localisées dans chacune des zones. Le second regroupe ces classes selon les trois fonctions définies précédemment : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Cette agrégation fournit une lecture synthétique de la composition fonctionnelle de chaque zone, sans remplacer l'analyse détaillée des classes individuelles.

Les résultats obtenus décrivent donc la représentation relative des formes dans l'inventaire classifié. Ils ne constituent ni une mesure de stabilité, ni une probabilité de rupture, ni une évaluation de l'aléa ou du risque. Leur fonction est de fournir une base quantitative commune pour comparer les signatures morphologiques des zones A, B et C et soutenir leur interprétation spatiale, structurale et cinématique.

6.4.1 Principe de quantification par points classifiés

La quantification repose sur les points du nuage appartenant aux éléments d'instabilité apparente validés. Chaque point retenu dans l'inventaire possède, dans le champ scalaire Classification, une valeur entière correspondant à l'une des neuf classes morphologiques définies précédemment. Le point classifié constitue ainsi l'unité élémentaire de comptage utilisée pour transformer l'inventaire spatial en résultats quantitatifs.

Pour chaque zone z , avec $z \in \{A, B, C\}$, le nombre de points associés à chacune des neuf classes est extrait séparément. Les points non associés à un élément validé, les portions exclues lors du nettoyage et les surfaces ne correspondant pas à la roche en place ne sont pas intégrés aux calculs.

Le nombre total de points classifiés dans une zone z est défini comme la somme des points appartenant aux neuf classes morphologiques :

$$N_z = \sum_{i=1}^9 N_{z,i} \quad (6.1)$$

Où N_z représente le nombre total de points classifiés dans la zone z et $N_{z,i}$ représente le nombre de points de la classe i dans la zone z .

Cette définition garantit que le dénominateur utilisé dans les calculs correspond exclusivement au jeu de données morphologique effectivement classifié. Les portions de nuage non cartographiées ou exclues de l'inventaire ne sont donc pas prises en compte.

Le choix d'une quantification par points répond à la structure du jeu de données produit dans CloudCompare. Les éléments ayant été délimités directement dans les nuages de points, leur appartenance à une classe morphologique est déjà enregistrée sous forme numérique. Le comptage permet ainsi d'exploiter directement cette information sans introduire une conversion géométrique supplémentaire.

Cette métrique reflète davantage l'importance spatiale relative des classes dans le modèle qu'un simple comptage du nombre d'éléments. En effet, un élément étendu de surface altérée et une petite cicatrice localisée ne recevraient pas le même poids dans un comptage par points, contrairement à un comptage fondé uniquement sur le nombre d'entités. Toutefois, le nombre de points ne constitue pas une mesure surfacique exacte, puisqu'il demeure influencé par la densité du nuage, l'orientation des surfaces, la distance au capteur, l'angle d'incidence et les effets d'occlusion.

La quantification doit donc être interprétée comme une mesure de représentation relative dans le jeu de données classifié. Une classe fortement représentée en nombre de points occupe une place importante dans la composition de l'inventaire, mais cette représentation ne constitue ni une mesure de sa gravité, ni une indication de probabilité de rupture, ni un niveau de danger.

La procédure repose sur les règles suivantes :

1. Chaque point classifié appartient à une seule classe morphologique ;
2. Seuls les points associés aux éléments d'instabilité apparente validés sont inclus dans les calculs ;
3. Les calculs sont réalisés séparément pour les zones A, B et C ;
4. Les résultats sont exprimés sous forme de proportions relatives afin de permettre leur comparaison.

Cette étape établit la base de calcul utilisée pour déterminer la proportion relative de chaque classe morphologique dans les trois zones.

6.4.2 Proportion relative des classes par zone

À partir du nombre de points classifiés établi précédemment, la deuxième étape consiste à déterminer la contribution relative de chacune des neuf classes morphologiques dans les zones A, B et C. Cette transformation est nécessaire puisque les nombres bruts de points classifiés diffèrent d'une zone à l'autre et ne permettent pas, à eux seuls, une comparaison directe de leur composition morphologique.

Pour une zone z et une classe morphologique i , la proportion relative $P_{z,i}$ est calculée selon l'équation suivante :

$$P_{z,i} = \frac{N_{z,i}}{N_z} \times 100 \quad (6.2)$$

Où :

- $P_{z,i}$ représente la proportion, en pourcentage, des points associés à la classe i dans la zone z ;
- $N_{z,i}$ représente le nombre de points classifiés dans la classe i pour la zone z ;
- N_z représente le nombre total de points classifiés, toutes classes confondues, dans cette même zone ;
- $z \in \{A, B, C\}$ et $i \in \{1, \dots, 9\}$.

Le calcul est réalisé indépendamment pour chacune des trois zones. Ainsi, le dénominateur utilisé pour la zone A correspond uniquement au nombre total de points classifiés dans cette zone, le même principe est appliqué séparément aux zones B et C. Les proportions sont donc obtenues selon :

$$P_{A,i} = \frac{N_{A,i}}{N_A} \times 100 \quad (6.3)$$

$$P_{B,i} = \frac{N_{B,i}}{N_B} \times 100 \quad (6.4)$$

$$P_{C,i} = \frac{N_{C,i}}{N_C} \times 100 \quad (6.5)$$

Cette normalisation intra-zone est fondamentale pour l'analyse comparative. Elle permet de répondre à la question suivante : **quelle place chaque classe occupe-t-elle dans la composition morphologique classifiée de chaque zone ?** Elle ne répond pas à la question de savoir quelle zone contient la plus grande quantité absolue d'une classe donnée. Ces deux lectures doivent être distinguées, car une zone peut contenir un nombre brut élevé de points appartenant à une classe en raison de son étendue ou de la quantité totale de données classifiées, sans que cette classe soit dominante dans sa composition interne.

À titre d'exemple conceptuel, une classe représentant 40 % des points classifiés d'une zone est considérée comme fortement représentée dans la composition morphologique de cette zone, même si le nombre absolu de points correspondant est inférieur à celui observé dans une autre zone plus étendue où cette même classe ne représente que 15 % du total. La comparaison des proportions vise ainsi à caractériser la structure relative des distributions, et non à comparer directement les volumes de données disponibles.

Pour chaque zone, les neuf proportions forment un vecteur de composition morphologique :

$$P_z = (P_{z,1}, P_{z,2}, \dots, P_{z,9}) \quad (6.6)$$

Ce vecteur permet d'identifier les classes dominantes, secondaires et plus localisées dans chacune des zones tout en conservant le niveau de détail de l'inventaire morphologique.

Les proportions calculées doivent être interprétées comme des indicateurs de représentation relative dans le jeu de données classifié. Elles ne constituent ni des proportions surfaciques exactes, ni des probabilités de rupture, ni des mesures de stabilité, d'aléa ou de risque. Une valeur élevée traduit uniquement une forte contribution quantitative de la classe à la composition morphologique de la zone.

Les distributions obtenues constituent le premier niveau de lecture quantitative de l'inventaire. Elles servent ensuite de base à l'agrégation selon les trois groupes fonctionnels présentée dans la section suivante.

6.4.3 Agrégation par groupe fonctionnel

L'analyse des neuf classes morphologiques permet de décrire en détail la composition de l'inventaire dans chacune des zones A, B et C. Afin de compléter cette lecture, les classes sont également regroupées selon les trois fonctions dominantes définies précédemment : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive.

Pour une zone z et un groupe fonctionnel k , la proportion agrégée $G_{z,k}$ est calculée par la somme des proportions relatives des classes appartenant à ce groupe :

$$G_{z,k} = \sum_{i \in C_k} P_{z,i} \quad (6.7)$$

Où $G_{z,k}$ représente la proportion du groupe fonctionnel k dans la zone z , exprimée en pourcentage ; $P_{z,i}$ représente la proportion relative de la classe morphologique i dans la zone z ; C_k représente l'ensemble des classes morphologiques appartenant au groupe fonctionnel k ; $z \in \{A, B, C\}$; $k \in \{L, P, D\}$, correspondant respectivement à la libération directe de matériau, à la prédisposition structurale et à la dégradation progressive.

Conformément au regroupement fonctionnel établi précédemment, les ensembles de classes sont définis comme suit :

$$C_L = \{2,7,9\} \quad (6.8)$$

$$C_P = \{1,3,4,8\} \quad (6.9)$$

$$C_D = \{5,6\} \quad (6.10)$$

Ainsi, pour chaque zone z , les trois indicateurs fonctionnels sont calculés selon les expressions suivantes :

$$G_{z,L} = P_{z,2} + P_{z,7} + P_{z,9} \quad (6.11)$$

$$G_{z,P} = P_{z,1} + P_{z,3} + P_{z,4} + P_{z,8} \quad (6.12)$$

$$G_{z,D} = P_{z,5} + P_{z,6} \quad (6.13)$$

Cette opération produit, pour chacune des zones A, B et C, un profil fonctionnel composé de trois proportions complémentaires :

$$G_{z,k} = (G_{z,L}, G_{z,P}, G_{z,D}) \quad (6.14)$$

Cette agrégation fournit une lecture synthétique de la composition de l'inventaire. Elle permet de déterminer si les formes cartographiées sont principalement associées à une libération directe de matériau, à la structuration du massif ou à des processus de dégradation progressive.

Les valeurs agrégées sont entièrement dérivées des proportions des classes individuelles. Aucune pondération supplémentaire n'est appliquée, afin de ne pas introduire une hiérarchie arbitraire entre les classes. Chaque classe contribue donc au groupe fonctionnel selon sa représentation réelle dans le jeu de données classifié.

L'interprétation des groupes fonctionnels doit toutefois rester associée à celle des classes qui les composent. Deux zones peuvent présenter une proportion similaire de prédisposition structurale tout en étant caractérisées par des formes différentes. Cette contribution peut, par exemple, être principalement portée par la stratification fracturée dans une zone et par les zones de joints verticaux persistants dans une autre.

L'agrégation fonctionnelle constitue ainsi un niveau de synthèse complémentaire, mais ne remplace pas l'analyse détaillée des neuf classes morphologiques. Les deux niveaux sont conservés afin de distinguer la nature précise des formes observées de leur fonction dominante dans l'organisation de l'inventaire.

Les distributions obtenues font ensuite l'objet d'un contrôle de cohérence visant à vérifier la fermeture des proportions et la correspondance entre les résultats détaillés et agrégés.

6.4.4 Contrôle de cohérence et normalisation des distributions

Avant leur utilisation dans l'analyse comparative, les distributions quantitatives ont fait l'objet d'un contrôle de cohérence visant à vérifier l'intégrité des calculs et la comparabilité des zones A, B et C. Cette étape constitue un contrôle arithmétique et méthodologique du jeu de données dérivé. Elle ne modifie ni la classification initiale des éléments cartographiés ni leur appartenance aux groupes fonctionnels.

Le premier contrôle consiste à vérifier que la distribution des neuf classes morphologiques est complète et que l'ensemble des points retenus dans une zone a été attribué à une seule classe. Pour une zone z , le nombre total de points classifiés est défini par :

$$N_z = \sum_{i=1}^9 N_{z,i} \quad (6.15)$$

Où N_z représente le nombre total de points classifiés dans la zone z et $N_{z,i}$ correspond au nombre de points appartenant à la classe morphologique i .

La normalisation est ensuite réalisée en divisant le nombre de points de chaque classe par le nombre total de points classifiés dans la zone considérée :

$$P_{z,i} = \frac{N_{z,i}}{N_z} \times 100 \quad (6.16)$$

où $P_{z,i}$ représente la proportion relative, exprimée en pourcentage, de la classe i dans la zone z .

Cette normalisation est nécessaire pour comparer les zones A, B et C sur une base commune, puisque celles-ci présentent des nombres totaux de points classifiés différents. Sans cette étape, une zone plus étendue, plus densément échantillonnée ou comprenant une plus grande quantité de données pourrait présenter un nombre brut de points plus élevé sans que la classe considérée occupe nécessairement une place proportionnellement plus importante dans sa composition morphologique. La normalisation permet donc de comparer la structure interne des distributions plutôt que les quantités absolues de données disponibles.

Après normalisation, la somme des proportions relatives des neuf classes doit satisfaire la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^9 P_{z,i} = 100 \%. \quad (6.17)$$

Cette égalité permet de vérifier que tous les points inclus dans le calcul ont été attribués à l'une des neuf classes morphologiques, qu'aucune donnée classifiée n'a été omise et qu'aucun point n'a été compté dans plusieurs classes. Le dénominateur N_z comprend uniquement les points associés aux éléments d'instabilité apparente validés dans la zone considérée. Les portions non cartographiées, les points exclus lors du nettoyage, les surfaces non rocheuses et les éléments jugés trop ambigus ne sont pas intégrés au calcul.

Le deuxième contrôle concerne l'agrégation fonctionnelle. Les trois groupes fonctionnels constituent une partition complète et non chevauchante des neuf classes morphologiques. Chaque classe est associée à un seul groupe selon sa fonction dominante. Par conséquent, pour chaque zone z , la somme des proportions agrégées doit également être égale à 100 % :

$$G_{z,L} + G_{z,P} + G_{z,D} = 100 \% \quad (6.18)$$

Où $G_{z,L}$, $G_{z,P}$ et $G_{z,D}$ représentent respectivement les proportions associées à la libération directe de matériau, à la prédisposition structurale et à la dégradation progressive.

La concordance entre la somme des proportions des neuf classes et celle des trois groupes fonctionnels constitue un contrôle supplémentaire de la cohérence des calculs. Toute différence autre que celle pouvant résulter de l'arrondissement doit conduire à une vérification des données sources, de l'affectation des classes aux groupes ou de la procédure d'agrégation.

Afin de limiter les écarts liés aux arrondis, les calculs ont été effectués à partir des nombres entiers de points et des proportions non arrondies. L'arrondissement à deux décimales est appliqué uniquement lors de la présentation des résultats dans les tableaux et les figures. La somme des valeurs affichées peut donc différer légèrement de 100 % de quelques centièmes de point de pourcentage, sans que cela traduise une omission de données.

La normalisation est appliquée séparément à chacune des zones A, B et C. Chaque zone possède ainsi son propre dénominateur N_z , correspondant au nombre total de points appartenant aux éléments validés et classifiés dans cette zone. Cette approche limite l'influence directe des différences d'étendue, de géométrie et de quantité totale de données entre les zones.

Cette normalisation ne corrige toutefois pas les variations locales de densité du nuage de points. Elle ne transforme donc pas le comptage des points en une mesure surfacique exacte. La comparabilité des résultats repose également sur l'application uniforme des procédures de nettoyage, de délimitation, de classification et de validation dans les trois zones.

À l'issue de ces vérifications, chaque zone est représentée par deux distributions complémentaires : une distribution détaillée composée des proportions relatives des neuf classes morphologiques et une distribution synthétique composée des proportions des trois groupes fonctionnels. Ces distributions constituent la base quantitative utilisée dans la section suivante pour présenter et comparer les résultats obtenus dans les zones A, B et C.

6.5 Résultats et analyses du jeu de données d'instabilité apparente

La présente section expose les résultats issus de l'observation, de la cartographie tridimensionnelle, de la classification et de la quantification des éléments d'instabilité apparente identifiés dans les zones A, B et C. Elle s'appuie sur le jeu de données construit dans les sections précédentes, dans lequel chaque élément cartographié est associé à une classe morphologique et à un groupe fonctionnel et, lorsque les observations le permettent, à un contexte structural ainsi qu'à une étiquette de compatibilité cinématique.

L'analyse suit une progression allant de l'observation morphologique des formes à leur caractérisation quantitative, puis à leur interprétation morpho-structurale. Les éléments sont d'abord examinés selon leur distribution spatiale dans chacune des trois zones. Cette lecture permet de distinguer les formes distribuées de manière diffuse, celles organisées suivant la stratification ou des structures persistantes, ainsi que les manifestations plus localisées de libération de matériau.

Une synthèse quantitative globale de l'inventaire est ensuite présentée afin de décrire la contribution des neuf classes morphologiques et des trois groupes fonctionnels à l'échelle de l'ensemble des zones étudiées. Cette lecture générale est complétée par une comparaison normalisée des distributions propres aux zones A, B et C. La normalisation permet de comparer leur composition interne malgré les différences de nombre total de points classifiés.

Les résultats sont interprétés à deux niveaux complémentaires. Le premier conserve le détail des neuf classes morphologiques et permet d'identifier les formes quantitativement dominantes, secondaires ou plus localisées. Le second repose sur leur agrégation selon les fonctions de libération directe de matériau, de prédisposition structurale et de dégradation progressive. Cette lecture synthétique ne remplace pas l'analyse des classes individuelles, puisqu'une contribution fonctionnelle comparable peut résulter de compositions morphologiques différentes.

Les observations morphologiques et les distributions quantitatives sont enfin confrontées au cadre structural et cinématique établi au chapitre 5. Cette confrontation vise à examiner si l'organisation

des éléments cartographiés est cohérente avec la stratification S0, les familles de joints F1, F2 et F3 ainsi qu'avec les mécanismes géométriquement admissibles pour les différentes orientations de paroi. L'objectif n'est pas d'attribuer systématiquement un mécanisme de rupture à chaque forme, mais de distinguer les associations structurales suffisamment robustes des interprétations plus contextuelles.

Une distinction est maintenue entre une compatibilité cinématique potentielle et une manifestation morphologique de libération déjà exprimée. Une géométrie structurale située dans une enveloppe de faisabilité indique qu'un mécanisme est géométriquement admissible dans les conditions considérées. À l'inverse, une cicatrice visible sur la paroi constitue une trace morphologique d'un détachement passé. Ces deux niveaux d'interprétation ne doivent donc pas être confondus.

Les résultats quantitatifs décrivent la contribution relative des classes au jeu de données classifié. Ils ne correspondent ni à des proportions surfaciques exactes, ni à des probabilités de rupture, ni à des mesures de stabilité, d'aléa ou de risque. Leur interprétation repose sur une lecture conjointe de la composition morphologique, de l'organisation spatiale, du rôle fonctionnel et du contexte structural et cinématique des éléments observés.

6.5.1 Distribution spatiale des éléments d'instabilité apparente par zone

La distribution spatiale des éléments d'instabilité apparente cartographiés met en évidence des signatures morphologiques distinctes entre les zones A, B et C. Ces différences reflètent la variabilité de la géométrie des parois, de la segmentation structurale, de l'état d'altération des surfaces et des manifestations visibles de circulation de l'eau.

L'analyse repose sur la localisation et l'organisation des classes morphologiques dominantes dans chaque zone. Certaines formes sont distribuées de manière diffuse sur de larges portions de paroi, tandis que d'autres sont concentrées suivant la stratification, des joints persistants, des contacts lithologiques ou des secteurs de fracturation plus intense. Les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts présentent généralement une expression plus localisée.

La lecture spatiale complète l'analyse quantitative, puisque deux zones peuvent présenter des proportions comparables pour un même groupe fonctionnel tout en étant caractérisées par des organisations morphologiques différentes. Une forte contribution de la prédisposition structurale peut, par exemple, résulter d'une stratification fracturée largement distribuée ou de corridors de joints verticaux persistants produisant une compartimentation plus nette du massif.

Pour chaque zone, l'analyse est organisée selon une progression commune. Les principaux indicateurs morphologiques sont d'abord décrits à partir des images RGB. Leur distribution est ensuite examinée sur les modèles tridimensionnels classifiés, avant d'être interprétée en relation avec l'organisation générale du massif. Cette démarche permet de passer de l'observation locale des formes à une lecture spatiale intégrée de chaque paroi.

Les sections suivantes présentent successivement les résultats obtenus dans les zones A, B et C.

6.5.1.1 Zone A : distribution spatiale et expression morphologique

Dans la zone A, les principaux éléments d'instabilité apparente cartographiés correspondent à la stratification fracturée, aux surfaces altérées et aux zones d'influence par suintement. Leur distribution montre une organisation principalement diffuse, souvent associée aux interfaces subhorizontales du massif et à des portions de paroi marquées par des variations d'état de surface.

La stratification fracturée se manifeste sous forme de bandes étagées, segmentées ou discontinues suivant le litage. Elle constitue l'élément structurant le plus visible de la zone et contribue à organiser une part importante de la morphologie observée. Les surfaces altérées se distinguent par des changements de teinte, de texture ou de rugosité apparente par rapport aux surfaces rocheuses plus fraîches, tandis que les zones d'influence par suintement sont reconnues par des traces sombres, des colorations localisées, des dépôts secondaires ou une végétation alignée le long de certaines discontinuités.

La Figure 6.7 présente des exemples représentatifs de ces indicateurs sur les images RGB de la zone A. Les observations mettent en évidence une expression morphologique principalement diffuse, dans laquelle la stratification fracturée constitue l'élément structurant le plus visible, tandis que les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement traduisent des manifestations associées à la dégradation progressive de la paroi. Les formes observées correspondent moins fréquemment à des géométries de détachement nettement individualisées, telles que des cicatrices en coin ou des surplombs bien définis.

Cette première lecture montre ainsi que la signature morphologique de la zone A résulte de l'association entre une forte expression de la stratification fracturée et des manifestations diffuses d'altération et de suintement. La structuration subhorizontale du massif organise une partie importante des formes visibles, mais son expression sur la paroi demeure largement distribuée sous forme de bandes fragmentées et de surfaces dégradées, plutôt que sous forme de compartiments rocheux fortement individualisés.



Figure 6.7 Indicateurs morphologiques représentatifs observés sur les images RGB de la zone A.

(a) Stratification fracturée marquée par des bandes subhorizontales discontinues ; (b) zone d'influence par suintement caractérisée par des traces sombres et des colorations localisées ; (c) surface altérée développée sur une portion exposée de la paroi ; (d) association spatiale entre stratification fracturée et influence du suintement

La cartographie tridimensionnelle permet de préciser l'organisation spatiale de ces formes à l'échelle de l'ensemble de la zone. Les éléments associés à la stratification fracturée sont largement distribués suivant les interfaces subhorizontales, tandis que les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement se concentrent dans certaines portions de paroi ou se développent le long des mêmes bandes morphostructurales.

La vue générale présentée à la Figure 6.8 met en évidence une forte représentation de la stratification fracturée, des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement. Les éléments cartographiés ne sont pas distribués uniformément, mais s'organisent préférentiellement le long

de bandes morphostructurales correspondant au litage et dans des portions de paroi marquées par des changements d'état de surface ou par des manifestations visibles de circulation de l'eau. Cette organisation montre que la stratification fracturée constitue un élément majeur de la signature de la zone A, tandis que l'altération et le suintement contribuent à son expression morphologique diffuse.

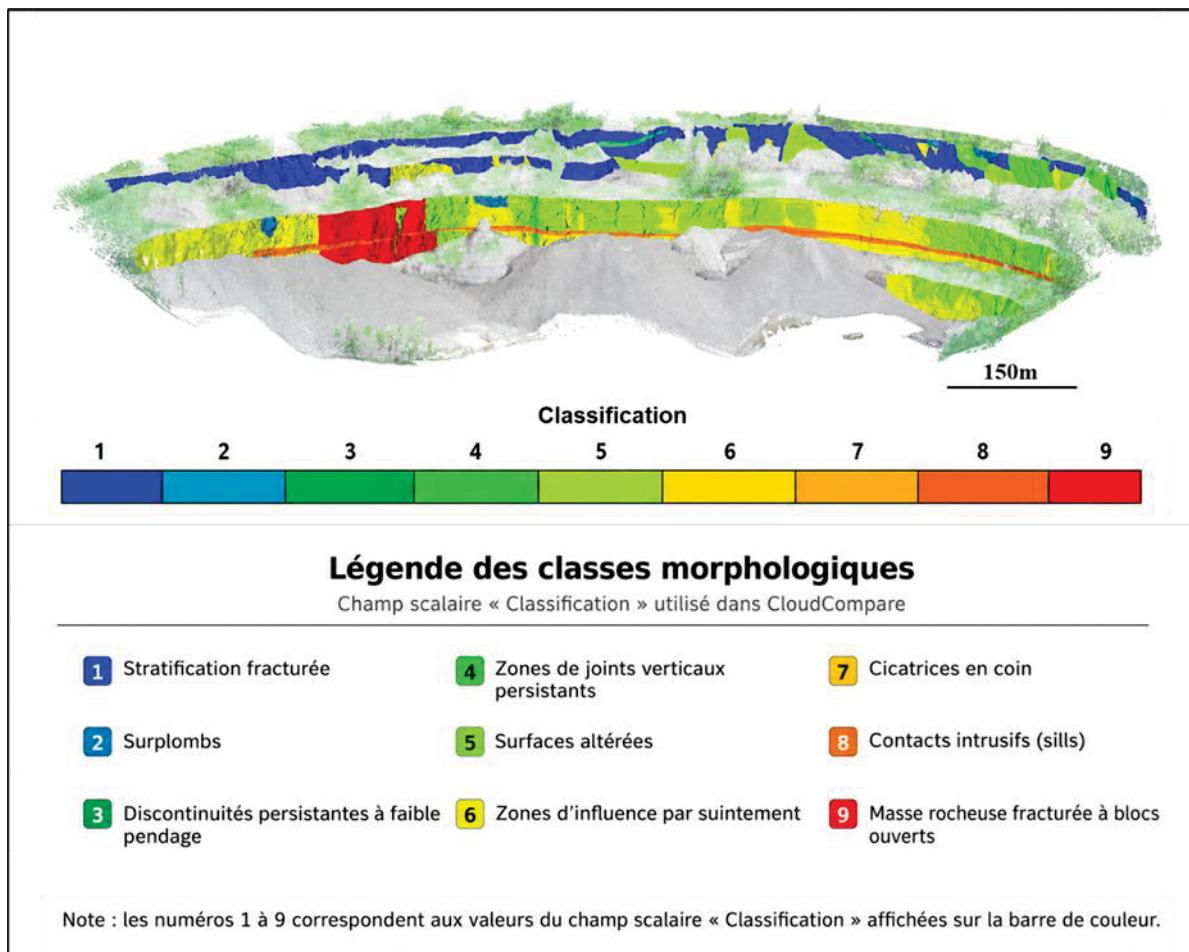


Figure 6.8 Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone A et colorés selon le champ scalaire Classification de CloudCompare. La distribution met en évidence la forte représentation de la stratification fracturée, des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement

L'examen séparé des principales classes présentée à la Figure 6.9 montre que la stratification fracturée constitue la composante la plus continue de l'inventaire. Son organisation traduit le rôle

du litage dans la segmentation des bancs et dans la structuration générale des formes visibles. Les surfaces altérées présentent une distribution plus irrégulière et se concentrent sur des portions exposées de la paroi. Les zones d'influence par suintement apparaissent localement le long de structures ouvertes ou de secteurs favorables à la circulation de l'eau.

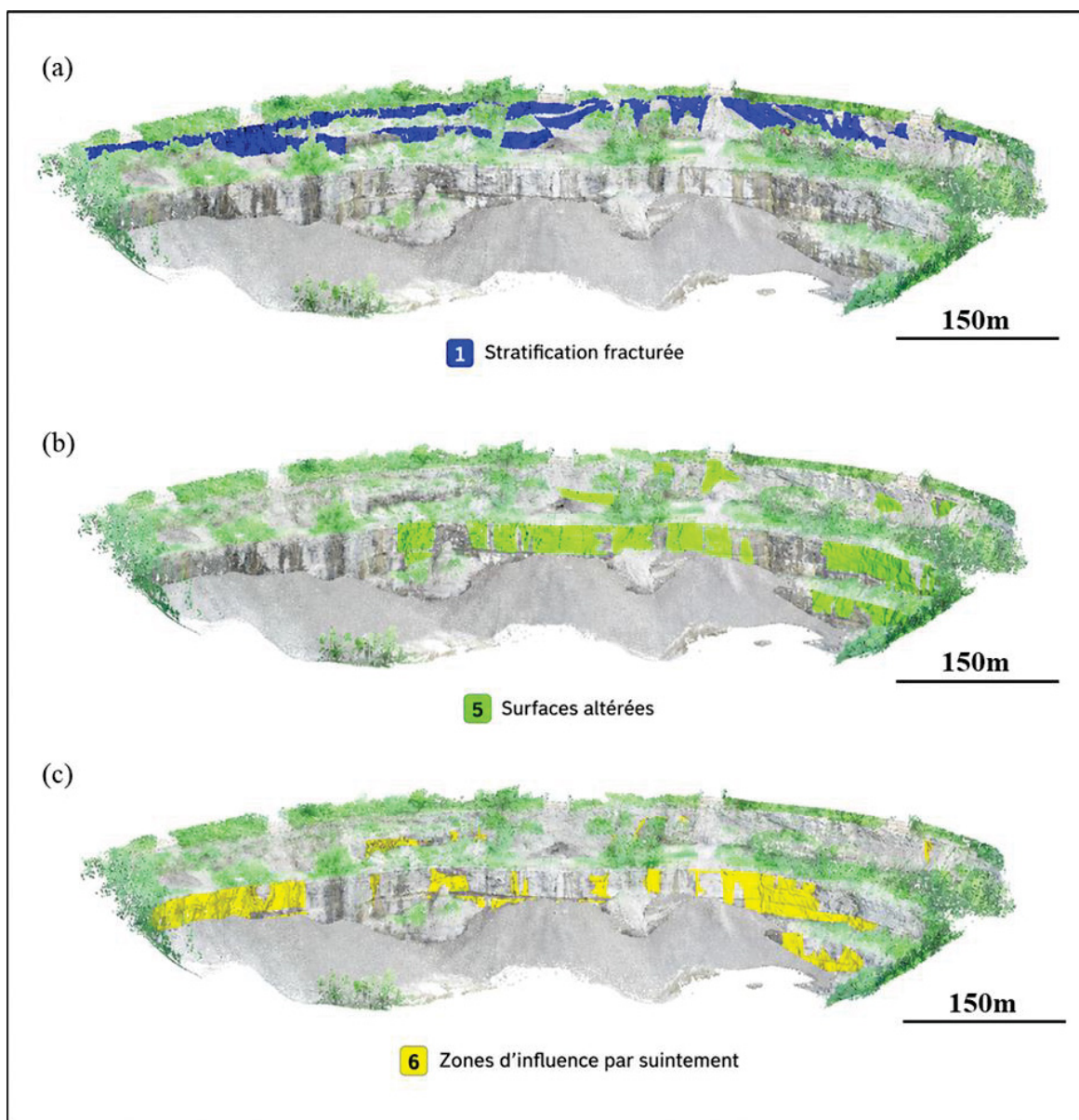


Figure 6.9 Distribution des principales classes morphologiques cartographiées dans la zone A :
 (a) stratification fracturée; (b) surfaces altérées; (c) zones d'influence par suintement. Leur organisation met en évidence une forte contribution de la structuration subhorizontale du massif, associée à une expression morphologique diffuse de l'altération et du suintement

La cartographie tridimensionnelle montre ainsi que la zone A est principalement caractérisée par une signature structurale portée par la stratification fracturée, dont l'expression spatiale demeure toutefois diffuse. Cette distinction est importante : la forte représentation de la stratification fracturée traduit une contribution majeure de la prédisposition structurale dans l'inventaire, mais elle ne correspond pas à une compartimentation uniforme de la paroi par des structures verticales persistantes ou à une individualisation généralisée de blocs rocheux.

Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement complètent cette signature en montrant que la structuration subhorizontale du massif est associée, dans plusieurs portions de la paroi, à des manifestations de dégradation progressive. Les éléments appartenant à ces classes peuvent être spatialement proches ou organisés suivant les mêmes bandes morphostructurales, ce qui suggère une interaction entre le litage fracturé, l'état d'altération des surfaces et la circulation locale de l'eau. Cette association spatiale ne démontre toutefois pas une relation causale unique entre ces phénomènes.

Les formes de libération directe de matériau, notamment les cicatrices en coin et les surplombs, demeurent plus localisées dans la zone A. De même, les zones de joints verticaux persistants et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts sont présentes ponctuellement, mais elles ne constituent pas les éléments qui structurent principalement l'expression morphologique générale de la zone. Celle-ci se distingue plutôt par la combinaison entre une stratification fracturée largement représentée et des formes diffuses d'altération et de suintement.

Dans l'ensemble, la cartographie de la zone A met donc en évidence une dominance quantitative de la prédisposition structurale, principalement portée par la stratification fracturée, associée à une expression morphologique générale diffuse. La zone ne doit ainsi être décrite ni comme exclusivement dominée par la dégradation progressive, ni comme uniformément compartimentée par des structures persistantes. Sa signature résulte de l'interaction entre la structuration subhorizontale du massif, la fragmentation des bancs, l'altération des surfaces et l'influence locale de l'eau.

6.5.1.2 Zone B : distribution spatiale et expression morphologique

Dans la zone B, les éléments d'instabilité apparente cartographiés présentent une organisation plus fortement structurée que dans la zone A. Les classes dominantes correspondent principalement aux zones de joints verticaux persistants, aux zones d'influence par suintement, aux masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et aux contacts intrusifs sous forme de sills. Leur distribution traduit une compartimentation plus nette du massif rocheux, associée à la présence de discontinuités persistantes, d'hétérogénéités lithologiques et de structures ouvertes favorables à la circulation de l'eau.

Les zones de joints verticaux persistants apparaissent sous forme de corridors de fractures subverticales à verticales, continus sur plusieurs mètres. Elles recoupent la paroi et contribuent à individualiser des compartiments rocheux distincts. Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts correspondent à des secteurs où cette segmentation est plus avancée et où plusieurs discontinuités visibles délimitent des volumes partiellement désolidarisés. Les contacts intrusifs se manifestent sous forme de limites lithologiques relativement continues, susceptibles d'introduire des contrastes de texture, de résistance et de fracturation. Les zones d'influence par suintement sont généralement localisées le long de structures ouvertes ou d'interfaces favorables à la circulation préférentielle de l'eau.

La Figure 6.10 présente les principaux indicateurs topographiques observés sur les images RGB de la zone B. Ces observations suggèrent que l'instabilité apparente dans ce secteur est moins diffuse que dans la zone A et davantage associée à la structuration du massif rocheux. Les formes observées traduisent une prédisposition structurale marquée, localement renforcée par la circulation de l'eau et par les contrastes lithologiques liés aux contacts intrusifs.



Figure 6.10 Indicateurs topographiques représentatifs de l'instabilité apparente dans la zone B à partir des images RGB. (a) Zones de joints verticaux persistants, illustrant la segmentation structurale de la paroi ; (b) zone influencée par le suintement, caractérisée par des traces d'humidité, des colorations sombres et une végétation localisée ; (c) stratification fracturée, marquée par des surfaces étagées et discontinues le long du litage ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills, visibles comme des limites lithologiques continues

La cartographie tridimensionnelle confirme que ces éléments ne sont pas répartis uniformément sur la paroi. Les zones de joints verticaux persistants se concentrent dans des corridors structuraux qui traversent plusieurs niveaux rocheux. Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts apparaissent préférentiellement à proximité de secteurs où plusieurs familles de discontinuités se recoupent. Les zones d'influence par suintement suivent localement des structures ouvertes, tandis que les contacts intrusifs forment des bandes lithologiques continues ou discontinues selon les portions observées. La vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés, présentée à la Figure 6.11, montre que ces éléments ne sont pas répartis de manière uniforme. Ils se

concentrent préférentiellement le long de structures qui compartimentent la paroi, ainsi qu'à proximité de limites lithologiques ou de zones d'ouverture favorables à la circulation de l'eau.

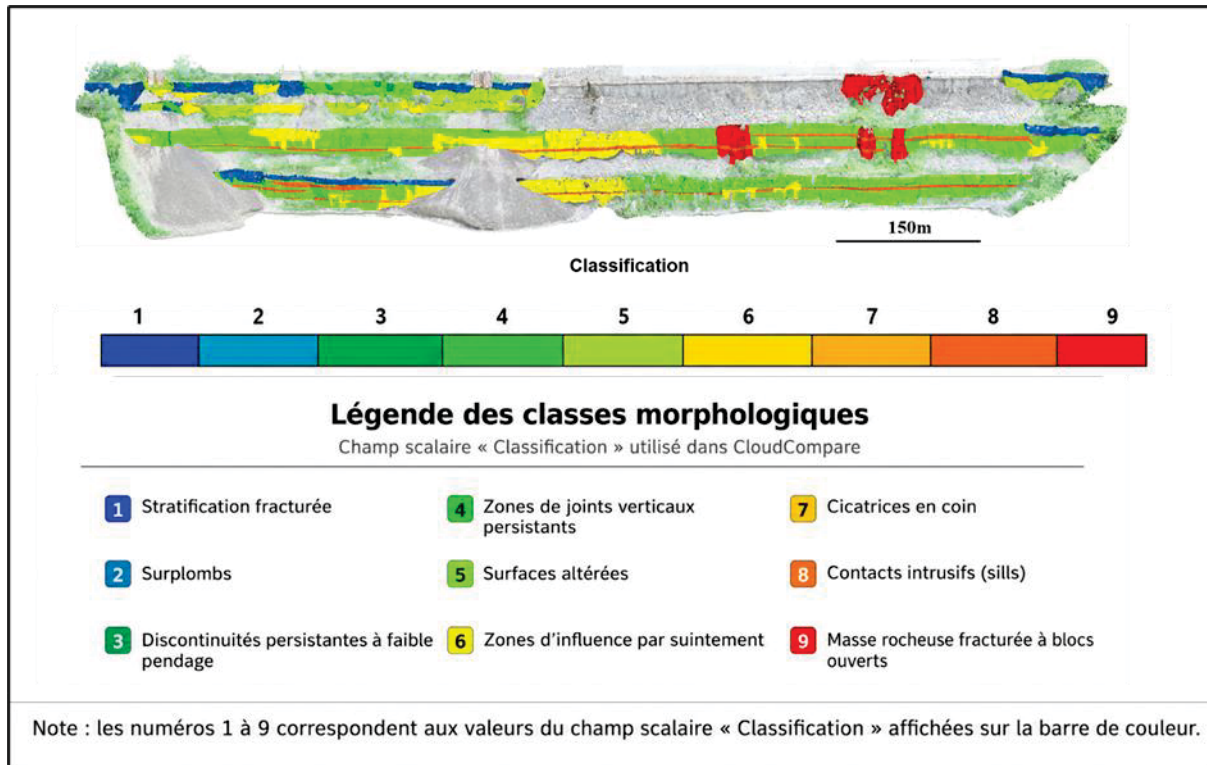


Figure 6.11 Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone B. Les éléments sont colorés selon le champ scalaire Classification utilisé dans CloudCompare. La distribution cartographiée met en évidence une prédominance apparente des zones de joints verticaux persistants sur les surfaces observables de la zone B. Cette prédominance décrit la représentation morphologique visible dans l'inventaire et peut être influencée par l'orientation des parois et les conditions d'observation; elle ne constitue donc pas une mesure directe de la fréquence réelle des familles de discontinuités dans le massif.

Cette tendance apparaît plus clairement à la Figure 6.12, qui isole les principales classes morphologiques représentatives de la zone B. La Figure 6.12a montre que les éléments associés aux zones de joints verticaux persistants structurent fortement la paroi et contribuent à l'individualisation de compartiments rocheux. La Figure 6.12b met en évidence les zones influencées par le suintement, qui se développent localement le long de structures ouvertes ou de

secteurs favorables à la circulation de l'eau. La Figure 6.12c montre les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, qui traduisent une compartimentation plus avancée du massif et l'individualisation locale de volumes rocheux. La Figure 6.12d présente les contacts intrusifs sous forme de sills, qui introduisent des contrastes lithologiques et morphologiques pouvant influencer l'organisation des fractures.

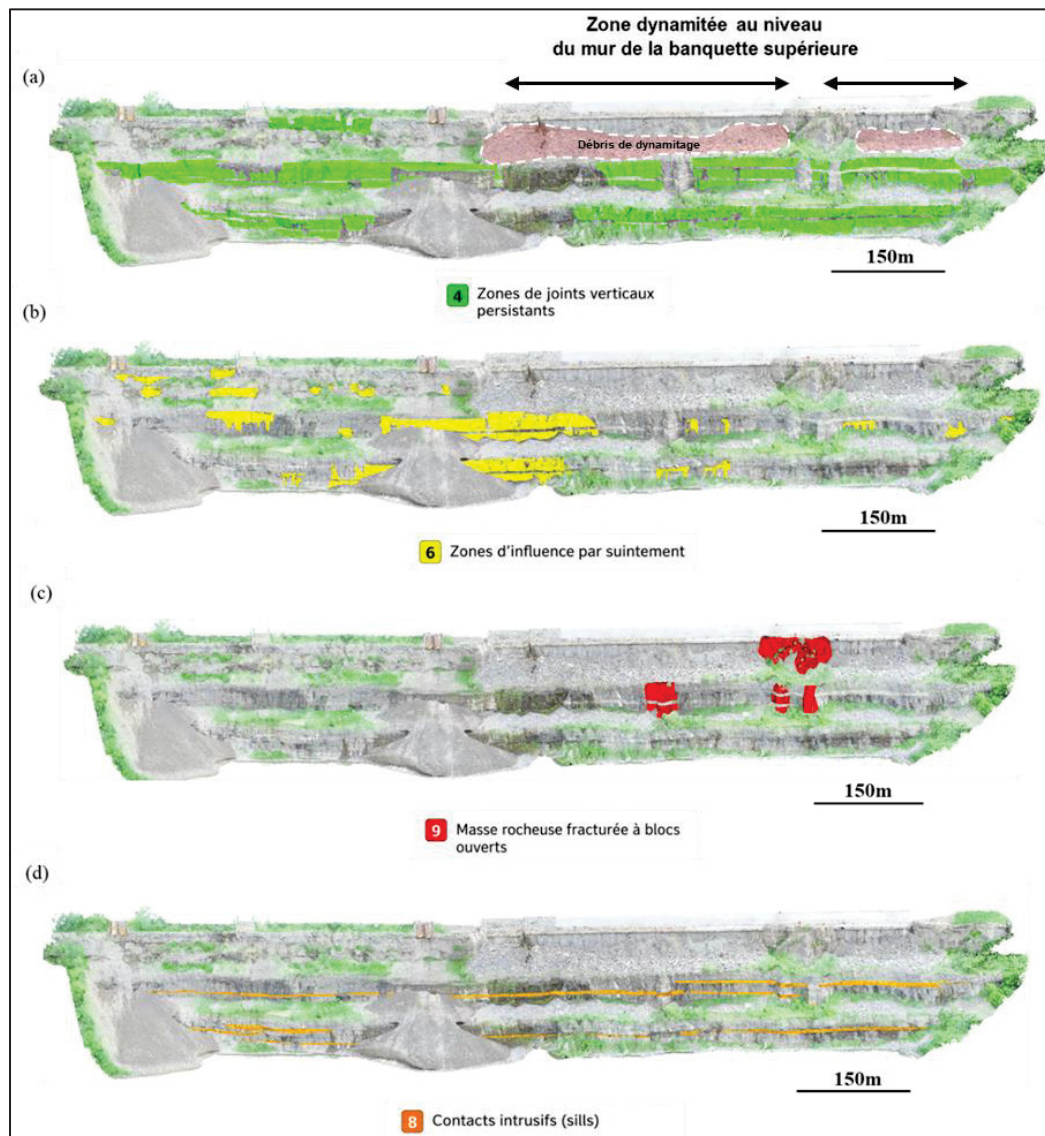


Figure 6.12 Distribution des principales classes morphologiques représentatives cartographiées dans la zone B : (a) zones de joints verticaux persistants ; (b) zones d'influence par suintement ; (c) masses rocheuses fracturées à blocs ouverts ; (d) contacts intrusifs sous forme de sills

Dans l'ensemble, la zone B se distingue par une expression morphologique principalement associée à la prédisposition structurale du massif. Contrairement à la zone A, où la stratification fracturée et les formes diffuses dominent l'organisation générale, la zone B présente une segmentation plus nette de la paroi par des structures persistantes.

Les zones d'influence par suintement et les contacts intrusifs complètent cette signature. Les premières montrent une relation spatiale avec des discontinuités ouvertes, tandis que les seconds introduisent des interfaces susceptibles de concentrer localement la fracturation ou la dégradation. Cette association ne démontre pas un lien causal unique, mais elle indique que les structures et les contrastes lithologiques contribuent conjointement à l'organisation des formes observées.

La zone B doit ainsi être interprétée comme un secteur où la prédisposition structurale s'exprime de manière plus directement lisible dans la géométrie de la paroi. Les joints verticaux persistants constituent l'élément dominant de cette organisation, tandis que les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, les contacts intrusifs et les manifestations de suintement traduisent des formes plus localisées de segmentation et de dégradation.

6.5.1.3 Zone C : distribution spatiale et expression morphologique

Dans la zone C, les éléments d'instabilité apparente cartographiés sont principalement associés aux surfaces altérées, aux zones d'influence par suintement, à la stratification fracturée et aux masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Leur distribution met en évidence une expression morphologique dominée par la dégradation progressive des surfaces rocheuses, à laquelle s'ajoutent localement des formes de segmentation structurale et de libération de matériau.

Les surfaces altérées occupent de larges portions de la paroi et se distinguent par des variations de teinte, de texture et de rugosité apparente par rapport aux surfaces rocheuses plus fraîches. Les zones d'influence par suintement apparaissent sous forme de traces sombres, de colorations verticales, de dépôts secondaires ou de végétation localisée le long de certaines structures ouvertes. La stratification fracturée se manifeste par des bandes subhorizontales discontinues ou

fragmentées, tandis que les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts correspondent à des secteurs où plusieurs discontinuités contribuent à individualiser des volumes rocheux.

La Figure 6.13 présente des exemples représentatifs des principaux indicateurs morphologiques observés sur les images RGB de la zone C. Ces observations montrent que la signature générale du secteur repose sur l'association entre l'altération apparente des surfaces, l'influence locale de l'eau et la segmentation progressive de certaines portions du massif.

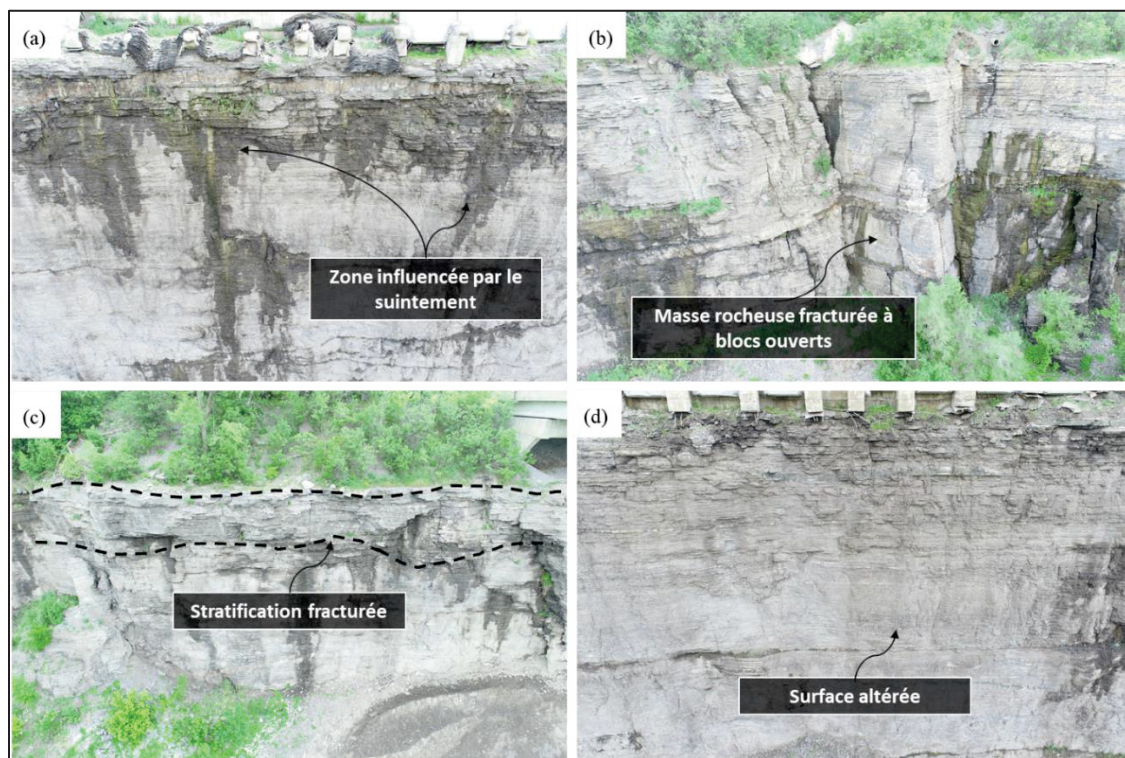


Figure 6.13 Indicateurs topographiques représentatifs de l'instabilité apparente dans la zone C à partir des images RGB. (a) Zone influencée par le suintement, caractérisée par des traces sombres et des colorations verticales ; (b) masse rocheuse fracturée à blocs ouverts, traduisant l'individualisation locale de volumes rocheux ; (c) stratification fracturée, marquée par des bandes subhorizontales discontinues ; (d) surface altérée développée sur une portion exposée de la paroi

La cartographie tridimensionnelle présentée à la Figure 6.14 confirme que ces formes ne sont pas distribuées uniformément. Les surfaces altérées se concentrent sur de larges portions exposées de la paroi, tandis que les zones d'influence par suintement se développent localement le long de discontinuités ouvertes ou de secteurs favorables à la circulation de l'eau. La stratification fracturée suit en partie l'organisation subhorizontale du massif, alors que les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts apparaissent de manière plus ponctuelle dans les portions fortement segmentées.

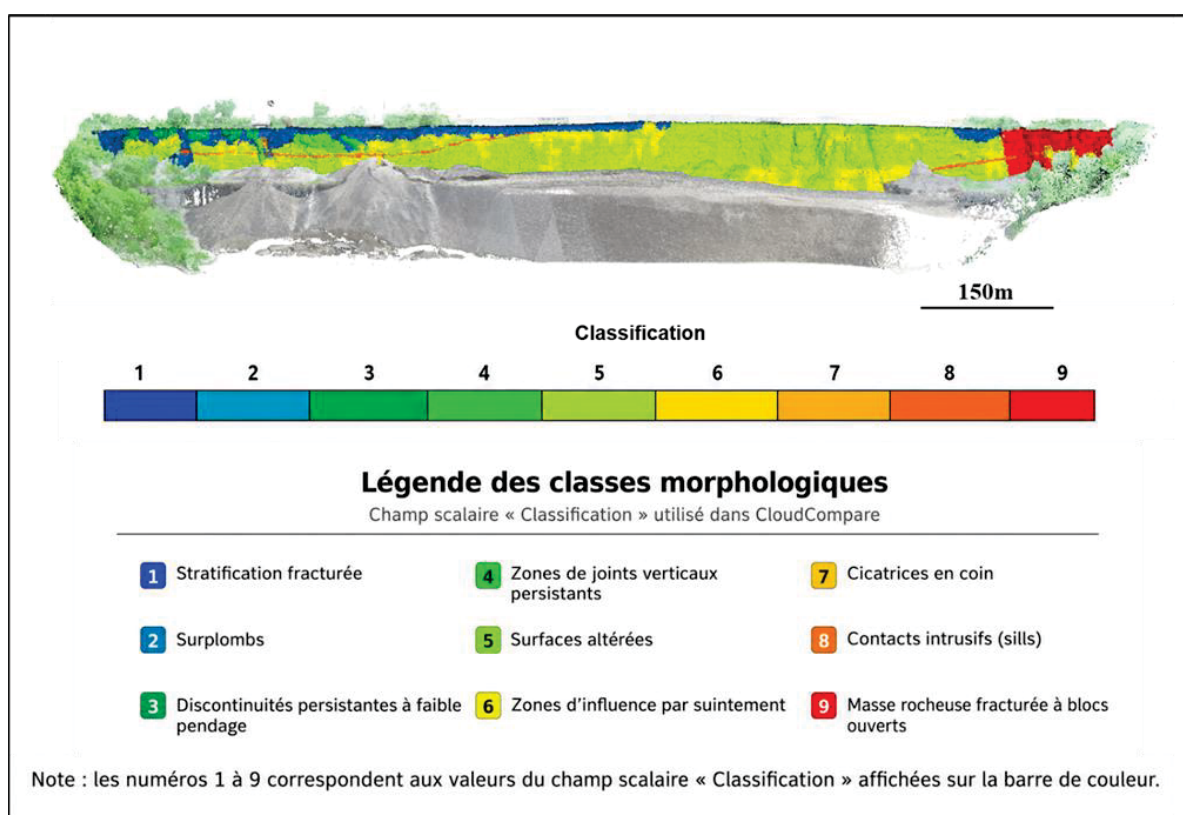


Figure 6.14 Vue générale des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone C, colorés selon le champ scalaire de classification utilisé dans CloudCompare. La distribution des classes met en évidence une dominance des surfaces altérées, des zones d'influence par suintement et de la stratification fracturée, avec une contribution locale des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts

Cette tendance apparaît plus clairement à la Figure 6.15, qui isole les trois principales classes morphologiques dominantes cartographiées dans la zone C. La Figure 6.15a montre que les

surfaces altérées occupent de larges portions de la paroi, ce qui traduit une dégradation étendue de l'état de surface du massif. La Figure 6.15b met en évidence les zones influencées par le suintement, qui se développent localement le long de discontinuités ouvertes ou de secteurs favorables à la circulation de l'eau. La Figure 6.15c montre la stratification fracturée, dont la distribution suit en partie les interfaces subhorizontales du massif et contribue à la segmentation progressive des bancs rocheux.

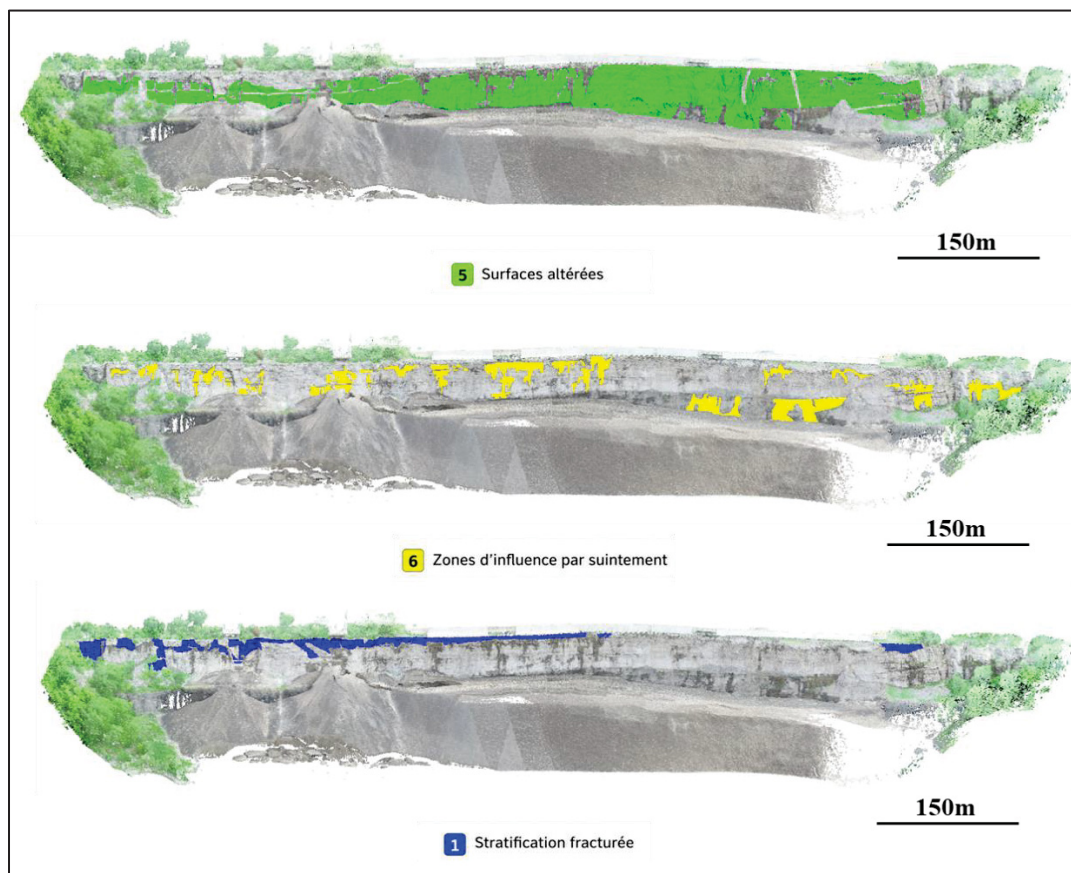


Figure 6.15 Distribution des principales classes morphologiques dominantes cartographiées dans la zone C : (a) surfaces altérées ; (b) zones d'influence par suintement ; (c) stratification fracturée. Ces classes traduisent une expression d'instabilité apparente principalement associée à la dégradation progressive des surfaces rocheuses, à l'action locale de l'eau et à la structuration subhorizontale du massif

Les cicatrices en coin et les surplombs peuvent également être observés localement dans la zone C. Leur distribution demeure toutefois limitée par rapport à celle des surfaces altérées et des zones

d'influence par suintement. Les cicatrices en coin présentent une importance morphologique particulière, puisqu'elles correspondent à des traces de libération passée de matériau et non uniquement à des configurations potentiellement compatibles avec un mécanisme cinématique.

Dans l'ensemble, la zone C se distingue par une expression morphologique dominée par la dégradation progressive. Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement structurent la signature générale de la paroi, tandis que la stratification fracturée et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts traduisent une contribution structurale plus localisée.

La zone C ne doit toutefois pas être interprétée comme un secteur exclusivement associé à une dégradation diffuse. La présence ponctuelle de cicatrices en coin, de surplombs et de volumes rocheux individualisés montre que des formes localisées de libération de matériau coexistent avec les manifestations étendues d'altération et de suintement. Sa signature résulte ainsi de la combinaison entre dégradation progressive dominante, influence hydrique, structuration subhorizontale et segmentation locale du massif.

6.5.2 Synthèse quantitative globale

La synthèse quantitative globale vise à caractériser la composition du jeu de données morphologique construit pour les zones A, B et C. Elle constitue une première lecture d'ensemble de l'inventaire avant l'analyse détaillée des distributions propres à chaque zone. Les résultats présentés correspondent au nombre de points associés aux éléments d'instabilité apparente validés et classifiés selon les neuf classes morphologiques définies précédemment.

Au total, le jeu de données comprend 145 634 385 points classifiés. La zone A regroupe 39 571 996 points, la zone B 42 798 732 points et la zone C 63 263 657 points. Ces différences de nombres absolus doivent être interprétées avec prudence, puisqu'elles reflètent conjointement l'étendue des portions de paroi cartographiées, la géométrie des surfaces observées, les conditions locales d'échantillonnage et la quantité de données associées aux éléments d'instabilité apparente cartographiés. Elles ne constituent donc pas, en elles-mêmes, une indication d'une expression plus ou moins importante de l'instabilité apparente dans une zone donnée.

La distribution globale des points classifiés selon les neuf classes morphologiques est présentée au Tableau 6.5. À l'échelle de l'ensemble des trois zones, les surfaces altérées constituent la classe la plus représentée, avec 50 602 251 points, soit 34,75 % du jeu de données total. Elles sont suivies par la stratification fracturée, qui regroupe 28 593 927 points, soit 19,63 %, et par les zones d'influence par suintement, avec 23 867 290 points, soit 16,39 %.

Ces trois classes représentent collectivement 70,77 % du jeu de données morphologique classifié. Cette concentration quantitative montre que l'inventaire est principalement constitué de formes spatialement étendues associées à l'altération apparente des surfaces rocheuses, à l'influence visible de la circulation de l'eau et à l'expression morphologique de la stratification fracturée. Cette observation décrit la composition du jeu de données à l'échelle globale ; elle ne signifie pas que ces classes possèdent nécessairement une importance géotechnique supérieure à celle des formes moins représentées.

Les zones de joints verticaux persistants constituent également une composante importante de l'inventaire, avec 22 423 833 points, correspondant à 15,40 % du total. Leur représentation globale traduit l'importance des structures subverticales dans l'organisation morphologique de certaines portions des parois. Leur distribution n'est toutefois pas uniforme entre les trois zones, ce qui justifie l'analyse comparative présentée dans les sections suivantes.

Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts représentent 10 969 734 points, soit 7,53 % du jeu de données global, tandis que les contacts intrusifs totalisent 5 700 577 points, soit 3,91 %. Les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage et les cicatrices en coin présentent des contributions globales plus faibles, respectivement de 1,23 %, 0,87 % et 0,30 %.

La faible représentation quantitative de ces dernières classes doit être interprétée en tenant compte de leur géométrie et de leur mode d'expression. Contrairement aux surfaces altérées, aux zones d'influence par suintement ou à certaines structures persistantes, qui peuvent s'étendre sur de grandes portions de paroi, les surplombs et les cicatrices en coin correspondent généralement à des formes plus localisées. Leur faible contribution au nombre total de points classifiés traduit donc

principalement leur extension spatiale limitée dans l'inventaire et ne permet pas de conclure à une importance géomécanique négligeable.

Tableau 6.5 Synthèse globale du nombre de points classés par classe morphologique

Classe	Classe morphologique	Zone A	Zone B	Zone C	Total	% global
1	Stratification fracturée	18 140 655	4 469 955	5 983 317	28 593 927	19,63 %
2	Surplombs	713 242	129 514	941 792	1 784 548	1,23 %
3	Discontinuités persistantes à faible pendage	899 906	148 518	212 066	1 260 490	0,87 %
4	Zones de joints verticaux persistants	3 410 351	17 271 879	1 741 603	22 423 833	15,40 %
5	Surfaces altérées	8 233 655	4 959 525	37 409 071	50 602 251	34,75 %
6	Zones d'influence par suintement	6 333 786	6 901 681	10 631 823	23 867 290	16,39 %
7	Cicatrices en coin	221 112	36 936	173 687	431 735	0,30 %
8	Contacts intrusifs	619 287	3 680 880	1 400 410	5 700 577	3,91 %
9	Masse rocheuse fracturée à blocs ouverts	1 000 002	5 199 844	4 769 888	10 969 734	7,53 %
Total	—	39 571 996	42 798 732	63 263 657	145 634 385	100 %

Afin de compléter cette lecture détaillée, les neuf classes ont ensuite été agrégées selon les trois groupes fonctionnels définis précédemment. À l'échelle globale, le groupe de dégradation progressive représente 74 469 541 points, soit 51,13 % du jeu de données. Le groupe de prédisposition structurale totalise 57 978 827 points, soit 39,81 %, tandis que le groupe de libération directe de matériau comprend 13 186 017 points, correspondant à 9,05 % du total. Ces proportions sont synthétisées au Tableau 6.6.

Tableau 6.6 Synthèse globale des groupes fonctionnels des éléments d'instabilité apparente

Groupe fonctionnel	Classes incluses	Nombre de points	% global
Libération directe de matériau	Surplombs, cicatrices en coin, masse rocheuse fracturée à blocs ouverts	13 186 017	9,05 %
Prédisposition structurale	Stratification fracturée, discontinuités persistantes à faible pendage, zones de joints verticaux persistants, contacts intrusifs	57 978 827	39,81 %
Dégradation progressive	Surfaces altérées, zones d'influence par suintement	74 469 541	51,13 %
Total	—	145 634 385	100 %

La distribution globale met ainsi en évidence une prédominance quantitative des formes associées à la dégradation progressive, suivies par celles rattachées à la prédisposition structurale. Les formes appartenant au groupe de libération directe de matériau sont moins représentées dans l'inventaire global.

Cette organisation doit toutefois être comprise comme une description de la composition du jeu de données, et non comme une hiérarchie de stabilité ou d'importance géotechnique. Elle ne traduit pas non plus une séquence nécessaire entre la dégradation progressive, la prédisposition structurale et la libération de matériau.

Enfin, la lecture globale peut masquer des contrastes importants entre les zones. Une classe fortement représentée à l'échelle de l'ensemble du jeu de données peut être principalement concentrée dans une seule zone. La comparaison normalisée des distributions propres aux zones A, B et C est donc présentée dans la section suivante.

6.5.3 Comparaison normalisée des classes morphologiques entre les zones

La synthèse globale décrit la composition générale de l'inventaire, mais elle ne permet pas, à elle seule, de caractériser les différences entre les zones A, B et C. L'agrégation de l'ensemble des

points classifiés peut en effet masquer des contrastes importants lorsqu'une même classe est fortement représentée dans une zone et faiblement représentée dans les autres. La comparaison repose donc sur les proportions relatives calculées séparément pour chaque zone conformément à la méthode présentée à la Section 6.4.2.

Cette normalisation permet de comparer la structure interne des inventaires morphologiques malgré les différences de nombre total de points classifiés. Elle vise à déterminer la place occupée par chaque classe dans la composition de chaque zone, et non à comparer directement les quantités absolues de données disponibles.

La Figure 6.16 présente la distribution relative des neuf classes morphologiques dans les zones A, B et C.

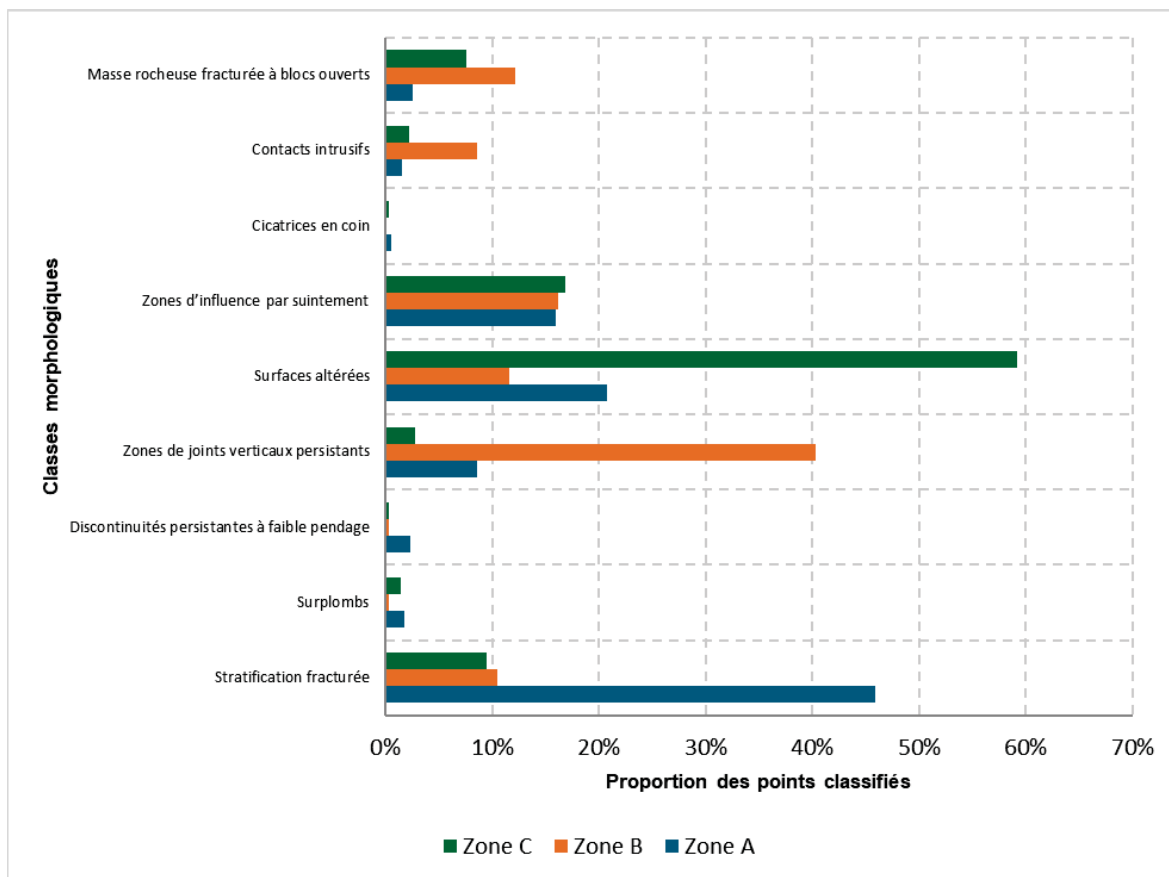


Figure 6.16 Comparaison des distributions relatives des neuf classes morphologiques dans les zones A, B et C

Dans la zone A, la stratification fracturée constitue la classe la plus représentée, avec 45,84 % des points classifiés. Elle est suivie par les surfaces altérées, qui représentent 20,81 %, et par les zones d'influence par suintement, avec 16,01 %. Ces trois classes regroupent ainsi 82,66 % de la distribution classifiée de la zone. Les zones de joints verticaux persistants représentent 8,62 %, tandis que chacune des autres classes contribue à moins de 3 %. La composition de la zone A est donc principalement marquée par la stratification fracturée, accompagnée de manifestations diffuses d'altération et de suintement.

La zone B présente une distribution différente. Les zones de joints verticaux persistants y constituent la classe dominante, avec 40,36 % des points classifiés. Elles sont suivies par les zones d'influence par suintement, avec 16,13 %, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, avec 12,15 %, et les surfaces altérées, avec 11,59 %. La stratification fracturée représente 10,44 %, tandis que les contacts intrusifs contribuent à 8,60 %. Cette distribution distingue la zone B par la forte représentation des formes associées à la segmentation structurale du massif et à l'individualisation locale de volumes rocheux.

Dans la zone C, les surfaces altérées dominent nettement la distribution, avec 59,13 % des points classifiés. Elles sont suivies par les zones d'influence par suintement, qui représentent 16,81 %, par la stratification fracturée, avec 9,46 %, et par les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, avec 7,54 %. Les zones de joints verticaux persistants et les contacts intrusifs représentent respectivement 2,75 % et 2,21 %, tandis que les autres classes contribuent chacune à moins de 2 %. La composition morphologique de la zone C est ainsi fortement concentrée autour des formes associées à l'altération apparente et à l'influence visible de l'eau.

La comparaison montre que la distribution globale résulte de contributions spatialement différenciées. La forte représentation globale des surfaces altérées est principalement liée à leur dominance dans la zone C. De même, la contribution globale des zones de joints verticaux persistants est largement portée par la zone B, tandis que la stratification fracturée occupe une place particulièrement importante dans la zone A.

Ces contrastes confirment l'intérêt de la normalisation par zone. Par exemple, la zone A contient moins de points classifiés que la zone C, mais la stratification fracturée représente une part beaucoup plus importante de sa composition interne. À l'inverse, la forte quantité absolue de points associés aux surfaces altérées dans la zone C correspond également à une dominance relative très marquée de cette classe.

La comparaison normalisée met ainsi en évidence trois signatures morphologiques distinctes. La zone A est principalement caractérisée par la stratification fracturée, la zone B par les zones de joints verticaux persistants et la segmentation du massif, tandis que la zone C est dominée par les surfaces altérées et les manifestations de suintement. Ces différences sont ensuite synthétisées à partir des trois groupes fonctionnels dans la section suivante.

6.5.4 Comparaison des groupes fonctionnels entre les zones

Afin de compléter la comparaison détaillée des neuf classes morphologiques, les résultats ont été agrégés selon les trois groupes fonctionnels définis précédemment : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Cette lecture permet de synthétiser la composition de chaque zone tout en conservant, en parallèle, l'analyse détaillée des classes qui contribuent à chaque groupe.

La Figure 6.17 présente la composition relative des trois groupes fonctionnels dans les zones A, B et C.

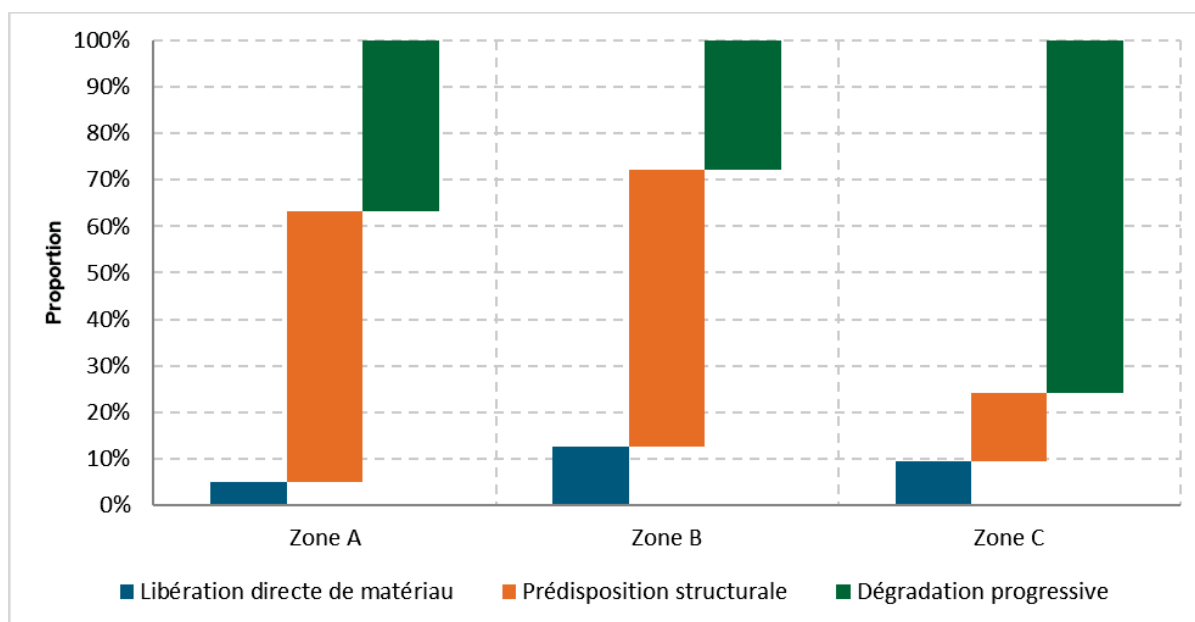


Figure 6.17 Composition relative des groupes fonctionnels dans les zones A, B et C

Dans la zone A, les formes associées à la prédiposition structurale représentent 58,30 % du jeu de données classifié. La dégradation progressive contribue à 36,81 %, tandis que la libération directe de matériau représente 4,89 %. Cette dominance fonctionnelle est principalement liée à la forte représentation de la stratification fracturée, qui constitue à elle seule 45,84 % de la distribution morphologique de la zone. Elle ne traduit donc pas une compartimentation généralisée du massif par des structures verticales persistantes, mais plutôt l'importance du litage fracturé dans l'organisation morphologique de la paroi.

Dans la zone B, la prédiposition structurale constitue également le groupe quantitativement dominant, avec 59,75 % de la distribution. La dégradation progressive représente 27,71 %, tandis que la libération directe de matériau contribue à 12,54 %. Contrairement à la zone A, cette contribution structurale est principalement portée par les zones de joints verticaux persistants, auxquelles s'ajoutent la stratification fracturée, les contacts intrusifs et les discontinuités persistantes à faible pendage. La zone B présente ainsi une expression plus directement associée à la segmentation et à la compartimentation du massif.

La zone C se distingue par une organisation fonctionnelle nettement différente. La dégradation progressive y représente 75,94 % de la distribution classifiée. La prédisposition structurale contribue à 14,76 %, tandis que la libération directe de matériau représente 9,30 %. Cette dominance résulte principalement de la forte représentation des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement, qui occupent collectivement la majeure partie de l'inventaire morphologique de la zone.

La comparaison montre que des proportions fonctionnelles proches peuvent correspondre à des compositions morphologiques différentes. Les zones A et B présentent toutes deux une dominance de la prédisposition structurale, mais celle-ci ne repose pas sur les mêmes classes. Dans la zone A, elle est essentiellement associée à la stratification fracturée, tandis que dans la zone B, elle est principalement portée par les zones de joints verticaux persistants et les contacts intrusifs. L'agrégation fonctionnelle doit donc toujours être interprétée en relation avec les classes morphologiques qui la composent.

Cette distinction est particulièrement importante pour la zone A. La contribution élevée de la prédisposition structurale pourrait suggérer, à première lecture, une organisation comparable à celle de la zone B. Toutefois, l'analyse spatiale montre que la stratification fracturée s'y exprime surtout sous forme de bandes discontinues et diffuses, fréquemment associées à l'altération et au suintement. La dominance d'un groupe fonctionnel ne suffit donc pas à décrire la géométrie ni le mode d'expression des éléments cartographiés.

De même, la proportion plus élevée de libération directe de matériau dans la zone B par rapport à la zone A s'explique principalement par la présence plus importante de masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Dans la zone C, les formes de libération directe demeurent minoritaires à l'échelle quantitative, mais certaines cicatrices en coin localisées conservent une signification morphologique importante en tant que traces de détachements passés.

Les proportions fonctionnelles ne doivent pas être interprétées comme une gradation de l'instabilité, de la stabilité ou du danger. Elles décrivent uniquement la composition relative de l'inventaire classifié dans chaque zone. Une forte représentation de la dégradation progressive, de

la prédisposition structurale ou de la libération directe de matériau ne permet pas, à elle seule, d'établir qu'une zone est plus défavorable qu'une autre.

Dans l'ensemble, la comparaison fonctionnelle met en évidence trois signatures distinctes. La zone A présente une prédisposition structurale principalement portée par la stratification fracturée et associée à une expression morphologique diffuse. La zone B se caractérise par une prédisposition structurale plus directement exprimée par la segmentation du massif et les joints verticaux persistants. La zone C est dominée par la dégradation progressive, principalement associée aux surfaces altérées et aux zones d'influence par suintement. Ces résultats fournissent une base synthétique pour l'interprétation morpho-structurale et cinématique présentée dans la section suivante.

6.6 Interprétation morpho-structurale et cinématique des éléments cartographiés

La comparaison quantitative présentée précédemment met en évidence des compositions morphologiques distinctes entre les zones A, B et C. Toutefois, les proportions relatives ne suffisent pas à expliquer la manière dont les formes observées s'organisent sur les parois ni leur relation avec l'architecture du massif rocheux. La présente section complète donc l'analyse quantitative par une interprétation intégrée de la distribution spatiale des éléments cartographiés, de leur association avec les familles structurales S0, F1, F2 et F3 et de leur compatibilité avec les mécanismes cinématiquement admissibles établis au chapitre 5.

L'interprétation est réalisée séparément pour chaque zone afin de préserver les contrastes liés à l'orientation des parois, à la distribution des discontinuités et à la nature des classes morphologiques dominantes. Elle repose sur la lecture conjointe des images RGB annotées, des cartes de direction de pendage dérivées des normales de surface et des cartes de classification morphologique. Ces trois supports fournissent des informations complémentaires : les images RGB documentent les signatures visibles, les cartes d'orientation permettent de préciser leur organisation géométrique et les cartes de classification montrent leur distribution spatiale à l'échelle de la paroi.

L'objectif n'est pas d'attribuer systématiquement un mécanisme de rupture unique à chaque élément cartographié. Pour les formes à géométrie diffuse, telles que les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement ou certaines zones de stratification fracturée, l'interprétation cinématique demeure principalement contextuelle. Leur organisation peut être associée à des structures visibles sans qu'une géométrie de rupture précise puisse être définie. À l'inverse, les cicatrices en coin, les surfaces planes persistantes ou certains volumes nettement individualisés permettent une association structurale et une interprétation cinématique plus directes lorsque leurs limites sont suffisamment lisibles dans le modèle 3D.

Une distinction fondamentale est maintenue entre la compatibilité cinématique et l'observation d'une libération déjà exprimée. Une structure ou une intersection située dans une enveloppe de faisabilité indique qu'un mécanisme est géométriquement admissible pour l'orientation de paroi considérée. Elle ne démontre pas qu'une rupture s'est produite ou se produira. À l'inverse, une cicatrice de détachement clairement visible constitue une trace morphologique d'une perte passée de matériau. Dans ce cas, l'analyse vise à vérifier si sa géométrie est cohérente avec les structures susceptibles d'avoir contrôlé le détachement observé.

Les sections suivantes présentent successivement l'interprétation de la zone A, caractérisée par une forte représentation de la stratification fracturée et une expression morphologique diffuse; de la zone B, où la segmentation structurale par les joints persistants est plus nettement exprimée; et de la zone C, dominée par la dégradation progressive, mais présentant localement des indices de détachements déjà exprimés.

6.6.1 Zone A : signature structurale dominée par la stratification fracturée et expression morphologique diffuse

Dans la zone A, l'association structurale des éléments d'instabilité apparente cartographiés met en évidence une signature complexe dans laquelle la dominance quantitative de la prédisposition structurale résulte principalement de la forte représentation de la stratification fracturée. Cette classe constitue l'élément principal de l'inventaire morphologique de la zone, tandis que les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement contribuent à une expression spatiale plus diffuse. La zone A ne doit donc être décrite ni comme exclusivement dominée par la dégradation

progressive, ni comme uniformément compartimentée par des structures persistantes. Sa signature résulte de l'interaction entre la structuration subhorizontale du massif, la fragmentation des bancs, l'altération des surfaces et l'influence locale de l'eau.

La Figure 6.18 présente une vue RGB annotée des sous-secteurs A1, A2 et A3. Elle montre que la stratification fracturée, les surfaces altérées et les manifestations de suintement demeurent largement représentées dans l'ensemble de la zone. Ces formes s'organisent principalement suivant le litage ou à proximité de discontinuités visibles, mais elles ne correspondent pas, dans la majorité des cas, à des géométries de détachement nettement individualisées. L'expression morphologique générale demeure ainsi diffuse, malgré la forte contribution quantitative des classes appartenant au groupe de prédisposition structurale.

Dans les sous-secteurs A1 et A2, les structures visibles sont principalement associées à l'interaction entre les familles F1 et F3. Leur influence se manifeste par l'organisation locale de certaines bandes de stratification fracturée, de zones altérées et de manifestations de suintement. Cette relation suggère que les structures préexistantes peuvent guider la distribution des formes de dégradation apparente, sans que celles-ci définissent systématiquement une géométrie de rupture unique.

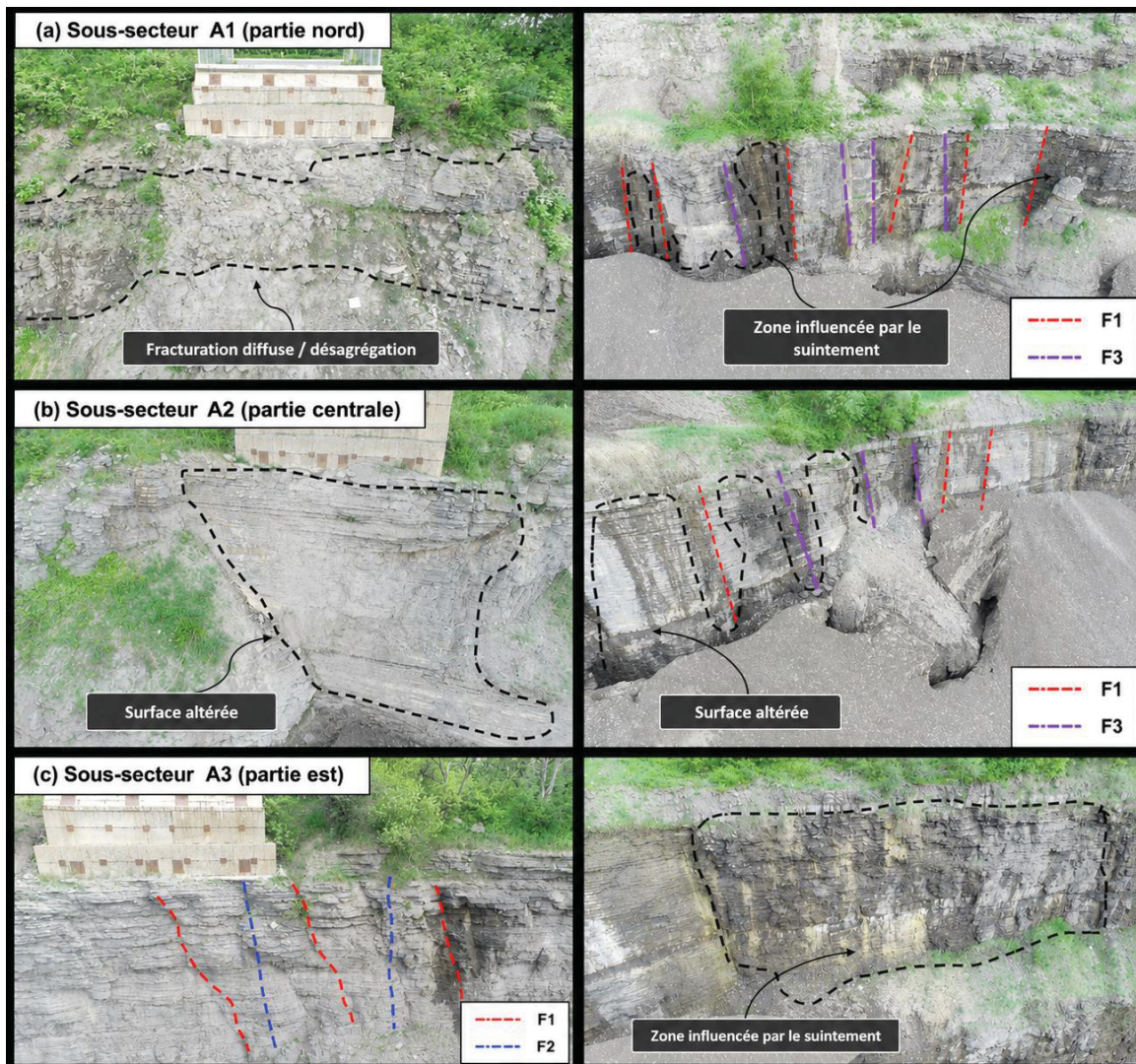


Figure 6.18 Vue RGB annotée des principaux indicateurs morphologiques et structuraux observés dans les sous-secteurs A1, A2 et A3 de la zone A

La carte de direction de pendage dérivée des normales de surface, présentée à la Figure 6.19, confirme que la zone A ne constitue pas un domaine structural homogène. La courbure de la paroi et les changements progressifs d'orientation entre A1, A2 et A3 modifient la relation géométrique entre les familles structurales et la face rocheuse.

Dans les sous-secteurs A1 et A2, les orientations dominantes montrent principalement une interaction entre F1 et F3. Cette association est cohérente avec l'expression diffuse observée sur les vues RGB et avec l'organisation des éléments associés à la stratification fracturée, aux surfaces

altérées et aux zones d'influence par suintement. Les familles structurales contribuent ainsi à organiser localement les formes observées, mais sans produire une compartimentation généralisée de la paroi.

Dans le sous-secteur A3, l'organisation structurale devient plus lisible. L'association F1–F2 y est davantage exprimée et contribue localement à l'individualisation de géométries plus nettement structurées. Cette configuration distingue A3 des sous-secteurs A1 et A2 et permet une interprétation cinématique localement plus directe lorsque les structures observées définissent des intersections compatibles avec un détachement en coin.

La stratification S0 demeure toutefois le cadre structural de fond de l'ensemble de la zone A. Elle organise la disposition des bancs et contribue directement à la forte représentation de la stratification fracturée dans l'inventaire. Les familles F1, F2 et F3 ne remplacent donc pas ce contrôle subhorizontal, mais modulent localement l'organisation des éléments cartographiés et la segmentation de certaines portions de la paroi.

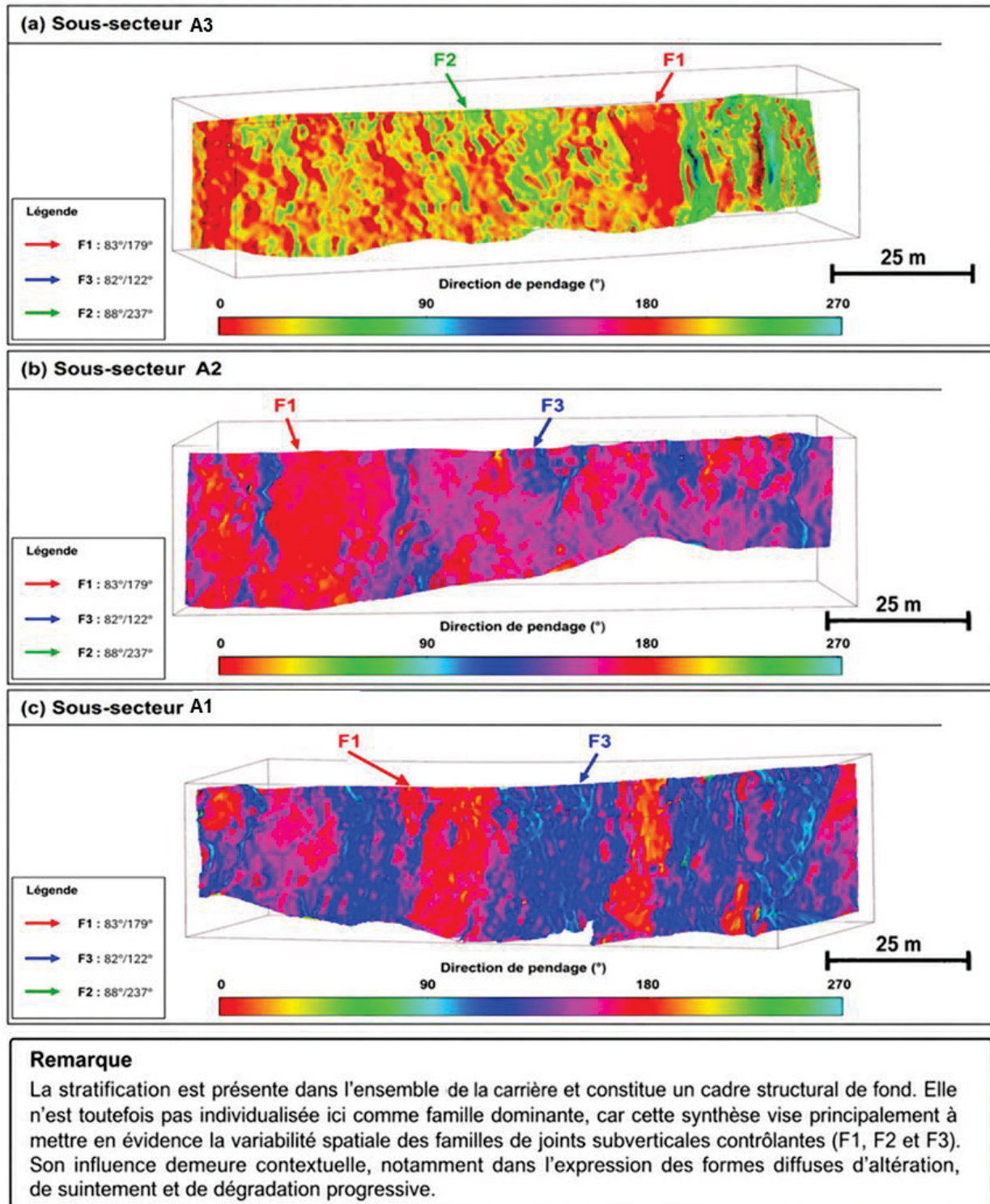


Figure 6.19 Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant la variabilité structurale interne de la zone A. La figure met en évidence une interaction dominante entre F1 et F3 dans A1–A2 et une association F1–F2 plus lisible dans A3

La carte de classification des éléments d'instabilité apparente cartographiés, présentée à la Figure 6.20, confirme la forte représentation de la stratification fracturée, des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement. Cette distribution traduit une signature dans laquelle la prédisposition structurale est principalement portée par le litage fracturé, tandis que l'altération et le suintement contribuent à une expression spatiale diffuse de l'état apparent de la paroi.

Les formes associées à la libération directe de matériau, telles que les cicatrices en coin et les surplombs, demeurent localisées. De même, les zones de joints verticaux persistants, les contacts intrusifs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts sont présents ponctuellement, mais ne structurent pas l'expression morphologique générale de la zone avec la même continuité que dans la zone B.

La comparaison entre les sous-secteurs montre également une variabilité interne. A1 et A2 demeurent principalement caractérisés par une organisation diffuse des éléments cartographiés, associant stratification fracturée, altération et suintement. A3 présente localement une proportion plus importante de formes liées à la structuration du massif, notamment des zones de joints verticaux persistants et quelques cicatrices en coin. Cette évolution spatiale confirme que la zone A possède une signature générale dominée quantitativement par la prédisposition structurale, mais dont l'expression morphologique varie progressivement le long de la paroi.

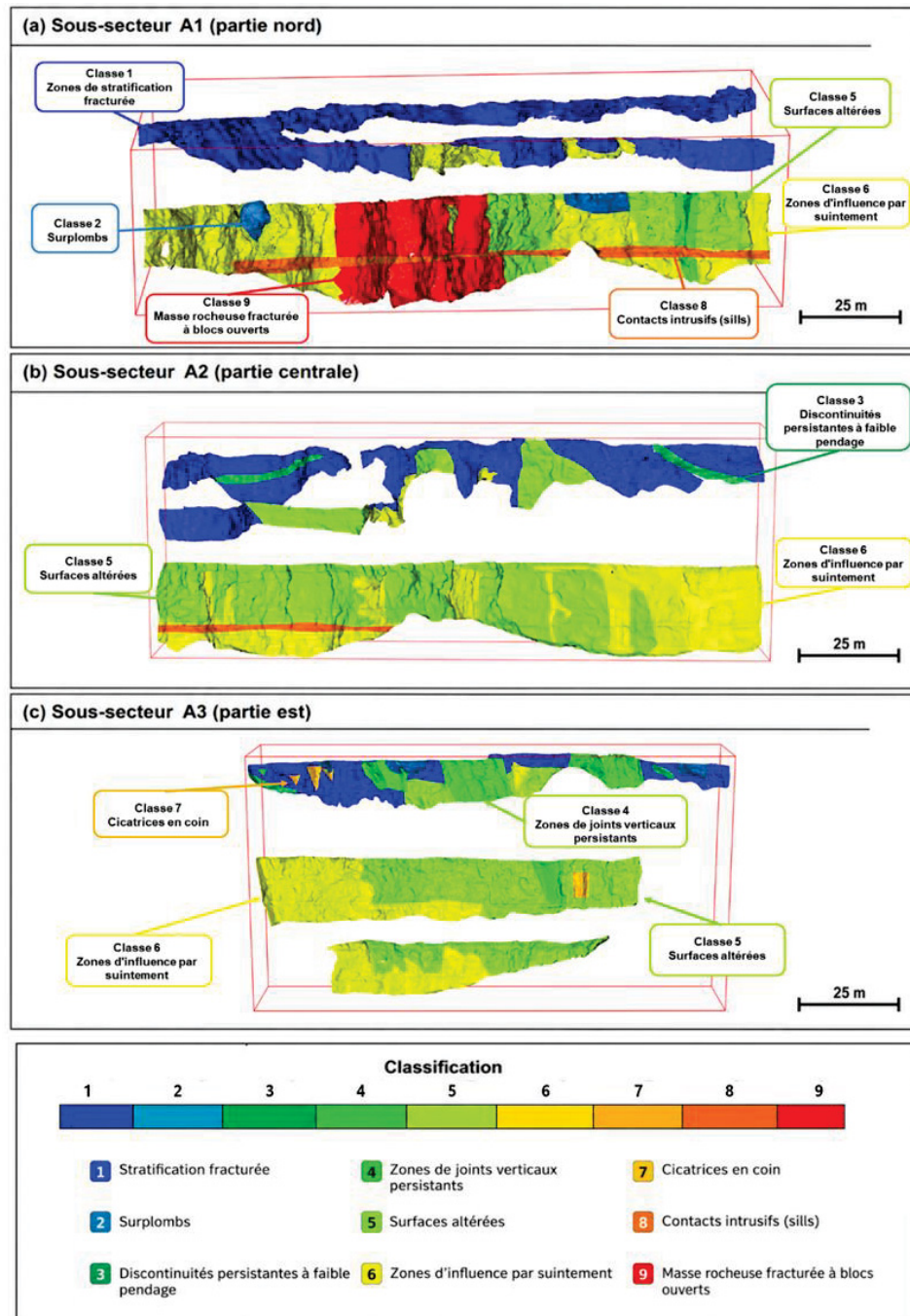


Figure 6.20 Carte de classification des éléments d'instabilité apparente de la zone A. La carte montre la forte représentation de la stratification fracturée et son association spatiale avec les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement, ainsi que la présence locale d'éléments plus structurés

L'intégration des observations RGB, de la carte de direction de pendage et de la classification morphologique permet ainsi d'interpréter la zone A comme un secteur présentant une dominance quantitative du groupe de prédisposition structurale, principalement portée par la stratification fracturée, mais dont l'expression morphologique générale demeure diffuse. La structuration subhorizontale du massif organise une part importante des éléments cartographiés, tandis que les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement traduisent des manifestations de dégradation progressive spatialement associées à cette architecture.

Les résultats mettent ainsi en évidence une distinction entre la composition fonctionnelle quantitative et le mode d'expression morphologique des éléments cartographiés. La zone A n'est pas dominée quantitativement par la dégradation progressive, puisque le groupe de prédisposition structurale constitue la principale composante de son inventaire. Toutefois, cette prédisposition s'exprime principalement par une stratification fracturée largement distribuée, plutôt que par une compartimentation nette et généralisée du massif. Les manifestations d'altération et de suintement contribuent ainsi au caractère diffus de la signature observée.

Sur le plan cinématique, les éléments cartographiés des sous-secteurs A1 et A2 doivent être interprétés avec prudence. Les formes dominantes y présentent généralement des géométries trop diffuses pour être rattachées à un mécanisme de rupture unique. La compatibilité cinématique demeure donc principalement contextuelle : les familles F1 et F3 peuvent organiser certaines portions de la paroi et influencer la distribution des éléments cartographiés, sans que cette organisation constitue la preuve d'un mécanisme de rupture déterminé.

Dans le sous-secteur A3, l'association plus lisible entre F1 et F2 permet une interprétation cinématique localement plus directe. Lorsque les plans structuraux associés sont suffisamment bien définis, leur intersection peut produire une géométrie compatible avec un mécanisme de détachement en coin. Cette compatibilité demeure toutefois une indication géométrique et ne constitue pas une preuve de rupture effective ou future.

Dans l'ensemble, la zone A doit être interprétée comme un secteur où la stratification fracturée constitue la principale composante structurale de l'inventaire, tandis que l'altération et le

suintement contribuent à une expression morphologique diffuse. Les familles F1 et F3 modulent principalement l'organisation des éléments cartographiés dans A1 et A2, alors que l'association F1–F2 devient plus lisible dans A3. Ce dernier sous-secteur marque ainsi une transition vers une organisation davantage contrôlée par la structure. Cette variabilité interne montre que la dominance quantitative d'un groupe fonctionnel ne suffit pas, à elle seule, à décrire l'ensemble de la signature morphologique, structurale et cinématique d'une zone.

6.6.2 Zone B : Prédilection structurale dominante et compatibilité avec le glissement en coin

Dans la zone B, l'association structurale des éléments d'instabilité apparente cartographiés révèle une organisation davantage contrôlée par la structuration du massif rocheux que par des processus diffus de dégradation progressive. Contrairement à la zone A, où les formes dominantes traduisent surtout une expression plus diffuse associée à la stratification fracturée, à l'altération et au suintement, la zone B se distingue par une compartimentation plus nette du massif, principalement associée aux familles de joints subverticales F1 et F2. Les éléments dominants y correspondent aux zones de joints verticaux persistants, aux masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, aux zones d'influence par suintement ainsi qu'aux contacts intrusifs observés sous forme de sills. Cette distribution indique que l'expression de l'instabilité apparente dans ce secteur est fortement liée à une prédisposition structurale du massif.

Cette interprétation est appuyée par la vue RGB annotée de la zone B, présentée à la Figure 6.21, qui met en évidence de nombreux corridors de fractures subverticales attribués principalement aux familles F1 et F2. Ces structures segmentent la paroi et contribuent à l'individualisation de compartiments rocheux distincts. La figure montre également la présence de zones de suintement localisées, généralement associées à des structures ouvertes, ainsi que de contacts intrusifs sous forme de sills, qui introduisent des contrastes lithologiques susceptibles d'influencer localement la fracturation, l'ouverture des discontinuités ou la dégradation préférentielle de certaines interfaces. L'ensemble de ces observations confirme que la zone B présente une organisation structurale plus marquée que celle observée dans la zone A.

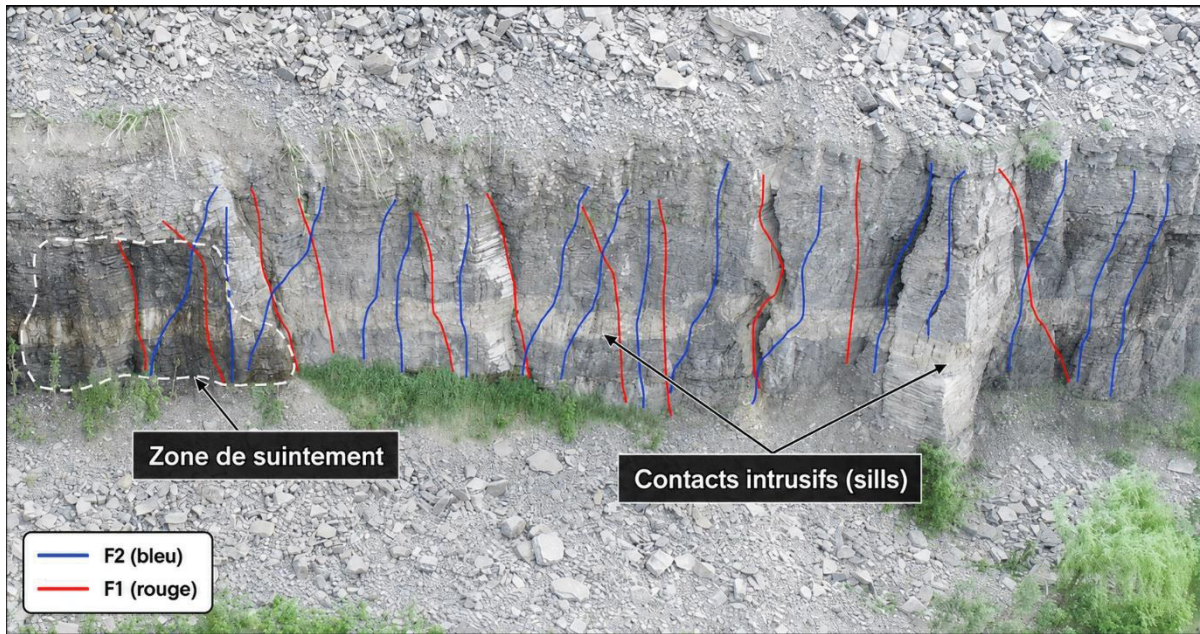


Figure 6.21 Vue RGB annotée de la zone B montrant les principales familles de joints persistants F1 et F2 ainsi que les zones de suintement et les contacts intrusifs (sills), illustrant la segmentation structurale de la paroi et l'individualisation de compartiment

La carte de direction de pendage dérivée des normales de surface de la zone B, présentée à la Figure 6.22, confirme l'interprétation structurale proposée à partir de la vue RGB. Les variations d'orientation visibles sur cette carte mettent en évidence des domaines cohérents avec les familles de joints subverticales F1 et F2. Ces familles correspondent à des joints à fort pendage, dont l'organisation contribue à la segmentation de la paroi et à l'individualisation de compartiments rocheux. La présence de bandes d'orientation associées à F1 et F2 montre que la compartimentation observée sur l'image RGB ne relève pas uniquement d'une lecture visuelle, mais correspond à une organisation géométrique mesurable dans le modèle 3D.

Cette carte joue donc un rôle important dans l'association structurale des éléments cartographiés. Elle permet de relier les zones de joints verticaux persistants, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et les secteurs influencés par le suintement à des structures contrôlantes identifiables. Dans ce contexte, les familles F1 et F2 constituent les principaux éléments structuraux responsables de la prédisposition du massif dans la zone B. Leur interaction contribue à créer des

géométries favorables à l'individualisation de blocs et, localement, à des configurations compatibles avec le glissement en coin.

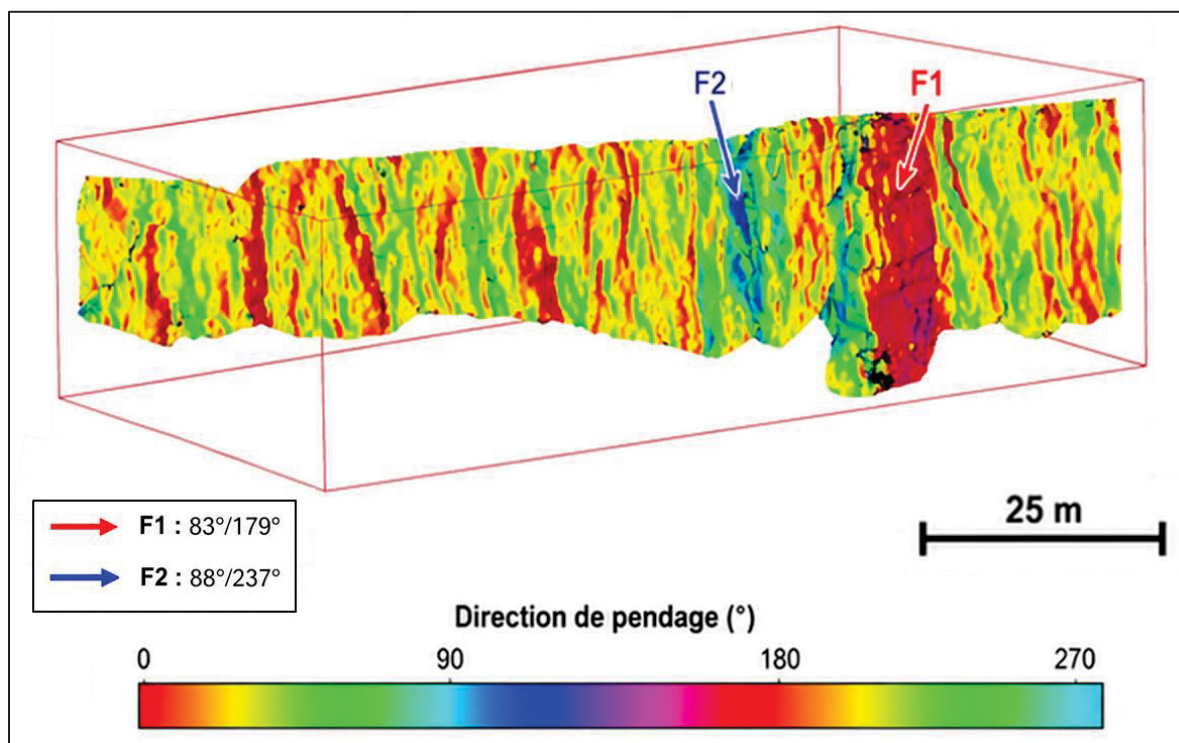


Figure 6.22 Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant la dominance des familles structurales F1 et F2 et leur rôle dans la segmentation du massif rocheux de la zone B

La carte de classification des éléments d'instabilité apparente cartographiés de la zone B, présentée à la Figure 6.23, confirme que l'expression de l'instabilité apparente dans ce secteur est principalement associée à la prédisposition structurale du massif rocheux. Les classes dominantes correspondent aux zones de joints verticaux persistants, aux masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, aux zones d'influence par suintement et aux contacts intrusifs sous forme de sills. Les zones de joints verticaux persistants traduisent la compartimentation de la paroi par des discontinuités continues, tandis que les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts indiquent une individualisation plus avancée de certains volumes rocheux.

Les zones d'influence par suintement montrent que l'eau exploite localement les structures ouvertes ou les interfaces préférentielles, ce qui peut accentuer la dégradation de certains compartiments. Les contacts intrusifs, quant à eux, introduisent une hétérogénéité lithologique susceptible de guider la fracturation, la circulation d'eau ou la dégradation préférentielle le long de certaines interfaces. Cette distribution confirme donc que, dans la zone B, les éléments d'instabilité apparente cartographiés ne traduisent pas principalement une dégradation diffuse comme dans la zone A, mais une organisation plus structurée du massif, contrôlée par les discontinuités et les contrastes lithostructuraux.

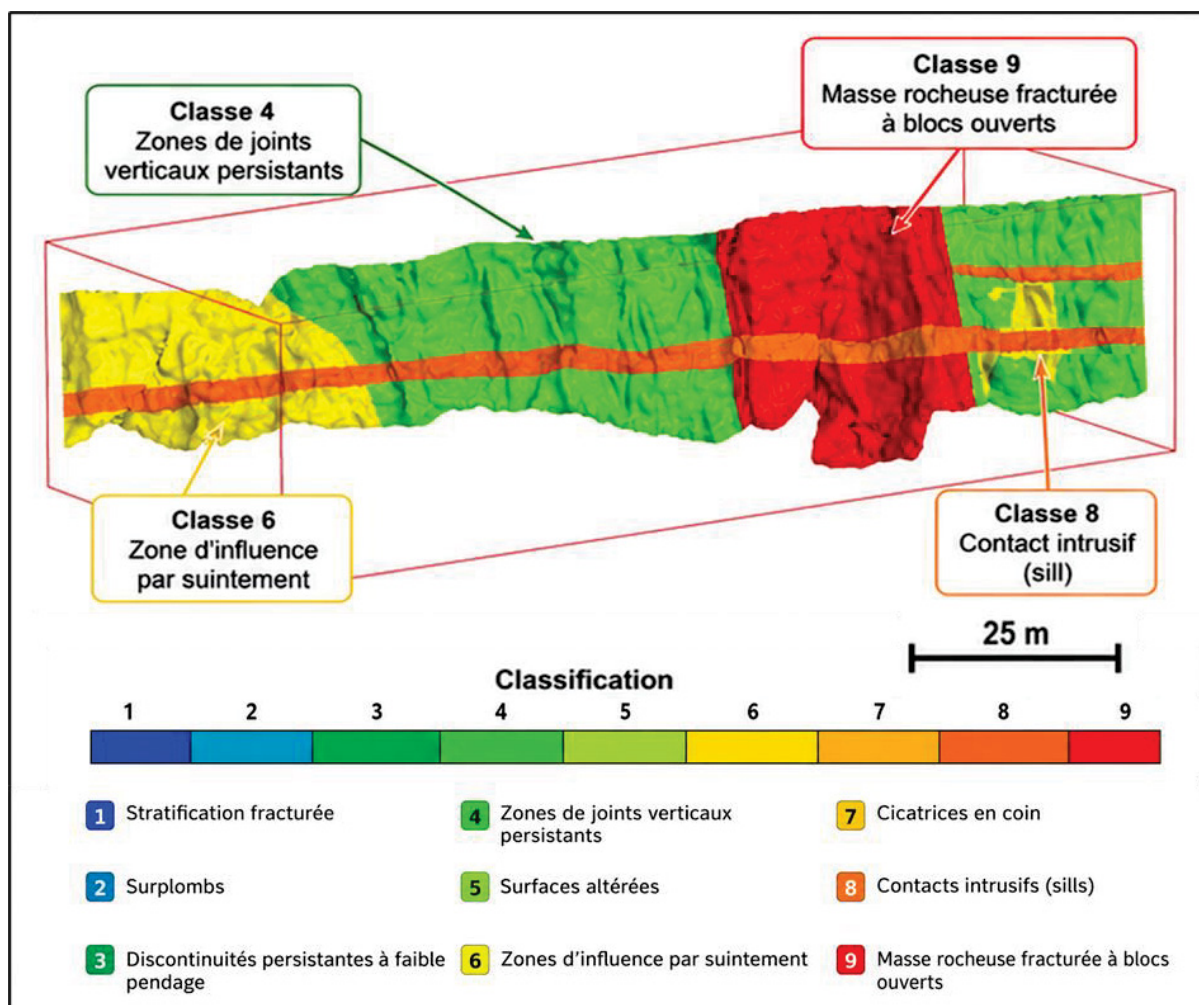


Figure 6.23 Carte de classification des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone B. La carte montre la dominance des zones de joints verticaux persistants, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, des zones d'influence par suintement et des contacts intrusifs

L'intégration des observations RGB, de la carte de direction de pendage dérivée des normales et de la carte de classification morphologique permet d'interpréter la zone B comme un secteur où l'organisation des éléments cartographiés est principalement contrôlée par la segmentation structurale du massif rocheux. La zone B montre une structuration nette de la paroi, dominée par les familles de joints subverticales F1 et F2.

Les familles F1 et F2 jouent un rôle central dans la compartimentation de la paroi. Leur présence récurrente dans les observations RGB et leur expression géométrique sur la carte de direction de pendage montrent qu'elles constituent les principales structures contrôlantes du secteur. Les éléments associés aux zones de joints verticaux persistants traduisent cette segmentation structurale, tandis que les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts indiquent une individualisation plus avancée de certains volumes rocheux. Cette organisation montre que la morphologie observée dans la zone B est fortement liée à la prédisposition structurale du massif.

L'intersection des familles F1 et F2 peut générer des lignes de plongement favorables à l'individualisation de coins rocheux. Cette configuration est cohérente avec les résultats de l'analyse cinématique directionnelle, qui indiquent que le glissement en coin constitue un mécanisme cinématiquement admissible dans ce secteur. La compatibilité avec le glissement en coin apparaît donc bien exprimée dans la zone B. Toutefois, cette compatibilité doit être interprétée comme une indication géométrique, et non comme une preuve de rupture effective. Elle signifie que certaines géométries observées sont cohérentes avec ce mécanisme, sans démontrer que la rupture s'est nécessairement produite.

Les zones d'influence par suintement et les contacts intrusifs complètent cette interprétation. Les zones de suintement montrent que l'eau exploite localement les structures ouvertes, ce qui peut contribuer à l'altération et à l'affaiblissement de certains compartiments rocheux. Les contacts intrusifs, quant à eux, introduisent des hétérogénéités lithologiques qui peuvent guider la fracturation, favoriser la concentration de discontinuités ou accentuer la dégradation préférentielle de certaines interfaces. Ces éléments ne constituent pas nécessairement des mécanismes de rupture

en eux-mêmes, mais ils renforcent la lecture d'un massif structuralement prédisposé à l'instabilité apparente.

Dans l'ensemble, l'analyse de la zone B indique que l'instabilité apparente y est principalement associée à la prédisposition structurale du massif rocheux. Les familles F1 et F2 contrôlent l'organisation spatiale des éléments cartographiés, la segmentation de la paroi et l'individualisation de volumes rocheux. Les classes morphologiques dominantes confirment cette interprétation, en montrant une forte représentation des zones de joints persistants, des blocs ouverts, du suintement localisé et des contacts intrusifs. La zone B se distingue ainsi par une signature morphologique où la structure du massif contrôle fortement l'organisation des formes observées, avec une compatibilité cinématique locale bien exprimée avec des géométries de glissement en coin.

6.6.2.1 Zone C : Dégradation progressive dominante et détachements locaux déjà exprimés

Dans la zone C, l'association structurale des éléments d'instabilité apparente cartographiés et leur interprétation cinématique mettent en évidence un comportement distinct de celui observé dans la zone B. Bien que des structures raides participent localement à l'organisation du massif, l'expression dominante de l'instabilité apparente demeure principalement liée à la dégradation progressive des surfaces rocheuses. Cette dégradation se manifeste surtout par l'abondance de surfaces altérées, par la présence de zones d'influence par suintement et, plus localement, par des secteurs de stratification fracturée. Ainsi, la zone C ne se caractérise pas d'abord par une compartimentation structurale nette à l'échelle du secteur, mais plutôt par un affaiblissement progressif du massif, auquel s'ajoutent localement des formes de détachement déjà exprimées.

La Figure 6.24 présente une vue RGB annotée des principaux indicateurs structuraux et morphologiques observés dans la zone C. Elle met en évidence, d'une part, l'extension spatiale importante des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement, et, d'autre part, la présence plus localisée de surplombs, de secteurs de stratification fracturée, de zones de joints verticaux persistants et de cicatrices en coin. Les zones de suintement apparaissent sous forme de traces sombres ou de secteurs localement humides, souvent concentrés le long de discontinuités

ouvertes ou de zones de faiblesse. Les surfaces altérées se distinguent par une modification de la texture, de la teinte et de l'état de surface, traduisant un affaiblissement progressif de la paroi. Les surplombs et les secteurs de stratification fracturée indiquent quant à eux une sensibilité locale à la désagrégation et au relâchement des couches superficielles. Enfin, les cicatrices en coin constituent des indices morphologiques particulièrement importants, puisqu'elles témoignent non pas d'une simple compatibilité cinématique potentielle, mais d'un détachement local déjà exprimé.

Dans l'ensemble, cette figure montre que l'instabilité apparente dans la zone C est dominée par des processus de dégradation progressive, fortement influencés par l'altération et par la circulation locale de l'eau, tandis que le contrôle structural intervient surtout de manière ponctuelle dans l'expression de certaines formes plus localisées, notamment les cicatrices en coin. La zone C correspond ainsi à un secteur où les processus diffus d'affaiblissement de la paroi dominent spatialement, tout en coexistant avec des indices localisés de détachement déjà survenu.

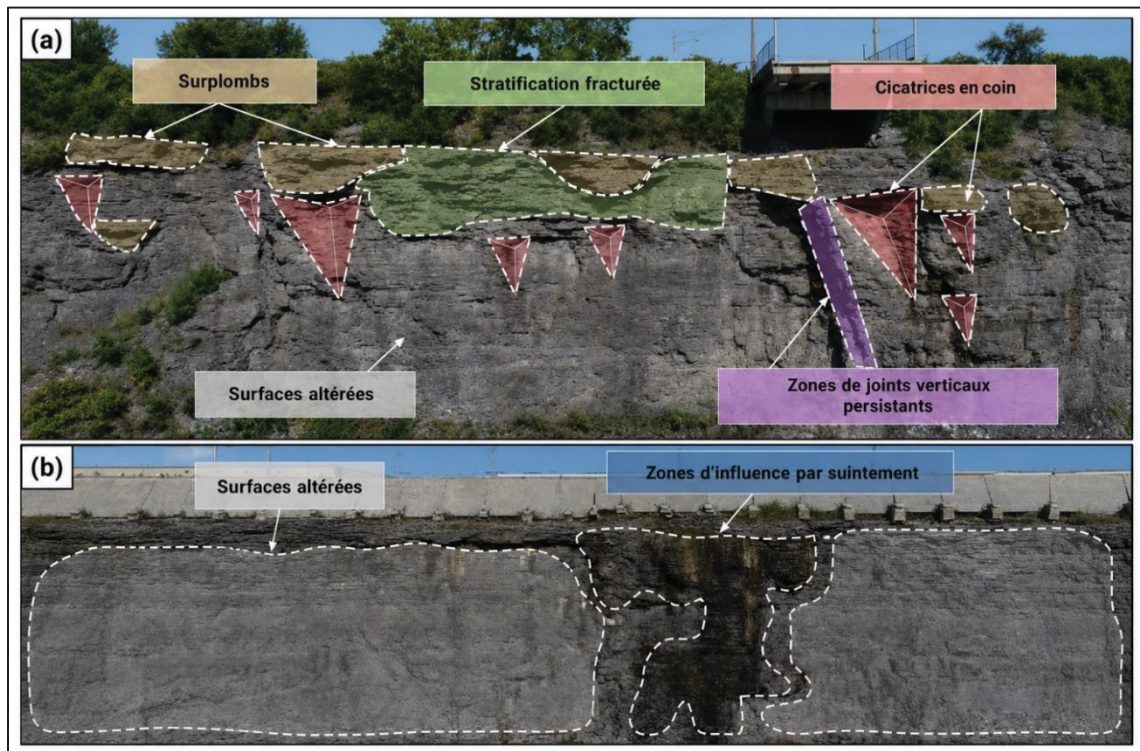


Figure 6.24 Vue RGB annotée des indicateurs structuraux et morphologiques de la zone C : a) éléments d'instabilité apparente observés sous les zones de déversement ponctuel et dans les secteurs sans déversement; b) éléments d'instabilité apparente observés sous la zone de déversement étendu. La figure met en évidence la prédominance des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement, ainsi que la présence locale de surplombs, de stratification fracturée, de zones de joints verticaux persistants et de cicatrices en coin déjà exprimées

La carte de direction de pendage dérivée des normales de surface, présentée à la Figure 6.25, permet de compléter l'observation RGB par une lecture géométrique de la cicatrice en coin observée dans la zone C. Les variations d'orientation visibles sur cette carte mettent en évidence deux surfaces structurales attribuées aux familles F1 et F2, dont l'intersection est cohérente avec la géométrie du détachement observé. Dans ce cas, la figure ne montre pas seulement une compatibilité cinématique potentielle, mais un indice morphologique de détachement en coin déjà exprimé. La cicatrice observée suggère ainsi que l'intersection des familles F1 et F2 a localement favorisé la libération d'un volume rocheux en coin.

Cette interprétation demeure toutefois locale à l'échelle de la zone C. Elle indique que les familles F1 et F2 peuvent contrôler ponctuellement certains détachements, sans pour autant constituer le mode d'organisation dominant de l'ensemble du secteur. La zone C reste principalement marquée par la dégradation progressive des surfaces rocheuses et par l'influence du suintement, mais cette figure montre que des mécanismes de détachement en coin se sont déjà exprimés localement lorsque la géométrie structurale était favorable.

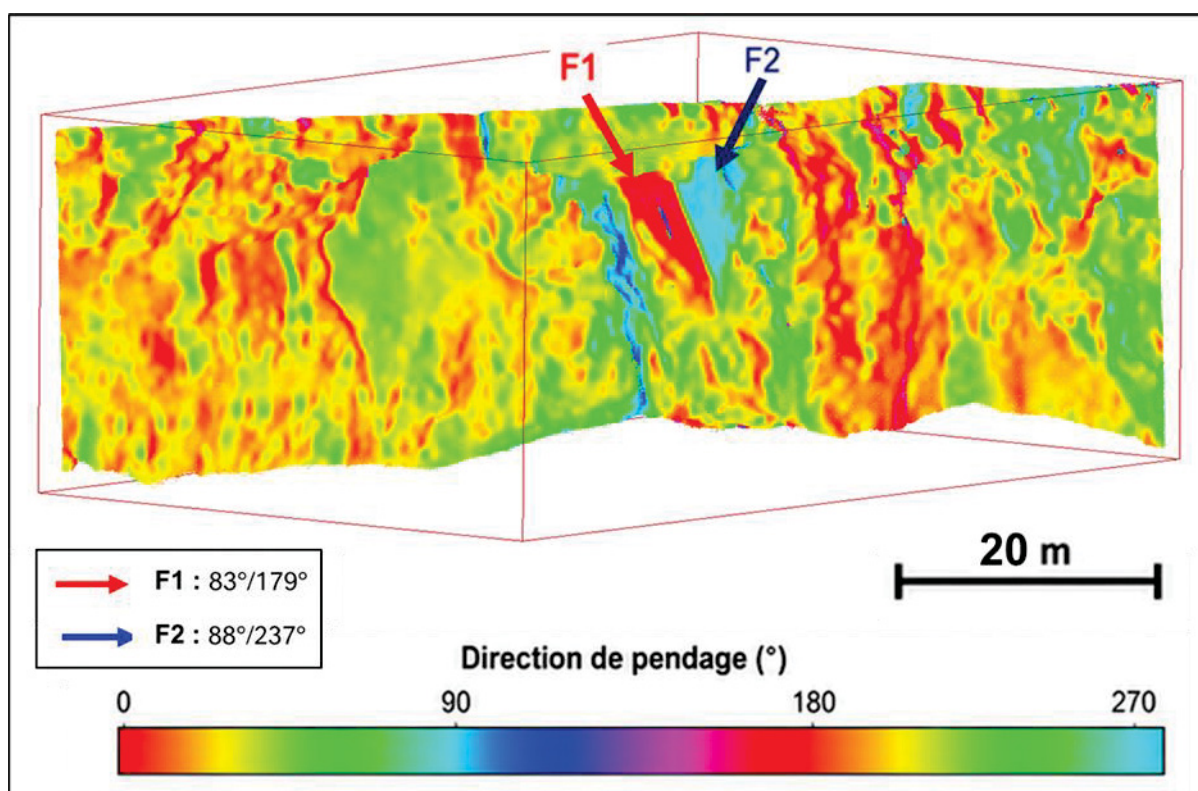


Figure 6.25 Carte de direction de pendage dérivée des normales de surface montrant une cicatrice en coin déjà exprimée dans la zone C. La figure illustre son association avec les familles structurales F1 et F2

La carte de classification des éléments d'instabilité apparente cartographiés de la zone C, présentée à la Figure 6.26, confirme que l'expression dominante de l'instabilité apparente dans ce secteur est principalement associée à la dégradation progressive des surfaces rocheuses. Les classes les plus représentées correspondent aux surfaces altérées, aux zones d'influence par suintement et à

la stratification fracturée. Cette distribution traduit une évolution diffuse et étendue de la paroi, liée à l'altération des surfaces, à la circulation locale de l'eau et à la fragmentation progressive de certains niveaux rocheux.

La Figure 6.26 montre également la présence de formes plus localisées, notamment des cicatrices en coin, des surplombs, des contacts intrusifs et des zones de joints verticaux persistants. Ces éléments indiquent que la zone C n'est pas uniquement affectée par une dégradation diffuse, mais qu'elle présente aussi des indices ponctuels de contrôle structural et de détachement localisé. Les cicatrices en coin constituent des formes particulièrement significatives, car elles témoignent de détachements déjà exprimés localement, tandis que les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts traduisent des configurations plus ponctuelles de libération ou de prédisposition à la libération de matériau. Toutefois, ces formes demeurent spatialement limitées par rapport aux surfaces altérées et aux zones influencées par le suintement.

Dans l'ensemble, la distribution des classes morphologiques confirme que la zone C est dominée par des processus de dégradation progressive, tout en conservant des marqueurs structuraux et cinématiques localisés. Cette organisation appuie l'interprétation d'un secteur où l'affaiblissement diffus des parois constitue le processus dominant, mais où certaines géométries structurales permettent localement l'expression de détachements en coin.

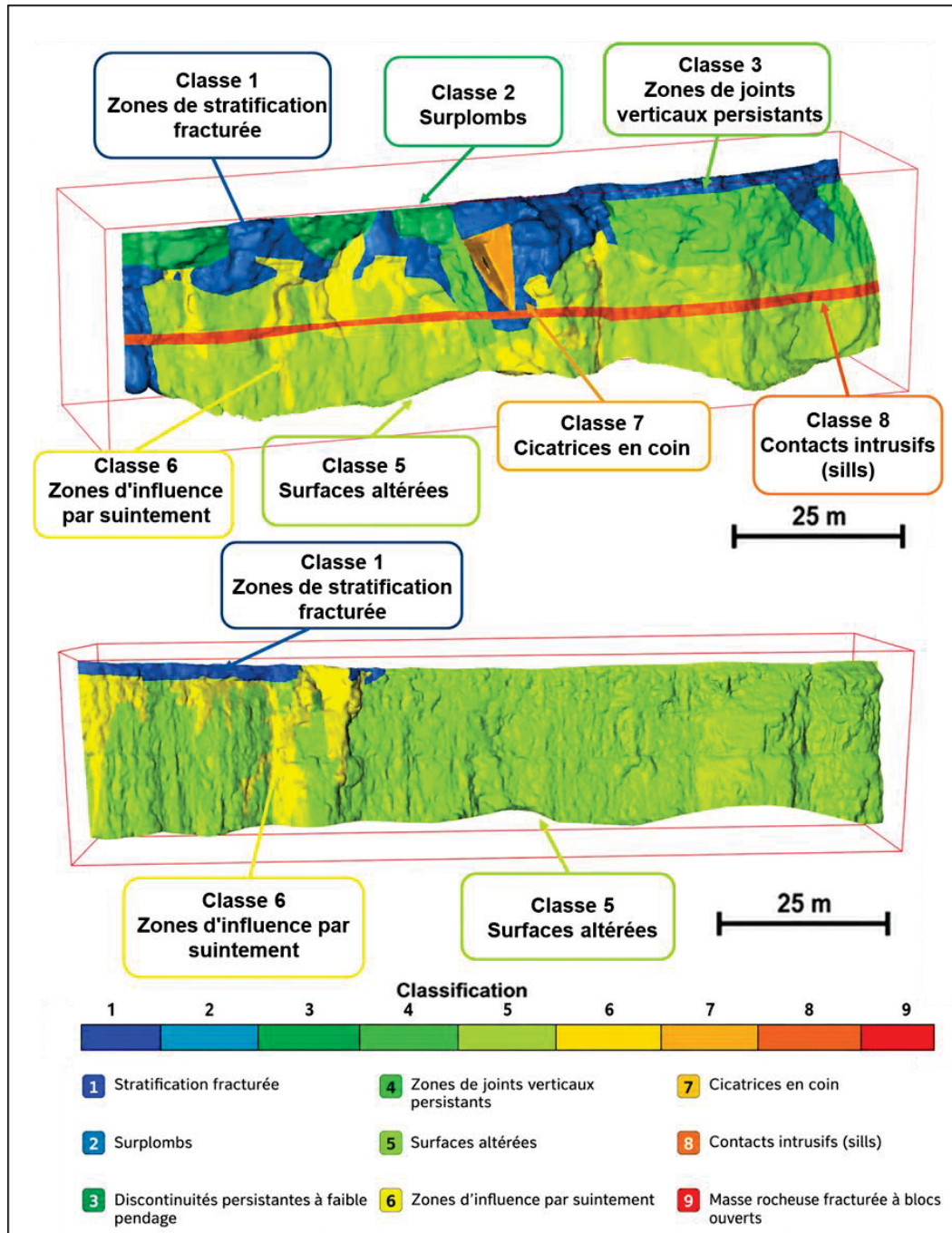


Figure 6.26 Carte de classification des éléments d'instabilité apparente cartographiés dans la zone C. La carte montre la dominance des surfaces altérées, des zones d'influence par suintement et de la stratification fracturée, ainsi que la présence locale de cicatrices en coin et d'éléments structuraux associés

La synthèse structurale et cinématique de la zone C montre que l'instabilité apparente y est principalement associée à des processus de dégradation progressive, tout en présentant localement des indices de détachement déjà exprimés. Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement constituent les indicateurs morphologiques les plus représentatifs de ce secteur. Elles traduisent une évolution diffuse des parois rocheuses, liée à l'altération des surfaces, à la circulation locale de l'eau et à l'affaiblissement progressif du massif.

Cette dégradation progressive n'exclut toutefois pas l'existence de contrôles structuraux ponctuels. Les familles de joints subverticales F1 et F2 demeurent localement importantes, car elles peuvent participer à la segmentation du massif, favoriser l'ouverture de certaines discontinuités et guider la circulation préférentielle de l'eau. Dans certains secteurs, leur intersection peut également contrôler la formation de géométries favorables au détachement de volumes rocheux.

La présence de cicatrices en coin dans la zone C doit être interprétée avec prudence, mais elle constitue un indice morphologique important. Ces cicatrices ne doivent pas être décrites uniquement comme des géométries compatibles avec un glissement en coin, puisqu'elles indiquent que des détachements se sont déjà exprimés localement. Elles traduisent donc une libération passée de matériau, probablement contrôlée par l'intersection de discontinuités raides associées aux familles F1 et F2. Cette interprétation demeure toutefois locale et ne doit pas être généralisée à l'ensemble de la zone.

Sur le plan cinématique, la zone C combine donc deux niveaux d'interprétation. Le premier correspond à une dégradation progressive dominante, pour laquelle la compatibilité cinématique demeure surtout contextuelle, notamment dans les surfaces altérées et les zones de suintement. Le second correspond à des formes ponctuelles de libération de matériau, représentées par les cicatrices en coin, où l'association avec les familles F1 et F2 permet une interprétation cinématique plus directe. Dans ces cas précis, il ne s'agit pas seulement d'une compatibilité potentielle, mais d'un indice de détachement local déjà exprimé.

Dans l'ensemble, la zone C doit être interprétée comme un secteur dominé par la dégradation progressive des surfaces rocheuses, localement affecté par des détachements en coin contrôlés par la structure. Les processus d'altération et de suintement expliquent l'expression dominante de

l'instabilité apparente, tandis que les familles F1 et F2 interviennent ponctuellement dans la segmentation du massif et dans la formation de cicatrices en coin. Cette distinction permet de conserver une interprétation équilibrée : la zone C n'est pas dominée par des ruptures nettes généralisées, mais elle présente localement des formes de libération déjà exprimées dans un contexte structural favorable.

6.7 Synthèse intégrée des résultats morphologiques, quantitatifs, structuraux et cinématiques

L'intégration des résultats met en évidence trois signatures distinctes dans les zones A, B et C. Ces différences ne reposent pas uniquement sur la proportion des classes morphologiques, mais également sur leur organisation spatiale, leur relation avec la stratification S0 et les familles de joints F1, F2 et F3, ainsi que sur la portée de leur interprétation cinématique. Les niveaux de lecture quantitatif, spatial et géomécanique sont donc complémentaires, mais ne doivent pas être confondus.

À l'échelle de la carrière, la stratification S0 constitue un cadre structural commun. Elle organise les bancs rocheux et contribue à l'expression de la stratification fracturée dans les trois zones. Elle ne suffit toutefois pas, à elle seule, à expliquer les contrastes observés. Ceux-ci résultent davantage de la contribution relative des classes, de leur mode de distribution sur les parois et de leur association locale avec les familles de joints à fort pendage.

La zone A présente une dominance quantitative de la prédisposition structurale, principalement portée par la stratification fracturée. Cette classe représente 45,84 % des points classifiés, tandis que les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement contribuent respectivement à 20,81 % et 16,01 %. L'organisation spatiale demeure toutefois largement diffuse, sous forme de bandes discontinues suivant le litage et de surfaces altérées ou influencées par l'eau. Dans A1 et A2, les relations structurales sont principalement associées aux familles F1 et F3, alors que l'association F1–F2 devient plus lisible dans A3. La compatibilité cinématique demeure donc surtout contextuelle dans A1 et A2, mais peut être interprétée plus directement pour certaines géométries localisées dans A3.

La zone B présente également une dominance de la prédisposition structurale, mais celle-ci repose sur une organisation différente. Les zones de joints verticaux persistants représentent 40,36 % des points classifiés et constituent la classe dominante. Elles contribuent à une segmentation nette de la paroi et à l'individualisation locale de compartiments rocheux. Les familles F1 et F2 apparaissent comme les principales structures associées à cette organisation. Leur intersection produit localement des géométries compatibles avec le glissement en coin, sans que cette compatibilité constitue une preuve de rupture effective.

La zone C se distingue par une dominance quantitative de la dégradation progressive, portée principalement par les surfaces altérées, qui représentent 59,13 % des points classifiés, et par les zones d'influence par suintement, avec 16,81 %. Cette organisation traduit une dégradation spatialement étendue de la paroi, associée à l'altération et à la circulation locale de l'eau. Des formes plus localisées, notamment des cicatrices en coin, sont néanmoins observées. Celles-ci constituent des traces de détachements passés et peuvent être associées localement aux familles F1 et F2 lorsque les surfaces contrôlantes sont suffisamment lisibles.

La comparaison entre les zones A et B montre qu'une même dominance fonctionnelle peut correspondre à des expressions morphologiques très différentes. Dans la zone A, la prédisposition structurale est principalement liée à la stratification fracturée et s'exprime de manière diffuse. Dans la zone B, elle est dominée par les joints verticaux persistants et correspond à une compartimentation plus nettement structurée. La zone C présente une configuration distincte, dominée par des formes de dégradation progressive, mais ponctuée de manifestations localisées de libération de matériau.

Les classes associées à la libération directe de matériau demeurent quantitativement minoritaires dans les trois zones. Leur faible représentation ne signifie toutefois pas qu'elles sont sans importance. Les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts sont généralement localisés, mais leur géométrie et leur relation avec les structures du massif peuvent fournir des informations importantes sur des détachements passés ou sur l'individualisation de volumes rocheux.

La portée de la compatibilité cinématique varie également selon la nature des formes. Pour les surfaces altérées, les zones de suintement et certaines zones de stratification fracturée, elle demeure principalement contextuelle. Pour les surfaces planes persistantes, les corridors de joints ou les volumes nettement individualisés, l'association structurale peut être plus directe. Enfin, dans le cas des cicatrices de détachement clairement identifiées, l'analyse porte sur la cohérence entre une libération déjà exprimée et les structures susceptibles d'en avoir contrôlé la géométrie.

La synthèse des résultats est présentée au Tableau 6.7. Elle distingue, pour chaque zone, la composition quantitative dominante, l'organisation spatiale des formes, les principaux contrôles structuraux identifiés et la portée de l'interprétation cinématique.

Tableau 6.7 Synthèse intégrée des résultats morphologiques, quantitatifs, structuraux et cinématiques dans les zones A, B et C

Zone	Classes quantitativement dominantes	Groupe fonctionnel quantitativement dominant	Organisation spatiale principale	Association structurale principale	Interprétation cinématique
A	Stratification fracturée; surfaces altérées; zones d'influence par suintement	Prédisposition structurale (58,30 %)	Expression diffuse et discontinue suivant principalement le litage, en association avec l'altération et le suintement	Interaction principalement F1–F3 dans A1–A2; association F1–F2 plus lisible dans A3	Compatibilité principalement contextuelle pour les formes diffuses; lecture cinématique localement plus directe dans A3
B	Zones de joints verticaux persistants; zones d'influence par suintement; masses rocheuses fracturées à blocs ouverts; surfaces altérées	Prédisposition structurale (59,75 %)	Segmentation structurale marquée et individualisation locale de compartiments rocheux	Association dominante avec F1 et F2	Géométries localement compatibles avec le glissement en coin; compatibilité géométrique ne constituant pas une preuve de rupture effective
C	Surfaces altérées; zones d'influence par suintement; stratification fracturée; masses rocheuses fracturées à blocs ouverts	Dégradation progressive (75,94 %)	Dégradation étendue associée à des manifestations hydriques et à des éléments structuraux localisés	Contrôle local de certaines cicatrices en coin par F1 et F2	Compatibilité principalement contextuelle pour les formes diffuses; détachements en coin déjà exprimés localement lorsque des cicatrices sont observées

Dans l'ensemble, les différences entre les zones ne peuvent être décrites par une seule variable ni par une hiérarchie fondée uniquement sur l'abondance des classes. Chaque zone présente une combinaison particulière entre composition morphologique, organisation spatiale, architecture structurale et compatibilité cinématique. Cette lecture intégrée constitue une caractérisation comparative des formes observées et de leur contexte géomécanique; elle ne permet pas d'établir une hiérarchie de stabilité, de danger ou de risque entre les zones.

6.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de construire un inventaire tridimensionnel structuré des éléments d'instabilité apparente observés sur les parois rocheuses de la carrière Francon. Les principales contributions méthodologiques sont les suivantes :

- Définition de neuf classes morphologiques fondées sur des critères visuels, géométriques, structuraux et texturaux explicites;
- Regroupement des classes selon trois fonctions dominantes : libération directe de matériau, prédisposition structurale et dégradation progressive;
- Délimitation manuelle des éléments cartographiés dans les modèles 3D nettoyés et codification uniforme au moyen du champ scalaire Classification;
- Validation des éléments par comparaison de plusieurs supports, notamment les images RGB, les cartes d'orientation, les normales de surface et les observations de terrain;
- Association des éléments cartographiés aux structures contrôlantes lorsque leur géométrie permettait une interprétation suffisamment robuste;
- Attribution d'étiquettes de compatibilité cinématique distinguant le glissement planaire, le glissement en coin, le basculement et les éléments non directement attribués;
- Quantification de l'inventaire à partir du nombre de points classifiés et normalisation séparée des distributions dans les zones A, B et C;
- Comparaison des résultats selon les neuf classes morphologiques et les trois groupes fonctionnels, sans assimiler les proportions obtenues à des mesures de stabilité, d'aléa ou de risque.

Les principales observations empiriques et comportementales par zone peuvent être résumées comme suit :

Pour la zone A :

- La stratification fracturée constitue la classe dominante et explique la forte contribution de la prédisposition structurale.

- Les éléments sont principalement distribués sous forme de bandes discontinues suivant le litage.
- Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement contribuent à une expression morphologique diffuse.
- Les sous-secteurs A1 et A2 sont surtout associés à l'interaction des familles F1 et F3.
- Le sous-secteur A3 présente une association F1–F2 plus lisible et certaines géométries localement compatibles avec un détachement en coin.
- Dans l'ensemble, la compatibilité cinématique demeure principalement contextuelle et les formes de libération directe restent localisées.

Pour la zone B :

- Les zones de joints verticaux persistants constituent la classe dominante.
- La paroi présente une segmentation structurale marquée et une individualisation plus nette de compartiments rocheux.
- Les familles F1 et F2 constituent les principales structures associées à cette organisation.
- Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts traduisent localement une segmentation plus avancée du massif.
- Les zones de suintement se développent préférentiellement le long de structures ouvertes, tandis que les contacts intrusifs introduisent des hétérogénéités lithostructurales.
- Certaines intersections F1–F2 présentent une compatibilité géométrique avec le glissement en coin, sans constituer une preuve de rupture effective.

Pour la zone C :

- Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement dominent largement l'inventaire.
- L'expression morphologique générale correspond à une dégradation progressive spatialement étendue.

- La stratification fracturée et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts apportent une composante structurale plus localisée.
- Les relations entre les formes diffuses et la cinématique demeurent principalement contextuelles.
- Des cicatrices en coin localisées constituent toutefois des traces de détachements déjà exprimés.
- Certaines de ces cicatrices sont cohérentes avec l'intersection des familles F1 et F2, mais cette interprétation demeure locale et ne doit pas être généralisée à l'ensemble de la zone.

En synthèse, la zone A se distingue par une prédisposition structurale principalement portée par la stratification fracturée et associée à une expression diffuse; la zone B par une compartimentation structurale nettement exprimée et une compatibilité locale avec le glissement en coin; et la zone C par une dégradation progressive dominante, accompagnée de détachements ponctuels déjà exprimés. Ces conclusions décrivent les conditions morphologiques et structurales observées dans chaque zone, sans établir une hiérarchie de stabilité, de danger ou de risque.

CHAPITRE 7

ANALYSE COMPARATIVE DES SIGNATURES GÉOTECHNIQUES APPARENTES SELON LES SPÉCIFICITÉS OPÉRATIONNELLES

7.1 Préambule

Le chapitre précédent a permis de constituer un inventaire tridimensionnel des formes d'instabilité apparente observées sur les parois rocheuses de la carrière Francon. Cet inventaire repose sur l'identification, la délimitation, la classification et la quantification des formes visibles à partir des modèles LiDAR et photogrammétriques. Les résultats ont mis en évidence des distributions morphologiques distinctes dans les zones A, B et C.

Le présent chapitre mobilise cet inventaire afin de comparer les signatures morphologiques et fonctionnelles associées aux différents contextes opérationnels de la carrière. Trois contextes sont considérés : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. La zonation géométrique, le chaînage longitudinal et le cadre structural établis précédemment sont conservés comme référentiels spatiaux pour l'attribution des éléments cartographiés.

Dans ce mémoire, la signature morpho-fonctionnelle apparente désigne une lecture descriptive et comparative de l'état visible des parois rocheuses, fondée sur la nature des formes cartographiées, leur représentation relative et leur organisation spatiale. Elle ne correspond ni à une probabilité de rupture, ni à un facteur de sécurité, ni à une mesure absolue de l'aléa. Elle vise plutôt à caractériser et à comparer les conditions apparentes des parois à partir des données classifiées.

La comparaison repose sur deux niveaux complémentaires. Le premier conserve les neuf classes morphologiques définies au chapitre précédent. Le second regroupe ces classes selon trois fonctions principales : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la

dégradation progressive. Cette organisation permet de préserver le niveau de détail de l'inventaire tout en produisant une lecture synthétique des signatures associées à chaque contexte opérationnel.

Le chapitre présente d'abord la définition et la portée de la signature morpho-fonctionnelle apparente, puis les contextes opérationnels, leurs règles de délimitation et leur relation avec la zonation et le chaînage. La méthode de normalisation et de construction des profils comparatifs est ensuite exposée. Les résultats sont enfin présentés selon les neuf classes morphologiques et les trois groupes fonctionnels afin d'établir les profils morpho-fonctionnels propres aux différents contextes étudiés.

7.2 Définition et portée de la signature morpho-fonctionnelle apparente

Dans le cadre de ce mémoire, la signature morpho-fonctionnelle apparente désigne une lecture descriptive et comparative de l'état visible des parois rocheuses, établie à partir des formes morphologiques cartographiées et quantifiées dans les modèles tridimensionnels. Elle permet de comparer les secteurs étudiés selon la nature des éléments d'instabilité apparente, leur représentation relative, leur organisation spatiale et, lorsque les données le permettent, leur association avec le cadre structural et la compatibilité cinématique du massif rocheux.

Le qualificatif apparente souligne que l'analyse repose sur des indices observables à la surface des parois. Ces indices ne correspondent pas nécessairement à des ruptures actives ni à des mécanismes de défaillance démontrés. Les neuf classes morphologiques sont regroupées selon trois fonctions principales : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Ce regroupement fournit une lecture synthétique des formes observées tout en conservant le niveau de détail de l'inventaire morphologique.

La signature morpho-fonctionnelle apparente ne constitue ni une probabilité de rupture, ni une estimation de l'aléa, ni une évaluation des conséquences potentielles. Elle ne remplace pas une analyse de stabilité, un calcul de facteur de sécurité ou une modélisation mécanique détaillée.

Sa fonction est de fournir un cadre spatial et comparatif permettant de distinguer les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des différentes unités étudiées.

Les trois groupes fonctionnels constituent une grille comparative de l'expression morphologique des éléments cartographiés; ils ne représentent ni des niveaux croissants d'instabilité ni une séquence d'évolution du massif. Leurs contributions relatives, calculées à partir des points cartographiés sous les conditions d'acquisition et de traitement utilisées, décrivent respectivement la représentation des formes associées à la prédisposition structurale, à la dégradation progressive et à la libération directe de matériau. Ces résultats doivent être interprétés conjointement avec la nature et la distribution spatiale des classes et ne constituent pas une évaluation de la stabilité ou du danger. Le profil morphofonctionnel conserve ainsi les trois composantes afin de comparer les signatures observées dans les différents contextes opérationnels de la carrière Francon.

Les proportions calculées décrivent la composition relative de l'inventaire classifié. Elles doivent être interprétées conjointement avec la nature et la distribution spatiale des classes, puisque deux secteurs présentant des profils fonctionnels comparables peuvent être constitués de formes morphologiques différentes. Le profil morpho-fonctionnel conserve donc les trois composantes fonctionnelles et ne les réduit pas à une cote unique.

La définition retenue établit ainsi une distinction entre l'observation morphologique, l'interprétation géomécanique et l'évaluation détaillée de la stabilité. Elle constitue le cadre utilisé pour comparer les signatures associées à la plateforme de déversement ponctuelle, à la plateforme de déversement étendue et au secteur sans déversement direct de la carrière Francon.

7.3 Contextes opérationnels et définition des unités d'analyse

Les zones géométriques A, B et C, ainsi que les sous-secteurs A1, A2 et A3, ont été définis aux chapitres 4 et 5 afin de tenir compte des variations d'orientation des parois et du cadre

structural local. Dans le présent chapitre, cette zonation est conservée comme référentiel spatial et complétée par une classification fondée sur la relation entre les portions de paroi et les zones de déversement de neige.

Trois contextes opérationnels sont distingués : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. Leur répartition par rapport à la zonation géométrique et au chaînage longitudinal est présentée à la Figure 7.1.

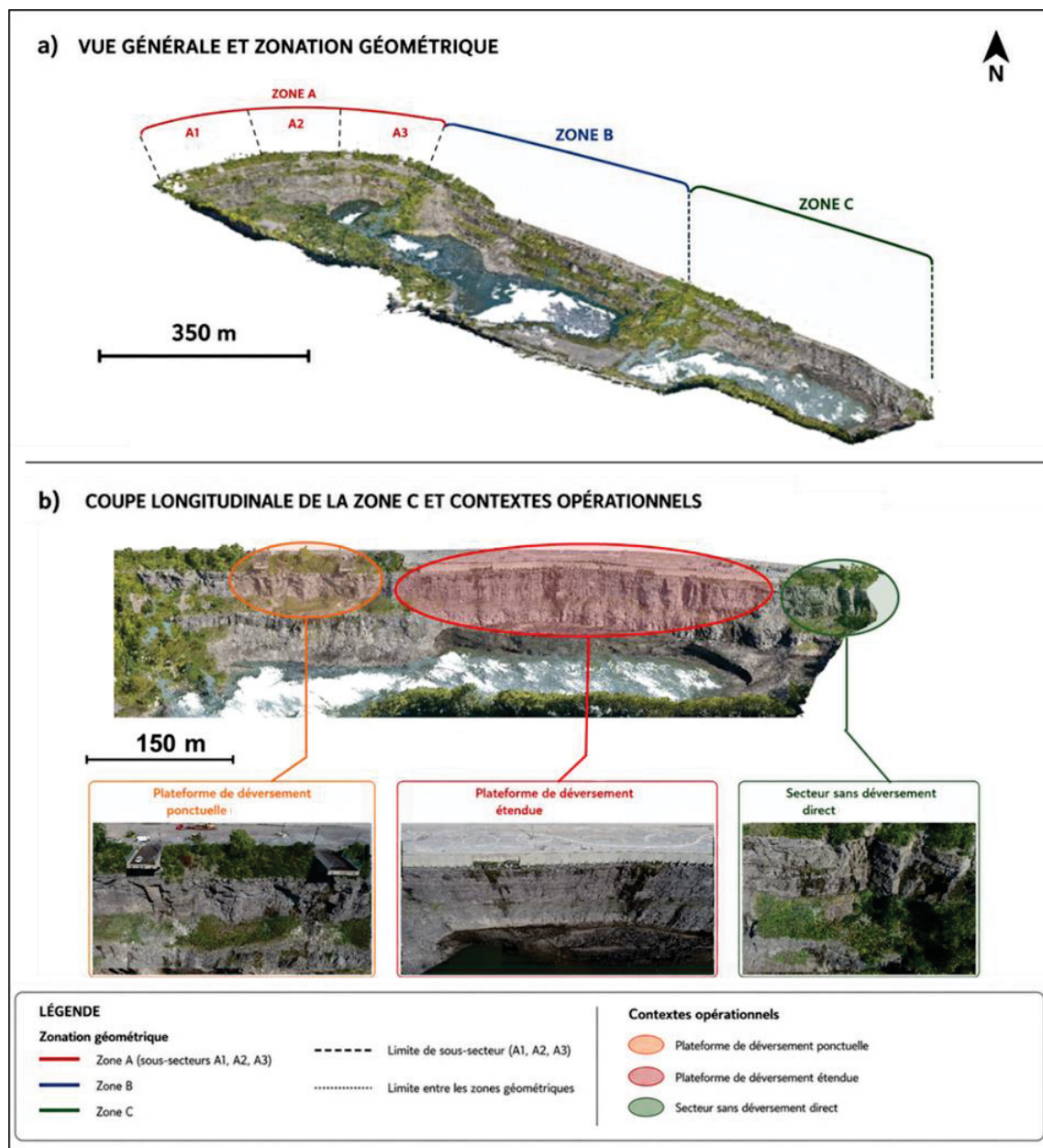


Figure 7.1 Zonation géométrique et contextes opérationnels de la carrière Francon : (a) vue générale des zones A, B et C ; (b) coupe longitudinale de la zone C illustrant une plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et un secteur sans déversement direct

La plateforme de déversement ponctuelle correspond à une zone opérationnelle spatialement localisée le long de la crête de la paroi. Dans cette configuration, les opérations de déversement sont concentrées dans une emprise relativement limitée. L'unité d'analyse ne correspond

toutefois pas à la projection verticale stricte du contour de la plateforme sur la paroi. Elle représente plutôt une zone d'influence opérationnelle locale comprenant la portion de paroi située au droit de la plateforme ainsi que la banquette directement associée, où la neige et les matériaux peuvent s'accumuler, se redistribuer latéralement et contribuer aux apports locaux d'eau de fonte.

La délimitation de cette unité constitue une approximation méthodologique destinée à structurer la comparaison. Elle ne représente pas une frontière physique démontrée de l'influence des opérations de déversement. La signature observée peut également dépendre de la géométrie de la paroi, de la stratification, des familles de discontinuités, de la présence de banquettes et des conditions locales de drainage.

La plateforme de déversement étendue correspond à une emprise opérationnelle continue couvrant une portion latérale plus importante le long de la paroi. Dans la zone C, cette unité est comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775. Elle permet d'examiner la signature morphologique d'un secteur dans lequel l'accumulation et la redistribution de la neige, les apports d'eau de fonte et les interactions avec les surfaces rocheuses peuvent s'exprimer sur une extension spatiale plus importante que dans le contexte ponctuel.

Le secteur sans déversement direct correspond aux portions de paroi situées entre les zones d'influence associées aux plateformes de déversement ponctuelles ou à l'extérieur de l'emprise de la plateforme de déversement étendue. Il désigne l'absence de déversement directement associé à la portion de paroi analysée. Il ne constitue toutefois pas un témoin expérimental strict, puisque ces secteurs demeurent exposés aux précipitations naturelles, à l'accumulation de neige, au ruissellement, aux cycles de gel-dégel, à la circulation de l'eau dans le massif, à l'altération et aux effets hérités de l'excavation.

Les trois contextes opérationnels ne constituent pas des unités géomécaniques homogènes. Ils décrivent la relation spatiale entre les parois étudiées et les zones de déversement ou d'accumulation. Ils sont donc utilisés comme cadre de comparaison et non comme facteurs

explicatifs uniques des formes observées. Leur interprétation doit tenir compte des interactions possibles entre le contexte opérationnel, la stratification S0, les familles de discontinuités F1, F2 et F3, la géométrie de la paroi, les conditions hydriques et l'historique des interventions.

Les unités opérationnelles présentent par ailleurs des étendues différentes. Les secteurs sans déversement direct peuvent couvrir des portions de paroi plus importantes que les zones associées aux plateformes de déversement ponctuelles, tandis que la plateforme de déversement étendue correspond à une emprise continue propre à la zone C. Les nombres bruts de points classifiés ne sont donc pas comparés directement entre les contextes. Pour chaque unité opérationnelle, le nombre de points attribués à chaque classe est rapporté au nombre total de points cartographiés dans cette unité, afin d'en décrire la composition relative. Cette mise en proportion facilite la comparaison entre des unités d'étendues différentes, mais ne corrige pas les biais potentiels liés à la densité du nuage, à l'angle d'incidence, à l'orientation des surfaces, aux occlusions, au filtrage ou à la présence de végétation. Les résultats représentent ainsi des proportions relatives de points cartographiés sous les conditions d'acquisition et de traitement utilisées, et non des proportions surfaciques exactes.

Dans la carrière Francon, la répartition opérationnelle comprend cinq plateformes de déversement ponctuelles dans la zone A, six dans la zone B et deux dans la zone C, auxquelles s'ajoute la plateforme de déversement étendue comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775. Les portions restantes sont attribuées au secteur sans déversement direct selon les règles spatiales précisées dans la section suivante.

Le croisement entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les contextes opérationnels permet ainsi de construire des unités d'analyse servant de cadre à une comparaison descriptive des proportions relatives de points cartographiés et à l'établissement de leurs profils morpho fonctionnels.

7.4 Croisement entre zonation géométrique, chaînage et contextes opérationnels

Le croisement entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les contextes opérationnels permet de définir les unités utilisées pour la comparaison des signatures morpho-fonctionnelles apparentes. La zonation géométrique fournit le cadre spatial des parois, tandis que le chaînage permet de localiser les plateformes et les différentes portions de paroi le long de la carrière. Les contextes opérationnels permettent ensuite de regrouper les éléments cartographiés selon leur position par rapport aux zones de déversement.

Les zones A, B et C, ainsi que les sous-secteurs A1, A2 et A3, demeurent les référentiels géométriques de l'analyse. Ils ne sont pas remplacés par les contextes opérationnels. Chaque élément d'instabilité apparente conserve ainsi son appartenance à une unité géométrique, tout en étant attribué à l'un des trois contextes opérationnels.

Trois règles spatiales sont retenues :

- Les portions comprises dans la zone d'influence locale d'une plateforme de déversement ponctuelle sont attribuées au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle ;
- Les portions situées entre deux plateformes de déversement ponctuelles, sans plateforme directement associée, sont attribuées au secteur sans déversement direct ;
- La portion continue de la zone C comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775 est attribuée à la plateforme de déversement étendue.

Pour les plateformes de déversement ponctuelles, l'unité principale d'attribution ne correspond pas à une projection verticale stricte du contour de la plateforme. Elle comprend la portion de paroi située au droit de la plateforme ainsi que la banquettes directement associée. Trois niveaux conceptuels sont néanmoins distingués afin d'encadrer cette délimitation.

Le Tableau 7.1 présente ces trois niveaux conceptuels et précise leur rôle dans l’attribution des éléments d’instabilité apparente cartographiés au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle.

Tableau 7.1 Niveaux conceptuels de délimitation associés aux plateformes de déversement ponctuelles

Niveau de délimitation	Définition	Rôle dans l’analyse
Zone stricte	Portion directement située au droit de la plateforme ponctuelle	Interprétation conservatrice
Zone d’influence locale	Portion située au droit de la plateforme et banquette directement associée	Niveau principal utilisé pour l’attribution au contexte de plateforme ponctuelle
Zone élargie	Extension latérale possible associée à la redistribution de la neige, des matériaux ou des eaux de fonte	Élément complémentaire d’interprétation spatiale

Cette distinction permet de reconnaître l’incertitude associée aux limites des plateformes de déversement ponctuelles tout en conservant une règle d’attribution explicite et reproductible. Elle évite également de présenter les unités opérationnelles comme des emprises parfaitement déterminées.

La zone d’influence locale constitue la limite principale utilisée pour l’attribution des éléments cartographiés. La zone élargie n’est pas appliquée comme une limite fixe. Elle sert uniquement à documenter les situations dans lesquelles la topographie ou l’organisation des dépôts suggère une extension latérale possible de l’influence opérationnelle.

Le secteur sans déversement direct correspond aux intervalles situés entre les plateformes de déversement ponctuelles ainsi qu'aux portions situées à l'extérieur de l'emprise de la plateforme de déversement étendue. Cette attribution indique uniquement qu'aucune plateforme de déversement n'est directement associée à la portion de paroi considérée. La plateforme de déversement étendue est propre à la zone C et correspond à l'emprise continue comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775.

Le Tableau 7.2 résume les règles de correspondance utilisées pour attribuer les portions de paroi aux différents contextes opérationnels.

Tableau 7.2 Correspondance entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les contextes opérationnels utilisés pour l'analyse comparative

Référentiel spatial	Critère de délimitation opérationnelle	Contexte opérationnel associé	Rôle dans l'analyse comparative
Portions situées au droit des plateformes ponctuelles	Présence d'une plateforme de déversement ponctuelle directement associée à la paroi	Plateforme de déversement ponctuelle	Analyse des signatures morphologiques associées à un déversement localisé
Portions situées entre deux plateformes ponctuelles	Absence de déversement direct au droit de la portion de paroi considérée	Secteur sans déversement direct	Analyse comparative de secteurs sans plateforme directement associée
Portion comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775	Emprise continue d'une plateforme de déversement étendue	Plateforme de déversement étendue	Analyse d'un contexte de déversement à extension latérale continue

Les unités ainsi définies présentent des étendues différentes. Les nombres bruts de points classifiés ne sont donc pas utilisés directement pour comparer les contextes. Les proportions

des neuf classes morphologiques et des trois groupes fonctionnels sont calculées séparément à l'intérieur de chaque unité opérationnelle. Ce croisement fournit ainsi la base spatiale nécessaire à la construction des profils morpho-fonctionnels comparatifs.

7.4.1 Application du croisement aux zones A, B et C

Après la définition des règles générales de croisement entre la zonation géométrique, le chaînage longitudinal et les contextes opérationnels, leur application est précisée pour les zones A, B et C. Cette étape permet de documenter la répartition des plateformes de déversement ponctuelles, des secteurs sans déversement direct et, dans la zone C, de la plateforme de déversement étendue.

L'objectif est d'assurer une correspondance cohérente entre la position longitudinale des plateformes, la géométrie des parois et l'attribution des éléments d'instabilité apparente aux différents contextes opérationnels. Cette attribution est réalisée à partir du modèle tridimensionnel global et du chaînage de référence, tout en conservant l'appartenance de chaque élément à sa zone géométrique. Les sections suivantes présentent l'application de cette démarche aux zones A, B et C.

7.4.2 Application dans la zone A

La zone A constitue le principal secteur associé aux plateformes de déversement ponctuelles. Cinq plateformes y sont identifiées le long du chaînage longitudinal, aux positions 0+075, 0+135, 0+275, 0+350 et 0+450. Ces repères permettent de localiser les plateformes le long de la crête et de définir les portions de paroi retenues pour l'analyse comparative.

Les portions de paroi comprises dans la zone d'influence locale de ces plateformes sont attribuées au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle. Les portions situées entre deux plateformes, lorsqu'aucune plateforme n'est directement associée à la paroi, sont attribuées au secteur sans déversement direct. Cette règle permet de distinguer les secteurs associés à un déversement localisé des intervalles inter-plateformes utilisés comme unités comparatives.

La Figure 7.2 présente la répartition générale des cinq plateformes de déversement ponctuelles dans la zone A ainsi que les intervalles situés entre celles-ci, attribués au secteur sans déversement direct. Elle permet de visualiser la logique spatiale utilisée pour associer les éléments d'instabilité apparente cartographiés aux différents contextes opérationnels.

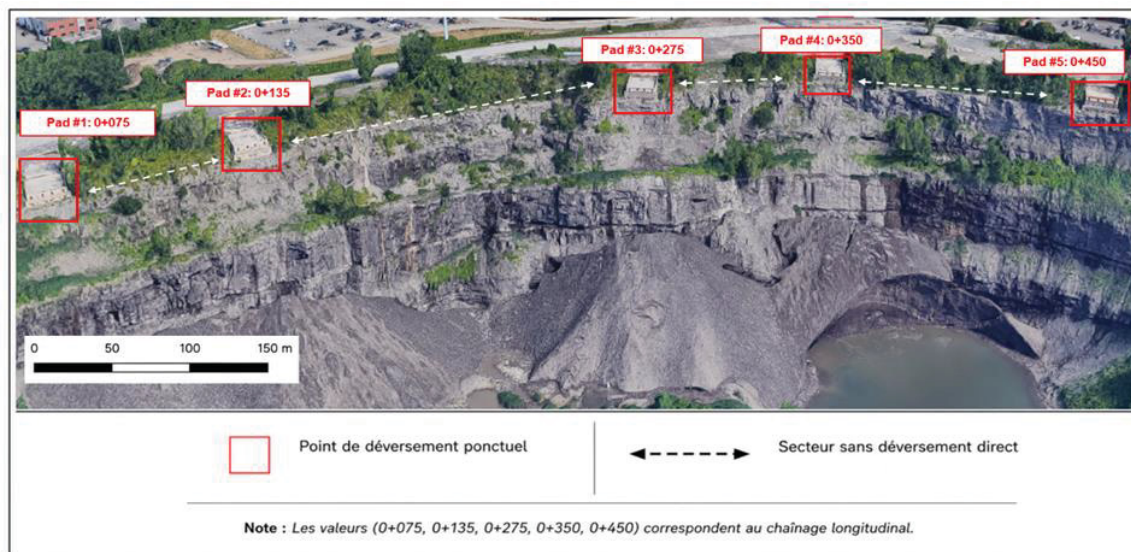


Figure 7.2 Répartition des cinq plateformes de déversement ponctuelles et des secteurs sans déversement direct dans la zone A selon le chaînage longitudinal

La courbure de la paroi nécessite de préciser cette attribution dans les sous-secteurs A1, A2 et A3. Le sous-secteur A1 comprend les plateformes nos 1 et 2, situées respectivement aux chaînages 0+075 et 0+135. Le sous-secteur A2 comprend la plateforme no 3, située au chaînage 0+275. Le sous-secteur A3 comprend les plateformes nos 4 et 5, situées respectivement aux chaînages 0+350 et 0+450. Dans chaque sous-secteur, les portions comprises dans la zone d'influence locale des plateformes sont attribuées au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle, tandis que les intervalles non directement associés à une plateforme sont attribués au secteur sans déversement direct.

La Figure 7.3 présente l'application détaillée de cette règle dans les sous-secteurs A1, A2 et A3. Elle permet de visualiser la répartition des plateformes de déversement ponctuelles dans chaque sous-secteur et de préciser la position des secteurs sans déversement direct correspondant aux intervalles inter-plateformes.

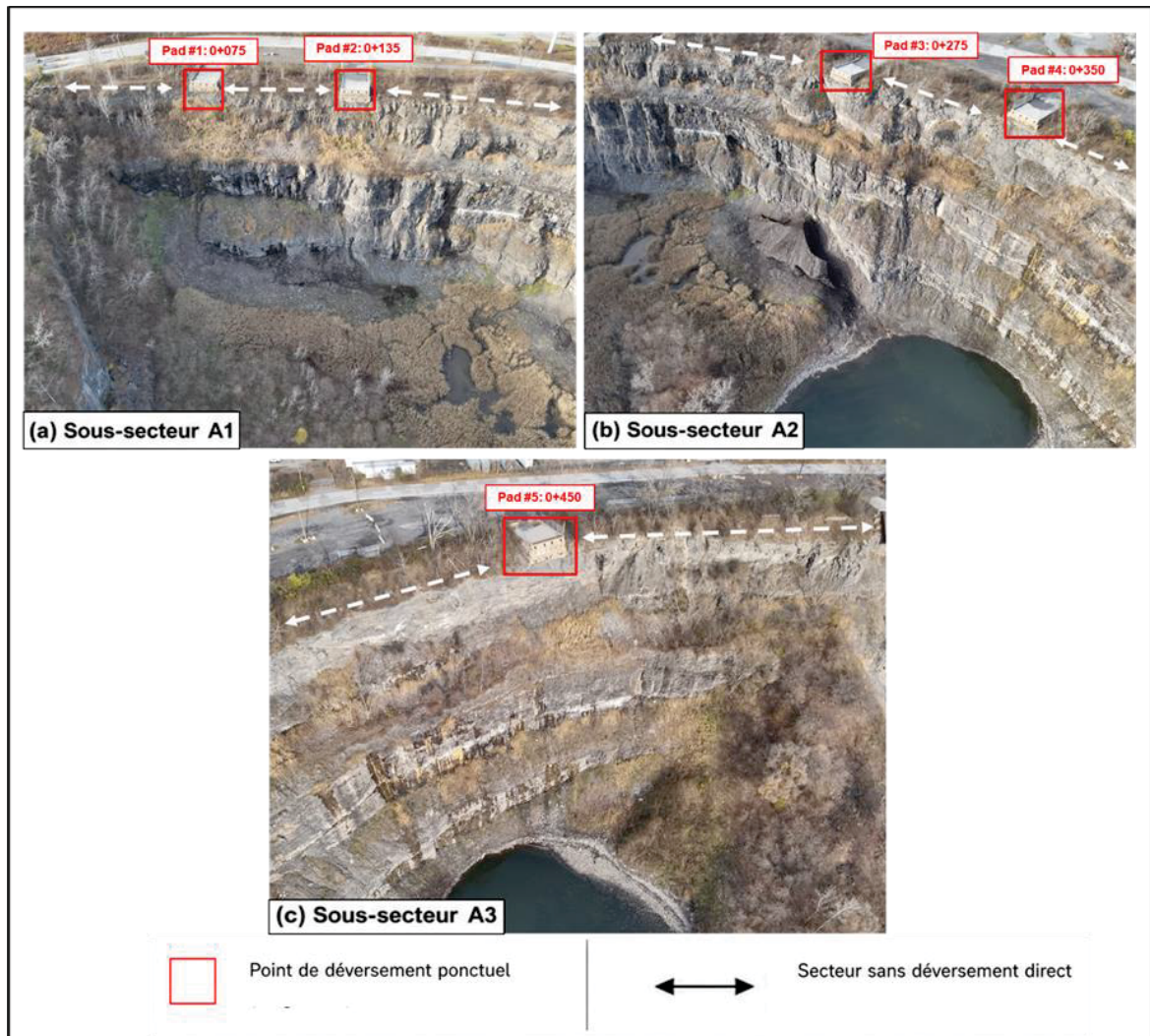


Figure 7.3 Application du croisement entre le chaînage longitudinal, la subdivision géométrique et les contextes opérationnels dans les sous-secteurs A1, A2 et A3 de la zone A

Cette attribution permet de comparer les éléments cartographiés associés aux plateformes ponctuelles et ceux des intervalles inter-plateformes, tout en conservant les variations géométriques propres aux sous-secteurs de la zone A.

7.4.3 Application dans la zone B

La zone B présente une configuration opérationnelle distincte de celle de la zone A. Six plateformes de déversement ponctuelles y sont identifiées le long du chaînage longitudinal, aux positions 0+570, 0+655, 0+775, 0+870, 1+000 et 1+075. Elles correspondent respectivement aux plateformes nos 6, 7, 8, 9, 10 et 11. Leur localisation permet de structurer l'analyse de la zone B en distinguant les portions de paroi comprises dans la zone d'influence locale des plateformes de déversement ponctuelles des intervalles inter-plateformes attribués au secteur sans déversement direct.

La Figure 7.4 présente la répartition des six plateformes de déversement ponctuelles dans la zone B ainsi que les secteurs sans déversement direct associés aux intervalles inter-plateformes. Les vues détaillées permettent de visualiser les portions de paroi auxquelles aucune plateforme de déversement n'est directement associée.

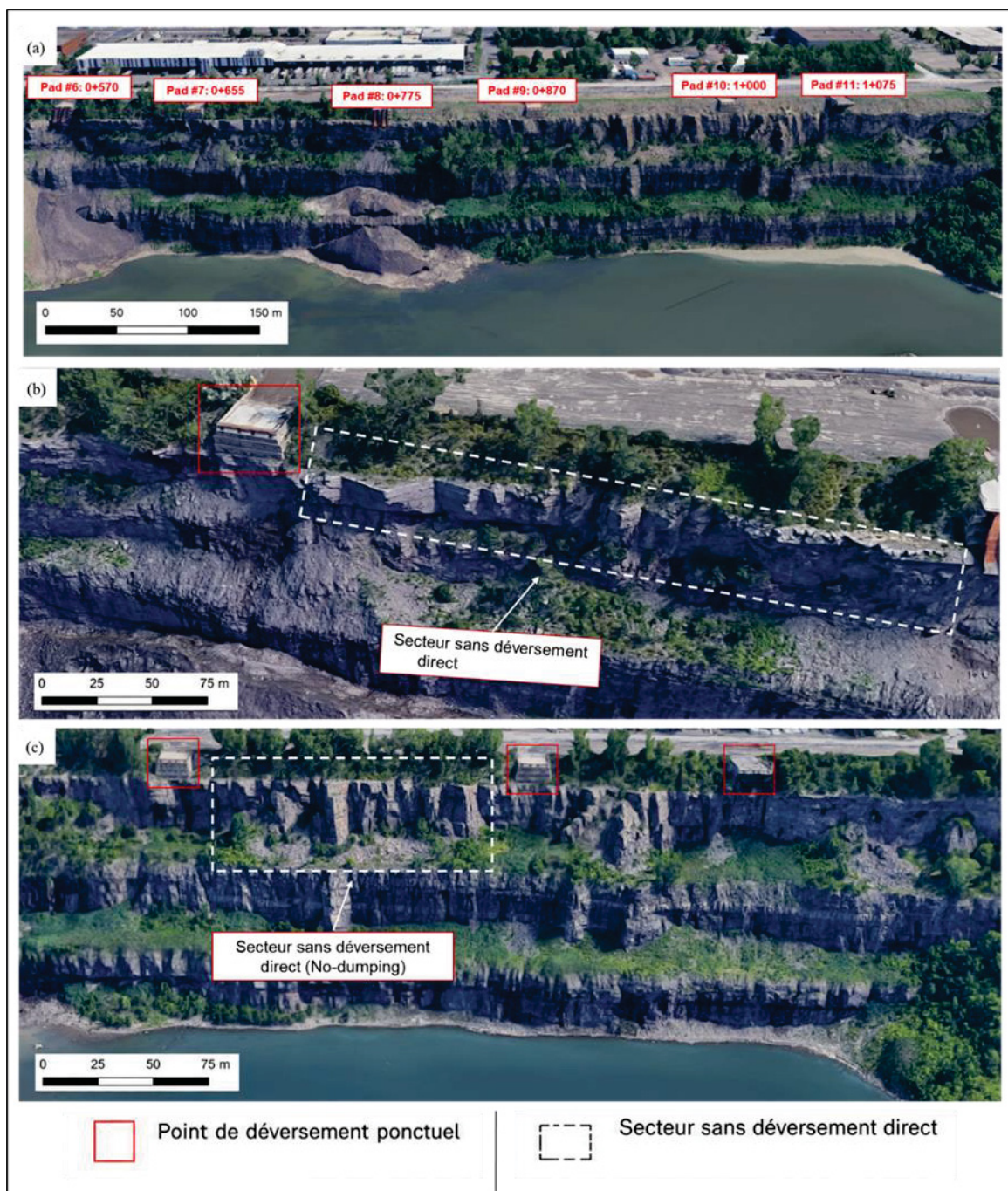


Figure 7.4 Répartition des six plateformes de déversement ponctuelles et des secteurs sans déversement direct dans la zone B selon le chaînage longitudinal

Le secteur sans déversement direct occupe une place importante dans la zone B en raison de l'étendue de plusieurs intervalles inter-plateformes. Cette attribution indique uniquement

l'absence de déversement directement associé à la portion de paroi considérée. Ces secteurs demeurent néanmoins influencés par la géométrie locale du front rocheux, la stratification, les familles de discontinuités, l'altération, le suintement, les processus climatiques et les effets hérités de l'excavation.

7.4.4 Application dans la zone C

La zone C présente une configuration opérationnelle mixte, caractérisée par la présence de plateformes de déversement ponctuelles et d'une plateforme de déversement étendue. Deux plateformes de déversement ponctuelles y sont identifiées le long du chaînage longitudinal, aux positions 1+320 et 1+400. Elles correspondent respectivement aux plateformes nos 12 et 13. Les portions de paroi comprises dans leur zone d'influence locale sont attribuées au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle.

La zone C se distingue toutefois des zones A et B par la présence d'une plateforme de déversement étendue, délimitée entre les chaînages 1+435 et 1+775. Cette emprise correspond à une portion de paroi le long de laquelle les opérations de déversement s'exercent de manière continue. Les éléments d'instabilité apparente cartographiés à l'intérieur de cette emprise sont donc attribués au contexte de la plateforme de déversement étendue.

La Figure 7.5 présente la répartition des deux plateformes de déversement ponctuelles, des secteurs sans déversement direct et de la plateforme de déversement étendue dans la zone C. Les repères 1+320, 1+400, 1+435 et 1+775 correspondent au chaînage longitudinal de référence. Cette figure permet de visualiser la coexistence de plusieurs configurations opérationnelles au sein d'une même zone géométrique.

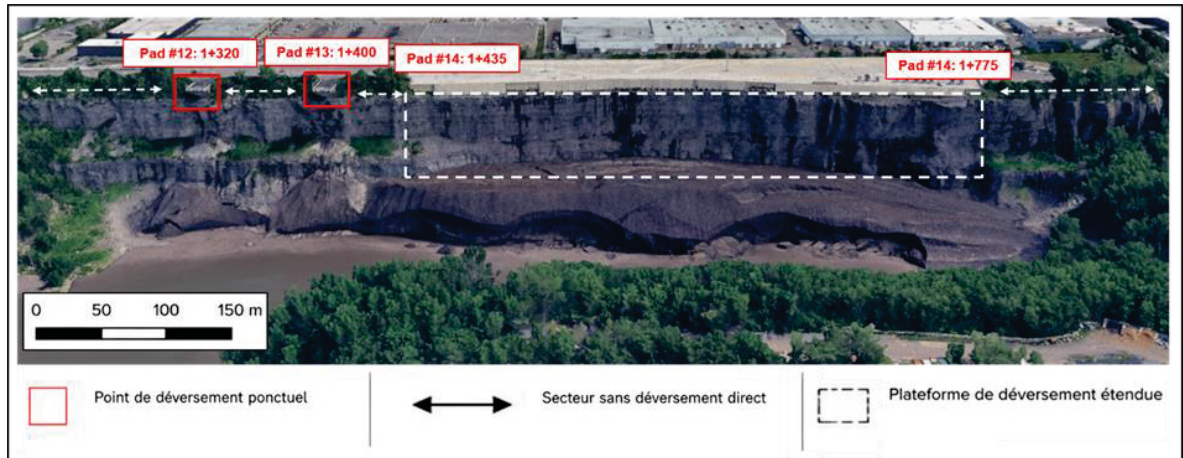


Figure 7.5 Répartition des deux plateformes de déversement ponctuelles, des secteurs sans déversement direct et de la plateforme de déversement étendue dans la zone C selon le chaînage longitudinal de référence

La plateforme de déversement étendue constitue l'unité opérationnelle principale de la zone C en raison de son emprise longitudinale continue. Les plateformes de déversement ponctuelles situées en amont sont toutefois conservées dans l'analyse afin de documenter localement les signatures associées à un déversement ponctuel. Cette organisation évite de considérer l'ensemble de la zone C comme une unité opérationnelle homogène.

L'attribution des éléments cartographiés dans la zone C repose ainsi sur les règles suivantes :

- Les éléments situés dans les zones d'influence locales des plateformes nos 12 et 13 sont attribués au contexte de la plateforme de déversement ponctuelle ;
- Les éléments situés dans les intervalles auxquels aucune plateforme n'est directement associée sont attribués au secteur sans déversement direct ;
- Les éléments compris entre les chaînages 1+435 et 1+775 sont attribués au contexte de la plateforme de déversement étendue.

Cette application permet de conserver la coexistence des trois contextes opérationnels dans une même zone géométrique et fournit les unités nécessaires à la comparaison quantitative présentée dans les sections suivantes.

7.5 Méthode de comparaison et construction du profil morpho-fonctionnel

La comparaison des contextes opérationnels repose sur l'inventaire morphologique établi au chapitre 6. Chaque élément d'instabilité apparente cartographié est associé à une classe morphologique, à un groupe fonctionnel et, lorsque sa géométrie le permet, à une interprétation structurale ou cinématique. Dans le présent chapitre, ces attributs sont mobilisés afin de comparer les signatures observées dans les trois contextes opérationnels : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct.

L'objectif n'est pas de recalculer la stabilité des parois ni d'estimer une probabilité de rupture. Il consiste à construire, pour chaque contexte opérationnel, un profil morpho-fonctionnel comparatif fondé sur la composition des éléments cartographiés. Ce profil décrit la nature dominante des formes observées, leur représentation relative, leur organisation spatiale et leur signification géomécanique apparente.

7.5.1 Niveaux d'analyse

La méthode repose sur trois niveaux d'analyse complémentaires.

Le premier niveau correspond à la distribution des neuf classes morphologiques. Il conserve le détail de l'inventaire et permet d'identifier les formes les plus représentées dans chaque contexte opérationnel.

Le deuxième niveau correspond à l'agrégation des classes selon les trois groupes fonctionnels définis au chapitre 6 :

- La libération directe de matériau ;
- La prédisposition structurale ;
- La dégradation progressive.

Cette agrégation fournit une lecture synthétique de la composition fonctionnelle de chaque contexte, sans remplacer l'analyse détaillée des classes morphologiques.

Le troisième niveau correspond à l'interprétation du profil obtenu à partir des proportions des groupes fonctionnels et de la nature des classes qui les composent. L'organisation spatiale des éléments cartographiés est également prise en compte afin de distinguer les formes distribuées de manière diffuse de celles concentrées dans des secteurs localisés.

7.5.2 Calcul des proportions morphologiques

Pour chaque contexte opérationnel, le nombre de points associé à chaque classe est rapporté au nombre total de points classifiés dans l'unité considérée. Cette normalisation permet de comparer des contextes présentant des étendues spatiales, des densités de points et des nombres d'éléments cartographiés différents.

La proportion relative de la classe morphologique i dans le contexte opérationnel o est définie par :

$$P_{o,i} = \frac{N_{o,i}}{N_o} \times 100 \quad (7.1)$$

Où $P_{o,i}$ représente la proportion, en pourcentage, de la classe i dans le contexte opérationnel o ; $N_{o,i}$ représente le nombre de points classifiés dans la classe i pour ce contexte ; et N_o représente le nombre total de points classifiés dans l'unité opérationnelle considérée.

7.5.3 Construction du profil fonctionnel

Les trois groupes fonctionnels sont ensuite calculés par sommation des classes qui leur sont associées.

La **libération directe de matériau** regroupe :

- Les surplombs, classe 2 ;
- Les cicatrices en coin, classe 7 ;
- Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, classe 9.

Sa contribution est calculée par :

$$G_{o,L} = P_{o,2} + P_{o,7} + P_{o,9} \quad (7.2)$$

La **prédisposition structurale** regroupe :

- La stratification fracturée, classe 1 ;
- Les discontinuités persistantes à faible pendage, classe 3 ;
- Les zones de joints verticaux persistants, classe 4 ;
- Les contacts intrusifs, classe 8.

Sa contribution est calculée par :

$$G_{o,P} = P_{o,1} + P_{o,3} + P_{o,4} + P_{o,8} \quad (7.3)$$

La **dégradation progressive** regroupe :

- Les surfaces altérées, classe 5 ;
- Les zones d'influence par suintement, classe 6.

Sa contribution est calculée par :

$$G_{o,D} = P_{o,5} + P_{o,6} \quad (7.4)$$

Où $G_{o,L}$ correspond à la contribution de la libération directe de matériau, $G_{o,P}$ à la contribution de la prédisposition structurale et $G_{o,D}$ à la contribution de la dégradation progressive dans le contexte opérationnel o .

Pour chaque contexte, les trois contributions vérifient théoriquement la relation suivante, sous réserve des écarts attribuables aux arrondis :

$$G_{o,L} + G_{o,P} + G_{o,D} = 100\% \quad (7.5)$$

Le profil morpho-fonctionnel du contexte opérationnel o est ainsi défini par le triplet :

$$G_o = (G_{o,L}, G_{o,P}, G_{o,D}) \quad (7.6)$$

Ce profil conserve les trois composantes fonctionnelles plutôt que de les réduire à une valeur unique. Il fournit ainsi une représentation comparative de la composition de l'inventaire classifié, sans constituer une cotation absolue de la stabilité des parois.

7.5.4 Interprétation des profils

Les profils fonctionnels sont interprétés à partir de la contribution relative des trois groupes fonctionnels et de la composition morphologique à l'origine de cette distribution. Un contexte est décrit comme dominé par la prédisposition structurale lorsque les classes associées à la stratification fracturée, aux discontinuités persistantes, aux joints verticaux persistants et aux contacts intrusifs constituent la contribution principale. Il est décrit comme dominé par la dégradation progressive lorsque les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement représentent la composante majoritaire.

Un profil mixte est retenu lorsqu'aucun groupe fonctionnel ne domine nettement ou lorsque deux composantes présentent des contributions suffisamment proches pour traduire une combinaison de signatures. Cette désignation demeure strictement descriptive et ne correspond ni à une séquence d'évolution du massif ni à un niveau de stabilité.

La libération directe de matériau est prise en compte même lorsqu'elle ne constitue pas le groupe dominant. Les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts peuvent présenter une extension spatiale limitée tout en conservant une importance locale. Leur interprétation repose donc sur leur présence, leur nature morphologique et leur organisation spatiale, et non uniquement sur leur proportion relative.

Le Tableau 7.3 présente la logique d'interprétation utilisée pour décrire les profils morpho-fonctionnels à partir des trois groupes fonctionnels.

Tableau 7.3 Logique d'interprétation des profils de géorisque apparent selon la contribution des groupes fonctionnels

Profil de géorisque apparent	Critère principal d'interprétation	Signification géomécanique dominante
Profil dominé par la prédisposition structurale	Contribution majoritaire de la stratification fracturée, des discontinuités persistantes, des joints verticaux ou des contacts intrusifs	Signature principalement associée à l'organisation et à la segmentation structurales du massif
Profil dominé par la dégradation progressive	Contribution majoritaire des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement	Signature principalement associée à l'évolution apparente de l'état des surfaces
Profil marqué par la libération directe	Présence notable de cicatrices en coin, de surplombs ou de masses rocheuses fracturées à blocs ouverts	Signature comprenant des formes localisées de détachement antérieur, de perte de support ou d'individualisation de blocs
Profil mixte	Contributions proches entre au moins deux groupes fonctionnels	Signature combinant plusieurs types de formes morphologiques

Ces catégories ne représentent pas des niveaux croissants d'instabilité ou de stabilité. Elles servent uniquement à décrire la composition fonctionnelle dominante des contextes étudiés. Un profil dominé par la dégradation progressive indique ainsi une forte représentation des formes associées à l'altération et au suintement, tandis qu'un profil dominé par la

prédisposition structurale traduit une forte présence des formes liées à l'architecture et à la segmentation du massif rocheux.

7.5.5 Portée et limites de la comparaison

La construction des profils repose sur le nombre de points classifiés et non sur une mesure surfacique ou volumétrique exacte des éléments cartographiés. Les proportions obtenues peuvent donc être influencées par la densité locale du nuage de points, la géométrie et la visibilité des surfaces, les conditions d'acquisition ainsi que la délimitation manuelle des formes.

La normalisation réalisée séparément dans chaque contexte réduit l'effet des différences d'étendue entre les unités opérationnelles, sans toutefois les rendre parfaitement équivalentes. La plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct peuvent notamment différer par l'orientation des parois, leur cadre structural, leur couverture tridimensionnelle et la répartition des formes cartographiées.

Les profils doivent ainsi être interprétés comme des signatures descriptives et comparatives associées aux unités opérationnelles définies. La proximité spatiale entre une plateforme et une classe morphologique ne permet pas, à elle seule, d'établir une relation causale. L'interprétation des résultats repose sur la combinaison des éléments suivants :

- La distribution des neuf classes morphologiques ;
- La contribution des trois groupes fonctionnels ;
- L'organisation spatiale des éléments cartographiés ;
- Le cadre structural et cinématique ;
- Le contexte opérationnel de la portion de paroi étudiée.

La section suivante présente l'application de cette méthode aux trois contextes opérationnels et compare leurs distributions morphologiques, leurs profils fonctionnels et leurs signatures morpho-fonctionnelles apparentes.

7.6 Résultats comparatifs des profils morpho-fonctionnels selon les contextes opérationnels

Cette section présente les résultats obtenus après l'agrégation des éléments d'instabilité apparente cartographiés selon les trois contextes opérationnels retenus : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. L'analyse vise à comparer leur composition morphologique et fonctionnelle à partir des neuf classes définies au chapitre précédent.

Les valeurs quantitatives ont été extraites dans CloudCompare à partir du champ scalaire de classification attribué aux éléments cartographiés. Les entités ont été séparées selon leur identifiant de classe afin d'obtenir, pour chaque contexte opérationnel, le nombre de points associé à chacune des neuf classes morphologiques. Ces données constituent la base du calcul des proportions relatives et assurent la traçabilité du traitement quantitatif.

La comparaison repose principalement sur les proportions calculées séparément à l'intérieur de chaque contexte. Cette normalisation est nécessaire puisque la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct présentent des étendues spatiales et des nombres de points classifiés différents. Les nombres bruts sont conservés dans les tableaux afin de documenter l'inventaire, tandis que les pourcentages sont utilisés pour comparer la composition interne des contextes sur une base commune.

Les résultats sont présentés selon deux niveaux complémentaires. La distribution des neuf classes morphologiques permet d'identifier les formes dominantes et de conserver le détail des signatures observées. Leur agrégation en trois groupes fonctionnels permet ensuite de distinguer la contribution relative de la libération directe de matériau, de la prédisposition

structurale et de la dégradation progressive. Cette double lecture constitue le fondement des profils morpho-fonctionnels comparatifs présentés dans les sections suivantes.

7.6.1 Distribution des classes morphologiques selon les contextes opérationnels

La distribution des neuf classes morphologiques permet de comparer la composition détaillée des éléments d'instabilité apparente dans la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. Les résultats sont exprimés en nombres de points classifiés et en proportions relatives calculées séparément à l'intérieur de chaque contexte. Le Tableau 7.4 présente les valeurs obtenues pour chacune des neuf classes morphologiques.

Tableau 7.4 Distribution quantitative des classes morphologiques selon les contextes opérationnels

Classe morphologique	<i>Plateforme de déversement ponctuelle — points</i>	<i>Plateforme de déversement étendue — points</i>	Secteur sans déversement direct — points	<i>Plateforme de déversement ponctuelle (%)</i>	<i>Plateforme de déversement étendue (%)</i>	Secteur sans déversement direct (%)
Stratification fracturée	7 249 368	1 563 529	19 778 887	27,13	4,09	24,51
Surplombs	125 690	0	1 658 858	0,47	0,00	2,06
Discontinuités persistantes à faible pendage	802 818	0	457 672	3,00	0,00	0,57
Zones de joints verticaux persistants	6 273 957	815 423	15 334 453	23,48	2,13	19,00
Surfaces altérées	6 333 367	29 792 005	14 480 206	23,70	77,94	17,95
Zones d'influence par suintement	4 195 217	5 619 769	14 052 120	15,70	14,70	17,42
Cicatrices en coin	173 687	0	258 048	0,65	0,00	0,32
Contacts intrusifs	1 381 479	434 081	3 884 017	5,17	1,14	4,81
Masse rocheuse fracturée à blocs ouverts	187 444	0	10 782 290	0,70	0,00	13,36
Total	26 723 027	38 224 807	80 686 551	100,00	100,00	100,00

La Figure 7.6 présente les proportions de chaque classe sous forme de diagramme en barres groupées et permet de comparer directement les formes dominantes dans les trois contextes.

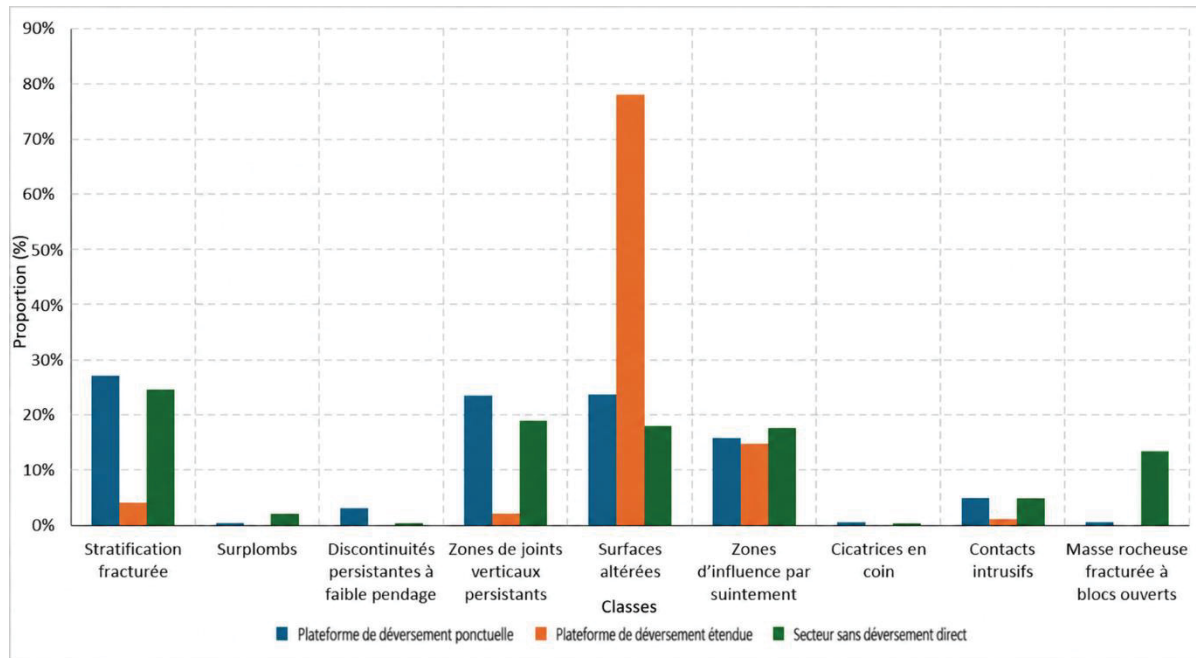


Figure 7.6 Comparaison visuelle des classes morphologiques entre les contextes opérationnels

La plateforme de déversement ponctuelle présente une composition principalement répartie entre la stratification fracturée, les surfaces altérées et les zones de joints verticaux persistants. La stratification fracturée constitue la classe la plus représentée, avec 27,13 %, suivie des surfaces altérées, avec 23,70 %, et des zones de joints verticaux persistants, avec 23,48 %. Les zones d'influence par suintement représentent également une part importante de l'inventaire, avec 15,70 %. Chacune des cinq autres classes présente une proportion inférieure à 6 %.

La plateforme de déversement étendue présente une distribution fortement concentrée dans deux classes. Les surfaces altérées représentent 77,94 % des points classifiés et les zones d'influence par suintement 14,70 %, soit une contribution cumulée de 92,64 %. Les proportions restantes correspondent à la stratification fracturée, avec 4,09 %, aux zones de joints verticaux persistants, avec 2,13 %, et aux contacts intrusifs, avec 1,14 %. Aucun point n'a été attribué

aux surplombs, aux discontinuités persistantes à faible pendage, aux cicatrices en coin ou aux masses rocheuses fracturées à blocs ouverts dans cette unité.

Le secteur sans déversement direct présente la distribution la plus diversifiée. La stratification fracturée constitue la classe dominante, avec 24,51 %, suivie des zones de joints verticaux persistants, avec 19,00 %, des surfaces altérées, avec 17,95 %, et des zones d'influence par suintement, avec 17,42 %. Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts représentent 13,36 %. Les contacts intrusifs, les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage et les cicatrices en coin présentent des contributions plus faibles.

Pour compléter cette lecture détaillée, la Figure 7.7 présente la composition morphologique interne de chaque contexte sous la forme d'un diagramme en barres empilées à 100 %. Cette représentation met en évidence le poids relatif de chaque classe dans la signature morphologique globale de chaque contexte opérationnel.

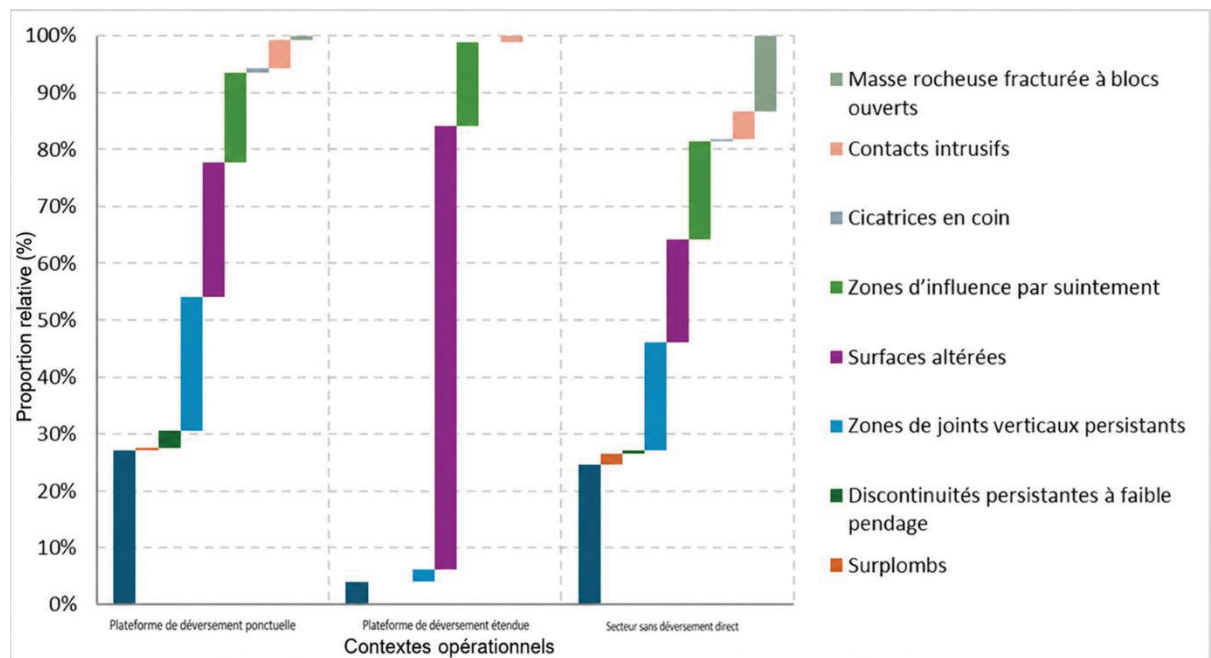


Figure 7.7 Signature morphologique relative des contextes opérationnels

Les résultats mettent ainsi en évidence trois compositions morphologiques distinctes : une distribution partagée entre plusieurs classes dans la plateforme de déversement ponctuelle, une forte concentration des points dans les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement dans la plateforme de déversement étendue, et une distribution plus diversifiée dans le secteur sans déversement direct. Cette lecture détaillée constitue la base de l'agrégation fonctionnelle présentée dans la section suivante.

7.6.2 Distribution des groupes fonctionnels selon les contextes opérationnels

La deuxième lecture des résultats repose sur l'agrégation des neuf classes morphologiques en trois groupes fonctionnels : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive. Cette agrégation permet de synthétiser la composition morphologique de la plateforme de déversement ponctuelle, de la plateforme de déversement étendue et du secteur sans déversement direct, tout en conservant la correspondance avec les classes présentées dans la section précédente.

La libération directe de matériau regroupe les surplombs, les cicatrices en coin et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. La prédisposition structurale comprend la stratification fracturée, les discontinuités persistantes à faible pendage, les zones de joints verticaux persistants et les contacts intrusifs. La dégradation progressive regroupe les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement.

Le Tableau 7.5 présente la distribution quantitative de ces groupes fonctionnels dans les trois contextes opérationnels.

Tableau 7.5 Répartition relative des points cartographiés entre les groupes fonctionnels selon les contextes opérationnels

Groupe fonctionnel apparent	Classes incluses	Plateforme de déversement ponctuelle (points)	Plateforme de déversement étendue (points)	Secteur sans déversement direct (points)	Plateforme de déversement ponctuelle (%)	Plateforme de déversement étendue (%)	Secteur sans déversement direct (%)
Libération directe de matériau	Classe 2, 7 et 9	486 821	0	12 699 196	1,8	0,0	15,7
Prédisposition structurale	Classe 1, 3, 4 et 8	15 707 622	2 813 033	39 455 029	58,7	7,3	48,9
Dégradation progressive	Classe 5 et 6	10 528 584	35 411 774	28 532 326	39,4	92,6	35,3
Total	—	26 723 027	38 224 807	80 686 551	100,0	100,0	100,0

Les résultats montrent que la plateforme de déversement ponctuelle présente un profil fonctionnel dominé par la prédisposition structurale, qui représente 58,7 % des points classifiés. La dégradation progressive constitue la deuxième composante, avec 39,4 %, tandis que la libération directe de matériau représente 1,8 %. Cette distribution résulte principalement de la contribution de la stratification fracturée et des zones de joints verticaux persistants, auxquelles s'ajoutent les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement.

La plateforme de déversement étendue présente un profil nettement dominé par la dégradation progressive, qui atteint 92,6 % des points classifiés. La prédisposition structurale représente 7,3 %, tandis qu'aucun point n'a été attribué au groupe de libération directe de matériau dans cette emprise. Cette distribution est principalement attribuable à la forte représentation des surfaces altérées et, dans une moindre mesure, des zones d'influence par suintement.

Le secteur sans déversement direct présente une composition plus répartie entre les trois groupes fonctionnels. La prédisposition structurale demeure dominante, avec 48,9 %, suivie de la dégradation progressive, avec 35,3 %. La libération directe de matériau atteint 15,7 %,

soit la contribution la plus élevée de ce groupe parmi les trois contextes opérationnels. Cette contribution repose principalement sur les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, auxquelles s'ajoutent les surplombs et les cicatrices en coin.

Afin de visualiser directement ces distributions, les contributions relatives des trois groupes fonctionnels sont représentées sous la forme d'un diagramme en barres empilées à 100 % à la Figure 7.8.

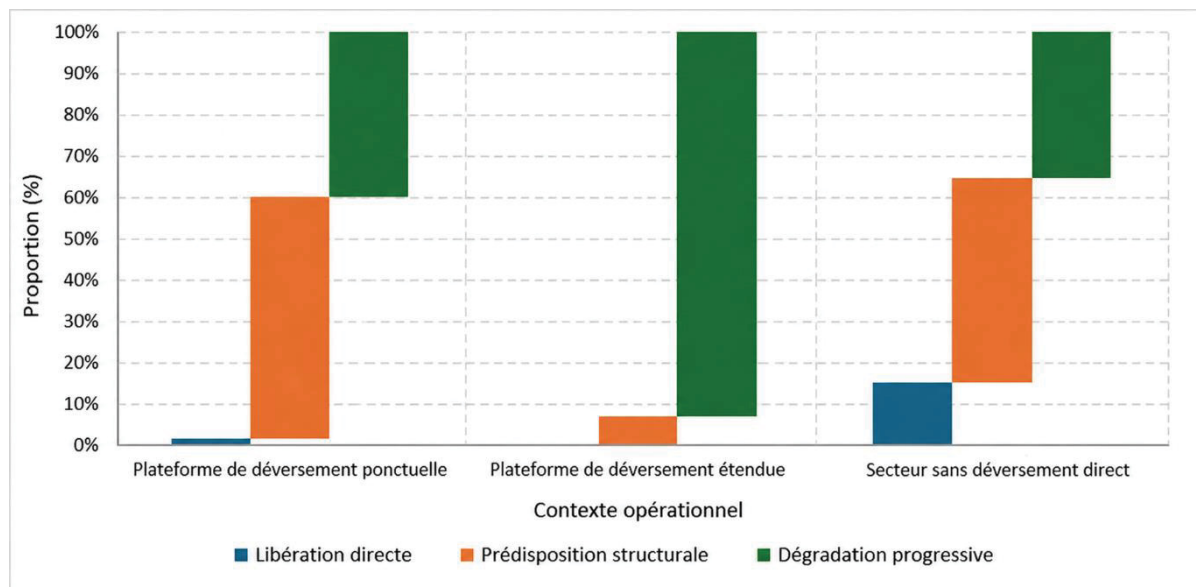


Figure 7.8 Profils fonctionnels comparés des contextes opérationnels

Les résultats mettent ainsi en évidence trois profils fonctionnels distincts : un profil dominé par la prédiposition structurale pour la plateforme de déversement ponctuelle, un profil fortement dominé par la dégradation progressive pour la plateforme de déversement étendue et un profil plus diversifié, également à dominante structurale, pour le secteur sans déversement direct. Cette synthèse constitue la base de l'interprétation comparative des signatures morpho-fonctionnelles présentée dans la section suivante.

7.6.3 Lecture complémentaire des profils opérationnels selon les zones A, B et C

Afin de maintenir le lien avec la zonation géométrique établie dans les chapitres précédents, les profils opérationnels sont replacés dans les zones A, B et C. Cette lecture complémentaire vise à préciser la répartition spatiale de la plateforme de déversement ponctuelle, de la plateforme de déversement étendue et du secteur sans déversement direct, sans reprendre l'analyse détaillée propre à chaque zone.

Les contextes opérationnels ne sont pas répartis uniformément le long de la carrière. La zone A comprend cinq plateformes de déversement ponctuelles et plusieurs secteurs sans déversement direct. La zone B comprend six plateformes de déversement ponctuelles, également séparées par des secteurs sans déversement direct. La zone C regroupe deux plateformes de déversement ponctuelles, la plateforme de déversement étendue comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775, ainsi que des secteurs sans déversement direct.

Le Tableau 7.6 synthétise cette répartition spatiale et rappelle les principales classes morphologiques observées dans chaque zone.

Tableau 7.6 Lecture spatiale complémentaire des profils opérationnels selon les zones A, B et C

Zone	Contextes opérationnels présents	Lecture dominante
Zone A	Plateforme de déversement ponctuelle et secteur sans déversement direct	Signature marquée par la stratification fracturée, les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement
Zone B	Plateforme de déversement ponctuelle et secteur sans déversement direct	Signature fortement influencée par les zones de joints verticaux persistants, les contacts intrusifs et la compartimentation structurale
Zone C	Plateforme de déversement ponctuelle, plateforme de déversement étendue et secteur sans déversement direct	Signature fortement dominée par la dégradation progressive dans l'emprise de la plateforme de déversement étendue

Dans la zone A, la plateforme de déversement ponctuelle et le secteur sans déversement direct sont répartis dans les sous-secteurs A1, A2 et A3. Les principales classes morphologiques observées sont la stratification fracturée, les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement.

Dans la zone B, les deux contextes opérationnels sont principalement associés à des portions de paroi dans lesquelles les zones de joints verticaux persistants, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et les contacts intrusifs sont fortement représentés.

Dans la zone C, les trois contextes opérationnels sont présents. La plateforme de déversement étendue se distingue par la forte représentation des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement. Des classes associées à la prédisposition structurale et des formes localisées

de libération directe de matériau sont également observées dans les portions attribuées à la plateforme de déversement ponctuelle et au secteur sans déversement direct.

Cette lecture montre qu'une même zone géométrique peut comprendre plusieurs contextes opérationnels et qu'un même contexte peut être représenté dans plusieurs zones de la carrière. Les profils présentés dans ce chapitre correspondent donc à des résultats globaux obtenus par agrégation des points attribués à chaque contexte. Leur variabilité spatiale et leur interprétation géomécanique sont examinées au chapitre 8.

7.6.4 Synthèse des profils morpho-fonctionnels

La combinaison de la distribution des neuf classes morphologiques, de leur agrégation en groupes fonctionnels et de leur répartition spatiale permet d'établir une synthèse comparative des profils morpho-fonctionnels associés aux trois contextes opérationnels. Cette synthèse décrit la composition dominante de chaque contexte sans établir de hiérarchie absolue de stabilité ou de danger.

La plateforme de déversement ponctuelle présente un profil dominé par la prédisposition structurale, qui représente 58,78 % des points classifiés. Cette composante repose principalement sur la stratification fracturée, les zones de joints verticaux persistants, les discontinuités persistantes à faible pendage et les contacts intrusifs. La dégradation progressive représente également une part importante du profil, avec 39,40 %, principalement sous la forme de surfaces altérées et de zones d'influence par suintement. La libération directe de matériau demeure limitée à 1,82 %. La plateforme de déversement ponctuelle est donc caractérisée par un profil à dominante structurale accompagné d'une composante importante de dégradation progressive.

La plateforme de déversement étendue présente le profil le plus nettement individualisé. La dégradation progressive atteint 92,64 % des points classifiés, dont 77,94 % correspondent aux surfaces altérées et 14,70 % aux zones d'influence par suintement. La prédisposition

structurale représente 7,36 %, tandis qu'aucun point n'a été attribué au groupe de libération directe de matériau. La plateforme de déversement étendue est ainsi caractérisée par une forte concentration des éléments cartographiés dans les classes associées à la dégradation progressive.

Le secteur sans déversement direct présente la composition fonctionnelle la plus diversifiée. La prédisposition structurale demeure dominante, avec 48,90 %, suivie de la dégradation progressive, avec 35,36 %. La libération directe de matériau atteint 15,74 %, soit la proportion la plus élevée observée pour ce groupe parmi les trois contextes. Cette contribution repose principalement sur les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, auxquelles s'ajoutent les surplombs et les cicatrices en coin. Le secteur sans déversement direct correspond donc à un profil diversifié à dominante structurale, marqué par une représentation notable des formes de libération directe de matériau.

Le Tableau 7.7 synthétise les profils morpho-fonctionnels obtenus pour les trois contextes opérationnels.

Tableau 7.7 Synthèse interprétative des profils morpho-fonctionnels selon les contextes opérationnels

Contexte opérationnel	Groupe fonctionnel dominant	Groupe secondaire	Profil interprétatif
Plateforme de déversement ponctuelle	Prédisposition structurale, 58,78 %	Dégradation progressive, 39,40 %	Profil à dominante structurale avec une composante importante de dégradation progressive
Plateforme de déversement étendue	Dégradation progressive, 92,64 %	Prédisposition structurale faible, 7,36 %	Profil fortement dominé par les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement
Secteur sans déversement direct	Prédisposition structurale, 48,90 %	Dégradation progressive 35,36 %, avec libération directe notable, 15,74 %	Profil diversifié à dominante structurale, marqué par une contribution notable de la libération directe de matériau

Les résultats mettent ainsi en évidence trois signatures comparatives distinctes. La plateforme de déversement ponctuelle associe une dominance structurale à une contribution importante de la dégradation progressive. La plateforme de déversement étendue se distingue par une concentration très marquée des éléments cartographiés dans le groupe de la dégradation progressive. Le secteur sans déversement direct présente la distribution la plus diversifiée et la contribution la plus élevée de la libération directe de matériau.

Ces profils constituent la synthèse quantitative des résultats du chapitre. Leur variabilité spatiale, leur interprétation géomécanique et leurs relations possibles avec les conditions structurales, hydriques et opérationnelles sont examinées au chapitre 8.

CHAPITRE 8

DISCUSSION INTÉGRÉE

8.1 Préambule

Les chapitres précédents ont permis d'établir le cadre structural et cinématique de la carrière Francon, de cartographier neuf classes morphologiques et de construire des profils morpho-fonctionnels comparatifs pour la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct.

Le présent chapitre met ces résultats en relation afin d'examiner comment la structure du massif, l'orientation des parois, les conditions hydriques, l'altération et les configurations opérationnelles contribuent à l'organisation des formes observées. L'objectif n'est pas de reprendre les résultats déjà présentés, mais d'en proposer une interprétation intégrée à l'échelle de l'ensemble de la carrière.

La discussion distingue la compatibilité cinématique, qui permet d'identifier des mécanismes géométriquement possibles, de leur expression morphologique observée ou de leurs indices d'expression antérieure dans les parois. Elle s'appuie également sur la complémentarité entre les neuf classes morphologiques et les trois groupes fonctionnels : la prédisposition structurale, la dégradation progressive et la libération directe de matériau.

Une attention particulière est accordée à la variabilité spatiale des signatures morpho-fonctionnelles. La zone C occupe une place centrale dans cette analyse, puisqu'elle réunit les trois contextes opérationnels dans un même secteur et permet de comparer directement leurs expressions locales.

Le chapitre présente d'abord l'organisation générale des signatures morpho-fonctionnelles à l'échelle de la carrière, puis examine les relations entre la structure, la compatibilité cinématique, la morphologie et les contextes opérationnels. Il discute ensuite les apports, les limites et les implications de l'approche pour la surveillance et la gestion géotechnique des parois.

8.2 De la prédisposition structurale à son expression morphologique

La mise en relation des résultats structuraux, cinématiques et morphologiques montre que les formes observées dans la carrière Francon s'inscrivent dans une architecture rocheuse commune, mais qu'elles ne s'expriment pas de manière uniforme le long des parois. La stratification, les familles de joints, leurs intersections et l'orientation locale des fronts définissent un cadre de prédisposition géométrique. La morphologie visible traduit ensuite, de manière variable, l'expression de cette prédisposition sous la forme d'une segmentation du massif, d'une individualisation de blocs, de traces de détachement ou d'une dégradation progressive. Cette distinction est fondamentale : la structure définit les configurations géométriquement possibles, tandis que la morphologie indique les secteurs où ces configurations se manifestent ou ont laissé des traces observables.

8.2.1 Architecture structurale commune de la carrière

L'architecture structurale de la carrière Francon repose sur l'association de la stratification faiblement inclinée S0 et de trois familles de joints à fort pendage, F1, F2 et F3. Cette fabrique constitue la trame géométrique commune aux zones A, B et C. Elle organise les bancs, segmente le massif et délimite des volumes rocheux susceptibles de s'individualiser au voisinage des faces libres.

La stratification S0, dont l'orientation moyenne est de $7^\circ/12^\circ$, constitue la structure la plus persistante. Elle organise le massif en bancs subhorizontaux et contribue à la géométrie étagée des fronts rocheux. Dans les modèles tridimensionnels, son expression est principalement reconnue par la stratification fracturée et par certaines discontinuités persistantes à faible pendage. Son rôle ne se limite toutefois pas à celui d'une surface potentiellement compatible avec un mouvement.

Elle contrôle surtout l'organisation des bancs et forme une limite structurale susceptible d'interagir avec les joints raides, les contrastes lithologiques et les surfaces exposées.

Les familles F1, F2 et F3 recoupent la stratification selon plusieurs directions. La famille F1 présente une orientation moyenne de $83^{\circ}/179^{\circ}$, la famille F2 de $88^{\circ}/237^{\circ}$ et la famille F3 de $82^{\circ}/122^{\circ}$. Leur fort pendage favorise une segmentation verticale ou oblique du massif et limite la continuité latérale des bancs. Leur expression morphologique apparaît notamment sous la forme de zones de joints verticaux persistants, de fractures ouvertes et de masses rocheuses compartimentées.

Les intersections entre ces familles accentuent la compartimentation tridimensionnelle du massif. Deux joints raides peuvent délimiter latéralement un volume rocheux, tandis que leur combinaison avec la stratification peut produire des blocs tabulaires, prismatiques ou en coin. La forme et le degré d'individualisation de ces volumes dépendent toutefois de la persistance, de l'espacement, de l'ouverture et de la continuité réelle des discontinuités. L'orientation seule ne suffit donc pas à déterminer leur expression morphologique.

La relation entre la fabrique structurale et la face libre constitue également un contrôle déterminant. Les orientations représentatives des parois varient entre les sous-secteurs A1, A2 et A3 ainsi qu'entre les zones B et C. Une même famille de discontinuités peut ainsi être fortement exposée dans un secteur et demeurer peu visible dans un autre. Ces variations influencent la possibilité pour les structures de déboucher vers la paroi, la géométrie des volumes délimités et la visibilité des formes qui leur sont associées.

L'architecture structurale de la carrière peut ainsi être résumée par quatre composantes complémentaires : la stratification organise les bancs, les joints raides les segmentent, leurs intersections délimitent les volumes rocheux et l'orientation de la face libre contrôle leur exposition. Cette combinaison constitue le cadre commun à partir duquel se développent les signatures morpho-structurales contrastées observées dans les zones A, B et C.

8.2.2 Compatibilité cinématique et expression morphologique des mécanismes

L'analyse cinématique directionnelle a permis d'identifier les mécanismes géométriquement admissibles à partir des orientations des familles structurales et des parois. Les résultats détaillés ont été présentés au chapitre 5. Ils sont repris ici de manière synthétique afin d'être mis en relation avec les formes morphologiques cartographiées et d'en examiner la cohérence géomécanique. Le glissement en coin constitue le mécanisme le plus fréquemment compatible avec les orientations analysées, tandis que le glissement planaire et le basculement apparaissent dans des configurations plus localisées.

Comme l'illustre la Figure 8.1a, cette hiérarchie fournit un cadre de lecture géométrique à l'échelle de la carrière, tandis que la Figure 8.1c en présente une synthèse par secteur. Cette compatibilité ne démontre toutefois ni l'activation actuelle ni l'occurrence effective de ces mécanismes.

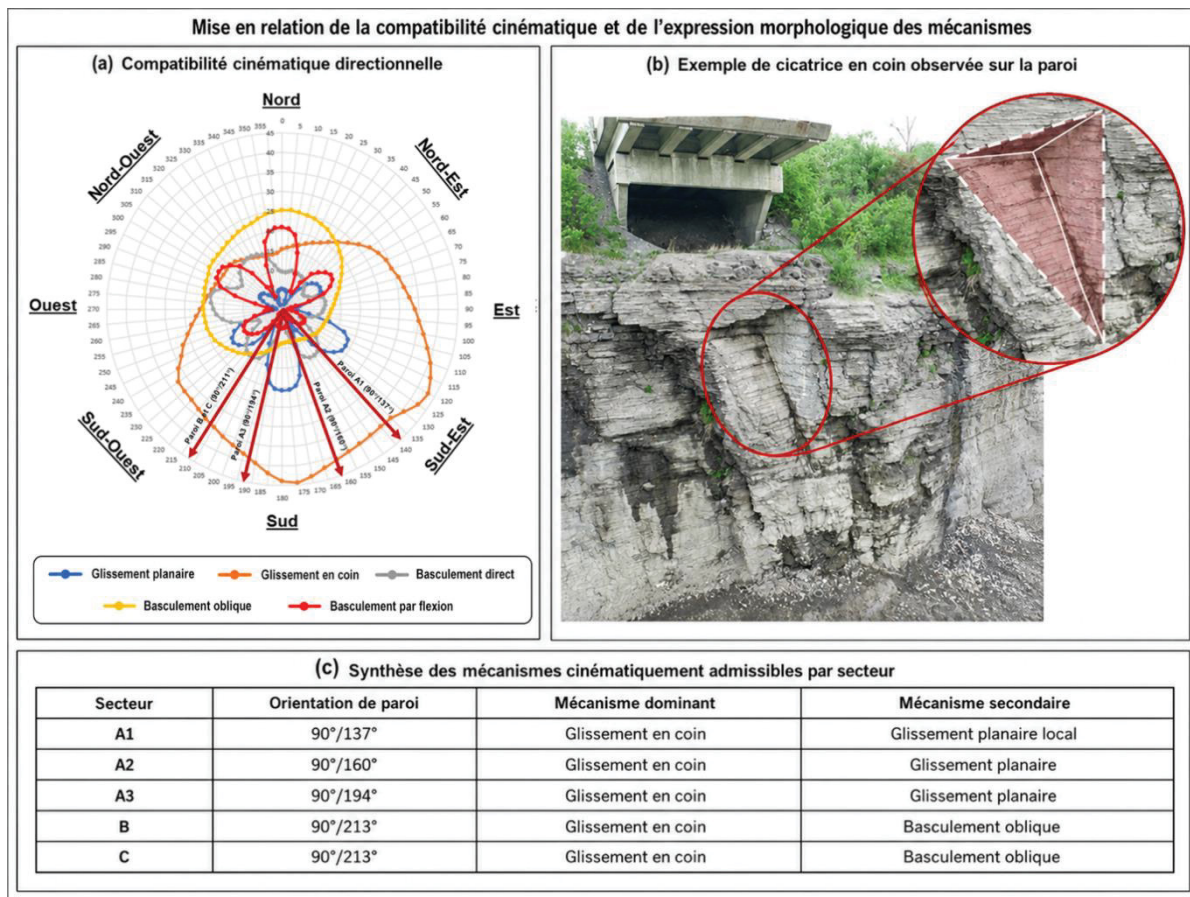


Figure 8.1 Mise en relation de la compatibilité cinématique et de l'expression morphologique des mécanismes : (a) compatibilité cinématique directionnelle à l'échelle des secteurs étudiés ; (b) exemple de cicatrice en coin observée sur la paroi et interprétée comme une trace morphologique de détachement antérieur ; (c) synthèse des mécanismes cinématiquement admissibles par secteur

La compatibilité cinématique traduit uniquement la présence de relations angulaires favorables entre les discontinuités et la face libre. Elle ne tient pas compte de manière complète de la persistance réelle des plans, de leur ouverture, de leur rugosité, de leur remplissage, de la présence de ponts rocheux, des conditions hydriques ou de la résistance au cisaillement mobilisable. Une configuration géométriquement admissible peut donc demeurer sans expression morphologique visible.

La cartographie tridimensionnelle apporte un niveau d'information complémentaire en localisant les secteurs où la prédisposition structurale s'exprime dans la géométrie du massif. La stratification fracturée, les zones de joints verticaux persistants et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts montrent que la segmentation structurale est visible sur plusieurs portions de paroi. Ces formes ne témoignent pas nécessairement d'un mouvement actif, mais elles confirment le rôle de l'architecture du massif dans l'organisation morphologique observée.

Les cicatrices en coin constituent l'exemple le plus direct de mise en relation entre la compatibilité cinématique et l'expression morphologique. Comme le montre la Figure 8.1b, leur géométrie, délimitée par des surfaces planes sécantes, est cohérente avec la libération d'un volume rocheux contrôlé par l'intersection de discontinuités. Lorsqu'une telle géométrie concorde avec une combinaison structurale cinématiquement admissible, la cicatrice peut être interprétée comme une trace morphologique d'un détachement antérieur, plutôt que comme une simple possibilité géométrique.

Cette correspondance demeure toutefois locale. Toutes les intersections structuralement favorables ne sont pas associées à une cicatrice visible. Dans certains cas, la persistance des discontinuités peut être insuffisante, des ponts rocheux peuvent maintenir le volume en place ou la géométrie du système peut ne pas permettre un débouché complet vers la face libre. Inversement, certaines cicatrices observées dans les modèles tridimensionnels ne permettent pas toujours d'identifier avec certitude les plans structuraux ayant contrôlé le détachement.

Le même raisonnement s'applique au glissement planaire et au basculement. Des discontinuités persistantes à faible pendage peuvent localement satisfaire les conditions géométriques d'un mécanisme planaire sans traduire une rupture exprimée. Elles peuvent également correspondre à des plans de stratification simplement exposés ou altérés. De même, des joints raides peuvent être compatibles avec un basculement sans qu'une rotation nette ou une inclinaison manifeste des blocs soit observable.

Le croisement entre l'analyse cinématique et la cartographie morphologique permet ainsi de distinguer trois niveaux d'interprétation : (i) une prédisposition géométrique, lorsque les

orientations sont compatibles avec un mécanisme ; (ii) une expression morphologique locale, lorsque la segmentation, l'ouverture ou l'individualisation des blocs est visible ; et (iii) une trace de détachement antérieur, lorsqu'une cicatrice cohérente avec la géométrie structurale est observée. Cette distinction évite d'assimiler toute compatibilité cinématique à une rupture effectivement exprimée et permet de préciser la portée géomécanique des formes cartographiées.

8.2.3 Formes à contrôle structural direct et formes à association contextuelle

Les neuf classes morphologiques ne présentent pas toutes le même degré de correspondance avec l'architecture structurale. Certaines sont directement définies par la géométrie des discontinuités, tandis que d'autres résultent d'interactions plus complexes entre la structure, l'eau, la lithologie, l'altération et les conditions d'exposition. Il est donc nécessaire de distinguer les formes à contrôle structural direct de celles dont la relation avec la structure demeure principalement contextuelle.

Les zones de joints verticaux persistants constituent l'expression la plus directe des familles F1, F2 et F3. Leur continuité, leur fort pendage et leur organisation en corridors traduisent explicitement la segmentation du massif selon les directions structurales dominantes. Leur présence indique une prédisposition à la compartimentation, sans toutefois démontrer que les blocs délimités disposent d'une liberté cinématique suffisante pour se déplacer.

La stratification fracturée présente également une association structurale forte. Elle traduit la fragmentation ou l'interruption des bancs suivant S0 et résulte souvent de l'interaction entre la stratification et les joints à fort pendage. Cette classe rend visible l'organisation en bancs du massif et son degré de segmentation, sans correspondre à elle seule à un mécanisme de rupture démontré. Elle constitue avant tout une expression morphologique de la prédisposition structurale.

Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts sont également fortement liées à l'architecture structurale. Elles résultent de la combinaison de plusieurs familles de discontinuités et traduisent un degré avancé d'individualisation des volumes rocheux. Contrairement aux simples zones de joints persistants, elles montrent une ouverture visible des fractures et une désolidarisation partielle des blocs. Elles occupent ainsi une position intermédiaire entre la segmentation structurale et une

expression plus avancée de la libération de matériau, sans permettre de déterminer la mobilité actuelle des volumes.

Certaines cicatrices en coin présentent aussi un contrôle structural direct lorsque leurs limites correspondent à deux surfaces planes sécantes compatibles avec les familles identifiées. Leur géométrie constitue alors une trace de détachement antérieur cohérente avec une configuration en coin. Cette interprétation ne peut toutefois pas être systématiquement étendue à toutes les cavités angulaires, puisque la lisibilité des plans et leur rattachement aux familles structurales varient selon la qualité des modèles et le degré d'exposition des surfaces.

Les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement présentent une relation plus indirecte avec la structure. Leur localisation peut être guidée par des joints, des plans de stratification ou des contacts lithologiques agissant comme chemins préférentiels de circulation de l'eau. Leur expression dépend cependant aussi de la durée d'exposition, des cycles de gel-dégel, de l'humidité, des contrastes minéralogiques et des conditions de drainage. La structure constitue donc un cadre de localisation et de circulation, mais elle ne représente pas à elle seule l'origine de la dégradation.

Les surplombs présentent également une association variable avec l'architecture structurale. Certains résultent d'une perte de support le long d'un plan de stratification ou de l'érosion différentielle d'un niveau moins résistant. D'autres peuvent être associés à l'intersection de joints ou au détachement d'un volume adjacent. Leur seule géométrie en porte-à-faux ne permet donc pas d'attribuer un mécanisme unique. Leur interprétation doit tenir compte de la nature du sous-creusement, de la continuité des plans adjacents et du contexte lithostructural local.

Les contacts intrusifs constituent enfin des formes influencées par plusieurs facteurs. Ils représentent des interfaces lithologiques persistantes susceptibles d'introduire des contrastes de résistance, de fracturation, d'altération et de perméabilité. Leur présence peut localement favoriser la segmentation du massif ou la concentration de la dégradation, mais elle ne constitue pas en elle-même une manifestation de mouvement. Leur rôle dépend de l'état du contact, de la compétence relative des matériaux, de la présence d'eau et de leur relation avec les autres familles de discontinuités.

Cette distinction montre que la structure intervient selon plusieurs niveaux. Elle peut définir directement la forme cartographiée, comme dans le cas des joints persistants ou de la stratification fracturée. Elle peut contrôler la géométrie d'une trace de détachement, comme pour certaines cicatrices en coin. Elle peut également agir indirectement en guidant la circulation de l'eau, l'altération ou l'érosion différentielle, comme dans le cas des zones d'influence par suintement, des surfaces altérées, des surplombs et des contacts intrusifs.

Cette distinction confirme aussi l'intérêt de conserver les neuf classes morphologiques. Des classes appartenant à un même groupe fonctionnel peuvent traduire des configurations différentes. La stratification fracturée et les zones de joints verticaux persistants relèvent toutes deux de la prédisposition structurale, mais la première exprime principalement l'organisation en bancs, tandis que la seconde traduit une compartimentation par des fractures raides. De même, les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement appartiennent au groupe de la dégradation progressive, tout en renseignant respectivement sur l'état des surfaces et sur la circulation locale de l'eau.

L'agrégation en trois groupes fonctionnels fournit ainsi une lecture synthétique sans remplacer l'analyse détaillée des classes. La représentation quantitative doit également être interprétée avec prudence : une classe peu étendue, telle qu'une cicatrice en coin, un surplomb ou une masse rocheuse fracturée à blocs ouverts, peut conserver une importance géomécanique locale. L'interprétation repose donc conjointement sur la nature de la forme, sa proportion et son organisation spatiale.

Dans l'ensemble, les résultats confirment que l'analyse cinématique et la cartographie morphologique ne sont ni redondantes ni interchangeables. L'analyse cinématique définit un domaine de possibilité géométrique à partir de l'architecture structurale et de l'orientation des parois. La cartographie morphologique localise les secteurs dans lesquels cette prédisposition se manifeste par une segmentation visible, une individualisation de blocs, une dégradation localisée ou une trace de détachement antérieur. Leur intégration permet ainsi de passer de l'identification

de configurations structurales possibles à une interprétation spatialement explicite de leur expression observable sur les parois de la carrière Francon.

8.3 Interprétation comparative des signatures morpho-fonctionnelles

Les profils établis dans la section précédente montrent que les trois contextes opérationnels se distinguent par des compositions morphologiques et fonctionnelles contrastées. Leur interprétation ne peut toutefois reposer uniquement sur les proportions mesurées. Elle doit également tenir compte de la nature des classes dominantes, de leur regroupement fonctionnel, de leur organisation spatiale, du cadre structural du massif rocheux, de la géométrie des parois ainsi que des conditions locales d'altération et de circulation de l'eau.

Une attention particulière est accordée à la zone C, puisqu'elle constitue le seul secteur dans lequel les trois contextes opérationnels sont représentés au sein d'une même zone : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. Cette configuration offre un cadre particulièrement pertinent pour comparer les signatures morpho-fonctionnelles tout en limitant, autant que possible, l'influence des différences géologiques et géométriques observées entre les zones A, B et C. Les observations réalisées dans la zone C ne remplacent toutefois pas les résultats obtenus dans les autres zones. Elles permettent plutôt d'appuyer une lecture comparative plus intégrée des contextes opérationnels.

L'objectif de cette section est donc d'interpréter la portée géomécanique apparente de chaque signature morpho-fonctionnelle et de mettre en évidence les principales différences entre les contextes opérationnels. L'analyse demeure descriptive et comparative. Elle ne vise pas à établir une relation causale directe entre les opérations de déversement et les formes cartographiées, mais à examiner comment les signatures observées s'inscrivent dans l'interaction entre la structure géologique, l'état apparent des parois, les conditions hydriques et les configurations opérationnelles propres à chaque secteur.

8.3.1 Signature du contexte de plateforme de déversement ponctuelle

La plateforme de déversement ponctuelle correspond aux portions de paroi situées au droit des plateformes ponctuelles ou comprises dans leur zone d'influence locale, telle qu'elle a été définie dans la méthodologie. À l'échelle de la carrière Francon, ce contexte regroupe les plateformes réparties dans les zones A, B et C. Il représente ainsi une configuration opérationnelle spatialement localisée dont la signature morphologique doit être interprétée conjointement avec la géométrie des parois, la stratification S0, les familles de discontinuités, les conditions hydriques et la position des banquettes.

La Figure 8.2 présente, à titre illustratif, deux plateformes de déversement ponctuelles situées dans la zone C, soit la plateforme no 12, au chaînage 1+320, et la plateforme no 13, au chaînage 1+400. Le choix de la zone C s'explique par le fait qu'elle regroupe, au sein d'un même secteur, la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct. Elle offre donc un cadre spatial particulièrement pertinent pour illustrer et comparer l'expression locale des signatures morpho-fonctionnelles. Les deux plateformes présentées ne sont toutefois pas considérées comme représentatives, à elles seules, de l'ensemble des plateformes de déversement ponctuelles de la carrière.

Les proportions illustrées à la Figure 8.2 sont calculées séparément pour chacune des deux plateformes et fournissent une lecture locale complémentaire. L'interprétation globale de la plateforme de déversement ponctuelle repose, quant à elle, sur l'ensemble des points classifiés associés aux plateformes des zones A, B et C. La figure comprend également l'échelle des neuf classes morphologiques et une synthèse des groupes fonctionnels caractérisant ce contexte à l'échelle de la carrière.

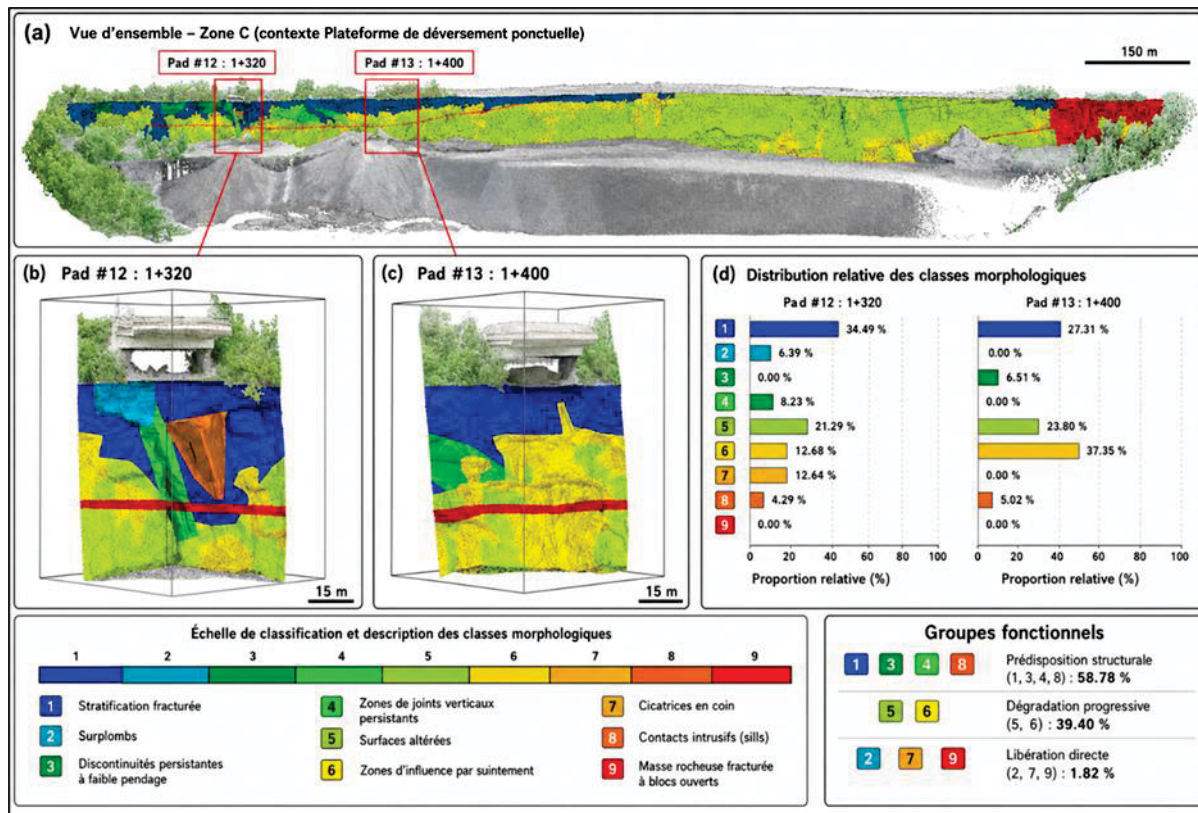


Figure 8.2 Illustration locale de la signature morpho-fonctionnelle de la plateforme de déversement ponctuelle dans la zone C : (a) vue d'ensemble classifiée de la paroi et localisation des plateformes nos 12 et 13 ; (b) et (c) détails morphologiques tridimensionnels des deux plateformes ; (d) comparaison des proportions relatives des classes morphologiques calculées séparément pour les deux secteurs. La partie inférieure présente l'échelle des neuf classes morphologiques ainsi que la synthèse des groupes fonctionnels de la plateforme de déversement ponctuelle à l'échelle de la carrière

Les résultats montrent que le profil fonctionnel de la plateforme de déversement ponctuelle est dominé par la prédisposition structurale, qui représente 58,78 % des points classifiés. Cette dominance résulte de la contribution combinée de la stratification fracturée, des zones de joints verticaux persistants, des discontinuités persistantes à faible pendage et des contacts intrusifs. Parmi les classes morphologiques, la stratification fracturée est la plus représentée, avec 27,13 %, suivie des surfaces altérées, avec 23,70 %, et des zones de joints verticaux persistants, avec 23,48 %.

Cette distribution met en évidence une signature morpho-structurale dans laquelle l'architecture du massif rocheux constitue la composante principale. Les plateformes de déversement ponctuelles sont localisées dans des secteurs où la stratification S0, les familles de joints et les contacts géologiques contrôlent l'organisation, la segmentation et la continuité des formes visibles. La représentation élevée de la stratification fracturée et des zones de joints verticaux persistants indique ainsi que l'état apparent des parois situées à proximité des plateformes dépend fortement de la prédisposition structurale du massif. La signature observée ne peut donc pas être interprétée uniquement comme l'expression d'une dégradation progressive associée au contexte opérationnel.

La dégradation progressive constitue néanmoins une composante importante du profil, avec 39,40 % des points classifiés. Elle est principalement portée par les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement. Leur présence traduit une évolution apparente de l'état superficiel des parois susceptible d'être modulée par la circulation locale de l'eau, l'humidité, l'exposition aux cycles climatiques ainsi que l'accumulation ou la redistribution de neige et de matériaux sur les banquettes. Ces facteurs peuvent agir sur un massif déjà structuré et fracturé, sans que leurs contributions respectives puissent être isolées à partir de la seule cartographie morphologique. Les résultats mettent donc en évidence une association spatiale avec la plateforme de déversement ponctuelle, sans démontrer que les opérations de déversement sont directement à l'origine des formes observées.

La libération directe de matériau demeure faiblement représentée, avec 1,82 % des points classifiés. Les surplombs, les cicatrices en coin et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts occupent ainsi une faible proportion de l'inventaire classifié. Cette représentation limitée ne réduit toutefois pas leur importance géomécanique locale. Une forme de faible étendue peut conserver une signification particulière lorsqu'elle coïncide avec une discontinuité persistante, une ouverture marquée ou une géométrie compatible avec un détachement.

Dans l'ensemble, la plateforme de déversement ponctuelle présente une signature dominée par la prédisposition structurale, accompagnée d'une composante importante de dégradation progressive. Cette combinaison montre que ces plateformes doivent être interprétées dans leur cadre morpho-

structural local et non comme des unités opérationnelles isolées. La lecture des formes observées nécessite ainsi de distinguer l'influence de l'architecture géologique, l'état apparent des surfaces et les conditions propres à chaque plateforme.

8.3.2 Signature du contexte de plateforme de déversement étendue

La plateforme de déversement étendue correspond à l'emprise opérationnelle continue située dans la zone C, entre les chaînages 1+435 et 1+775. Contrairement à la plateforme de déversement ponctuelle, constituée de secteurs spatialement localisés dans les zones A, B et C, cette plateforme s'étend sur une portion continue de la paroi. Elle offre ainsi un cadre particulier pour examiner une signature morphologique susceptible d'intégrer, sur une plus grande extension spatiale, les effets combinés de l'état initial du massif, de l'accumulation et de la redistribution des matériaux, des apports d'eau de fonte et des conditions hydriques locales.

Cette configuration doit toutefois être interprétée avec prudence. Puisque la plateforme de déversement étendue est uniquement présente dans la zone C, sa signature ne peut être complètement dissociée des caractéristiques géologiques, morphologiques et hydriques propres à cette zone. Elle constitue néanmoins une unité opérationnelle distincte, dont la continuité spatiale permet une comparaison avec les plateformes de déversement ponctuelles et les portions de paroi attribuées au secteur sans déversement direct.

Les résultats montrent que la plateforme de déversement étendue présente une signature très fortement dominée par la dégradation progressive, qui représente 92,64 % des points classifiés. Cette dominance repose principalement sur les surfaces altérées, qui atteignent 77,94 %, et sur les zones d'influence par suintement, qui représentent 14,70 %. Ces deux classes constituent ainsi l'essentiel de la signature morphologique associée à cette emprise.

La Figure 8.3 illustre cette organisation morpho-fonctionnelle dans la zone C. Le panneau (a) présente la vue classifiée de la paroi et localise la plateforme de déversement étendue entre les chaînages 1+435 et 1+775. Le panneau (b) montre un détail tridimensionnel de cette portion de paroi, tandis que le panneau (d) présente la distribution relative des classes morphologiques. La

partie inférieure rappelle les neuf classes cartographiées et leur regroupement fonctionnel. L'ensemble met en évidence l'extension spatiale des surfaces altérées et des zones d'influence par suintement, ainsi que la faible représentation des formes structurales individualisées.

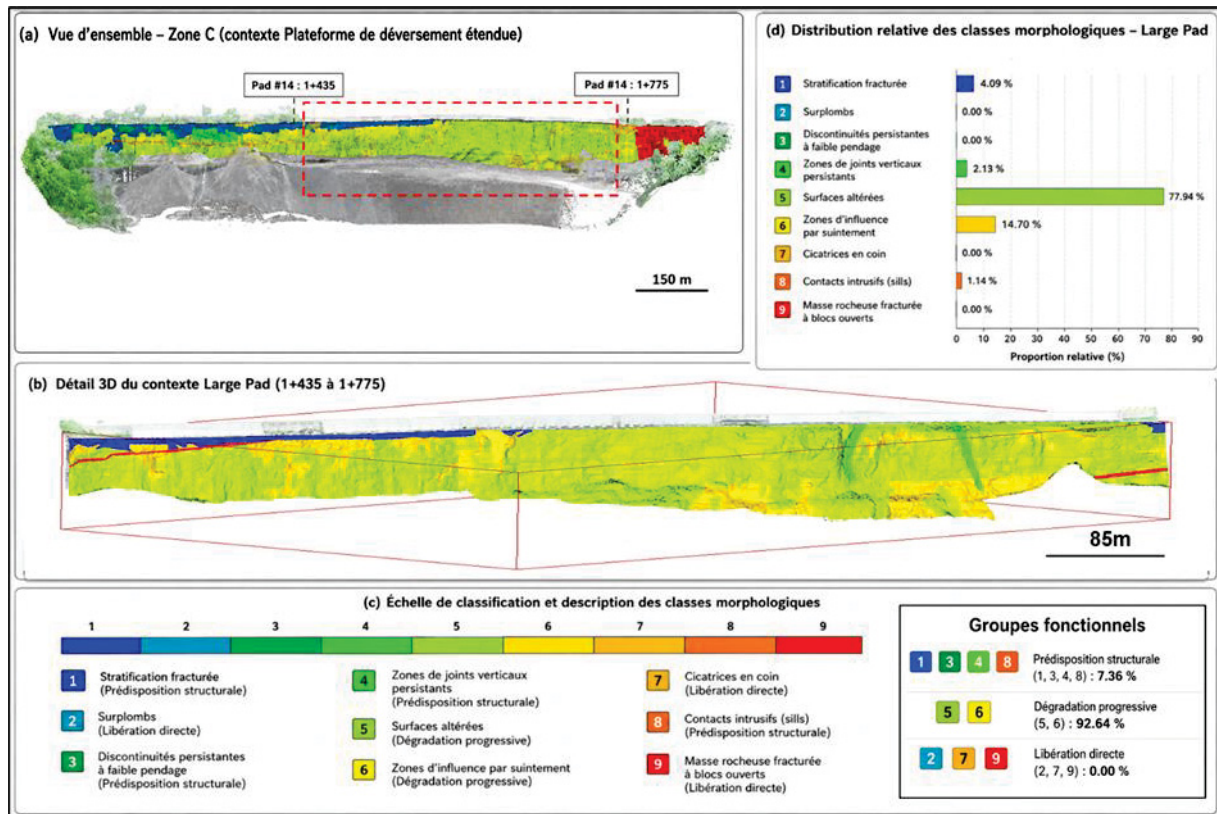


Figure 8.3 I Illustration de la signature morpho-fonctionnelle de la plateforme de déversement étendue dans la zone C : (a) vue d'ensemble classifiée de la zone C et localisation de l'emprise comprise entre les chaînages 1+435 et 1+775 ; (b) détail tridimensionnel de cette portion de paroi ; (c) échelle de classification et description des neuf classes morphologiques ; (d) distribution relative des classes dans la plateforme de déversement étendue. Le panneau inférieur droit présente la répartition des groupes fonctionnels et met en évidence la dominance de la dégradation progressive

Cette distribution distingue nettement la plateforme de déversement étendue des deux autres contextes opérationnels. Alors que la plateforme de déversement ponctuelle présente une signature dominée par la prédisposition structurale et que le secteur sans déversement direct conserve une

composition plus diversifiée, la plateforme de déversement étendue se caractérise par une concentration très marquée des formes associées à l'altération des surfaces et à l'influence de l'eau. Son profil correspond ainsi à une expression morphologique relativement continue et diffuse de la détérioration, plutôt qu'à une concentration de formes discrètes associées à la libération directe de matériau.

Les surfaces altérées occupent de larges portions de la paroi et sont fréquemment associées à des textures relativement lisses, à des secteurs de suintement ainsi que, localement, à de la végétation développée le long des discontinuités. Cette association est compatible avec une évolution progressive de l'état de surface sous l'effet combiné de l'humidité, de la circulation de l'eau, de l'altération et de l'exposition aux cycles climatiques. Les données disponibles ne permettent toutefois pas de quantifier directement une perte de résistance mécanique ni d'isoler la contribution individuelle de chacun de ces facteurs.

Cette interprétation rejoint les observations de Sadeghi et Aubertin (2025), obtenues sur cette même paroi à partir d'une analyse topographique de données LiDAR. Leur étude a mis en évidence des secteurs caractérisés par une détérioration marquée des surfaces, des indices d'érosion mécanique et des conditions de drainage défavorables dans les portions associées aux activités de déversement. La convergence générale entre ces observations et la forte représentation des surfaces altérées dans le présent travail appuie l'interprétation d'une signature dominée par la dégradation progressive. Les deux analyses demeurent toutefois complémentaires, puisque les formes sont ici examinées à partir d'une classification morpho-fonctionnelle spécifiquement orientée vers l'expression apparente des mécanismes observables.

La prédisposition structurale représente seulement 7,36 % des points classifiés. Elle est principalement associée à la stratification fracturée, aux zones de joints verticaux persistants et aux contacts intrusifs. Cette faible proportion ne signifie pas que l'architecture du massif est absente ou mécaniquement négligeable. Elle indique plutôt que, dans l'inventaire morphologique de cette emprise, les éléments structuraux individualisés sont spatialement dominés, et possiblement partiellement masqués, par les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement. La

structure conserve donc un rôle de contrôle, même si elle est moins directement exprimée dans la distribution quantitative des classes.

Aucune forme appartenant au groupe de la libération directe de matériau n'a été identifiée parmi les points classifiés de la plateforme de déversement étendue. Les surplombs, les cicatrices en coin et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts ne contribuent donc pas au profil quantitatif de cette unité. Cette absence ne démontre toutefois pas l'inexistence de toute possibilité de détachement. Elle signifie uniquement que les formes visibles retenues comme indicateurs de libération directe n'ont pas été cartographiées à l'intérieur de cette emprise au moment de l'analyse.

Dans l'ensemble, la plateforme de déversement étendue présente la signature la plus distincte des trois contextes opérationnels. Elle est caractérisée par une dominance presque exclusive de la dégradation progressive, portée principalement par les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement. Cette configuration souligne le rôle central de l'état apparent des surfaces et des conditions hydriques dans l'expression morphologique de la paroi.

Cette association spatiale ne démontre toutefois pas que les opérations de déversement étendu sont directement à l'origine des formes observées. La signature résulte vraisemblablement de l'interaction entre la géométrie locale de la paroi, l'architecture du massif, la circulation de l'eau, les conditions climatiques, l'accumulation de matériaux et l'évolution propre de la zone C. Elle justifie néanmoins de considérer la plateforme de déversement étendue comme une unité opérationnelle spécifique dans l'interprétation des signatures morpho-fonctionnelles apparentes, plutôt que de l'intégrer à une lecture globale et indifférenciée de la zone C.

8.3.3 Signature du contexte de secteur sans déversement direct

Le secteur sans déversement direct correspond aux portions de paroi situées entre les plateformes de déversement et auxquelles aucun déversement direct n'est attribué selon les règles d'affectation spatiale retenues dans cette étude. Il constitue une unité comparative importante, puisqu'il permet de distinguer les portions directement associées aux plateformes de celles qui ne présentent pas

cette relation opérationnelle immédiate. Il ne doit toutefois pas être interprété comme un témoin expérimental strict, comme une zone entièrement soustraite aux influences opérationnelles voisines ni comme un secteur exempt de processus de détérioration.

À l'échelle de la carrière, le secteur sans déversement direct présente un profil plus diversifié que ceux des deux autres contextes opérationnels. La prédisposition structurale demeure le groupe fonctionnel dominant, avec 48,90 % des points classifiés. Cette contribution est principalement associée à la stratification fracturée, aux zones de joints verticaux persistants, aux discontinuités persistantes à faible pendage et aux contacts intrusifs. Parmi les classes morphologiques, la stratification fracturée représente 24,51 % des points classifiés, tandis que les zones de joints verticaux persistants en représentent 19,00 %. Cette distribution confirme que l'expression morphologique de ces secteurs demeure fortement contrôlée par l'architecture du massif rocheux.

La dégradation progressive constitue également une composante importante du profil, avec 35,36 % des points classifiés. Elle est principalement portée par les surfaces altérées, qui représentent 17,95 %, et par les zones d'influence par suintement, qui atteignent 17,42 %. Ces proportions montrent que l'absence de déversement direct au droit d'une portion de paroi ne signifie pas l'absence d'altération, de circulation de l'eau ou d'évolution de l'état des surfaces. Les secteurs concernés demeurent soumis au ruissellement, à l'infiltration locale, aux variations climatiques, aux cycles de gel-dégel et à l'évolution naturelle d'un massif déjà fracturé.

La principale particularité du secteur sans déversement direct réside dans la contribution relativement élevée du groupe de libération directe de matériau, qui atteint 15,74 %. Cette valeur est supérieure à celle obtenue pour la plateforme de déversement ponctuelle et contraste avec l'absence de formes de libération directe cartographiées dans la plateforme de déversement étendue. Cette contribution est principalement portée par les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, qui représentent 13,36 % des points classifiés, auxquelles s'ajoutent les surplombs et, plus localement, les cicatrices en coin.

Cette proportion ne doit toutefois pas être interprétée comme une fréquence de rupture ni comme une probabilité directe de détachement. Elle traduit la représentation relative, dans l'inventaire

cartographié, des formes morphologiques associées à une libération possible ou antérieure de matériau. Leur portée géomécanique dépend également de leur géométrie, de leur position dans la paroi, de leur association avec les discontinuités et de leur compatibilité cinématique.

La Figure 8.4 présente, à titre illustratif, une portion du secteur sans déversement direct située dans la zone C, entre les chaînages 1+775 et 1+800. Le choix de cet exemple s'inscrit dans la comparaison des trois contextes opérationnels présents dans cette zone. Il ne vise toutefois pas à représenter l'ensemble des portions sans déversement direct de la carrière, mais à illustrer l'expression locale que peut prendre leur signature morpho-fonctionnelle.

Le panneau (a) localise le secteur dans la vue d'ensemble de la zone C, tandis que le panneau (b) présente son détail tridimensionnel classifié. Le panneau (c) rappelle l'échelle des neuf classes morphologiques et le panneau (d) montre leur distribution relative dans le secteur illustré. Pour cet exemple local, la dégradation progressive représente 50,65 % des points classifiés, la libération directe de matériau 25,61 % et la prédisposition structurale 23,74 %. Les principales classes sont les surfaces altérées, avec 31,52 %, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, avec 21,72 %, et les zones d'influence par suintement, avec 19,13 %.

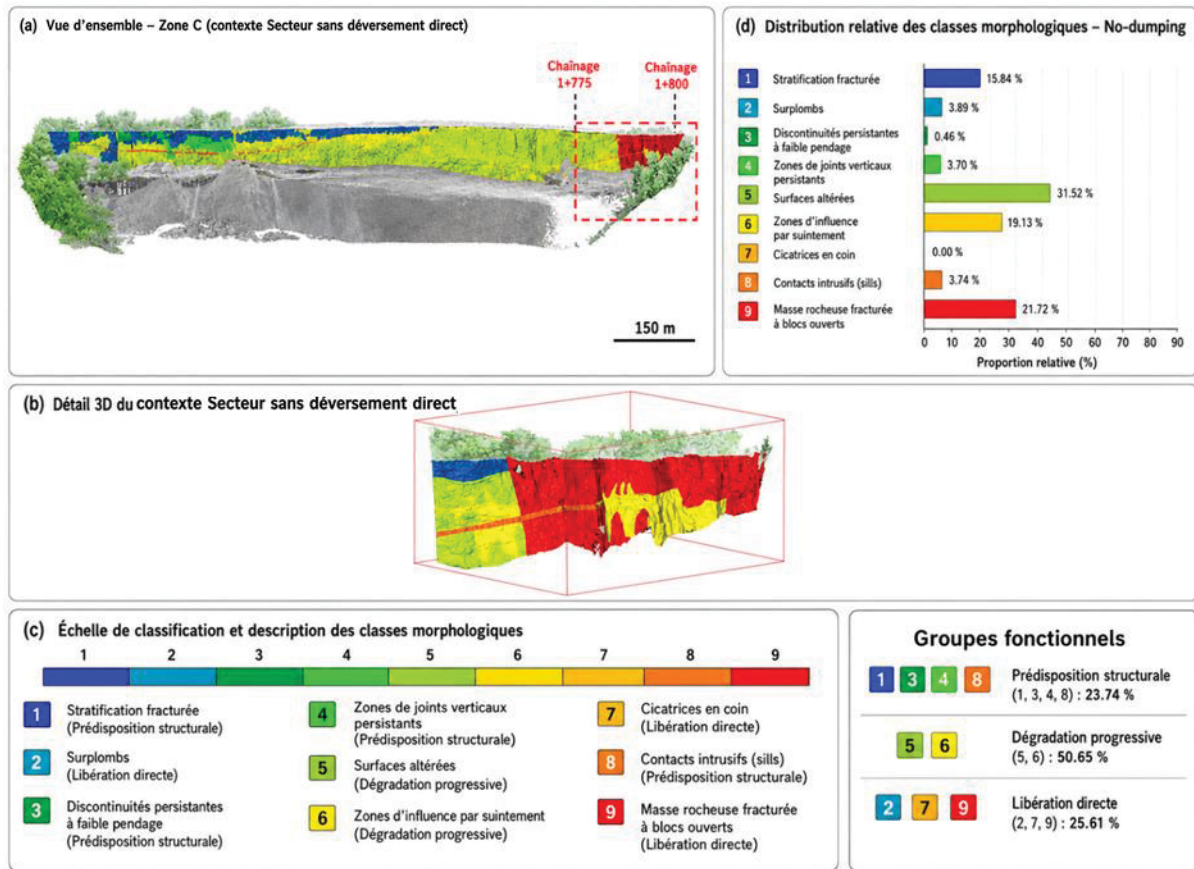


Figure 8.4 Illustration locale de la signature morpho-fonctionnelle du secteur sans déversement direct dans la zone C : (a) vue d'ensemble de la zone C et localisation du secteur compris entre les chaînages 1+775 et 1+800 ; (b) détail tridimensionnel classifié de cette portion de paroi ; (c) échelle et description des neuf classes morphologiques ; (d) distribution relative des classes et synthèse des groupes fonctionnels. Cette illustration constitue une lecture locale complémentaire et ne représente pas, à elle seule, le profil global du secteur sans déversement direct à l'échelle de la carrière

La signature de cet exemple local diffère du profil global, qui demeure dominé par la prédisposition structurale. Cette différence n'est pas contradictoire. Elle révèle plutôt l'hétérogénéité interne du secteur sans déversement direct, dont certaines portions peuvent être dominées par l'architecture structurale, alors que d'autres présentent une expression plus marquée de la dégradation progressive ou de la libération directe de matériau. La catégorie opérationnelle ne correspond donc pas à une signature morphologique uniforme.

La présence de masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, de surplombs et de cicatrices en coin montre également que les portions sans déversement direct ne sont pas nécessairement moins marquées par les formes associées à la segmentation, à l'individualisation ou au détachement antérieur de volumes rocheux. Ces formes peuvent être contrôlées par la structure du massif, la géométrie héritée de l'excavation, l'ouverture progressive des discontinuités, l'altération ou des détachements déjà exprimés. Elles confirment que le cadre géologique et morphologique demeure déterminant, même en l'absence de déversement directement associé à la paroi.

Dans l'ensemble, le secteur sans déversement direct présente un profil diversifié à dominante structurale, caractérisé par une contribution importante de la dégradation progressive et par la représentation la plus élevée des formes de libération directe parmi les trois contextes étudiés. Cette signature montre que l'état morpho-fonctionnel apparent des parois ne dépend pas uniquement de la proximité immédiate des opérations de déversement. Il résulte de l'interaction entre l'architecture du massif, la géométrie de la paroi, les conditions hydriques, l'altération et l'évolution historique des secteurs excavés. Le secteur sans déversement direct doit ainsi être considéré comme une unité comparative, et non comme une condition de référence stable ou dépourvue de formes géomécaniquement significatives.

8.4 Contribution scientifique et méthodologique de l'approche intégrée

La principale contribution scientifique et méthodologique de ce mémoire réside dans le développement d'une démarche intégrée établissant une continuité explicite entre l'acquisition des données tridimensionnelles, le traitement des modèles, la caractérisation structurale, l'analyse cinématique, la cartographie morphologique, le regroupement fonctionnel, l'intégration des contextes opérationnels et la construction de profils morpho-fonctionnels comparatifs. Cette chaîne méthodologique transforme progressivement les nuages de points bruts en un référentiel spatialement structuré et géomécaniquement interprétable. Les modèles LiDAR et photogrammétriques ne sont ainsi pas utilisés uniquement comme supports de visualisation, mais comme bases géométriques permettant d'extraire l'orientation des parois et des discontinuités,

d'évaluer la compatibilité cinématique des mécanismes possibles, puis d'identifier et de délimiter les formes visibles sur les surfaces rocheuses.

Une contribution méthodologique essentielle réside également dans la séparation maintenue entre les différentes étapes de l'interprétation. Chaque forme est d'abord reconnue à partir de critères morphologiques, géométriques, texturaux et colorimétriques, puis associée à l'une des neuf classes morphologiques. Son rôle dominant est ensuite précisé par son appartenance à l'un des trois groupes fonctionnels, soit la libération directe de matériau, la prédisposition structurale ou la dégradation progressive. Ce n'est qu'après cette classification que son association éventuelle avec une famille de discontinuités ou un mécanisme cinématiquement admissible est examinée. Cette séparation limite l'attribution prématurée d'un mécanisme de rupture à une forme sur la seule base de son apparence et permet de conserver les situations dans lesquelles le contrôle structural demeure indirect, multiple ou incertain.

L'approche se distingue également par la conservation de l'information spatiale associée à chaque élément cartographié. Chaque observation demeure reliée à sa position tridimensionnelle, à la zone géométrique dans laquelle elle se trouve, au chaînage longitudinal, au contexte opérationnel, à sa classe morphologique, à son groupe fonctionnel et, lorsque la géométrie le permet, à une association structurale ou cinématique. Cette organisation permet une lecture dépassant la simple présence ou l'absence d'une forme. Elle rend possible l'examen de sa continuité, de sa concentration, de son alignement avec une structure persistante, de sa proximité avec une plateforme de déversement ou de sa relation avec une zone de suintement, un contact lithologique ou une portion particulière de la paroi. La création de ce référentiel spatial constitue également une base réutilisable pour de futures campagnes de suivi, notamment dans une perspective multitemporelle.

Enfin, la construction de profils morpho-fonctionnels comparatifs constitue une contribution de synthèse permettant de mobiliser l'ensemble du jeu de données sans le réduire à une valeur unique. La normalisation des résultats par proportions rend comparables des unités présentant des étendues, des densités de points et des nombres d'éléments différents, notamment la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement

direct. Ces profils conservent la nature des signatures observées en distinguant la contribution des neuf classes morphologiques et des trois groupes fonctionnels.

Les profils morpho-fonctionnels ne correspondent toutefois ni à une mesure absolue de la stabilité des parois, ni à une probabilité de rupture, ni à une évaluation complète des conséquences potentielles. Leur portée demeure descriptive, spatiale et comparative. Ils permettent d'identifier les fonctions dominantes, de distinguer des configurations morphologiques contrastées et de soutenir la sélection des secteurs nécessitant une analyse géomécanique ou une surveillance plus détaillée.

Dans son ensemble, l'approche proposée fournit ainsi un cadre cohérent pour relier les observations tridimensionnelles, l'architecture structurale du massif, les mécanismes géométriquement admissibles, les formes morphologiques visibles et les usages opérationnels du site. Elle constitue une démarche adaptable aux anciennes carrières urbaines réaménagées et à d'autres parois rocheuses difficiles d'accès, tout en maintenant une distinction rigoureuse entre l'observation morphologique, l'interprétation géomécanique, la comparaison opérationnelle et l'évaluation détaillée de la stabilité.

8.5 Incertitudes, limites et domaine de validité

L'approche développée permet de documenter et de comparer les signatures morphologiques et fonctionnelles à l'échelle de la carrière Francon, mais ses résultats doivent être interprétés en tenant compte de plusieurs sources d'incertitude. Celles-ci concernent la qualité des acquisitions, la construction des modèles tridimensionnels, la cartographie morphologique, la quantification fondée sur les points, les hypothèses de l'analyse cinématique et la comparaison entre les contextes opérationnels. Ces limites ne remettent pas en cause la pertinence de la démarche, mais elles en précisent la portée et empêchent d'assimiler les résultats à une évaluation complète de la stabilité des parois.

La qualité des modèles tridimensionnels dépend d'abord de la géométrie d'acquisition, de la distance entre le capteur et la paroi, de l'angle de visée, du recouvrement entre les trajectoires et

de la complexité locale des fronts rocheux. Malgré la combinaison d'acquisitions automatisées et rapprochées, certaines portions peuvent demeurer affectées par des zones d'ombre, des occlusions ou une densité de points plus faible, notamment près des surplombs, des banquettes, des zones concaves et des secteurs difficilement accessibles. La végétation, la neige, les dépôts meubles, les débris et les surfaces masquées peuvent également limiter la visibilité de la roche en place et réduire la précision de l'interprétation locale.

La cartographie morphologique repose en partie sur une interprétation manuelle des modèles tridimensionnels, des images RGB et des cartes d'orientation. Bien que des critères explicites aient été définis pour les neuf classes, une part de jugement demeure nécessaire, en particulier lorsque les limites des formes sont diffuses ou lorsque plusieurs signatures se superposent. Les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, la stratification fracturée et certains contacts lithologiques peuvent notamment présenter des caractéristiques visuelles communes. La qualité de la classification dépend donc de la résolution géométrique, de la qualité colorimétrique et de la lisibilité des surfaces. De plus, les modèles représentent uniquement la partie visible du massif et ne permettent pas d'observer directement la continuité des discontinuités en profondeur.

La quantification fondée sur les points classifiés présente également certaines limites. Le nombre de points associé à une classe ne correspond pas exactement à une surface ou à un volume, puisque la densité du nuage peut varier selon la distance d'acquisition, l'angle d'incidence, l'exposition de la paroi et les traitements appliqués. Les proportions calculées décrivent donc la composition relative de l'inventaire classifié, et non une mesure géométrique exacte. Elles permettent de comparer les signatures dominantes, mais ne constituent ni des probabilités de rupture, ni des facteurs de sécurité, ni des niveaux absolus de stabilité. Une classe faiblement représentée peut d'ailleurs conserver une importance géomécanique locale lorsqu'elle correspond à une cicatrice en coin, à un surplomb ou à une masse rocheuse fracturée à blocs ouverts.

L'analyse cinématique repose, quant à elle, sur des orientations moyennes des parois et des familles structurales. Ces valeurs décrivent les tendances principales du massif, mais ne reproduisent pas toutes les variations locales. L'adoption d'un pendage uniforme de 90° pour les parois et d'un angle de friction représentatif facilite la comparaison directionnelle, mais constitue

une simplification. L'analyse ne tient pas compte de manière complète de la persistance réelle des discontinuités, de leur ouverture, de leur rugosité, de leur remplissage, de la résistance des ponts rocheux, des pressions d'eau ou des conditions de contrainte. Elle définit donc uniquement une compatibilité géométrique et ne permet pas de conclure à l'activation d'un mécanisme ni à la stabilité réelle des volumes concernés.

La comparaison entre la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct comporte également une incertitude spatiale et interprétative. Les emprises opérationnelles sont définies à partir du chaînage et de la relation apparente entre les plateformes et les portions de paroi, mais elles ne constituent pas des frontières physiques parfaitement déterminées. La neige, les matériaux et les eaux de fonte peuvent être redistribués latéralement au-delà des limites retenues. Par ailleurs, les secteurs sans déversement direct ne représentent pas des témoins expérimentaux stricts, puisqu'ils demeurent exposés au ruissellement, aux cycles de gel-dégel, à l'altération, à la circulation de l'eau dans le massif et aux effets hérités de l'excavation. Les usages historiques du site et les configurations antérieures des plateformes ne sont pas non plus entièrement documentés. Il n'est donc pas possible d'isoler complètement l'influence opérationnelle de celle du contexte géologique, hydrique et morphologique. Les contrastes observés doivent être interprétés comme des associations spatiales et comparatives, et non comme des preuves de causalité.

Malgré ces limites, l'approche demeure adaptée à la construction d'un inventaire spatial des formes visibles, à la comparaison des signatures morphologiques et fonctionnelles, à la présélection des secteurs nécessitant une inspection détaillée et à l'établissement d'un état de référence pour un suivi ultérieur. Elle est particulièrement pertinente pour les parois étendues, abruptes ou difficiles d'accès, pour lesquelles une lecture continue et spatialement explicite est nécessaire. Elle permet de repérer les secteurs marqués par des structures persistantes, des blocs ouverts, des cicatrices de détachement, des surfaces altérées ou des zones de suintement, puis d'orienter les investigations complémentaires.

La méthode ne remplace toutefois pas une inspection géotechnique rapprochée, une instrumentation des discontinuités, une analyse de stabilité ou une modélisation mécanique

détaillée. Son domaine de validité est celui d'une caractérisation descriptive, spatiale et comparative de l'état apparent des parois. Elle constitue ainsi une étape intermédiaire entre l'observation tridimensionnelle des surfaces rocheuses et les analyses géotechniques approfondies nécessaires à une décision portant sur la stabilité ou la gestion des parois.

8.6 Implications pour la gestion, la surveillance et la conception opérationnelle

Les résultats obtenus peuvent soutenir une priorisation des inspections fondée sur la nature des signatures dominantes plutôt que sur leur seule représentation quantitative. Les formes associées à la libération directe de matériau, notamment les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, justifient des inspections ciblées afin de vérifier la géométrie des volumes, l'ouverture des discontinuités et l'évolution éventuelle des zones de perte de support.

Les secteurs dominés par la prédisposition structurale nécessitent principalement un examen des joints persistants, de leurs intersections, de la continuité des bancs et du degré d'individualisation des blocs. À l'inverse, les secteurs caractérisés par une dégradation progressive appellent un suivi de l'altération des surfaces, du suintement, des chemins de drainage et de l'humidité persistante. Cette logique conduit à une surveillance différenciée pouvant combiner le suivi géométrique des blocs, l'observation des cicatrices et des surplombs, la documentation de l'évolution des surfaces altérées, le contrôle des écoulements et la réalisation de campagnes LiDAR multitemporelles.

Sur le plan opérationnel, les résultats invitent également à considérer conjointement la position des plateformes, le maintien des banquettes, la gestion des eaux de fonte et la limitation des écoulements concentrés vers les parois. Les zones situées sous les plateformes ou à proximité de celles-ci devraient être observées régulièrement. Les pratiques de déversement pourraient également être réévaluées lorsqu'une concentration de blocs ouverts, de zones de suintement, de surfaces altérées ou de formes de libération directe de matériau est détectée.

Cette démarche ne définit pas, à elle seule, des règles de conception ou de dimensionnement. Elle fournit plutôt une base permettant d'orienter les inspections, la surveillance et les ajustements opérationnels. Elle peut être adaptée à d'autres anciennes carrières urbaines réaménagées, à

condition d'ajuster les classes morphologiques, les critères d'interprétation et les modalités de comparaison à la lithologie, au climat, à la géométrie et à l'usage propres à chaque site.

8.6.1 Portée des signatures morpho-fonctionnelles pour la conception et la gestion des zones de déversement

Les profils morpho-fonctionnels établis pour la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct permettent d'examiner la portée opérationnelle des signatures identifiées. Ils fournissent des éléments utiles pour orienter la conception, l'exploitation, l'inspection et le suivi des zones de déversement. Ces éléments ne constituent toutefois ni des prescriptions de dimensionnement ni des conclusions relatives à la stabilité des parois. Ils forment plutôt une base d'aide à la décision permettant d'adapter les observations, les priorités d'inspection et les mesures de gestion à la signature dominante de chaque secteur.

L'analyse montre d'abord qu'une classification reposant uniquement sur la présence ou l'absence de déversement serait insuffisante. La plateforme de déversement ponctuelle et le secteur sans déversement direct présentent tous deux une forte composante structurale, alors que la plateforme de déversement étendue est principalement caractérisée par la dégradation progressive. La planification et la gestion des zones de déversement devraient donc intégrer non seulement leur configuration opérationnelle, mais également la géométrie de la paroi, la stratification S0, les familles de discontinuités, les conditions hydriques et de drainage, la position des banquettes ainsi que l'organisation spatiale des formes cartographiées.

Cette lecture conduit à privilégier une gestion différenciée des secteurs. Les zones dominées par la prédisposition structurale nécessitent principalement une attention portée à la continuité des discontinuités et à l'individualisation possible de volumes rocheux. Les zones dominées par la dégradation progressive appellent davantage un suivi de l'état des surfaces, du suintement et de l'évolution des conditions hydriques. Enfin, les secteurs dans lesquels des formes de libération directe sont présentes exigent une vérification ciblée de leur géométrie et de leur signification géomécanique, même lorsque leur représentation quantitative demeure limitée.

8.6.1.1 Implications pour la plateforme de déversement ponctuelle

Le profil de la plateforme de déversement ponctuelle est dominé par la prédisposition structurale, avec une contribution importante de la dégradation progressive. Dans ces secteurs, la sélection et l'exploitation d'une plateforme devraient donc être accompagnées d'une vérification du cadre structural local, notamment :

- De l'orientation de la stratification par rapport à la paroi ;
- De la présence de joints persistants ou de discontinuités ouvertes ;
- De l'individualisation possible de compartiments rocheux ;
- De la présence de surfaces altérées ou de zones de suintement sous la plateforme et sur la banquette associée.

La faible proportion globale des formes de libération directe ne doit pas conduire à négliger les éléments localisés. Une cicatrice en coin, un surplomb ou un volume rocheux fortement individualisé peut présenter une importance locale malgré une contribution quantitative limitée. Les inspections devraient donc combiner une lecture générale du profil fonctionnel et une vérification ciblée des formes ponctuelles susceptibles de nécessiter une analyse géomécanique plus détaillée.

La zone d'influence locale retenue autour des plateformes de déversement ponctuelles devrait également être réévaluée lorsque la topographie indique une redistribution latérale possible de la neige, des matériaux ou des eaux de fonte. La projection verticale de la plateforme ne suffit pas nécessairement à représenter l'ensemble de la portion de paroi susceptible d'être associée aux conditions opérationnelles locales.

8.6.1.2 Implications pour la plateforme de déversement étendue

Le profil de la plateforme de déversement étendue est très fortement dominé par les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement. Cette signature indique que le suivi de cette

emprise devrait accorder une attention particulière à l'évolution de l'état apparent des surfaces et aux conditions hydriques.

Les principaux éléments à surveiller comprennent :

- L'extension ou l'intensification des surfaces altérées ;
- L'apparition de nouvelles traces de suintement ou l'élargissement des zones existantes ;
- La concentration des écoulements le long des discontinuités ;
- Les modifications de texture, de coloration ou de rugosité apparente ;
- L'apparition de végétation, de dépôts ou d'autres indices d'humidité persistante ;
- L'émergence de nouvelles formes structurales ou de volumes rocheux individualisés.

La continuité longitudinale de la plateforme de déversement étendue justifie une approche de gestion couvrant l'ensemble de son emprise, plutôt qu'une succession d'inspections ponctuelles indépendantes. Une attention particulière devrait être portée aux chemins préférentiels de drainage, aux zones d'accumulation ainsi qu'aux variations longitudinales de l'état apparent de la paroi.

La dominance de la dégradation progressive ne signifie toutefois pas que le massif est dépourvu de contrôle structural. Les manifestations visibles de la stratification, des joints et des contacts intrusifs demeurent pertinentes, notamment lorsqu'elles organisent la circulation de l'eau, favorisent sa concentration ou délimitent des portions plus altérées.

8.6.1.3 Implications pour les secteurs sans déversement direct

Le secteur sans déversement direct présente un profil diversifié à dominante structurale ainsi que la contribution la plus élevée de la libération directe de matériau parmi les trois contextes opérationnels. Cette observation montre que ces secteurs ne doivent pas être exclus des programmes de surveillance ni être considérés comme des zones de référence nécessairement moins marquées par des formes géomécaniquement significatives.

Dans ces secteurs, les inspections devraient porter en priorité sur :

- Les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts ;
- Les surplombs ;
- Les cicatrices de détachement ;
- La continuité et l'ouverture des joints persistants ;
- La compartimentation du massif ;
- Les relations entre les structures et la géométrie locale de la paroi.

La présence de formes de libération directe de matériau dans le secteur sans déversement direct montre que les conditions morphologiques observées ne peuvent pas être expliquées uniquement par les activités de déversement. Elles peuvent également être associées à l'architecture du massif, à la géométrie héritée de l'excavation, à l'altération naturelle, aux cycles climatiques et à l'évolution à long terme des parois.

Ces secteurs doivent donc être intégrés à la stratégie générale de suivi de la carrière, même en l'absence d'activité opérationnelle directe à leur sommet.

8.6.1.4 Utilisation des profils dans une démarche de gestion adaptative

Les profils morpho-fonctionnels peuvent être utilisés comme outils de présélection pour orienter les inspections et déterminer les besoins de caractérisation complémentaire. Leur utilisation peut suivre une démarche progressive :

- Identifier le contexte opérationnel de la portion de paroi ;
- Établir sa composition selon les neuf classes morphologiques ;
- Déterminer le profil fonctionnel dominant ;
- Repérer les formes localisées présentant une signification géomécanique particulière ;
- Replacer les observations dans le cadre structural et géométrique local ;
- Déterminer si une inspection ciblée, une surveillance temporelle ou une analyse de stabilité complémentaire est nécessaire.

Cette démarche ne transforme pas le profil morpho-fonctionnel en système de décision automatique. Elle permet plutôt de structurer l'information disponible et d'orienter l'attention vers les formes et les processus dominants de chaque secteur.

Un secteur dominé par la prédisposition structurale nécessite principalement une lecture détaillée des discontinuités et des volumes potentiellement individualisés. Un secteur dominé par la dégradation progressive demande davantage un suivi des surfaces, de l'eau et de leur évolution dans le temps. Un secteur marqué par la libération directe de matériau justifie une attention particulière aux géométries localisées, même lorsque leur représentation quantitative demeure faible.

8.6.1.5 Portée pour la conception des futures zones de déversement

Lors de la sélection ou de la modification d'une zone de déversement, le profil morpho-fonctionnel peut contribuer à comparer plusieurs emplacements potentiels. Cette comparaison doit toutefois être combinée à des critères géométriques, structuraux, hydrologiques et opérationnels.

Les secteurs présentant une forte continuité de joints, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts ou des cicatrices de détachement devraient faire l'objet d'une caractérisation géomécanique détaillée avant toute modification importante de l'utilisation de la crête. Les secteurs fortement marqués par l'altération et le suintement devraient être examinés sous l'angle du drainage, de l'accumulation de neige et de la gestion des eaux de fonte. La présence de banquettes, leur capacité d'accumulation et les chemins possibles de redistribution latérale devraient également être intégrés à la conception.

Ainsi, le choix d'un emplacement ne devrait pas reposer uniquement sur l'espace disponible au sommet de la paroi. Il devrait considérer conjointement :

- La géométrie et l'orientation du front rocheux ;
- La stratification et les familles de discontinuités ;
- Les formes morphologiques déjà présentes ;

- Les conditions hydriques ;
- La position et la géométrie des banquettes ;
- L'évolution temporelle apparente de la paroi ;
- Les modalités prévues de déversement et de gestion des matériaux.

Dans l'ensemble, les profils morpho-fonctionnels fournissent un cadre permettant d'adapter la gestion aux conditions observées. La plateforme de déversement ponctuelle appelle principalement une lecture structurale locale complétée par le suivi de l'altération et du suintement. La plateforme de déversement étendue nécessite une attention particulière à l'évolution diffuse des surfaces et aux conditions hydriques. Le secteur sans déversement direct doit demeurer intégré au programme de surveillance en raison de sa diversité morphologique et de la présence relativement importante de formes de libération directe. Cette approche permet de passer d'une classification purement opérationnelle à une gestion fondée sur la signature morpho-fonctionnelle observée des parois.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Synthèse de la recherche

Cette recherche avait pour objectif de développer une démarche intégrée permettant de caractériser l'état apparent des parois rocheuses de la carrière Francon et d'examiner leur relation avec les contextes de déversement de neige et de matériaux granulaires. Le travail répond à un besoin propre aux anciennes carrières urbaines réaménagées, où les parois sont étendues, abruptes, difficiles d'accès et soumises à l'interaction de facteurs structuraux, hydriques, climatiques et opérationnels.

La démarche repose sur des acquisitions tridimensionnelles par LiDAR et photogrammétrie, utilisées pour produire des modèles détaillés des parois. Ces modèles ont servi à caractériser la géométrie des fronts rocheux, la stratification et les principales familles de discontinuités, puis à évaluer les mécanismes cinématiquement admissibles. Une cartographie morphologique a ensuite été réalisée afin d'identifier les formes visibles à la surface du massif.

L'inventaire a été structuré selon neuf classes morphologiques : la stratification fracturée, les surplombs, les discontinuités persistantes à faible pendage, les zones de joints verticaux persistants, les surfaces altérées, les zones d'influence par suintement, les cicatrices en coin, les contacts intrusifs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts. Ces classes ont ensuite été regroupées selon trois fonctions principales : la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive.

La conservation de la position tridimensionnelle de chaque élément cartographié a permis d'analyser les résultats selon plusieurs dimensions complémentaires : la zone géométrique, le chaînage longitudinal, la classe morphologique, le groupe fonctionnel et le contexte opérationnel. Trois contextes ont ainsi été comparés : la plateforme de déversement ponctuelle, la plateforme de déversement étendue et le secteur sans déversement direct.

La recherche a ainsi permis d'établir une chaîne méthodologique continue :

- Acquisition et traitement des données tridimensionnelles ;
- Caractérisation de l'architecture structurale ;
- Analyse de la compatibilité cinématique ;
- Cartographie des formes visibles ;
- Regroupement selon leur fonction apparente ;
- Analyse spatiale par zone et par chaînage ;
- Comparaison selon les contextes opérationnels ;
- Construction de profils morpho-fonctionnels comparatifs.

Cette démarche permet de passer d'une représentation géométrique des parois à une lecture spatialement explicite de leur état morphologique et fonctionnel apparent, sans assimiler les observations cartographiées à une mesure absolue de la stabilité des parois.

Principaux résultats, contributions originales et conclusions générales

Les résultats montrent d'abord que l'état apparent des parois de la carrière Francon est contrôlé par une architecture structurale commune, dont l'expression varie fortement dans l'espace. La stratification S0 organise le massif en bancs subhorizontaux, tandis que les familles de joints F1, F2 et F3 assurent sa segmentation verticale et oblique. Leurs intersections favorisent la formation de blocs tabulaires, prismatiques ou de volumes en coin. L'orientation locale des parois détermine toutefois la manière dont ces structures sont exposées et leur compatibilité avec les différents mécanismes cinématiques.

L'analyse cinématique a montré que le glissement en coin constitue le mécanisme géométriquement le plus largement admissible pour les orientations de paroi étudiées, alors que le glissement planaire et le basculement sont associés à des configurations plus localisées. Ces résultats doivent être interprétés comme des possibilités géométriques et non comme la preuve d'une activation actuelle. La présence de certaines cicatrices en coin fournit néanmoins

une cohérence morphologique ponctuelle avec les intersections structurales et constitue une trace de détachement antérieur.

La cartographie morphologique a montré que les trois zones de la carrière présentent des signatures distinctes :

- La zone A est principalement caractérisée par la stratification fracturée, accompagnée de surfaces altérées et de zones d'influence par suintement. Sa signature associe donc une forte organisation par les bancs à une dégradation progressive relativement diffuse ;
- La zone B présente l'expression la plus nette de la compartimentation structurale. Les zones de joints verticaux persistants, les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et les contacts intrusifs y traduisent une segmentation plus marquée du massif et une individualisation locale des volumes rocheux ;
- La zone C est dominée par la dégradation progressive, principalement sous la forme de surfaces altérées et de zones d'influence par suintement. Cette signature diffuse coexiste avec une stratification fracturée secondaire, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts et des cicatrices en coin localisées témoignant de détachements antérieurs.

Ces différences ne correspondent pas à trois systèmes indépendants. Elles représentent plutôt un gradient spatial entre l'organisation par la stratification, la compartimentation par les joints, l'influence de l'eau et l'altération des surfaces, accompagné de manifestations ponctuelles de libération de matériau.

La comparaison des contextes opérationnels a également mis en évidence des signatures contrastées :

- La plateforme de déversement ponctuelle est dominée par la prédisposition structurale, qui représente 58,78 % des points classifiés. La dégradation progressive y demeure

importante, avec 39,40 %, tandis que la libération directe de matériau représente 1,82 % ;

- La plateforme de déversement étendue présente une très forte dominance de la dégradation progressive, qui atteint 92,64 %. Cette signature repose principalement sur les surfaces altérées et les zones d'influence par suintement ;
- Le secteur sans déversement direct présente la composition la plus diversifiée. La prédisposition structurale y représente 48,90 %, la dégradation progressive 35,36 % et la libération directe de matériau 15,74 %.

Ces résultats montrent que les contextes opérationnels sont associés à des compositions morphologiques différentes. Ils ne permettent cependant pas d'attribuer directement les formes observées aux opérations de déversement. Les plateformes sont implantées dans un massif déjà structuré, altéré et soumis à des circulations d'eau. Le secteur sans déversement direct présente lui aussi des formes de fracturation, de suintement, d'altération et de libération de matériau. Le contexte opérationnel doit donc être interprété comme un facteur susceptible de moduler certaines conditions locales, notamment l'humidité, les accumulations et les chemins de drainage, et non comme une cause unique.

Les principales contributions originales de la recherche peuvent être résumées comme suit :

- Une chaîne d'analyse intégrée des parois rocheuses reliant l'acquisition tridimensionnelle, l'analyse structurale, la compatibilité cinématique, la morphologie et les usages opérationnels dans un référentiel spatial commun ;
- Une classification morphologique adaptée à la carrière Francon, fondée sur neuf formes discernables dans les modèles tridimensionnels et permettant de conserver la diversité des expressions observées ;
- Un regroupement fonctionnel en trois composantes distinguant la libération directe de matériau, la prédisposition structurale et la dégradation progressive ;

- Une séparation méthodologique entre l'observation et l'interprétation, limitant l'attribution prématurée d'un mécanisme de rupture avant l'analyse complète de la forme, de son contexte et de sa relation avec les structures ;
- La conservation de l'information spatiale grâce à l'association de chaque élément cartographié à sa position tridimensionnelle, à son chaînage, à sa zone, à sa classe morphologique et à son contexte opérationnel ;
- La construction de profils morpho-fonctionnels comparatifs permettant de comparer des unités d'étendues différentes à partir de proportions normalisées, tout en conservant la nature des signatures ;
- Une démarche adaptée aux anciennes carrières urbaines réaménagées, dans lesquelles les parois doivent être analysées conjointement avec les usages du site et les processus hydriques.

Les conclusions générales de cette recherche sont les suivantes :

- L'architecture structurale constitue le cadre fondamental de la segmentation et de l'individualisation des volumes rocheux ;
- L'orientation des parois contrôle l'exposition des familles de discontinuités et la compatibilité géométrique des mécanismes possibles ;
- L'eau, le suintement et l'altération participent fortement à l'évolution progressive de certaines portions de paroi, particulièrement dans la zone C et sous la plateforme de déversement étendue ;
- Une faible représentation quantitative ne signifie pas nécessairement une faible importance géomécanique. Les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts peuvent demeurer significatifs malgré leur emprise réduite ;
- Les proportions de points classifiés décrivent la composition de l'inventaire et les signatures dominantes, mais elles ne représentent pas directement une surface exacte, une probabilité de rupture ou un niveau absolu de stabilité ;

- Les opérations de déversement peuvent moduler localement les conditions hydriques et l'état apparent des surfaces, mais leur influence ne peut pas être isolée de la géologie, de la géométrie des fronts, du climat et de l'héritage de l'excavation ;
- Les profils morpho-fonctionnels constituent des outils de comparaison et de présélection des secteurs à examiner. Ils ne remplacent pas une analyse de stabilité ni une inspection géotechnique détaillée.

Dans son ensemble, la recherche montre que l'interprétation des parois rocheuses gagne à combiner la structure, la morphologie, la localisation spatiale et le contexte opérationnel. Cette intégration permet de produire une lecture plus complète que celle obtenue par une analyse structurale ou une cartographie visuelle utilisées isolément.

Travaux futurs et recommandations

Les résultats obtenus constituent un état de référence des parois de la carrière Francon et ouvrent plusieurs perspectives visant à approfondir la méthode, à renforcer sa reproductibilité et à soutenir la gestion opérationnelle du site.

Recommandations pour la gestion et la surveillance

La surveillance des parois devrait être adaptée à la nature des signatures dominantes plutôt qu'à leur seule représentation quantitative :

- Les cicatrices en coin, les surplombs et les masses rocheuses fracturées à blocs ouverts devraient faire l'objet d'inspections ciblées afin de vérifier la géométrie des volumes, l'ouverture des fractures, les pertes de support et les changements récents ;
- Les secteurs dominés par la prédisposition structurale devraient être surveillés en portant une attention particulière à la continuité des joints, aux intersections structurales, à la fragmentation des bancs et à l'individualisation progressive des blocs;

- Les secteurs dominés par la dégradation progressive devraient faire l'objet d'un suivi de l'état des surfaces, du suintement, des traces d'humidité et des chemins de drainage;
- Les secteurs dans lesquels une faible proportion de formes de libération directe est spatialement concentrée ne devraient pas être considérés comme secondaires, puisque leur importance géomécanique locale peut dépasser leur représentation dans l'inventaire global ;
- Les inspections devraient être renforcées après les périodes de fonte, de fortes précipitations ou de cycles répétés de gel-dégel, particulièrement dans les secteurs présentant un suintement persistant.

La répétition de campagnes LiDAR permettrait de comparer les modèles dans le temps et de détecter :

- Les pertes ou déplacements de matériau ;
- Les modifications de la géométrie des surfaces ;
- L'élargissement apparent des fractures ;
- L'évolution des blocs individualisés ;
- La progression des surfaces altérées ;
- L'apparition de nouvelles cicatrices ou de nouveaux surplombs

Recommandations pour la conception et les pratiques opérationnelles

La position et l'utilisation des plateformes devraient être examinées conjointement avec la géométrie des parois et les signatures cartographiées. À ce titre, il est recommandé de :

- Maintenir les banquettes dégagées et fonctionnelles afin de limiter la concentration des matériaux et de faciliter l'inspection des fronts ;
- Surveiller les portions de paroi directement situées sous la plateforme de déversement ponctuelle et sous la plateforme de déversement étendue ;

- Améliorer la gestion des eaux de fonte et du ruissellement afin de limiter les écoulements concentrés vers les joints, les contacts lithologiques et les zones déjà altérées ;
- Éviter, lorsque cela est réalisable, de concentrer durablement les accumulations au-dessus de secteurs présentant des blocs ouverts, des surplombs, des cicatrices de détachement ou un suintement persistant ;
- Adapter la position, l'emprise ou les modalités de déversement lorsqu'une évolution défavorable des signatures morpho-fonctionnelles est observée ;
- Intégrer la cartographie des formes apparentes aux procédures d'inspection et aux décisions de planification des plateformes.

Ces recommandations doivent être considérées comme des orientations de gestion. Toute modification importante des pratiques ou de la configuration des plateformes devrait être appuyée par une inspection géotechnique détaillée et, lorsque cela est nécessaire, par une analyse de stabilité.

Travaux futurs sur la méthode de classification

La reproductibilité de la cartographie morphologique devrait d'abord être évaluée par l'application de la méthode par plusieurs observateurs et sur différents secteurs de paroi. Les travaux futurs pourraient notamment comprendre :

- La mesure de l'accord inter-observateurs ;
- La clarification des critères associés aux classes présentant des limites diffuses ;
- La constitution d'une bibliothèque d'exemples représentatifs et de cas ambigus ;
- L'évaluation de la sensibilité des résultats aux choix de délimitation des éléments cartographiés.

Une telle validation permettrait de mieux quantifier l'incertitude associée à l'interprétation manuelle, d'améliorer la cohérence de la classification et de faciliter le transfert de la méthode

à d'autres sites présentant des contextes lithologiques, géométriques ou opérationnels différents.

L'automatisation partielle de la cartographie constitue également une perspective importante. Des méthodes de classification supervisée ou d'apprentissage automatique pourraient être développées à partir des éléments déjà cartographiés manuellement. Elles pourraient combiner :

- Les données RGB ;
- L'orientation des normales ;
- La rugosité ;
- La courbure ;
- La continuité des plans ;
- L'ouverture apparente des fractures ;
- La densité locale des points ;
- La géométrie des cavités et des ruptures de surface.

Ces développements pourraient faciliter la détection semi-automatique de la stratification fracturée, des joints persistants, des masses rocheuses fracturées à blocs ouverts, des cicatrices en coin, des surplombs et des surfaces altérées. L'interprétation humaine demeurerait toutefois nécessaire pour valider les résultats, distinguer les formes présentant des caractéristiques visuelles similaires et replacer chaque observation dans son contexte structural, hydrique et opérationnel.

La détection des changements constitue une autre étape essentielle pour faire évoluer la méthode vers une surveillance multitemporelle des parois. La comparaison de campagnes LiDAR ou photogrammétriques répétées permettrait de détecter et de quantifier les modifications géométriques survenues entre deux dates, notamment :

- Les pertes ou déplacements de matériau ;
- L'apparition de nouvelles cicatrices ;

- L'évolution des surplombs ;
- L'élargissement apparent des fractures ;
- Le déplacement ou l'individualisation progressive de certains blocs ;
- La progression ou la régression des surfaces altérées ;
- Les modifications des zones de suintement et des chemins de drainage.

Cette démarche nécessiterait un recalage précis des campagnes successives, une homogénéisation des densités de points et une validation des changements détectés afin d'exclure les écarts attribuables aux occlusions, à la végétation, aux différences d'angle d'acquisition ou aux variations de qualité des modèles. La combinaison de la classification automatisée et de la détection des changements permettrait ainsi de distinguer les formes relativement permanentes des secteurs présentant une évolution mesurable.

Le couplage avec des données hydrologiques et climatiques permettrait ensuite de mieux interpréter l'origine et le rythme de ces changements. Les analyses futures pourraient intégrer:

- Les volumes de neige déposés ;
- Les dates et les rythmes de fonte ;
- Les précipitations ;
- Les températures ;
- Les cycles de gel-dégel ;
- L'humidité des surfaces ;
- Les débits ou la durée du suintement ;
- Les caractéristiques des systèmes de drainage.

L'installation de capteurs d'humidité, de température ou de débit dans certains secteurs permettrait de mieux distinguer les conditions hydriques naturelles des influences associées aux usages opérationnels. Le croisement de ces mesures avec les changements détectés dans les modèles tridimensionnels contribuerait à préciser les relations temporelles entre la fonte, le ruissellement, le suintement, l'altération et l'évolution morphologique des parois.

Enfin, les secteurs présélectionnés à partir des profils morpho-fonctionnels et de la détection des changements pourraient faire l'objet d'une évaluation géotechnique approfondie comprenant :

- Une caractérisation détaillée de la persistance, de l'espacement, de l'ouverture, de la rugosité et du remplissage des discontinuités ;
- Une mesure plus précise des propriétés mécaniques des surfaces de rupture potentielles;
- Une estimation des pressions d'eau ;
- Une modélisation structurale tridimensionnelle ;
- Une analyse de stabilité des blocs et des volumes en coin ;
- Une estimation des volumes potentiellement mobilisables et des trajectoires possibles;
- Une évaluation des conséquences possibles pour les infrastructures, les plateformes et les personnes exposées.

À plus long terme, l'intégration de la classification automatisée, de la détection des changements, des données hydrologiques et climatiques ainsi que des analyses géotechniques pourrait conduire au développement d'un système d'aide à la décision combinant les signatures morphologiques, la compatibilité structurale, l'évolution temporelle, les conditions hydriques et les enjeux exposés. La méthode développée dans ce mémoire constitue ainsi une base permettant de passer d'une caractérisation statique des conditions apparentes à une surveillance évolutive et à une gestion différenciée des parois, tout en maintenant une distinction claire entre l'observation morphologique, l'interprétation géomécanique et l'évaluation détaillée de la stabilité.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubertin, J. D., & Hutchinson, D. J. (2022). Scale-dependent rock surface characterization using LiDAR surveys. *Engineering Geology*, 301, 106614. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106614>
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 164–198.
- Bar, N., & Barton, N. (2017). The Q-slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(12), 3307–3322.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287–332.
- Barton, N., & Bandis, S. C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In *Rock joints* (pp. 603–610). CRC Press.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10(1), 1–54.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Battulwar, R., Zare-Naghadehi, M., Emami, E., & Sattarvand, J. (2021). A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 920–936.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineering=Siviele Ingenieurswese*, 1973(12), 335–343.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Borris, M., Österlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2021). Snow pollution management in urban areas: an idea whose time has come? *Urban Water Journal*, 18(10), 840–849.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- Brisebois, D., & Brun, J. (1994). La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. *Géologie Du Québec*, 1, 95–120.

- Brisebois, D., Sharma, K., Jacob, H. L., & Bélanger, M. (2003). *Géologie de la grande région de Montréal. Ressources minérales de la grande région de Montréal*. D. Brisebois.
- Brodu, N., & Lague, D. (2012a). 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121–134.
- Brodu, N., & Lague, D. (2012b). 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006>
- Brown, E. T. (1981). Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods. (*No Title*).
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 71–81.
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L., & Lu, P. (2017). Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), 9.
- Clark, T. H. (1952). *Région de Montréal, Feuilles de Laval et de Lachine*. Ministère des Mines du Québec.
- Clark, T. H. (1972). *Geological framework of the Montreal region*. Geological Survey of Canada.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Currie, K. L. (1976). *THE ALKALINE ROCKS OF CANADA*.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineer-Ring Geology*, 1(1), 17–22.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years*.
- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*.
- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J. (2016). Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 799–804.

- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87.
- Ducat, T. (2022). *Caractérisation structurale et modélisation 3D de la géologie de la région de Montréal, sud du Québec, Canada*.
- Eberhardt, E. (2003). Rock slope stability analysis—utilization of advanced numerical techniques. *Earth and Ocean Sciences at UBC*, 41.
- Eby, G. N. (1987). The monteregian hills and white mountain alkaline igneous provinces, eastern north America. *Geological Society, London, Special Publications*, 30(1), 433–447.
- Elamin, A., Abdelaziz, N., & El-Rabbany, A. (2022). A GNSS/INS/LiDAR integration scheme for UAV-based navigation in GNSS-challenging environments. *Sensors*, 22(24), 9908.
- Fernández, O. (2005). Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. *Journal of Structural Geology*, 27(5), 855–858.
- Fey, C., & Wichmann, V. (2017). Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain – handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), 789–802. <https://doi.org/10.1002/esp.4022>
- Gallo, L. C., Cristallini, E. O., & Svarc, M. (2018). A Nonparametric Approach for Assessing Precision in Georeferenced Point Clouds Best Fit Planes: Toward More Reliable Thresholds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11). <https://doi.org/10.1029/2018JB016319>
- Giordan, D., Hayakawa, Y., Nex, F., Remondino, F., & Tarolli, P. (2018). The use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1079–1096.
- Globensky, Y. (1987). Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent (Mémoire MM 85-02, 63 p., 1 carte à l'échelle 1:250 000). Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.
- Goodman, R. E. (1991). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Rocscience.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC press.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(9), 1013–1035.

- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267–273.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*. CRC Press.
- Höfle, B., & Rutzinger, M. (2011). Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 55(2), 1–29.
- Hudson, J. A., & Cosgrove, J. W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3–4), 136–e1.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- ISRM. (1978). International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319–368. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91472-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9)
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61(1), 5–28.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics Fourth Edition. Rock Mechanics*.
- Jambor, J. L., AG, P., & HR, S. (1976). *A DAWSONITE-BEARING SILICOCARBONATITE SILL FROM MONTREAL ISLAND, QUEBEC*.
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Jonathan D. Aubertin. (2020). *Characterization of rock salt response to blasting using terrestrial laser scanning technology* [Doctor of Philosophy]. Queen's University.
- Julien, P. S., & Hubert, C. (1975). Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, 275, 337–362.
- Klemas, V. V. (2015). Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. *Journal of Coastal Research*, 31(5), 1260–1267.

- Kumarapeli, P. S. (1985). Vestiges of lapetan Rifting in the Craton West of the Northern Appalachians. *Geoscience Canada*.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26.
- Lague, D., & Feldmann, B. (2020). Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis. In *Developments in earth surface processes* (Vol. 23, pp. 25–54). Elsevier.
- Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., & Harrap, R. (2009). Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 194–199.
- Lato, M. J., & Vöge, M. (2012). Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 150–158.
- Le Groupe S.M. International inc. (2007). *Étude géotechnique : Partie sud de l'ancienne Carrière St-Michel (lot 2 212 107 ptie du Cadastre du Québec)*.
- Lichti, D. D. (2002). Ground-based laser scanners: operation, systems and applications. *Geomatica*, 56(1), 21–33.
- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *ISRM International Symposium*, ISRM-IS.
- Markland, J. T. (1972). *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected*. Interdepartmental Rock Mechanics Project, Imperial College of Science and
- Matrice, D. J. I. (2020). 300 RTK User Manual. *DJI: Shenzhen, China*.
- Matsuoka, N. (2008). Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994–2006) observations. *Geomorphology*, 99(1–4), 353–368.
- Matsuoka, N., & Murton, J. (2008). Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2), 195–210.
- McKean, J., & Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57(3–4), 331–351.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons.

- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1), 109–137.
- Pierson, L. A., Davis, S. A., & Van Vickle, R. (1990a). *Rockfall Hazard rating system: implementation manual*.
- Pierson, L. A., Davis, S. A., & Van Vickle, R. (1990b). *Rockfall Hazard rating system: implementation manual*.
- Pierson, L. A., & Van Vickle, R. (1993). *Rockfall hazard rating system: participant's manual*.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135–148.
- Prest, V. K., & Hode-Keyser, J. (1975). Géologie des dépôts meubles, île de Montréal, Québec (Carte 1426A, échelle 1:50 000). Commission géologique du Canada.
- Prest, V. K., & Hode-Keyser, J. (1982). Caractéristiques géologiques et géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal et des environs, Québec (Étude 75-27). Commission géologique du Canada.
- Reinosdotter, K., & Viklander, M. (2007). Road salt influence on pollutant releases from melting urban snow. *Water Quality Research Journal*, 42(3), 153–161.
- Resop, J. P., Lehmann, L., & Hession, W. C. (2019). Drone laser scanning for modeling riverscape topography and vegetation: Comparison with traditional aerial lidar. *Drones*, 3(2), 35.
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38–52.
- Rocher, M., & Tremblay, A. (2001). L'effondrement de la plate-forme du Saint-Laurent: ouverture de Iapetus ou de l'Atlantique? Apport de la reconstitution des paléocontraintes dans la région de Québec (Canada). *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 333(3), 171–178.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *ISRM International Symposium-Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*, ISRM-RRME.

- Romana, M., Tomás, R., & Seron, J. B. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. *ISRM Congress*, ISRM-13CONGRESS.
- Rusu, R. B. (2010). Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments. *KI-Künstliche Intelligenz*, 24(4), 345–348.
- Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011). 3d is here: Point cloud library (pcl). *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1–4.
- Sadeghi, N., & Aubertin, J. D. (2025). Scale-dependent recursive analysis of topographical roughness: A methodology for differentiating geological and geomechanical features from point cloud data. *Engineering Geology*, 354, 108152.
- Schofield, W., Schofield, W., & Breach, M. (2007). *Engineering surveying*. CRC Press.
- Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- SIGEOM. (2022). *Système d'information géominière du Québec (SIGEOM)*. Ministère de l'Énergie et Des Ressources Naturelles Du Québec. <https://sigeom.mines.gouv.qc.ca>
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011). *Engineering rock mass classification*. Elsevier.
- Slob, S., & Hack, R. (2004). 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. In *Engineering geology for infrastructure planning in Europe: a European perspective* (pp. 179–189). Springer.
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210.
- SNC-Lavalin inc. (2023a). *Analyse de stabilité de la paroi rocheuse – Construction d'un quai à neige continu, Carrière Saint-Michel, Montréal, Québec*.
- SNC-Lavalin inc. (2023b). *Étude géotechnique – Construction d'un quai à neige continu, Carrière Saint-Michel, Montréal, Québec*.
- Steacy, H. R., & Jambor, J. L. (1969). *Nature, distribution and content of zirconium and niobium in a silico-carbonatite sill at St-Michel, Montreal Island, Quebec*.
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3–4), 163–182.
- Tarassoff, P. / H. L. / P.-H. E. (2006). Famous mineral localities: The Francon Quarry, Montreal, Quebec, Canada. *The Mineralogical Record*, 37(1), 5–60.

- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., & Glennie, C. (2017). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169, 35–68.
- Tremblay, A., Morel, B., Beatriz Shahin-Cajas, C., Barbeau-Desjardins, C., Gelinas, E., Lague, E., Meilleur-Roy, F.-A., Leveque, G., Pelletier, J.-P., Ma, J., Bouliane-Gagnon, J., Desroches, K., Fitton, L., Desrosiers Arslanian, L., Mesrob, L., Hammond-Benoit, M., Valente, N., Robillard, O., Beaudry, S.-J., ... Langlois, V. (2019). *Carrière Francon : la 3e géologie de Montréal*.
- Tsachouridis, S., Pavloudakis, F., Sachpazis, C., & Tsioukas, V. (2025). Monitoring Slope Stability: A Comprehensive Review of UAV Applications in Open-Pit Mining. *Land*, 14(6), 1193.
- Viklander, M. (1999). Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Luleå, Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution*, 114(3), 377–394.
- Vivre Saint-Michel en santé. (2018). *Francon, cœur de notre quartier : Projet de requalification de la carrière Francon*.
- Vosselman, G., & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles publishing.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2004). *Rock slope engineering*. CRC press.
- Xu, T., Xu, L., Yang, B., Li, X., & Yao, J. (2017). Terrestrial Laser Scanning Intensity Correction by Piecewise Fitting and Overlap-Driven Adjustment. *Remote Sensing*, 9(11), 1090. <https://doi.org/10.3390/rs9111090>
- Zhou, J., Jiang, N., Li, C., & Li, H. (2024). A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(10), 4125–4140. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.004>