

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ferhat Abbas -Sétif 1-



Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre

Département des sciences de la terre

**THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT
TROISIÈME CYCLE –LMD-**

OPTION : Géologie de l'ingénieur et géotechnique

SUR LE THÈME :

**Contribution à l'évaluation du risque d'éboulement
sur les falaises rocheuses de la région de Béjaïa**

PAR :

M^m LADJEL. Zohra

Devant le jury :

RESIDENT : Pr. CHABOU Moulley, C Professeur Université de Sétif 1

DIRECTEUR DE THÈSE : Dr. ZAHRI Farid, MCA Université de Sétif 1

CODIRECTEUR : Pr. HADJI Riheb, Professeur Université de Sétif 1

EXAMINATEURS :

- Pr. MERDAS Abdelghani Professeur Université de Sétif 1
- Pr. FEHDI Chemsedin Professeur Université de Tébessa
- Pr. YAHYAOUI Sami Professeur E Polytechnique d'Alger

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Au nom de Dieu, le Clément, le Miséricordieux, Louange à ALLAH le Tout-Puissant qui m'a accordé la force et la détermination nécessaire pour mener à bien ce modeste travail. C'est avec une profonde gratitude que je le dédie à chacune des personnes dont les noms figurent ci-dessous, en reconnaissance de leur soutien et de leur encouragement tout au long de ce parcours.

Je tiens avant tout à exprimer ma gratitude envers mon directeur de thèse, Mr, ZAHRI Farid ; Docteur à l'université de Ferhat Abbas - Sétif 1- pour son encadrement de grand qualité. Ses conseils judicieux et ses suggestions éclairées m'ont permis de surmonter de nombreux défis. Sa disponibilité et le temps précieux qu'il a consacré tout au long de ces années ont été indispensables à l'aboutissement de ce travail. Son soutien et son engagement ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse, Mr Hadji Riheb ; Professeur à l'université de Ferhat Abbas - Sétif 1- pour son accompagnement attentif. Sa rigueur académique et ses remarques précieuses ont joué un rôle essentiel dans l'amélioration de ce travail et d'enrichir considérablement la qualité de cette recherche. Je lui suis profondément reconnaissante pour le temps et l'énergie qu'il a consacrés à m'orienter et à affiner mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à mon travail. Mes remerciements sont adressés à Mr CHABOU Moulley Charaf ; professeur à l'université de Ferhat Abbas - Sétif 1- d'avoir accepté de présider ce jury. Mes remerciement s'adresse également à Mr. MERDAS Abdelghani, professeur à l'université de Ferhat Abbas - Sétif 1-, à Mr. FEHDI Chemsedin, professeur à l'université de Tebessa et à Mr. YAHYAOUI Sami, professeur à l'école nationale polytechnique d'El Harrach, Alger, pour avoir accepté d'examiner mon travail. Leur expertise et leur engagement sont d'une grande valeur pour moi, et je suis honorée de bénéficier de leur appréciation et de leurs retours."

Je remercie sincèrement mon enseignant Mr, BOUIMA Tayeb ; Docteur à l'université de Ferhat Abbas - Sétif 1-, pour son aide précieuse lors des sorties de terrain et pour ses conseils dans l'interprétation de mes observations. Son soutien a été essentiel pour approfondir ma compréhension.

Je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements à mon enseignant Mr, BENDAOUD El Amine, Docteur à l'université de Sétif, pour son aide précieuse dans la recherche de documentation et pour son attention. Son soutien, ses encouragements constants ont été d'une grande importance pour moi.

Je remercie beaucoup le bureau d'étude de la DTP Béjaia et le bureau d'étude IMSR_{France} , pour la documentation et les informations précieuses qu'ils m'ont fournies.

Je souhaite exprimer mes grands remerciements au doctorant GASMI Younes, à la doctorante AOUATI Hasna, ainsi qu'aux étudiantes ARKANE Sonia et BAHLOUL Sandra pour leur aide précieuse, et leur collaboration qui ont été d'une grande valeur, et je leur suis reconnaissante pour leur disponibilité.

Je tiens à adresser des remerciements tout particuliers à M. Mokrani Hafidh et M. Mokrani Adem « Dadi », pour leur aide précieuse dans l'organisation des sorties sur le terrain. Leur dévouement et leur efficacité ont grandement facilité mes travaux et ont contribué à rendre ces expériences sur le terrain à la fois enrichissantes et mémorables.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille, mes frères et sœurs pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon cher époux, dont le soutien quotidien indéfectible, tant pour mes travaux que pour la vie en général, a été une source inestimable de force et de motivation. Sa présence à mes côtés m'a permis de surmonter les défis et de rester concentrée sur mes objectifs.

Je dédie ces remerciements à ma mère et à mon père, dont l'amour et le soutien inébranlables ont été les fondations de tout ce que je suis aujourd'hui. Leur présence constante à mes côtés et leurs encouragements inestimables ont été des sources de motivation inépuisables dans mes moments de doute. Ils m'ont appris la valeur du travail acharné et de la persévérance, et grâce à eux, j'ai pu avancer avec confiance vers mes objectifs. Leur influence positive et leurs sages conseils m'accompagnent à chaque étape de ma vie.

À mes chers enfants
Abdnour, Yahia et Ania

Résumé

Le phénomène de chute de blocs est fréquent dans les couloirs routiers montagneux. En raison de leur caractère soudain et rapide, il engendre souvent des impacts socioéconomiques lourds. Ce phénomène se produit couramment dans la route nationale reliant Kherrata-Béjaïa qui se caractérise par des sections très vulnérables et souvent affectées, à l'image du versant du Cap Aokas, le Talus en face du complexe touristique Safsaf et les talus au nord de la commune de Derguina. L'évaluation du risque de ce phénomène dans cette recherche est basée sur l'identification des facteurs de prédisposition et de déclenchement, et la combinaison de multi-approches structurales, probabilistes et photogrammétriques. Les méthodes d'évaluation sont choisies en fonction de la nature de l'aléa de départ (diffus ou localisés). Au niveau de la falaise d'Aokas, nous avons combiné l'analyse cinématique et la méthode MATTEROCKING. Le talus du complexe Safsaf est évalué avec la technique alpine, tandis que les talus de Derguina sont évalués selon une méthodologie globale. L'aléa de propagation est évalué suivant une étude trajectographique 3D. Le risque de chute des blocs est évalué qualitativement en adoptant la méthode RHRA pour le versant du Cap Aokas et la méthode RHRS pour les talus du Safsaf et Derguina. Cette étude a mis en évidence une étroite relation entre l'aspect structural des massifs rocheux et les zones de déclenchement ; le risque dans les sites étudiés est qualifié essentiellement moyen à élevé, et des parades selon les conditions morphologiques du site et l'intensité du phénomène sont suggérées. Cette méthodologie peut être appliquée à d'autres sites pour réduire et gérer les risques de chute de blocs.

Mots-clés : Chute de bloc, Falaise Aokas, MATTEROCKING, Trajectographie 3D, Risque.

Abstract

Rock falls are common in mountainous road corridors. Because of its sudden and rapid nature, it often has a significant socio-economic impact. This phenomenon occurs commonly on the national road between Kherrata and Bejaia, which is characterized by highly vulnerable sections and is often affected, such as the slope of Cap Aokas, the Talus opposite the tourist complex Safsaf and the slopes north of the town of Derguina. The risk assessment of this phenomenon in this research is based on the identification of predisposition and trigger factors, and the combination of multi-approaches such as structural, probabilistic and photogrammetric. The assessment methods are chosen according to the nature of the starting hazard (diffuse or localized). At the Aokas cliff, we combined kinematic analysis and MATTEROCKING. The slope of the Safsaf complex is assessed with alpine technique, while the slope of Derguina is assessed with a global method. The propagation hazard is assessed by a 3D trajectory study. The risk of falling blocks is assessed qualitatively by adopting the RHRA method for the slope of Cap Aokas and the RHRS method for the slopes of Safsaf and Derguina. This study has shown a close relationship between the structural aspect of the rock masses and the trigger zones; the risk in the sites studied is mainly medium to high, and varies according to the morphological conditions of the site and the intensity of the phenomenon are suggested. This methodology can be applied to other sites to reduce and manage a rock fall risk.

Keywords: Rockfall, Aokas cliff, MATTEROCKING, 3D Trajectory, Risk.

الملخص

تعد ظاهرة تساقط الكتل الصخرية شائعة في ممرات الطرق الجبلية. ونظرا لطبيعتها المفاجئة والسريعة، فإنها غالبا ما يكون لها أثر اجتماعي واقتصادي ثقيل. تحدث هذه الظاهرة بشكل شائع على الطريق الوطني الرابط بين خراطة و بجاية، التي تتميز بأجزاء جِدَّ معرضة و غالبا ما تتأثر، مثل منحدر جرف أوقاس، المنحدر المقابل لمجمع الصفصاف السياحي والمنحدرات شمال مدينة درقينة. استند تقييم مخاطر هذه الظاهرة في هذا البحث إلى تحديد العوامل المؤهبة والمحفزة، والجمع بين عدة مناهج ; الهيكلية والاحتمالية و الفوتوقرامترية. واختيرت طرق التقييم، وفقاً لطبيعة خطر البَدْء (منتشر أو موضعي). في جرف أوقاس، قمنا بدمج التحليل الحركي و MATTEROCKING. كما تم تقييم منحدر مجمع صفصاف باستخدام تقنية الألب، في حين تم تقييم منحدر درقينة بمنهجية أكثر عمومية. تم تقدير خطر الانتشار بواسطة دراسة المسار ثلاثي الأبعاد. أما تقويم خطر سقوط الكتل فقد تم بشكل نوعي بواسطة اعتماد طريقة RHRA لمنحدر جرف أوقاس وطريقة RHRS لمنحدرات الصفصاف و درقينة. وقد أظهرت هذه الدراسة وجود علاقة وثيقة بين الجانب الهيكلية للكتل الصخرية ومناطق الانطلاق، ووصفت المخاطر في المواقع المدروسة بأنها متوسطة إلى عالية بشكل أساسي، وتم اقتراح الحلول وفقا للظروف المورفولوجية للموقع وشدة الظاهرة. يمكن تطبيق هذه المنهجية على مواقع أخرى لتقليل وإدارة مخاطر سقوط الكتل الصخرية.

الكلمات المفتاحية : سقوط الصخور, جرف أوقاس, MATTEROCKING, المسار ثلاثي الأبعاد, المخاطر.

SOMMAIRE

Introduction générale	2
CHAPITRE I : LES MOUVEMENTS GRAVITAIRES ROCHEUX	
1. Introduction	7
2. Mouvement gravitaire rocheux	7
3. Différentes classifications des mouvements rocheux	8
3.1 Classification de (Evans and Hungr, 1993)	8
3.2 Classification de (Hungr et al., 2013)	9
4. Typologie des mouvements rocheux	9
4.1 Classification en fonction de la géologie et de la géomorphologie	10
4.1.1 Classification basée sur le volume des masses en mouvement	10
4.1.2 Classification en fonction de la vitesse de déplacement	10
4.1.3 Classification en fonction de la forme de l'instabilité	11
4.1.4 Classification basée sur la nature des matériaux rocheux	11
4.2 Classification basée sur les modes de rupture	11
5. Causes de détachement des blocs	14
5.1 Les facteurs de prédisposition	14
5.2 Les facteurs de déclenchement	16
6. Caractérisation des dimensions des discontinuités	17
6.1 L'orientation	18
6.2 Persistance	19
6.3 Espacement	19
6.4 Fréquence	19
6.4.1 La relation fréquence λ et la densité volumique ρ_a	20
6.4.2 Fréquence et volume	20
7. Méthode d'analyse de la stabilité d'une masse rocheuse	21
7.1 Méthodes de calcul classiques	21
7.1.1 Analyse cinématique	21
7.1.2 Analyse de l'équilibre limite	21
7.1.3 Méthode des blocs clés	24
7.2 Méthodes des éléments finis	24
7.3 Méthodes des éléments distinctes	25

8. Conclusion	25
CHAPITRE II : MÉTHODES D'ÉVALUATION DU RISQUE DE CHUTE DE BLOC	
1. Introduction	28
2. Définitions	28
2.1 Risque chute de blocs	28
2.2 Aléa chute de blocs	28
2.3 Vulnérabilité	30
2.4 Zonage	31
3. Méthodologies d'évaluation de risque de chute de blocs	31
3.1 Aléas diffus	32
3.2 Aléas localisés	32
3.3 Approche globale (Aléa diffus)	32
3.4 Approche détaillée (Aléa localisé)	32
3.5 Méthode quantitative (Aléa diffus)	33
3.5.1 Approche événement	33
3.5.2 Approche bloc	33
3.6 Méthode qualitative d'un aléa diffus	33
3.6.1 Méthode utilisant un système de notation	34
4. Méthode RES (ROCK ENGENNERING SYSTEM)	34
5. Méthode RHRS (ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM)	36
5.1 Phénomène du talus	37
5.2 Phénomène du versant	38
6. Etudes spécifiques d'alea liées aux éboulements rocheux LCPC (Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées)	40
6.1 Collecte des données préliminaire (couche sources)	41
6.2 Identification et caractérisation des instabilités (couche évaluation)	42
6.3 Processus d'évaluation d'un compartiment rocheux	42
6.4 Qualification de l'aléa de rupture	43
6.5 Qualification de la propagation « approche qualitative »	44
6.6 Détermination de l'aléa résultant	44
7. Méthode de MATTEROCKING	45
7.1 Méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des instabilités rocheuses ..	46
7.2 Caractérisation du massif	46

7.2.1	Le nombre, la persistance et l'espace moyen d'une famille de discontinuités	46
7.2.2	Nombre moyen de discontinuités contenues dans chacune des mailles topographiques	47
7.2.3	Nombre moyen de dièdre contenu dans chacune des mailles topographiques..	47
7.2.4	Nombre de discontinuité basé sur l'espace apparent	47
7.3	La distribution des discontinuités dans une falaise	48
7.3.1	Calcul de la Probabilité P	48
7.4	Elaboration de la carte d'aléa	49
7.4.1	Probabilité de rupture	49
7.4.2	Qualification de l'aléa de rupture	50
7.4.3	Etude trajectographique	50
7.4.4	Elaboration de la carte d'aléa	51
8.	Méthode ROCKFALL HAZARD AND RISK ASSESSMENT (SAROGLOU ET AL., 2012)	52
9.	Conclusion	53

CHAPITRE III : ETUDE TRAJECTOGRAPHIQUE

1.	Introduction	57
2.	Caractéristiques de la trajectoire d'un bloc en mouvement	57
3.	Méthodes de modélisation de propagation	59
3.1	Méthodes de modélisation physique/analogique (expérimentale)	59
3.2	Méthodes de modélisation numériques	60
3.2.1	Propagation de masses rocheuses	60
3.2.1.1	Méthode granulaire (discrète)	60
3.2.1.2	Méthode continue	61
3.2.1.3	Approches combinées continue/discrets et continue/trajectographie	63
3.2.2	Propagation de blocs rocheux isolés (approche type trajectographique)	63
3.2.2.1	Modèle basé sur une analyse empirique	63
3.2.2.2	Modèles basés sur les logiciels de modélisation de la trajectoire	65
3.2.2.3	Modèle trajectographique à l'échelle du versant	73
3.2.2.4	Modèle trajectographique à l'échelle régionale	74
3.2.2.5	Approche déterministe / Probabiliste	75
3.2.2.6	Logiciel Roc Pro 3D	77
4.	Etablissement d'une étude trajectographique	78

4.1 Préparation des données initiales	79
4.2 Définition des scénarios de départ	80
4.3 Simulation des trajectoires	80
4.4 Contrôle de la plausibilité	81
4.5 Fixer et présenter les résultats	81
5. Conclusion	82

CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

1. Introduction	85
2. Situation géographique	85
3. Géologie régionale	87
3.1 Aspect Structural	88
3.2 La tectonique	90
3.3 La stratigraphie	91
4. Géologie locale	94
4.1 Falaise du cap Aokas	94
4.1.1 Lithologie	94
4.1.2 Levé structural	96
4.2 Talus en face de l'hôtel Safsaf	100
4.2.1 Lithologie	101
4.2.2 Levé structural	101
4.3 Les talus rocheux de Darguina	103
4.3.1 Lithologie	104
4.3.2 Levé structural	105
5. Climat	106
6. Sismicité	109
7. Conclusion	111

CHAPITRE V : ANALYSE CINÉMATIQUE

1. Introduction	114
2. La collecte des données	114
2.1 Levé structural du Cap Aokas	115
2.2 Levé structural Talus Hôtel SAFSAF	121
2.3 Levé structural talus Derguina	122
3. Familles de discontinuités	125

3.1 Site 1 : Falaise d'Aokas	125
3.2 Site 2 : Talus en face d'Hôtel Safsaf	127
3.3 Site 3 : Talus de Derguina	127
4. Analyse cinématique	128
4.1 Détermination de l'angle de frottement des discontinuités	128
4.2 Résultats de l'analyse cinématique	130
4.2.1 Site 1 : Falaise de Aokas	130
4.2.2 Site 2 : Talus du complexe touristique Safsaf.....	136
4.2.3 Site 3 : Talus de Derguina	138
5. Conclusion	141
CHAPITRE VI : ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX CHUTES DES BLOCS	
1. Introduction	144
2. Evaluation de la probabilité de rupture (versant cap Aokas)	144
2.1 Résultats d'évaluation CAP AOKAS	145
3. Evaluation de la probabilité de rupture (talus SAFSAF)	151
3.1 Résultats d'évaluation Talus SAFSAF	151
4. Evaluation de la probabilité de rupture (talus DERGUINA)	155
4.1 Résultats d'évaluation talus de DERGUINA	156
5. Conclusion	159
CHAPITRE VII : ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS	
1. Introduction	162
2. Evaluation et cartographie de l'alea et risque chute de bloc du site cap Aokas	162
2.1 Etude trajectographique et évaluation de l'aléa chute de bloc	164
2.2 Risque chute de bloc	170
3. Evaluation de l'alea et risque chute de bloc des sites hôtel SAFSAF et DUERGUINA ...	177
3.1 Classification de risque au niveau du site talus hôtel SAFSAF	178
3.2 Classification de risque au niveau du site talus de DERGUINA	180
4. Conclusion	185
Conclusion générale	189

Référence bibliographique

ANNEXE

La liste des figures

Titre des figures	Page
Figure 1.1 : Rupture plane (a) Condition de rupture (b) Glissement banc sur banc (c) (Calvino et al., 2001)	12
Figure 1.2 : a) Basculement par flexion, b) Fauchage, c) Flambement (Norrish&Willy., 1999)	13
Figure 1.3 : Glissement pseudo-circulaire (Norrish&Willy., 1999)	14
Figure 1.4 : Caractéristique géométrique des discontinuités (Wittke, 2014).	18
Figure 1.5 : Projection stéréographique des familles de discontinuité (Jaboyedoff et al., 1999)	18
Figure 1.6 : Les lois de la distribution des espacements (M.Jaboydoff, 1996)	19
Figure 1.7 : Relation entre la densité volumique et la fréquence (Jaboyedoff., 1996)	20
Figure 1.8 : Schéma explicatif et estimation de la surface d'une discontinuité (Jaboyedoff et al., 1999)	20
Figure 1.9 : Schéma des forces en jeu dans la vérification de la stabilité (S. Gentier 2002)	22
Figure 2.1 : Matrice d'intersection des paramètres (Cancelli et Crosta 1993a)	35
Figure 2.2 : Chute de bloc depuis le talus et le versant (BRGM)	37
Figure 2.3 : N en fonction de L et T	47
Figure 2.4 : N_w en fonction de L_1 et L_2	47
Figure 2.5 : N en fonction de L	48
Figure 2.6: Matrice de classification de l'aléa (OFEFP, 1997)	52
Figure 3.1 : Modes de déplacements possibles d'un bloc sur un versant Descoedres(1997).	57
Figure 3.2 : Interpénétration entre blocs (Mejia et al , 2010)	61
Figure 3.3 : modèles de milieu continu équivalent A : Avalanche rocheuse, B : Fluide homogène équivalent (Banton, 2009a)	61
Figure 3.4 : Déplacement des particules lagrangiennes à travers un grille eulérien fixe (Al-Kafaji, 2013)	62
Figure 3.5 : Modélisation mixte de la propagation d'une masse rocheuse (Lisjak and Grasselli, 2011)	63
Figure 3.6 : Etude trajectographique par une approche empirique (Petje, 2005)	64
Figure 3.7 : Présentation en 2D du mouvement d'un projectile	66
Figure 3.8 : Référentiel local utilisé pour la formulation du glissement frottant (h : axe horizontal de la face ; d : axe opposé à la direction de plus grande pente de la face; n : axe normal à la face).	68
Figure 3.9 : Roulement frottant d'une sphère sur un plan	71
Figure 3.10 : Phase impact / rebond d'un bloc (Wyllie and Mah, 2014)	72
Figure 4.1 : Situation géographique de la zone d'étude	85
Figure 4.2 : Versant nord du mont Imma Tadrart PK24 au PK 25 (Cap Aokas)	86
Figure 4.3 : Talus en face de l'hôtel SAFSAF PK37+300 (Souk El Ténine)	86
Figure 4.4 : Versant Sud et Est du mont Ighil Louelene PK43 à PK45 (Darguina)	87

Figure 4.5 : Coupe Nord-Sud montrant les principales unités structurales de l'Algérie (Dessin de H. Haddoum, modifié)	88
Figure 4.6 : Les unités structurales des Babors et du Tell nord-Sétifien (O. Kireche 1993)	89
Figure 4.7 : Carte géologie de la zone d'étude extraite à partir de la carte de Ziama N°48	93
Figure 4.8 : Structure laminaire N40° <62° N-NW	94
Figure 4.9: Calcaire dolomitique en banc métrique	95
Figure 4.10 : Anciens éboulis localisés entre les failles dans les zones de broyages	95
Figure 4.11 : Terrasse alluvionnaire	95
Figure 4.12 : Faille majeure décrochante sénestre (N10°)	96
Figure 4.13 : Six failles « N125° » de l'Est vers l'Ouest de la falaise	97
Figure 4.14 : Altération des calcaires	98
Figure 4.15 : Calcaire bréchique	98
Figure 4.16 : Surface de karstification	98
Figure 4.17 : Cavité de volume plurimétrique au-dessous de la faille 5	98
Figure 4.18 : F2 visible sur le versant Est	99
Figure 4.19 : F3 et F4 à l'intérieur du l'ancien tunnel en amont	99
Figure 4.20 : F5 visible sur le versant Est	99
Figure 4.21 : la fracture F6	99
Figure 4.22 : Talus en face du complexe SAFSAF	100
Figure 4.23: Traces des tirs de mine (BET CAN)	100
Figure 4.24 : Calcaire travertineux	101
Figure 4.25 : Plan de stratification des travertins	101
Figure 4.26 : Grillage pondus et plaqué	101
Figure 4.27 : Béton projeté sur les calcaires	101
Figure 4.28 : Faille normale N-S zone Est	102
Figure 4.29 : Faille subverticale N160° zone (BET CAN)	102
Figure 4.30 : Levé de discontinuité au niveau du talus Est	103
Figure 4.31 : cavité située sous le surplomb	103
Figure 4.32 : Morphologie et lithologie des talus du mont Ighil Loulene	104
Figure 4.33 : Calcaire marneux en plaquettes	104
Figure 4.34 : Formation conglomératique	104
Figure 4.35 : Plan de stratification et les deux familles F2 et F3	105
Figure 4.36 : Précipitation annuelle entre la période 1997-2022	106
Figure 4.37 : Températures mensuelles moyennes durant la période (1997-2023)	107
Figure 4.38: l'incendie août 2021 Cap Aokas	107
Figure 4.39: Chute des blocs Aokas août 2021	107
Figure 4.40 : Précipitation mensuelle moyenne durant la période 1997-2023	108
Figure 4.41 : Chute de bloc au niveau du Cap Aokas (8/9/2024) et Derguina (9/9/2024)	108
Figure 4.42 : Carte de sismicité de l'Algérie du Nord période 2002-2006 (Craag)	109

Figure 4.43: Eboulement à Cap Carbon (19/3/2022)	110
Figure 4.44 : Zonage sismique de l'Algérie (RPA 2024)	110
Figure 5.1 : Implantation des fenêtres d'observation sur le versant du Cap Aokas	115
Figure 5.2 : Implantation du scanline sur le talus rocheux en face de l'Hôtel Safsaf	121
Figure 5.3 : Implantation des scanlines le long du versant rocheux à Derguina	122
Figure 5.4 : Projection stéréographiques des discontinuités (Falaise Aokas)	126
Figure 5.5 : La série des failles N130° qui découpent le versant Nord Falaise d'Aokas	126
Figure 5.6 : Projection stéréographique des discontinuités talus hôtel Safsaf	127
Figure 5.7 : Projection stéréographique des discontinuités Derguina	128
Figure 5.8 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) Aokas	129
Figure 5.9 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) Talus Safsaf	129
Figure 5.10 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) talus Derguina	130
Figure 5.11 : Carte des pentes du versant nord du Cap Aokas	134
Figure 5.12 : Analyse cinématique - Basculement - (Falaise d'Aokas)	135
Figure 5.13 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Falaise d'Aokas)	135
Figure 5.14 : Analyse cinématique - Glissement plan - (Talus Safsaf).	136
Figure 5.15 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Talus Safsaf).	138
Figure 5.16 : Carte de variation de l'orientation des versants et talus exposés à la route RN9 au niveau de Derguina.	138
Figure 6.1 : Modèle numérique du terrain de 5m de résolution (Cap Aokas).	146
Figure 6.2 : Répartition spatiale des probabilités de rupture type glissement plan des plans de discontinuités (F1, F2, F3 et F4) à travers le versant du Cap Aokas.	146
Figure 6.3 : La distribution des nombres de cellules occupés par les probabilités de rupture type glissement plan à travers le versant Nord du Cap Aokas.	147
Figure 6.4 : La répartition spatiale des structures dangereuses type dièdre à travers le versant Nord d'Aokas.	148
Figure 6.5 : la distribution des nombres de cellules occupés par les probabilités de rupture type glissement dièdre à travers le versant Nord du Cap Aokas.	149
Figure 6.6 : Carte de susceptibilité à la rupture versant Nord Cap Aokas (Ladjel et al., 2024).	150
Figure 6.7 : Répartition des zones sources des blocs à travers la falaise (DTP Béjaia 2016).	150
Figure 6.8: Eboulement Safsaf (14/01/2017)	151
Figure 6.9 : Les instabilités rencontrées sur le talus en face de l'hôtel Safsaf (BET CAN)	152
Figure 6.10 : Vue de face de la masse 1 et la coupe de principe de la masse 1(BET CAN)	153
Figure 6.11 : Planche photographique des instabilités 2-8 (BET CAN)	153
Figure 6.12 : Différentes position de prise des photos pour l'ensemble de stabilité 2-8	154
Figure 6.13 : Planche photographique de l'instabilité 9 (BET CAN)	155

Figure 6.14 : Planche photographique du surplomb (BET CAN)	155
Figure 6.15 : Modèle numérique de terrain (talus de Derguina)	156
Figure 6.16 : Carte d'orientation des talus (talus Derguina)	157
Figure 6.17 : Influence de l'orientation du talus sur la probabilité de trouver un plan critique	157
Figure 6.18 : Secteurs routiers exposés au talus contenant des blocs susceptibles à l'éboulement.	158
Figure 6.19 : Trace des blocs détachés et blocs susceptibles à la rupture (talus Derguina).	158
Figure 7.1 : Organigramme méthodologique de l'évaluation du risque chute de blocs	163
Figure 7.2 : Trajectoires de la simulation 3D et les cartes de densité des trajectoires à partir des zones sources ; a) faible, b) moyenne, c) forte.	166
Figure 7.3 : (1) : Photo de chute de blocs 2019, les blocs ont atteints l'intérieur du tunnel sortie ouest ; (2) : Les cartes de point d'arrêt pour les zones de mobilisation : a) faible, b) moyen, c) fort.	167
Figure 7.4 : Carte d'occurrence de chute de blocs du versant Nord du CAP AOKAS (Ladjel et Al., 2024).	168
Figure 7.5 : Carte de la vitesse et de la hauteur du rebond de la simulation 3D	168
Figure 7.6 : Carte de l'énergie et les classes d'énergies issues de la simulation 3D	169
Figure 7.7 : Profils des trajectoires ; (a) : classe 3, (b) : classe 2, (c) : classe 1	169
Figure 7.8 : Carte d'aléa chute de bloc de la falaise Cap Aokas (Ladjel et al., 2024)	170
Figure 7.9:(a) et (b) : transformation de l'ancienne route en amont en une zone touristique, (c) et (d) activité touristique au niveau des cavités féeriques situées au niveau du RN9 .	171
Figure 7.10 : Division de la zone d'étude en secteurs et implantation des profils	171
Figure 7.11:exemples des profils d'énergie des trois secteurs 1, 2 et 3	176
Figure 7.12 : Classification de risque chute de blocs au niveau de la falaise du Cap Aokas	176
Figure 7.13 : Grillage pendu et grillage plaqué déposés au niveau du talus hôtel SAFSAF	179
Figure 7.14 : Présence limitée de fosse par endroits avec efficacité moyenne	181
Figure 7.15 : Courbe exponentielle exprimant le score par rapport à la hauteur du talus.	182
Figure 7.16 : Courbe exponentielle exprimant le score par rapport à la taille du bloc.	183
Figure 7.17 : Variation de la taille et du volume des blocs susceptibles à l'éboulement	183
Figure 7.18 : Variation de l'index RHRS au niveau des secteurs susceptibles	184
Figure 7.19 : Cartographie du risque hiérarchisé de chute de blocs en talus le long de la RN9.	184

La liste des tableaux

Titre du tableau	Page
Tableau 1.1 : Classification de chute de bloc selon Varnes, 1978	8
Tableau 1.2 : Classification des mouvements gravitaires proposée par (Hungar et al., 2013)	9
Tableau 1.3 : Classification en fonction du volume éboulé (Besson et al., 1999)	10
Tableau 1.4 : Classification en fonction de la vitesse de déplacement (BRGM/RP-52909-FR 2003)	10
Tableau 2.1 : Classification de l'intensité en fonction de l'énergie E (Kj) (Raetz et al. 2002)	30
Tableau 2.2 : Choix du type de zonage (inspiré à partir de Fell et al., 2008)	31
Tableau 2.3 : Paramètres pris en compte dans la méthode RES	34
Tableau 2.4 : Système de notation des critères RHRS Budetta (2004)	37
Tableau 2.5 : Qualification du risque chute de bloc en talus RHRS	38
Tableau 2.6 : Index de vulnérabilité RHRS	39
Tableau 2.7 : Matrice d'évaluation du risque chute de bloc en versant RHRS	39
Tableau 2.8 : Echelle qualitative de probabilité d'occurrence (probabilité)	43
Tableau 2.9 : Echelle temporelle proposée (délai)	44
Tableau 2.10 : Classification des instabilités selon la méthode Matherrocking	50
Tableau 2.11 : Classification qualitatives de la probabilité d'occurrence	51
Tableau 2.12 : Classification de risque chute de bloc et indication des mesures de protection (Saroglou et al., 2012)	53
Tableau 4.1 : Précipitations enregistrées durant les éboulements enregistrés	108
Tableau 5.1 : Levé de discontinuité du versant du Cap Aokas	115
Tableau 5.2 : Levé de discontinuité talus Hôtel Safsaf	121
Tableau 5.3 : Levé de discontinuité talus Derguina	123
Tableau 5.4 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Falaise Aokas »	126
Tableau 5.5 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Safsaf »	127
Tableau 5.6 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Derguina »	128
Tableau 5.7 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (site Aokas)	129
Tableau 5.8 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (site talus Safsaf)	130
Tableau 5.9 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (Talus Derguia)	130
Tableau 5.10 : Analyse cinématique - Glissement plan - selon l'orientation du talus	131
Tableau 5.11 : Analyse cinématique -Glissement plan- selon la variation de la pente du versant	132
Tableau 5.12 : Analyse cinématique - Glissement dièdre - (Falaise d'Aokas)	133

Tableau 5.13 : Les seuils de pente déclenchant le glissement type dièdres	134
Tableau 5.14 : Analyse cinématique – Glissement dièdre – (Talus Safsaf)	136
Tableau 5.15 : Analyse cinématique – Basculement – (talus Safsaf)	137
Tableau 5.16 : Analyse cinématique pour les trois discontinuités - Basculement - (Talus Safsaf)	137
Tableau 5.17 : Analyse cinématique - Glissement plan en fonction de la variation de l'orientation des talus de Derguina	139
Tableau 5.18 : Analyse cinématique - Glissement plan en fonction de la variation de la pente des talus de Derguina	139
Tableau 5.19 : Analyse cinématique - Glissement dièdre (Talus Derguina)	140
Tableau 5.20 : Analyse cinématique - Basculement - (Talus Derguina)	140
Tableau 5.21 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Talus de Derguina)	141
Tableau 6.1 : Mesures géométriques des instabilités et leurs mécanismes de rupture talus hôtel SAFSAF	152
Tableau 7.1 : Paramètres de terrain inclus dans le modèle de simulation	165
Tableau 7.2 : Notation des trois profils du secteur 1 selon les divers critères	172
Tableau 7.3 : Notation des trois profils du secteur 2 selon les divers critères	173
Tableau 7.4 : Notation des trois profils du secteur 3 selon les divers critères	174
Tableau 7.5: Classification du risque chute de blocs dans les trois secteurs	175
Tableau 7.6 : Notation du talus SAFSAF selon la méthode RHRS	178
Tableau 7.7 : Notation des critères de vulnérabilité	180
Tableau 7.8 : Notation du critère taux de fréquentation des dix sections	180
Tableau 7.9 : Notation du facteur Hauteur du talus	182
Tableau 7.10 : Notation du facteur taille des blocs	183

ANNEXE

Tableau I : Processus d'évolution des parois rocheuses

Tableau II : Mécanisme de rupture simple

Tableau III : Mécanisme de rupture composée

Tableau IV : Echelle de pondération des critères de stabilité Matterocking

Tableau V : Système d'évaluation du risque chutes de bloc destiné aux pentes rocheuses naturelles (H. Saroglou. 2012)



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale

Les risques naturels, en particulier les mouvements gravitaires rocheux, sont devenus une préoccupation majeure dans l'aménagement du territoire en raison de la croissance urbaine dans les régions montagneuses. Les éboulements et les chutes de blocs constituent des menaces importantes et imprévisibles, notamment sur les ouvrages linéaires (routes, voies de chemin de fer, canalisations) et les populations installées dans ces régions. Les conséquences économiques liées aux risques dus aux mouvements gravitaires varient amplement d'une région à l'autre. Aux États-Unis, ces coûts sont estimés entre 1 et 2 milliards de dollars par an (USGS, 2019), tandis qu'en Europe, le bilan économique associé s'élève à environ 1 milliard d'euros par an. Néanmoins, sur le continent africain, il existe une importante lacune dans la recherche axée sur l'impact économique de ces risques géologiques ; cette situation est due au manque de surveillance des événements et à l'insuffisance des études des parades et de leurs implications financières correspondantes. Il est donc essentiel d'évaluer l'aléa et le risque de chute de blocs dans ces régions, car ils mettent en danger la vie humaine, et la fonctionnalité des infrastructures critiques qui soutiennent la vie urbaine moderne (Varnes, 1958).

Afin d'évaluer avec précision l'aléa et le risque associés à la chute de blocs, il faut souligner la nécessité d'une compréhension approfondie de ce phénomène. La chute de blocs résulte d'un détachement brusque d'un compartiment rocheux, suivi de sa propagation rapide le long d'une pente vers une zone d'arrêt (Hantz et al., 2021), ce qui entraîne par conséquent un temps de réaction extrêmement court, rendant leur comportement difficile à prévoir. Ce phénomène est le résultat de la combinaison de multiples facteurs qui varient dans le temps et dans l'espace en contribuant à leur apparition.

La vulnérabilité aux chutes de blocs est fondamentalement déterminée par les répercussions économiques et sociales, qui vont bien au-delà des simples dommages matériels ; il englobe les perturbations importantes touchant les infrastructures et les pertes tragiques en vies humaines. Cette vulnérabilité est directement liée à la fois à l'étendue de la masse rocheuse effondrée et à l'intensité du phénomène, ce qui permet d'évaluer les conséquences potentielles en fonction des différents niveaux d'énergie (Raetzo et al., 2002).

Les réseaux routiers au nord de l'Algérie, en particulier ceux qui traversent l'Atlas Tellien vers les régions côtières, sont exposés couramment au phénomène de chute de blocs, dont les conséquences sont souvent graves et très coûteuses. Par exemple, on peut citer la route nationale RN9 au niveau du Cap Aokas, dans la wilaya de Béjaïa, qui a connu de nombreux incidents récurrents au cours de ces vingt dernières années, dont celui du Mai 2015, qui était le

plus tragique, faisant sept morts et plusieurs blessés, sans compter le coût des interventions techniques ultérieures visant à atténuer les risques sur ce site. Néanmoins, la route reste menacée à ce jour, malgré la mise en œuvre des structures et des parades installées sur ce versant. Donc, la vraie difficulté réside dans le choix de la méthodologie d'évaluation des risques.

Des recherches récentes (Jiang et al. 2020 ; He et al. 2021) ont démontré la nécessité urgente d'améliorer et de renforcer ces méthodologies. À titre d'exemple, les travaux de (Hadji et al., 2013) ont attiré l'attention sur l'obligation d'améliorer l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements des terrains dans le nord algérien. En outre, Achour et al. (2017) ont plaidé en faveur de l'intégration des techniques d'exploration de données en tant que facteur important dans les études de risques dus au mouvement gravitaire. Donc, il est nécessaire d'évoluer et d'améliorer ces méthodologies, en adoptant de nouvelles techniques et approches.

Dorren et al. (2013) ont mis en pratique une méthodologie complète à trois niveaux spécialement conçue pour l'analyse des événements liés aux chutes de blocs, et qui se distinguent par leur applicabilité à différentes échelles d'étude, les différents degrés de détail qu'ils englobent, ainsi que par les objectifs particuliers qu'ils visent à atteindre. Le premier degré D1 se concentre sur la cartographie de la susceptibilité et l'identification des zones géographiques les plus exposées aux chutes des blocs. Le niveau D2 se focalise sur la cartographie des risques, en s'appuyant sur les résultats dérivés du niveau initial D1 et en intégrant d'autres facteurs critiques tels que la fréquence des chutes de pierres, la distance potentielle d'atteinte et les niveaux d'énergie associés à ces événements. Le dernier niveau D3 met l'accent sur les évaluations spécifiques au site et sur l'étude de la stabilité et la propagation des blocs, ainsi que l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'atténuation pour éliminer le risque. Cette approche à trois niveaux permet aux chercheurs d'adapter le degré de détail de l'analyse selon l'échelle d'étude et selon les objectifs que l'on cherche à atteindre.

Toutefois, il existe plusieurs méthodologies conçues spécifiquement pour évaluer le risque de chutes des blocs ; chaque méthode utilise des critères distincts pour atteindre ses objectifs. La méthodologie Rockfall Energy System facilite la sélection des paramètres pertinents à tenir en considération, conduisant à une expertise détaillée de facteurs causants, ainsi elle permet d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur les autres facteurs. La méthode Rockfall Hazard Rating System est basée sur une classification qualitative du risque au niveau des talus ou en versant, en impliquant de multiples facteurs. La méthode LPC s'appuie sur une analyse qualitative des paramètres de l'évolution et de rupture, afin d'évaluer la probabilité de chutes des blocs. La méthode Matterock aide à localiser les structures dangereuses au sein des

massifs rocheux en utilisant une approche structurale probabiliste. L'étude trajectographique fournit les différentes caractéristiques des blocs propagés telles que l'énergie cinétique, la hauteur du rebond...etc. Le choix d'une méthode particulière dépend des objectifs voulus et des sources disponibles pour l'analyse. Chacune de ces méthodologies est conçue pour identifier les étapes nécessaires à la réalisation d'une évaluation efficace des risques, en mettant l'accent sur les multiples facteurs causants.

Les chutes de blocs se caractérisent par un niveau d'imprévisibilité remarquable, car le détachement est soudain et la propagation est rapide. Par conséquent, il devient extrêmement difficile de déterminer avec précision quels compartiments rocheux spécifiques sont susceptibles de s'effondrer, le moment précis de détachement et les zones d'arrêt des blocs. Par conséquent, la mise en œuvre d'une méthodologie déterministe visant à localiser les zones susceptibles d'être sujettes à la mobilisation, tout en surveillant leurs processus de propagation, se heurte à des défis majeurs, principalement en raison de la distribution stochastique des discontinuités constatées sur les falaises (Hantz et al., 2002). Une alternative efficace et pratique consiste à utiliser des analyses statistiques et probabilistes, en utilisant une approche structurale qui présente une solution pratique aux défis posés (Jaboyedoff et al., 1996) et une approche probabiliste dans l'étude trajectographique.

Objectifs de l'étude

Il existe de nombreuses méthodologies pour évaluer l'aléa et le risque chute de blocs, cette étude vise essentiellement à distinguer les critères fondamentaux du choix de la méthode adéquate à chaque type de problème, tels que l'échelle d'étude ; la nature du phénomène, les objectifs voulus et la disponibilité des données.

Ce travail se concentre sur l'évaluation de la susceptibilité, l'aléa et le risque chute de blocs, en combinant plusieurs approches et formulations pour une meilleure adaptation aux conditions des sites étudiés.

Pour aboutir à ces objectifs, nous avons choisi le tronçon routier RN9 du PK 24 au PK 52 dans la wilaya de Bejaia, et nous avons proposé une méthodologie combinée de plusieurs approches et techniques. L'évaluation du risque est basée sur la succession de plusieurs étapes importantes :

- 1- Sectorisation du réseau routier en sections semblables vis-à-vis de la géologie et des conditions structurales. Ainsi que définir la nature du phénomène, les mécanismes de ruptures et les facteurs de déclenchement.
- 2- Effectuer une analyse cinématique et comparer les structures potentiellement dangereuses avec la topographie afin de mettre en évidence les zones susceptibles à la mobilisation.

- 3- Combiner et appliquer plusieurs méthodes afin de qualifier le risque de chute de blocs dans les trois sites.
- 4- La comparaison des résultats obtenus avec les zones de détachement existant et les dimensions des blocs situés en aval du versant issus des événements passés dans ces endroits, permet de faire valider les méthodologies proposées dans ce travail. Dans le but de proposer une méthodologie adéquate aux divers contextes des versants et talus qui logent nos réseaux routiers.

Organisation de la thèse

Le manuscrit comprend plusieurs parties, dont les trois premiers chapitres sont consacrés à la partie théorique de la thèse et les quatre derniers chapitres sont consacrés à l'analyse et l'exploitation des données ainsi que la présentation et la discussion des résultats :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du phénomène étudié (définition, classification, typologie et causes), il expose également quelques méthodes de la vérification de la stabilité des masses rocheuses.
- Le deuxième chapitre explique la relation entre l'aléa, la vulnérabilité et le risque en relation avec le phénomène étudié, et il dévoile aussi les diverses méthodes pour évaluer l'aléa et le risque chute de blocs.
- Le troisième chapitre présente l'étude trajectographique qui constitue un élément essentiel dans l'évaluation de l'aléa chute de blocs en versant.
- Le quatrième chapitre est la partie conçue pour la description de la zone d'étude, il comprend la collection des données géographiques, géologiques, structurales, climatiques, sismiques et historiques de chaque secteur de la zone d'étude.
- Le cinquième chapitre aborde l'analyse cinématique des discontinuités de chaque site étudié, en faisant ressortir les conditions géométriques défavorables liées à la topographie ainsi qu'aux discontinuités.
- Le sixième chapitre étudie la susceptibilité de mobilisation des blocs rocheux, en utilisant l'approche adéquate aux caractéristiques et conditions de chacun des sites.
- Le dernier chapitre propose une méthodologie basée sur la combinaison de plusieurs méthodes et outils, afin de qualifier l'aléa et le risque de chute de blocs.

Les principaux résultats de ce travail sont récapitulés dans la conclusion, et des recommandations et des perspectives sont proposées pour d'éventuels futurs travaux scientifiques.



**CHAPITRE I «LES MOUVEMENTS
GRAVITAIRES ROCHEUX »**



1. Introduction

Le terme « mouvements de versant » englobe plusieurs phénomènes (glissements de terrain, coulée boueuse, écoulement...) et regroupe diverses disciplines et méthodes, allant des plus classiques aux plus techniquement développées.

Sur le plan mécanique, ces mouvements sont provoqués grâce à la combinaison d'action de la force motrice permanente (le poids propre des terrains) avec les multiples contraintes, parfois provisoires. Ces contraintes peuvent survenir de façon sporadique, entraînant des phases d'initiation (au cours desquelles les mouvements semblent souvent insignifiants), de paroxysme jusqu'à la stabilisation (Yann Gunzburger, 2014). Toutefois, la classification de ces mouvements varie en fonction de leurs caractéristiques (Monjuvent et Marnezy, 1986 ; Antoine et Giraud, 1995).

Dans ce premier chapitre, on va exposer les mouvements gravitaires rocheux, dont le phénomène de chute de bloc fait partie, et une définition détaillée sera présentée, ainsi que les différentes classifications seront exposées et les divers facteurs causant la manifestation seront cités. Par la suite, et puisque le rôle des fractures au sein du massif rocheux est très important, on va aborder leurs caractérisations. Enfin, la vérification de la stabilité des blocs sera entamée suivant plusieurs approches.

2. Mouvement gravitaire rocheux

Les mouvements gravitaires rocheux sont un phénomène naturel qui se produisent généralement sur des pentes abruptes ou des falaises et qui implique le détachement instantané et rapide d'un matériau rocheux (Bourrier, 2008). Après la rupture, le mode de déplacement des blocs issus de détachement est soit une chute libre, soit une série de rebond de hauteur décroissante, ou bien glissement et/ou roulement. L'intervalle des volumes des éboulis varie d'une pierre, blocs rocheux isolés jusqu'à des mouvements en grande masse.

Ce phénomène possède des caractéristiques distinctives qui le distinguent des autres :

- Ils touchent essentiellement les reliefs rocheux très accidentés.
- Le massif doit être affecté par des fractures, permettant de générer des blocs.
- Le phénomène est très dangereux, car la propagation des compartiments est très rapide, rendant l'évacuation des personnes des infrastructures impossibles.
- Ce phénomène peut couvrir diverses fourchettes de volumes, il englobe :
 - ✓ Les chutes de blocs : c'est le déplacement de quelques blocs isolés sans interaction entre ces blocs ;

- ✓ Les éboulements de petite à moyenne taille (avec des volumes inférieurs à 100 m³), les interactions entre les éléments sont négligeables ou nulles ;
- ✓ Les écroulements (mouvement en masse) sont identifiés par une interaction importante entre les blocs ; la transmission d'énergie entre les éléments rocheux peut être assimilée à des écoulements. L'étude de leur propagation peut être effectuée à l'aide du modèle de type écoulement fluide.

3. Différentes classifications des mouvements rocheux

Il existe plusieurs classifications pour ranger les mouvements de terrain en catégories, dont les éboulements rocheux font partie (Tab. 1.1). Ces classifications ont évolué au cours du temps, et les différents paramètres (mode de rupture, le volume, la morphologie, la lithologie et la cinématique) sont prises en compte dans ces diverses classifications (Cruden et Varnes, 1996; Fell et al., 2008; Banton, 2009a;).

Tableau 1.1 : Classification de chute de bloc selon Varnes, 1978

Type de mouvement	Rock	
Chute	Chute de bloc	
Renversement	Basculement	Glissement de roche
Glissement rotationnel	Effondrement rocheux	
Glissement en translation	Glissement	
Étalement latéral	Etalement rocheux	
Flux	Ecroulement rocheux	Avalanche rocheuse
Complexe	Glissement et écroulement rocheux	

3.1 Classification de (Evans and Hungr, 1993)

- La chute de blocs : un nombre limité d'éléments rocheux se détachent d'une masse et interagissent principalement avec le relief lors de la propagation.
- Les éboulements rocheux : il s'agit d'un mouvement des volumes intermédiaires (< 10 000 m³) et une vitesse de propagation extrêmement rapide (vitesses > 5 m/s),
- Les avalanches rocheuses : il s'agit d'un mouvement gravitaire qui implique des volumes très importants (>10 000 m³) dont le mouvement est comparable à celui d'un fluide.

3.2 Classification de (Hungr et al., 2013)

Cette classification complète celle proposée par (Varnes, 1978), elle est basée sur les dernières croissances technologiques et informatiques (la photogrammétrie ; les analyses sismiques ; les simulations numériques...etc.). Ce qui facilite leur suivi dans le temps et permet une détection plus précise des zones de détachement (Tab. 1.2).

Selon (Hungr et al., 2013), le mot « chute de blocs » (Rockfall) est associé à la propagation d'un bloc rocheux isolé, même si au moment de détachement, un mouvement en masse a pu être identifié. En effet, il existe des éboulements en masses, dont le plus grand risque est lié à la propagation d'un compartiment isolé. Car la propagation de ces éléments isolés est connue pour avoir un impact destructeur considérable. Donc, le risque est en relation directe avec les blocs et non avec la masse rocheuse dans son ensemble. De ce fait, il est important de les tenir en considération dans le processus d'aménagement du territoire, comme le souligne Frayssines (2005).

Tableau 1.2 : Classification des mouvements gravitaires proposée par (Hungr et al., 2013)

Type de mouvement	Rock
Chute	Chute de bloc
Basculement	Basculement Basculement par flexion
Glissement	Glissement rotationnel Glissement planaire Glissement dièdre Glissade composé Glissade irrégulier
Etalement	Etalement rocheux
Flow Ecoulement	Avalanche rocheuse
Déformation de pente	Déformation des montagnes Déformation des pentes rocheuses

4. Typologie des mouvements rocheux

Les caractéristiques de la roche, de la pente et du réseau de discontinuité ont permis d'avoir divers types de mouvement.

En général, on peut identifier deux grands critères de classification en tenant compte soit de facteurs géologiques et géomorphologiques, soit à des aspects mécaniques liés aux contraintes et aux comportements des matériaux rocheux.

4.1 Classification en fonction de la géologie et de la géomorphologie

4.1.1 Classification basée sur le volume des masses en mouvement

En fonction des volumes éboulés croissants (Tab. 1.3), on peut exposer les phénomènes suivants :

- **Les blocs isolés** : se détachent de la pente individuellement et se propagent séparément. La rupture de ces blocs est due aux divers facteurs de prédisposition et déclenchant ;
- **Les écoulements** : Ce sont des masses rocheuses plus importantes qui se mettent en mouvement. Le processus de rupture est progressif, il est lié à l'altération-érosion, ou à la dégradation des assises en pied.

Tableau 1.3 : Classification en fonction du volume éboulé (Besson et al., 1999)

Eléments	Volume	Classe	Volume globale éboulé
Pierres	$V < 1\text{dm}^3$	Chute de pierre ou de bloc	$V < 100\text{m}^3$
Blocs	$0.1\text{m}^3 < V < 1\text{m}^3$	Eboulement en masse ou éboulement majeur	$100\text{m}^3 < V < 1\ 000\ 000\text{m}^3$
Gros blocs	$V > 1\text{m}^3$	Eboulement en grande masse ou éboulement catastrophique	$V > 1\ 000\ 000\text{m}^3$

4.1.2 Classification en fonction de la vitesse de déplacement

La rupture des blocs est progressive, au début, les signes de déplacement sont lents, mais, au moment du détachement, les déformations évoluent à une vitesse élevée, donc, seules les dispositifs de mesures de déplacement peuvent donner un avertissement sur le moment où celle-ci pourrait se manifester.

En fonction de la vitesse de propagation, le phénomène de chute de bloc peut être classé comme indiqué dans le tableau 1.4, dont l'échelle suivant est habituellement admis:

Tableau 1.4 : Classification en fonction de la vitesse de déplacement (BRGM/RP- 52909-FR 2003)

Mouvement	Vitesse de déplacement
Très lent	1mm/ans à 12mm/an
Lent	1mm/mois à 50mm/mois
Moyen	1.5mm/jour à 100mm/jour
Rapide	4mm/h à 10 000mm/h
Très rapide	2500mm/s à 10 000mm/s (et plus)

4.1.3 Classification en fonction de la forme de l'instabilité

Après la rupture, la zone de détachement est marquée par une forme distincte (JP.Mougin, 1973), dont on peut distinguer ce qui suit :

- Rupture circulaire
- Rupture sigmoïde ou listrique
- Rupture plane
- Rupture à forme hybride
- Surface de rupture en rapport avec la structure du massif rocheux

Puisque, les typologies fondées sur les mécanismes des ruptures adoptent également les critères morphologiques tout en tenant compte d'autres facteurs, cette classification n'est pas souvent utilisée.

4.1.4 Classification basée sur la nature des matériaux rocheux

Ces classifications ne sont pas utilisées fréquemment, elles font différencier entre les roches dures et tendres. Les ruptures de forme circulaires s'observent typiquement dans les roches meubles où la cohésion est nulle, ou encore, lorsque la cohésion diminue significativement suite aux modifications de caractéristiques ou d'une importante fracturation.

4.2 Classification basée sur les modes de rupture

Les catégories suivantes sont distinguées et généralement, sont couramment utilisées (Calvino et al., 2001 ; Homand .,1983 ; Norrish&Willy., 1999 ;Panet., 1991)

- **Dégradation superficielle** : Ce sont des chutes de pierres liées aux détachements superficiels de petits compartiments rocheux, les agents d'altération tels que les précipitations sont les causes principales de cette dégradation. Bien que cet événement apparaisse mineur, par rapport aux mouvements de grande ampleur, il peut y avoir des effets importants car le détachement de petits éléments rocheux peut de temps en temps déstabiliser des masses rocheuses plus importantes
- **Glissement plan** : le déplacement est effectué selon un plan de discontinuité plane telle qu'une fracture, une limite stratigraphique ou couche sur couche (Fig. 1.1). Également, on peut le voir apparaître au niveau d'un plan de rupture en relation avec un joint de tension subparallèle au front de falaise qui est en rapport avec les états de contraintes locales. De plus, pour que le glissement puisse se produire, le plan de rupture doit forcément resurgir au niveau des versants ayant une pente élevée vers l'aval.

Les conditions de rupture sont abouties quand les efforts moteurs dépassent les forces de résistance exprimées par le frottement sur le plan de rupture.

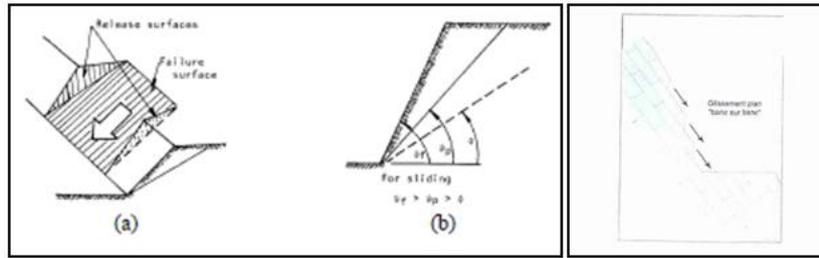


Figure 1.1 : Rupture plane (a) Condition de rupture (b) Glissement banc sur banc (c)
(Calvino et al., 2001)

- **Rupture de pied** : la rupture se développe à la base d'une structure en colonne dont le mouvement est dirigé vers l'extérieur (Calvino et al., 2001).
- **Glissement de dièdre (ou en coin)** : Il s'agit d'un déplacement par translation d'un bloc rocheux sur deux plans de fracture créant ainsi un dièdre ; il délimite souvent des volumes plus petits, pour recouper le versant. Le plongement aval du dièdre doit être important, pour provoquer une instabilité de type dièdre, la résistance au cisaillement sur les plans de rupture doit être inférieure aux forces déstabilisatrices.

Ce type de rupture est considéré comme un phénomène classique et fréquent dans les massifs rocheux où la fracturation est dense, suffisamment impotente par rapport à la pente du relief, et clairement évidente. Les cicatrices laissées par ces dièdres sont très perceptibles et facilement discernables, car la trace laissée dans la zone de détachement du compartiment rocheux prend la géométrie des discontinuités qui le forment.

- **Rupture de surplomb** : le détachement se manifeste quand la résistance du matériau est affaiblie sous l'effet des forces de traction, de flexion ou de cisaillement.
- **Rupture par basculement** : Suite à la présence des discontinuités rectilignes et profondes, la masse rocheuse se découpe en colonnes ; ces colonnes possèdent des caractéristiques géométriques très propices au basculement. En fait, une force ou un mouvement relativement faible vers la base peut les déstabiliser, lorsque la projection du centre de gravité de la colonne rocheuse est située en dehors du polygone de base. Le basculement peut se produire également dans des massifs homogènes qui sont plus déformables uniquement en raison de la décompression au sommet, sans avoir provoqué des déstabilisations significatives à la base (Fig. 1.2a).

- Chute de résistance du pied : (passage de la traction à la compression), ce qui provoque un léger affaissement du sol à la base de la colonne, incitant le basculement ;
 - Décompression du massif : (passage de la compression à la traction), due aux fissures de traction sub-verticales non confinées en tête de la paroi, favorisant un léger mouvement du massif vers le vide ;
 - Rupture par flexion d'écailles : il s'agit du découpage du massif par des discontinuités très rectilignes avec un très fort pendage vers l'amont.
- **Fauchage** : il s'agit d'un mouvement de basculement dirigé vers la vallée, composé de colonnes séparées par des fractures à pendage élevé, qui diminue avec la profondeur (Fig. 1.2b).
- **Flambage** : il s'agit d'un phénomène purement dû à la gravité, la rupture se produit généralement au pied de la colonne en raison du poids de l'écaille rocheuse (Fig. 1.2c). Il est fréquent dans les mines et peut être observé localement sur les falaises, elle touche encore des colonnes d'épaisseur métrique et se manifeste sur les pentes hautes et abruptes. Cela conduit à une déformation basale en courbe, ce qui entraîne un amincissement de la colonne, susceptible de provoquer une rupture en kink. Ce phénomène a été observé dans des cas locaux lorsque les falaises sont abruptes et homogènes, et où les propriétés des matériaux à la base sont altérées ou trempées. Les agents climatiques, le processus d'altération et la décompression peuvent contribuer aux découpages de panneaux minces parallèles au front de la falaise.

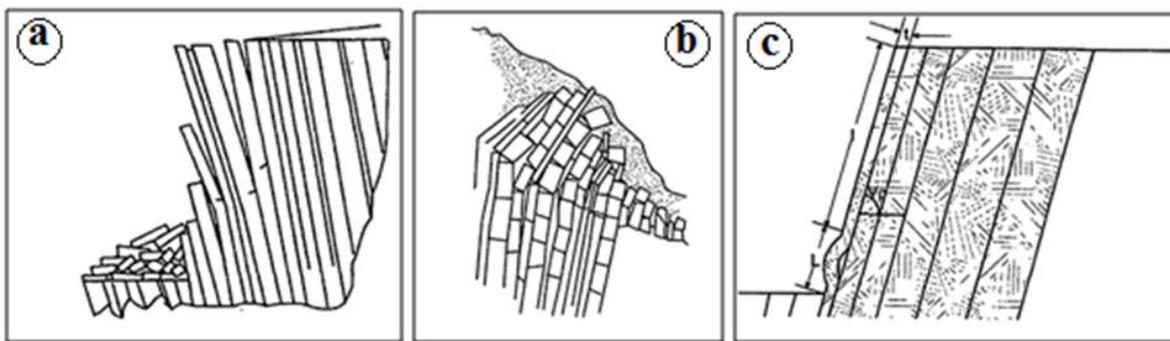


Figure 1.2 : a) Basculement par flexion, b) Fauchage, c) Flambement (Norrish&Willy., 1999)

- **Glissement pseudo-circulaire** : Cette forme de rupture touche les roches tendres ou altérées, dont leur comportement ressemble aux terrains meubles (Fig. 1.3).

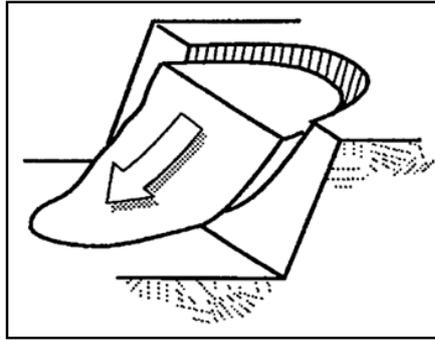


Figure 1.3 : Glissement pseudo-circulaire (Norrish&Willy., 1999)

5. Causes de détachement des blocs

Les chutes de bloc sont dues à la perte de cohésion des roches causée par divers processus de dégradation, aux agents d'altération, d'érosion, et à des facteurs extérieurs anthropiques, ainsi qu'aux événements naturels tels que l'activité sismique et le vent (Keaton, 2012).

En outre, les progrès technologiques du siècle dernier sont considérés comme un facteur de déclenchement supplémentaire de risque, spécifiquement dans les zones de l'exploitation minière à ciel ouvert de grande ampleur, les mouvements gravitaires rocheux sont fréquents sur ces zones.

On distingue deux catégories principales de paramètres causant les chutes de blocs :

- **Les facteurs de prédisposition** (permanents) : agissant sur l'aptitude du bloc à la rupture.
- **Les facteurs de déclenchement** (temporaires) : ces facteurs agissent sur les conditions incitant le déclenchement du phénomène.

5.1 Les facteurs de prédisposition

Les chercheurs citent fréquemment divers paramètres qui contribuent à la rupture des blocs :

- Le niveau d'altération des roches : l'altération affaiblit la résistance des roches, en particulier à proximité des discontinuités, favorisant ainsi les instabilités de surface ;
- La présence des minéraux particuliers : tels que les minéraux argileux ou les évaporites peuvent favoriser le glissement et la solubilité, respectivement ;
- La séquence stratigraphique : Les basculements et les ruptures en pieds peuvent être favorisés par l'existence d'une couche altérée intercalaire ou à la base de la paroi ;

- La résistance intrinsèque : Les ruptures des surplombs ou de base et les basculements sont dues à la flexion et à la décompression, tandis que le flambement et le fauchage peuvent être provoqués par les caractéristiques faibles des roches;
- L'orientation des discontinuités : en particulier par rapport à l'orientation du relief, peut définir les discontinuités susceptibles à la rupture ;
- La persistance des discontinuités : ce facteur contrôle le volume et la forme des compartiments rocheux qui sont potentiellement instables ;
- L'espacement entre discontinuités : il détermine la taille et le volume des blocs rocheux et affecte la résistance globale du massif ;
- La résistance au cisaillement des discontinuités : est influencée par la rugosité, l'ouverture ou la fermeture de la fracture, la nature des matériaux de remplissage et le degré d'altération ;
- La résistance à la traction des discontinuités : est spécifiquement destinée aux roches qui ont la capacité de se débiter en feuilles et en dalle ;
- Le remplissage des discontinuités : L'existence des argiles altérées dans les discontinuités peut agir comme un lubrifiant et affecter leur résistance au glissement ;
- Pente de versant : la décompression de la masse rocheuse et l'aptitude de création des colonnes verticaux augmentent avec la pente du relief ;
- Hauteur de la paroi : La partie basale des parois de grandes hauteurs subit des contraintes très élevées, provoquant des ruptures ou un fluage localisé, provoquant ainsi les premiers stades de dégradation qui se propagent à travers la masse rocheuse ;
- Les contraintes géostatiques du massif : c'est la contrainte horizontale divisée par la contrainte verticale, ce paramètre peut significativement impacter l'évolution du massif ;
- Présence d'intrusion : Peut provoquer l'altération, créer un barrage hydraulique, et générer une couche de savon, et par conséquent modifier localement les caractéristiques du massif;
- Présence de cavité : elle perturbe l'état de contrainte au sein du massif et fragilise la roche;
- Perméabilité du massif : c'est la mobilité de l'eau dans les fissures, une haute perméabilité facilite la décharge de discontinuités à proximité des parois. A l'inverse, une faible perméabilité minimise les venues d'eau mais augmente les surpressions. La situation la plus défavorable se produit lorsqu'un massif perméable est obstrué par des événements tels que la fracturation ou Karst) en paroi ;
- Présence de végétaux dans la paroi : sous l'effet des poussées des racines, l'ouverture des discontinuités augmente ;

- Présence continue d'eau dans le massif : peut provoquer une réduction de la résistance, l'eau peut entraîner des mises en charge rapides et augmenter la teneur en eau;
- Présence d'anciennes instabilités : contribue à la fragilisation et à la déstabilisation du massif rocheux;
- Sollicitations cycliques : Une longue période de sollicitations périodiques diminue la résistance des discontinuités ;
- Joints de tension : créés suite au mécanisme de cisaillement au sein du massif rocheux. Ce processus provoque un déplacement important de la masse et conduit à une dislocation d'une partie rocheuse du massif, et l'apparition des joints de tension. Le rôle du joint de tension est variable selon le cas ; la présence des joints indique que la masse rocheuse est déjà affectée par le cisaillement et sa stabilité est gravement compromise. De plus, les zones de tension peuvent recueillir l'eau de pluie et contribuent à une charge hydraulique rapide. En revanche, l'ouverture d'une zone de tension peut améliorer la circulation superficielle, améliorant ainsi la stabilité.
- L'érosion en pied de falaise : provoque un déséquilibre des forces et déstabilise la falaise ;
- Impact de la houle ; Peut provoquer une force statique identique à une accélération introduite par la houle. Ce qui favorise une déstabilisation accrue, ou une fracturation à la base de la falaise due à la charge hydraulique.

5.2 Les facteurs de déclenchement

Les causes fondamentales qui servent de déclencheurs sont :

- Les eaux d'infiltration: les poussées d'eau dans les discontinuités qui existent derrière les compartiments potentiellement instables perturbent l'état de l'équilibre du compartiment ;
- Mouvement dans les terrains meubles situés à la base d'une paroi rocheuse, peut provoquer des basculements par défaut d'assise ;
- Glissement des terrains tendres situés à la base ou en arrière de la paroi, peut déstabiliser la masse rocheuse ;
- Purge naturelle ou artificielle de blocs qui contribuent en premier lieu à la stabilité, juxtaposée à la déstabilisation de blocs plus petits qui peuvent, par conséquent, précipiter l'effondrement de compartiments rocheux plus importants ;
- Le vent : en cas de force intense, la végétation située sur les pentes est déracinée, ce qui entraîne la suppression de compartiments rocheux et favorise le délogement des blocs ;

- Ravinement par ruissellement : l'écoulement en paroi peut altérer rapidement les éléments fins et peu compacts supportant les blocs rocheux situés au-dessus ;
- Suffosion par venue d'eau dans le massif : les particules fines peuvent être mobilisées par l'entrée d'eau dans le massif, la formation de divers vides dans le massif peut provoquer une dégradation de la paroi ;
- Vibration : Les activités sismiques ou les vibrations attribuables aux efforts de construction peuvent provoquer des instabilités au sein du relief rocheux ;
- Gel-dégel : Les angles de glace peuvent exercer une pression sur les compartiments rocheux. Également, les vides laissés par les glaces fondues peuvent éroder la roche et diminuer leur résistance au cisaillement. En outre, les argiles situées au sein des fissures peuvent subir une diminution de cohésion au cours de ces processus ;

L'influence de l'eau sous ses divers états ne doit pas être négligée :

- Ruptures par basculement sont influencées par les eaux de ruissellement ;
- Les eaux de nappes et les eaux marines : les ruptures de pied des massifs peuvent être provoquées sous l'effet d'altérations chimiques et de la dégradation mécanique.

6. Caractérisation des dimensions des discontinuités

Les caractéristiques géométriques relatives aux discontinuités nécessitent la mise en œuvre de techniques d'échantillonnage. Plus précisément, cela implique un relevé des caractéristiques structurales menées de manière semblable et cohérente pour garantir que l'échantillonnage soit spatialement homogène.

Toutes les données récoltées facilitent la spécification des caractéristiques et l'évaluation de l'homogénéité du massif rocheux. L'échantillonnage est effectué selon deux méthodes distinctes :

- **La scanline** : cette méthode consiste à tracer une ligne droite appelée scanline et d'identifier toutes les discontinuités de persistance apparentes qui dépassent un seuil désigné. Il est impératif de respecter une ligne droite dans toute la mesure de possibilité, toutes les caractéristiques non recoupées par cette trajectoire linéaire doivent être ignorées ; l'échantillonnage est effectué sur une largeur proportionnée à la hauteur d'un humain moyen. Dans des conditions optimales, cette approche permet une bonne estimation des persistances. Inversement, il est essentiel de reconnaître que les discontinuités peuvent être orientées parallèlement à une scanline ; donc elles ne sont pas mesurées. Généralement, une scanline est sélectionnée selon les familles à analyser.

- **La fenêtre d'échantillonnage** : Cette méthodologie permet d'identifier à distance les caractéristiques structurales à partir d'une surface aussi plane que possible ; son orientation moyenne est enregistrée. L'observation d'une fenêtre permet d'identifier des caractéristiques structurales représentatives au sein du volume étudié, en créant une esquisse de toutes les traces des discontinuités, tout en préservant leur proportionnalité. Cette méthode facilite l'appréciation des espacements moyens et des persistances moyennes.

6.1 L'Orientation

Les caractéristiques géométriques des discontinuités doivent inclure principalement la distinction entre les familles. Chacune de ces familles peut présenter des propriétés distinctes, ce qui nécessite de pouvoir les différencier en fonction de leur orientation (Fig. 1.4). On suppose ainsi que chaque famille est associée à une manifestation d'un domaine de champ de contrainte particulier.

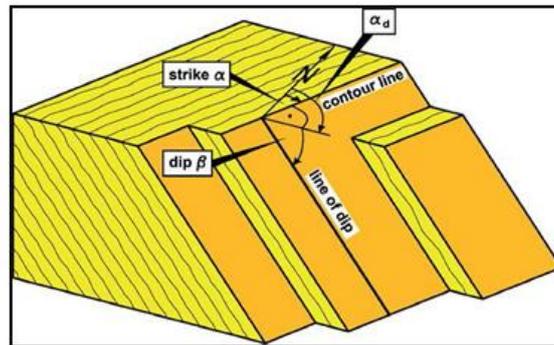


Figure 1.4 : Caractéristique géométrique des discontinuités (Wittke, 2014).

Pour cela, les mesures effectuées sur le terrain seront reportées sur le canevas de Schmidt (Fig. 1.5) et les résultats sont représentés sur un canevas de densité. Les orientations des différentes familles sont ensuite résumées par des orientations moyennes.

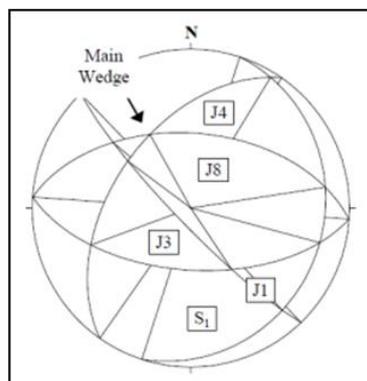


Figure 1.5 : Projection stéréographique des familles de discontinuité (Jaboyedoff et al., 1999)

6.2 Persistence

Les fenêtres d'échantillonnage ne fournissent que des informations partielles concernant les persistances. Toutefois, il est possible de calculer la longueur moyenne des traces (I) dans une fenêtre d'observation rectangulaire, en prenant en considération. Le nombre total de discontinuité (n), le nombre de traces intersectés avec la fenêtre (n_2) et le nombre de traces entièrement comprises dans la fenêtre (n_0):

$$\bar{I} = \frac{h \times u (n + n_2 + n_0)}{(h \sin \varphi + u \cos \varphi)(n - n_2 + n_0)} \quad (\text{Pahl, 1981})$$

Avec :

h la hauteur et u largeur de la fenêtre

φ l'angle entre les discontinuités et la hauteur de la fenêtre.

6.3 Espacement

La distribution potentielle des espacements respecte un comportement spécifique (Fig. 1.6), lié aux champs de contraintes particuliers (Rives et al, 1992).

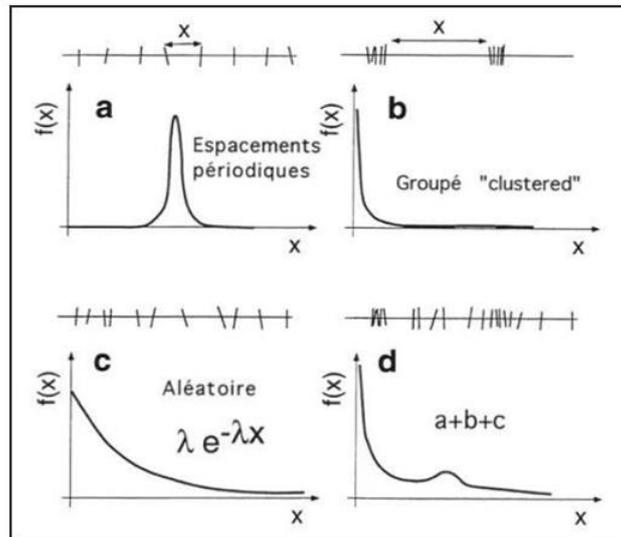


Figure 1.6 : Les lois de la distribution des espacements (M.Jaboydoff, 1996)

La projection d'un processus de fracturation aléatoire sur un processus structuré se rapproche couramment d'une distribution exponentielle négative.

6.4 Fréquence

La fréquence est donnée par : $\lambda = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{1}{L}$

Où $L = \bar{x}$, c'est la distance moyenne entre deux plans successifs.

La fréquence λ est en fonction de l'angle θ et de l'espacement apparent, elle vaut:

$$\lambda = \frac{1}{L} = \frac{1}{L_{app} \cos \theta} = \frac{\lambda_{app}}{\cos \theta}$$

6.4.1 La relation fréquence λ et la densité volumique ρ_a

L'espacement moyen L est inversement proportionnel à la densité de surface de discontinuité par unité de volume ρ_a

(Fig. 1.7) : $L = \frac{1}{\rho_a}$ et donc $\lambda = \rho_a$

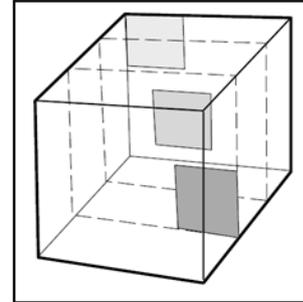


Figure 1.7 : Relation entre la densité volumique et la fréquence (Jaboyedoff ., 2016)

6.4.2 Fréquence et volume

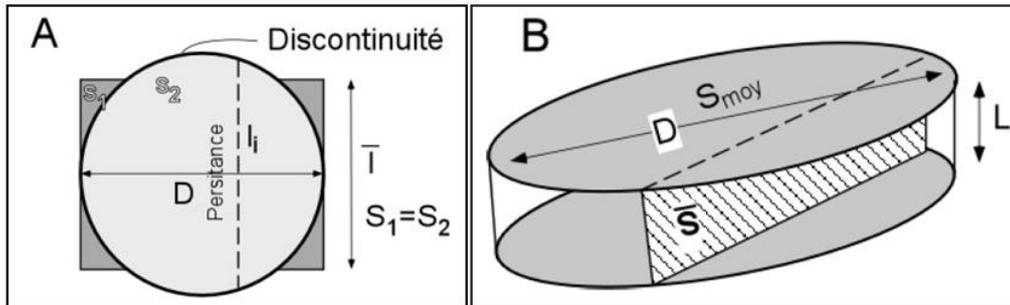


Figure 1.8 : Schéma explicatif et estimation de la surface d'une discontinuité (Jaboyedoff et al., 1999)

Si on suppose les discontinuités en moyenne circulaires de diamètre D (Fig. 8), donc $S_1 = S_2$

Avec : $S_1 = D \cdot l$ et $S_2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$

Alors la persistance moyenne l est reliée au diamètre par $l = \frac{\pi}{4} D$

D'où : $D = \frac{4}{\pi} l$

Donc la surface moyenne d'une discontinuité S_{moy} vaut : $S_{moy} = \frac{4}{\pi} l^2$

Connaissant l'espacement moyen L , on peut calculer le volume moyen \bar{V} occupé par une

discontinuité : $\bar{V} = \frac{4}{\pi} l^2 L$

7. Méthode d'analyse de la stabilité d'une masse rocheuse

Il existe deux catégories de l'évolution de la stabilité : celles fondées sur l'analyse des forces dans des conditions d'équilibre limite pour un volume spécifié du massif, et celles dérivées de l'analyse de la déformation en examinant minutieusement sa distribution au sein du massif.

7.1 Méthodes de calcul classiques

En premier lieu, il faut établir une analyse cinématique pour distinguer les modes de rupture potentiels. Par la suite, il devient faisable d'évaluer le potentiel d'instabilité grâce à une analyse de l'équilibre limite, pour obtenir le coefficient de sécurité.

7.1.1 Analyse cinématique

L'analyse cinématique a été introduite pour la première fois dans l'analyse structurale par Hoek and Bray (1981), Goodman (1989), cette méthode a donné ces preuves au cours de toutes ces dernières années (Wyllie et Mah., 2004 ; Zahri et al., 2016 ; Zeqiri et al., 2019).

Dans le cas où il y a plusieurs plans de fracturation qui se croisent à des angles obliques, les analyses cinématiques peuvent contribuer à prédire les cas de rupture possible. L'analyse cinématique est basée uniquement sur des considérations géométriques, sans tenir compte des contraintes impliquées. Cette méthode suppose que les blocs sont rigides (pas déformation) et elle permet d'évaluer si la pente est prédisposée à la formation des compartiments instables selon un mécanisme de rupture précis. Par conséquent, Les caractéristiques requises pour cette analyse comprennent la géométrie du relief (pente et orientation) et les caractéristiques des discontinuités.

Dans cette approche, l'analyse cinématique sert uniquement à définir les instabilités susceptibles conformément à un mode de rupture spécifié ; cependant elle ne permet pas de comparer les forces de mobilisation et les forces motrices au niveau du bloc instable, information élucidée par le calcul du coefficient de sécurité.

7.1.2 Analyse de l'équilibre limite

Cette méthode représente une approche géotechnique classique et relativement pratique. Dans ce contexte, l'approche de l'équilibre limite facilite la prise en compte des forces impliquées sur une ou plusieurs surfaces de discontinuités potentielles et aide à calculer le coefficient de

sécurité. Ce coefficient **F** représente le rapport entre la résistance de mobilisation pour s'opposer au glissement et les forces motrices qui tendent à le produire.

Il est exprimé par :

$$FS = \frac{\text{résistance au cisaillement mobilisée sur un plan de rupture}}{\text{résistance au cisaillement requise pour l'équilibre}}$$

A travers la configuration géométrique suivante (Fig. 1.9), il est facile de réaliser le bilan de ces forces et d'évaluer l'état potentiel d'une stabilité.

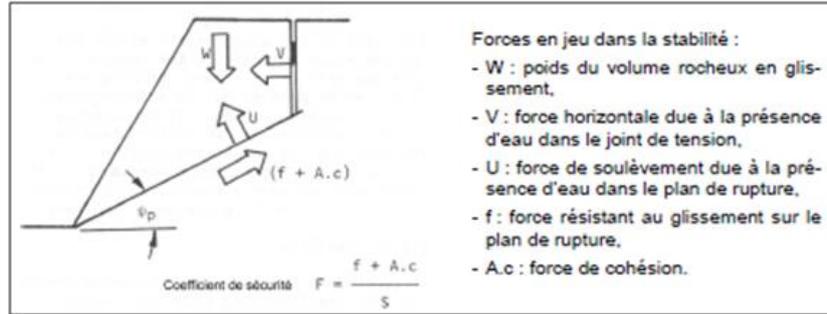


Figure 1.9 : Schéma des forces en jeu dans la vérification de la stabilité (S. Gentier 2002)

➤ **Analyse à deux dimensions**

Soit un bloc rocheux monolithique supposé indéformable, limité par un talus et deux surfaces de discontinuité : P₁ (plan de glissement) et P₂ (plan de rupture).

P₁ est caractérisé par une cohésion **c₁** et un angle de frottement **φ₁**.

P₂ résiste par traction **σ_{t2}** au glissement ; soit **χ₂** le degré de séparation.

H_w la hauteur de l'eau dans la fissure P₂

P₁ : la distribution des pressions interstitielles est linéaire.

Le facteur de sécurité est donné par l'expression suivante :

$$F = \frac{c_1 L_1 + \sigma_{t2} (1 - \chi_2) L_2 \frac{1}{\cos(\beta_2 - \beta_1)} + \{W \cos \beta_1 - U_1 - \chi_2 U_2 (\cos (\beta_1 - \beta_2))\} \tan \varphi_1}{W \sin \beta_1 + \chi_2 U_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)}$$

Avec :

W : Poids du bloc

U₁ et U₂ : Pression hydraulique sur les faces

On prend souvent la valeur pessimiste **χ = 1**

L'expression ci-dessus devient :

$$F = \frac{c_1 L_1 + (W \cos \beta_1 - U_1 - U_2 \cos(\beta_2 - \beta_1)) \tan \varphi_1}{W \sin \beta_1 + U_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)}$$

➤ **Analyse à trois dimensions**

Le bloc monolithique est limité par des plans de discontinuités formant une surface polyédrique.

Le glissement du bloc sera soit sur une face, les autres faces se détachent du massif, et l'analyse s'apparente au problème à deux dimensions.

Soit selon une ligne d'intersection d'un dièdre en se reposant sur les deux faces. Dans ce cas :

- La stabilité au glissement d'un bloc est limitée par trois plans de discontinuités P_1 , P_2 et P_3 .
- La direction de l'intersection I_{12} des plans P_1 et P_2 ;
- Le bloc se détache du massif suivant la face P_3 ; en faisant l'hypothèse qu'il n'existe pas de pont rocheux suivant la face P_3 .

L'analyse vectorielle mène vers l'expression suivante du coefficient de sécurité :

$$F = \frac{\sum_{\substack{r=1,2 \\ s=1,2}} c_r A_r + \left\langle W \sin(i_{12}, v) \left| \frac{\sin(n_s, j_v)}{\sin(n_r, n_s)} \right| - U_r - U_3 \sin(n_3, i_{12}) \left| \frac{\sin(n_r, n_3)}{\sin(n_r, n_s)} \right| \right\rangle \tan \phi_r}{W \cos(i_{12}, v) + U_3 \sin(i_{12}, n_3)}$$

Où :

I_{12} : Le vecteur unitaire de I_{12} orienté dans le sens descendant

v : Le vecteur unitaire vertical descendant

j_v : Le vecteur unitaire dans le plan vertical tel que $(i_{12}, j_v) = \pi/2$

n_r : Le vecteur unitaire sur la norme à P_r orienté vers l'intérieur du bloc

A_r : L'aire de la face P_r du bloc

P_r la résistance au cisaillement est présentée par la cohésion C_r et l'angle de frottement ϕ_r

La projection stéréographique permet d'obtenir facilement les différents angles dans la formule ci-avant.

➤ **Stabilité d'une masse rocheuse non monolithique**

L'analyse de la stabilité d'un compartiment affecté par plusieurs plans et capable de glisser le long d'une surface polyédrique, nécessite des hypothèses supplémentaires concernant les interactions entre les blocs eux-mêmes. La méthode des tranches peut être utilisée dans ce cas-là.

Une autre méthode consiste à effectuer un calcul séquentiel de la stabilité des divers blocs, en débutant par les blocs situés en hauts, en supposant qu'il n'existe aucune interaction avec les blocs situés en aval. S'il est jugé stable, l'interaction est considérée comme négligeable, à l'inverse, s'il est instable, le bloc est considéré comme étant en équilibre limite, ce qui

entraîne le calcul des réactions sur les blocs inférieurs, suivi de l'examen de la stabilité de ces blocs en tenant compte des réactions des blocs situés en amont.

7.1.3 Méthode des blocs clés

La théorie des blocs clés a été formulée par Goodman et Shi (1985), facilitant l'identification des blocs qui présentent un danger pour la stabilité du massif, et le calcul des forces nécessaires pour les sécuriser, ainsi qu'assurer la stabilité du massif. Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- On suppose que les blocs possèdent des faces planes, qui sont rigides et indéformables
- Les discontinuités sont considérées comme illimitées et sont supposées s'étendre à l'ensemble de la zone étudiée.
- Déterminer avec précision les discontinuités et les surfaces d'excavation (approche déterministe).

Les deux premières hypothèses sont jugées réalistes, les plans de fractures peuvent en effet être présumés plats et la rigidité des blocs provient de l'observation. La troisième hypothèse est incorrecte. Les massifs rocheux peuvent être influencés de manière significative par des fractures mineures, dont l'étendue spatiale est limitée, plutôt que par des fractures plus importantes et plus étendues.

L'analyse de la stabilité d'un bloc néglige l'influence des actions des autres blocs situés en amont, dont l'effet de leurs poids n'est pas intégré dans le bilan des forces motrices. Ceci présente une limite majeure de la méthode. Néanmoins, elle facilite l'identification des blocs amovibles, nécessitant une intervention pour assurer leur stabilité.

La théorie des blocs clés n'apporte aucune nouveauté importante à l'analyse classique de l'équilibre limite, cependant, sa particularité tient son aptitude à examiner les diverses combinaisons de plans de discontinuités.

7.2 Méthodes des éléments finis

Il s'agit d'une approche analytique puissante. Elle permet d'estimer les déplacements au sommet et le long des pentes, ainsi qu'à la base de l'excavation, et facilite l'identification des régions du massif qui sont soumises à des tensions, des tractions ou les zones plastiques dont les mécanismes de rupture progressive peuvent être initiés (J.-A. FLEURISSON, 2001).

Cette méthode est applicable dans les milieux continus. Elle permet d'élucider de nombreuses difficultés liées au comportement des pentes instables, en particulier le phénomène de rupture

progressive commençant à la base du talus. Elle permet d'établir une modélisation qui englobe de multiples variables. Elle implique la discrétisation du domaine d'étude en un milieu continu en éléments "finis", qui sont reliés entre eux par un nombre limité de points appelés "nœuds". L'ensemble de ces éléments devrait former un domaine qui se rapproche le plus du domaine d'étude. Également, elle permet d'analyser des domaines présentant des caractéristiques mécaniques homogènes ou hétérogènes. En outre, cette méthode peut s'adapter à une variété de comportements rhéologiques, notamment l'élasticité, la plasticité et la viscosité ; ainsi que résoudre des problèmes dynamiques. Pourtant, elle connaît ces limites dans les massifs très fracturés. Le processus de discrétisation devient complexe, rendant difficile la représentation précise du domaine d'étude.

7.3 Méthodes des éléments distinctes

Cette approche était introduite par M. Cundall en 1971, et elle a été évaluée grâce à la contribution de Belytschko (1984). Cette méthode facilite la modélisation des milieux fissurés grâce à l'assemblage de blocs qui rentrent en contact entre eux via leurs points de contact. Les blocs sont considérés rigides, et les mouvements du système sont dus aux déformations survenant au niveau des contacts entre blocs.

Le modèle formulé par M. Cundall repose sur des formulations qui incorporent explicitement le temps, admettant en conséquence d'examiner des problèmes dynamiques (tels que les tirs de mines, l'activité sismique, etc.). Ce modèle est fondé sur les trois étapes fondamentales suivantes :

- La présentation de l'environnement sous forme de blocs distincts.
- La modélisation des interfaces est réalisée grâce à la loi qui met en corrélation les forces et les déplacements aux points de contact entre blocs.
- Les lois de mouvement définissent l'évolution du modèle lorsqu'il est affecté par des contraintes externes.

8. Conclusion

Les mouvements gravitaires rocheux font partie des phénomènes naturels qui implique la rupture d'un bloc rocheux à volume déterminé et la propagation rapide de cette masse selon différentes modes de déplacement (chute libre, rebond, glissement/roulement), pour enfin s'arrêter en un point après avoir parcouru une distance avec une énergie cinétique variable. Ce phénomène se produit au sein des versants rocheux et des falaises fracturés, le mouvement est

rapide, et on distingue en fonction du volume éboulés : la chute de bloc, les éboulements et les écroulements.

En revanche, il existe plusieurs classifications selon les différents critères (géologique, morphologique, cinétique...etc.), mais la classification la plus souvent adoptée est fondée sur le mode de rupture, dont on spécifie : Glissement plan ou dièdre, rupture de surplomb, basculement, fauchage, flambage et glissement pseudo-circulaire.

Ce phénomène se produit à cause de multiples facteurs, ils sont groupés essentiellement en deux principales classes ; présentées par des facteurs permanents liés généralement aux conditions de prédisposition (géologiques, structurales, géomécanique...etc.). Également, on distingue les facteurs temporaires qui sont liés aux conditions de déclenchement (climatiques, sismiques et anthropiques).

Les discontinuités constituent un élément clé dans la création des blocs susceptibles à la rupture, de ce fait, il faut effectuer une bonne caractérisation des dimensions des discontinuités, dont il faut définir l'orientation, la persistance et l'espacement.

Pour analyser la stabilité d'une masse rocheuse, il existe différentes méthodes de calcul :

- La méthode classique : est basée en premier lieu sur une analyse cinématique afin de distinguer le mode de rupture potentiel ; par la suite, la qualification du potentiel d'instabilité est effectuée grâce à l'analyse de l'équilibre limite en calculant le facteur de sécurité.
- La méthode des éléments finis : permet de calculer les déplacements et vérifier la stabilité à travers la pente, elle est applicable dans les milieux continus et elle trouve ses limites quand le massif est très fracturé.
- La méthode des éléments distincts : elle facilite la modélisation de milieu fracturé et elle tient en compte l'interaction entre les éléments rocheux via leurs points de contacts ; les blocs sont supposés rigides et les déformations survenant au niveau des contacts constituent les mouvements du système.

Pour qualifier le risque de ce phénomène dangereux, il est essentiel d'adopter une méthode adéquate au type de phénomène ainsi qu'aux facteurs de prédispositions et de déclenchements.



**CHAPITRE II « MÉTHODES
D'ÉVALUATION DU RISQUE DE
CHUTE DE BLOC »**



1. Introduction

Le présent chapitre est consacré aux diverses méthodes destinées à l'évaluation de la susceptibilité, l'aléa et le risque de chute des blocs ; on commence d'abord par quelques définitions à savoir, l'aléa, la vulnérabilité et le risque. Par la suite, nous présentons les diverses méthodes qui tiennent en compte le phénomène de chute de bloc en talus et/ou en versant, ainsi que, le type d'aléa de départ (locale ou diffus). Les objectifs de ces méthodes sont différents, en allant de la susceptibilité, jusqu'à l'évaluation de l'aléa et la qualification du risque chute de bloc.

2. Définitions

2.1 Risque chute de bloc

Le risque est défini comme une combinaison du phénomène dommageable et de ses effets (Renn, 2008a ; Aven, 2016), il fusionne un élément externe, à savoir l'aléa (qui constitue une source potentielle de dommages), avec un élément interne, représenté par les enjeux qui sont caractérisés par une vulnérabilité (dommage potentiel) (V. E. Heintz, et B. Martin, 2021).

Le risque peut être défini comme l'estimation de la probabilité et le degré d'impact négatif sur les personnes, les infrastructures ou l'environnement. La détermination du risque est souvent estimé par le produit de la probabilité d'un phénomène d'une ampleur donnée X , se manifeste sur une période de temps donnée, multiplié par les conséquences potentielles (V. Labiouse, J. M. Abbruzzese, 2014).

$$\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$$

Si l'aléa est classé fort, par contre la vulnérabilité est qualifiée faible ; le niveau du risque est faible, en revanche, un scénario caractérisé par un aléa réduit, associé à une zone très vulnérable peut engendrer un niveau de risque important (M. Jeannin, 2005).

L'analyse de risque chute de bloc commence par la définition de l'aléa de ce phénomène, suivie par une estimation de la vulnérabilité des enjeux exposés, à travers une zone donnée durant un temps défini (V. E. Heintz, et B. Martin, 2021).

2.2 Aléa chute des blocs

L'aléa est une circonstance susceptible de mettre en danger des vies humaines, des biens ou des activités au point de provoquer des événements catastrophiques (V. Labiouse, J. M. Abbruzzese, 2014). C'est la probabilité qu'un phénomène naturel potentiellement dommageable soit survenu durant un intervalle de temps spécifique dans une zone

déterminée. (H. Raetzo et al 2002 ; O.Lateltin et al, 2005). Pour décrire un aléa, il est important de prendre en compte son emplacement, ainsi que son intensité (volume, superficie, vitesse...) et la fréquence à laquelle, il se produit. Donc l'aléa d'un phénomène donné peut être défini par le couple période de retour et intensité du phénomène (Y.Cuervo, 2015).

Le phénomène de chute des blocs est une succession d'événements ; il se débute par un détachement d'un compartiment rocheux de la paroi, suivi par le déplacement de ce bloc le long du relief avec une énergie cinétique variable ; enfin, il s'arrête en aval de la pente ou face à un obstacle. La relation entre ces éléments mène vers une classification de l'aléa (D. HANTZ, 2010).

L'aléa chute de bloc à un endroit, c'est la probabilité qu'un fragment de roche atteigne un endroit dans un laps de temps donné avec une énergie et une hauteur (D.Hantz et al, 2021).

Afin d'évaluer l'aléa chute de bloc, outre une analyse de susceptibilité, l'évaluation de l'intensité et la période de retour est indispensable.

- La susceptibilité fait référence à l'analyse des zones potentiellement instable, c'est-à-dire les zones de détachement des compartiments rocheux, en étudiant la typologie et la répartition spatiale, sans estimation de sa fréquence (M. Jeannin, 2005). L'évolution de la probabilité de mobilisation peut porter sur une masse rocheuse spécifique, dont les limites sont visibles en surface, et une localisation est identifiée, ou au contraire une zone dont laquelle, les blocs peuvent a priori se détacher de n'importe quel point (répartition spatiale aléatoire) (D. Hantz, 2010).
- L'aléa de propagation constitue un élément essentiel dans l'évaluation de l'aléa chute de bloc. En utilisant les simulations des trajectoires, on peut estimer la probabilité d'atteinte, en divisant le nombre total des blocs par le nombre de trajectoires atteignant les différents endroits de la zone étudiée (Rouiller et al, 1998). Trois « limites de propagation » sont définies pour classer cette probabilité en élevée, modérées ou faibles. Ces limites correspondent aux abscisses passées par 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} des blocs par rapport au nombre total de trajectoires calculées (ou 1, 10^{-2} et 10^{-4} si exprimés en pourcentage).
- L'intensité du phénomène est exprimée par l'énergie cinétique E d'une masse rocheuse durant sa propagation le long du relief (E.P.Howald et J.M. Abbruzzese, 2022). L'analyse du profil énergétique le long de la pente permet de définir trois classes d'intensité (faible, moyenne, forte) (Tab. 2.1).

La relation entre la probabilité de mobilisation et la probabilité d'atteinte conduit vers une évaluation qualitative et l'estimation de la probabilité d'occurrence (période de retour).

Tableau 2.1 : Classification de l'intensité en fonction de l'énergie E (Kj) (Raetzo et al. 2002)

Intensité	Energie E (Kj)	Conséquences
Faible	$E < 30$	Les bâtiments atteints sont faiblement endommagés, les personnes atteintes peuvent être tuées ou blessées. Une énergie de 30 kJ correspond à la résistance standard d'une barrière en bois de chêne d'environ 30 cm d'épaisseur.
Moyenne	$30 < E < 300$	Dégâts aux bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées. Une énergie de 300 kJ correspond à la résistance standard d'un mur en béton armé.
Forte	$E > 300$	Destruction partielle ou totale des bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées.

2.3 Vulnérabilité

La vulnérabilité indique l'ampleur des dégâts que peut provoquer le phénomène. En d'autres termes, elle montre encore l'aptitude d'être exposée ou de bien résister à un phénomène d'intensité donnée (BRGM-RP-58975-FR, 2011).

La vulnérabilité est déterminée à partir de l'exposition des enjeux qui soulignent la prédisposition à prévoir, s'ajuster et se rétablir, que ce soit précédemment, durant ou après un événement. Elle peut se manifester à la fois dans des dimensions biophysiques et/ou sociales, car elle est étroitement liée aux éléments distinctifs d'une région, à son contexte historique, aux caractéristiques matérielles et symboliques qui lui sont associées. Définir la vulnérabilité permet d'améliorer la gérance et la protection des territoires, notamment avec l'intégration des SIG (V. E-Heintz et B Martin 2021)

La vulnérabilité aux chutes de pierres se caractérise par les pertes socioéconomiques subies. Elle est influencée par l'énergie des blocs propagés. Pour évaluer la vulnérabilité, il faut quantifier les dommages potentiels qui peuvent être causés à la fois aux biens et aux personnes par rapport à l'intensité du phénomène chute de bloc. Elle est définie comme un pourcentage des dégâts par rapport à la valeur globale et elle peut aller de 0 % à 100 % (M.Jeannin, 2005).

Les enjeux sont habituellement matériels (individus, routes, bâtiments, etc. ; (Agliardi *et al.*, 2009 ; Michoud *et al.*, 2012)

Dans les enjeux linéaires comme la route, les vulnérabilités associées sont diverses :

- Vulnérabilité fonctionnelle : liée aux pertes de fonction de l'ouvrage, c'est la fermeture partielle ou totale de la voie suite à un événement.

- Vulnérabilité matérielle : liée aux dommages au réseau, on parle du dommage des structures suite à l'impact de la roche.
- Vulnérabilité humaine : liée aux atteintes des personnes, cette vulnérabilité résulte d'accident lié au phénomène qu'il soit directement (collision d'un bloc avec un véhicule) ou indirectement (dérapage d'un véhicule suite aux cailloux déposés sur la route).

2.4 Zonage

C'est la division du territoire en zones ou domaines homogènes et leur classement selon le degré de susceptibilité, d'aléa ou de risque de chute de bloc.

Nous distinguons trois types de zonage (Tab. 7) :

- Carte de susceptibilité : l'analyse tient compte de la typologie du phénomène, et de sa répartition spatiale, mais pas de sa fréquence.
- Carte d'aléa : Mise à part de la susceptibilité, une analyse de la probabilité d'occurrence et l'estimation de l'intensité du phénomène est nécessaire.
- Carte de risque : l'analyse va encore plus loin, en définissant le degré de vulnérabilité des vies humaines et des biens par rapport à un aléa donné, en estimant les conséquences de cet aléa.

Le choix pertinent du type de zonage dépend principalement des objectifs visés par l'étude, de l'échelle de zonage et du niveau de détail souhaité ainsi que les ressources disponibles (financement, calendrier et données d'entrée).

Tableau 2.2 : Choix du type de zonage (inspiré à partir de Fell et al., 2008)

Type de zonage		Niveau de détail prévu		
		Primaire	Moyen	Avancé
L'échelle du zonage	Régionale 1 / 25 000 à 1 / 250 000	Susceptibilité	Aléa	-
	Locale 1 / 5 000 à 1 / 25 000	Susceptibilité	Aléa	Risque
	Site spécifique 1 / 5 000 à 1 / 1 000	-	Aléa	Risque

3. Méthodologies d'évaluation de risque de chute de blocs

Pour évaluer l'aléa et le risque chute de bloc, la première étape consiste à la localisation des zones de détachement des blocs susceptibles. Dans ce contexte, une distinction entre l'aléa diffus et l'aléa localisé est faite.

3.1 Aléas diffus : c'est la susceptibilité des compartiments rocheux à la rupture à partir des endroits d'une paroi ou versant donné, plus ou moins homogène sans qu'ils soient reconnus individuellement, et l'éboulement ainsi pouvant s'engendrer en tout point d'une zone géographique déterminée.

3.2 Aléas localisés : Les compartiments rocheux potentiellement instables sont identifiés et localisés. Le bloc dans ce type d'aléa est caractérisé par son volume défini, son mécanisme de rupture est déterminé et sa probabilité de rupture est indiquée dans une période donnée.

3.3 Approche globale (Aléa diffus)

Cette méthode consiste à reconnaître les zones susceptibles au déclenchement des chutes sans chercher à déterminer avec précision les compartiments susceptibles de se détacher.

La pente du versant est considérée comme étant le facteur le plus fondamental pour situer les zones sources. Selon (Loye et al., 2009), la pente minimale pour déclencher un éboulement varie entre 37° et 60°.

En acceptant que le potentiel de chute augmente avec la pente, il devient possible, la détection des zones les plus probables au déclenchement d'un éboulement (carte de susceptibilité) (Van Ween et al., 2018). Il est donc impératif que les données topographiques possèdent un haut degré de précision et le modèle numérique du terrain (MNT) possède une bonne résolution. En fait, une faible résolution est traduite par un relief qui a subi un lissage, masquant ainsi les zones de départ potentielles.

$$\text{La pente limite } \alpha = 55^\circ * (\text{résolution MNT})^{-0,075}$$

Cependant, le parcours du terrain, la photo-interprétation, la documentation et l'enquête avec les riverains permettent d'identifier aussi précisément les zones d'éboulements potentiels.

Avec une analyse plus approfondie, il devient possible de localiser les compartiments dans lesquels les mécanismes de rupture sont prédéfinis ; il s'agit d'une analyse statistique de la relation entre la topographie et la structure du massif rocheux. Cette méthode particulière est mise en application avec le logiciel MATTEROCKING (Jaboydoff et al 1999- 2004 – Matasci et al 2015). La superposition des caractéristiques structurales avec la topographie permet de reconnaître les mécanismes de rupture susceptibles.

3.4 Approche détaillée (Aléa localisé)

L'identification par observation directe ou par les photos ou les MNT de la paroi permet d'identifier les compartiments susceptibles à la rupture suivant un mode de rupture spécifique.

Une reconnaissance déterministe des discontinuités est nécessaire pour une approche détaillée, car la détermination du volume, du pendage et azimute, ainsi que le plan de glissement du compartiment doivent être exacts.

Les constatations directes des falaises, par la technique alpine semblent être efficaces pour caractériser le massif rocheux en surface et pour mieux observer l'étendue des discontinuités dangereuses qui délimitent les blocs rocheux.

3.5 Méthode quantitative (Aléa diffus)

Un aléa diffus est composé d'un aléa de départ qui représente la fréquence des chutes d'un volume donné à partir d'une zone de détachement ; il englobe aussi, l'aléa de propagation qui est représenté par la densité des passages avec une énergie durant leurs trajectoires.

Pour évaluer l'aléa diffus, on utilise la méthode directe, il s'agit d'un inventaire des éboulements passés durant une longue période. Cependant, la méthode la plus fréquemment utilisée consiste à l'estimation du potentiel de rupture et l'étude trajectographique.

3.5.1 Approche événement

Effectuer des levés topographiques consécutifs de la falaise soit en utilisant le scanner laser, soit la photogrammétrie, ou encore la documentation historique. Une évaluation de la fréquence des chutes est ainsi possible, toutefois, l'observation des cicatrices peut fournir une évaluation plus grossière.

3.5.2 Approche bloc

Le relevé exhaustif des blocs au pied des reliefs permet la détermination des volumes des compartiments. En revanche, l'impact des blocs sur les arbres peut offrir des données temporelles précises, car il est possible de dater ces impacts grâce à la dendrochronologie, qui comprend l'analyse des anneaux de croissance des arbres. Cependant, cette méthode ne permet pas d'évaluer les volumes de blocs rocheux.

3.6 Méthode qualitative d'un aléa diffus

Afin d'évaluer l'aléa résultant (départ et propagation) dans une zone critique, il est impératif de déterminer la probabilité de rupture dans la zone de détachements, pour un intervalle de volume donné (relation fréquence-volume), ainsi que déterminer la probabilité d'atteinte jusqu'à la zone d'arrêt, en prenant en considération la variation de l'énergie. Toute méthode est qualifiée qualitative si elle ne quantifie pas la fréquence de rupture et la probabilité d'atteinte en fonction de l'énergie.

3.6.1 Méthode utilisant un système de notation

L'aléa (départ et propagation) est qualifié en adoptant un système de notation de plusieurs facteurs influant l'aléa. L'ensemble des facteurs choisis pour qualifier l'aléa résultant sont rassemblés en cinq groupes (fréquence, prédisposition, déclenchements, intensité et propagation).

L'estimation de l'aléa de départ est liée aux facteurs de prédisposition et moins souvent aux facteurs de déclenchement ; une région qui englobe plusieurs zones d'étude possède presque les mêmes conditions climatiques et sismiques.

4. Méthode RES (ROCK ENGENNERING SYSTEM)

La méthodologie RES est développée par M. HUDSON (Hudson 1992), elle est considérée comme une méthode polyvalente, car elle tient en compte l'influence et l'interaction de plusieurs facteurs sur le déclenchement du phénomène. En outre, elle est jugée très pratique pour résoudre le problème des zones qui ont été confrontées à des instabilités généralisées.

Le concept fondamental implique l'identification des paramètres (Tab. 2.3) qui contrôle les chutes de blocs. Sachant que la variation de l'un de ces facteurs influence les autres facteurs, il est crucial d'évaluer l'impact de chacun des facteurs sur le système. Il est donc impératif de considérer les paramètres et les interactions qui existent en utilisant une matrice des interactions (Fig. 2.1), le principe fondamental consiste à lister les principaux facteurs le long de la diagonale principale et d'évaluer les interactions dans les cellules non diagonales. Le long de la diagonale principale, il décrit l'influence du paramètre sur le système (cause), tandis que chaque colonne décrit l'influence du système sur le paramètre (effet).

Tableau 2.3 : Paramètres pris en compte dans la méthode RES

Paramètre	Description
P 1	Taille des blocs
P 2	Topographie et géométrie du versant
P 3	Mouvement du bloc
P 4	Trajectoire de l'éboulement
P 5	Distance maximale d'atteinte
P 6	La vitesse
P 7	Type d'impact
P 8	Coefficient de restitution
P 9	Nature de terrain
P 10	Résistance de la masse rocheuse
P 11	Rugosité de la surface d'impact
P 12	Végétation
P 13	Hauteur de chute libre
P 14	Coefficient de résistance
P 15	Destruction du projet

WEIGHT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	CAUSE
2.5	1	3	3	4	3	2	2	3	2	2	1	1	2	4	33	
1.74	2	3	4	3	3	3	0	2	0	1	1	3	0	4	29	
2.45	2	0	3	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	3	4	27
2.94	2	0	3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	2	4	30	
2.63	1	0	2	2	3	1	0	2	1	2	1	0	1	4	20	
2.85	1	0	2	3	4	3	3	1	2	0	2	2	2	4	29	
2.67	3	0	2	3	3	4	3	4	1	1	2	1	2	1	2	29
2.23	0	0	2	4	3	3	4	3	1	1	2	0	1	1	4	26
2.54	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3	4	39
1.83	3	2	1	2	2	1	2	2	2	1	0	1	3	2	24	
1.78	0	2	2	3	2	2	3	2	0	0	0	1	3	3	23	
1.34	2	0	2	2	3	2	1	1	2	1	1	0	2	2	21	
1.6	2	0	1	2	3	2	2	1	1	2	1	0	0	3	20	
2.09	1	2	2	2	4	3	2	1	0	2	0	0	1	4	24	
2.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
EFFECT	23	10	28	36	39	35	31	24	18	17	17	9	16	23	48	748

Figure 2.1 : Matrice d'intersection des paramètres (Cancelli et Crosta 1993a)

Le niveau de détail de l'étude est associé aux moyens et aux objectifs fixés, une étude détaillée nécessite un grand nombre de facteurs et de relations à tenir en considération. Par conséquent, il est possible de contrôler le degré de détail ainsi que caractériser ses facteurs et ses interactions selon les objectifs souhaités de l'étude.

L'application de la méthodologie RES nécessite deux étapes à suivre :

- Étape d'analyse
 - Définition des objectifs : susceptibilité, aléa ou risque.
 - Choix des paramètres : les paramètres inclus dans le fonctionnement du système sont sélectionnés sur la base des objectifs ; il faut choisir les paramètres et la relation les plus représentatifs.
 - Interaction : rassembler les données disponibles pour la caractérisation des interactions entre tous les facteurs sélectionnés, en classant lesquels sont influençants et non selon les objectifs. Le produit est une matrice très détaillée et adéquate au phénomène étudié.

Ces deux dernières étapes s'appuient sur la documentation disponible et les données collectées sur le terrain.
- Étape synthèse
 - Structure des connaissances acquises : Le réaménagement des données sélectionnées dans une structure qui dépende des objectifs et des moyens disponibles, c'est une nouvelle compaction de la matrice.
 - Compréhension du fonctionnement du modèle : le codage de la matrice des interactions permet l'interprétation du modèle.
 - Déterminer les méthodes et les procédures à suivre : déployez les actions que vous devrez entreprendre afin d'aboutir aux objectifs voulus.

Le zonage de la probabilité d'atteinte peut être défini, en subdivisant chaque trajectoire en fonction de la distance maximale admissible généralement définie comme la distance entre la falaise et l'élément à risque, ce qui donne une probabilité de propagation différente.

La méthodologie RES est basée sur la détermination de l'indice d'instabilité (Rock Mass Instability Index), cet indice classe le degré d'instabilité probable ; Il convient de noter que l'augmentation de l'indice RES signifie que la pente est instables.

5. Méthode RHRS (ROCKFALL HAZARD RATING SYSTEM)

La méthode RHRS est développée par le département des transports de l'Oregon aux États-Unis pour évaluer les probabilités d'atteinte et le risque d'objets linéaires (Pierson et al 1990-Hoek 1999). Plusieurs tests ont été menés sur plus de 4 000 sites le long du réseau autoroutier américain, facilitant ainsi l'adaptation de cette méthode dans différents réseaux routiers.

L'évaluation du risque de chute de blocs par la méthode RHRS est qualitative, elle est basée sur un système de notation de plusieurs critères influençant la stabilité des parois rocheuses, ainsi que les éléments caractérisant la vulnérabilité des sections routières. Ceci est fait afin d'évaluer directement le risque en plusieurs catégories comme faible, moyen ou élevé. La notation des facteurs de risque est basée sur un système de notation exponentielle, tandis que la notation des facteurs de conséquence est qualificative.

L'évaluation tient en compte onze (11) paramètres, qui sont tous évalués de manière simple et pragmatique. Les principaux paramètres retenus par la méthode sont :

- ✓ Les facteurs agissant sur l'aléa : Hauteur de talus, structure du massif, l'état des joints de discontinuité, l'érosion, taux d'érosion différentiel), intensité des phénomènes (V_u/V_t), condition climatique locale, historique événementiel ;
- ✓ Les facteurs régissent la vulnérabilité : efficacité fossé, taux de fréquentation, distance de visibilité, largeur de voie.

La méthodologie repose sur les actions suivantes:

- Collecte et structuration des données

Les données de base sont constituées des documents cartographiques, techniques, historiques ainsi que des mesures et constats sur le terrain.

- Évaluation de l'aléa et du risque

L'évaluation de l'aléa et le risque de chute de blocs dépend du phénomène, il peut se produire soit au niveau des talus ou au niveau du versant (Fig. 2.2) :

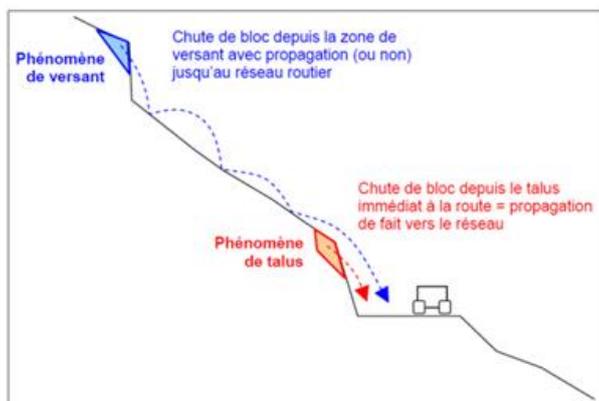


Figure 2.2 : Chute de bloc depuis le talus et le versant (BRGM)

5.1 Phénomène du talus

La notation des divers facteurs est établie d'une manière systématique (Tab. 2.4) :

- ✓ Pour les catégories quantifiables, le score correspondant est immédiatement déduit en utilisant un abaque de type exponentielle $Y = 3^x$ ou $X = f$ (critère scoré), cette formulation permet une augmentation rapide du score quand la note dépasse certain seuil
- ✓ Pour les catégories qualifiées, la note est prédéterminée (3, 9, 27, 81).

Tableau 2.4 : Système de notation des critères RHRS Budetta (2004)

Category	Rating criteria by score			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
Slope height	7.5 m	15 m	22.5 m	> 30 m
Ditch effectiveness	Good catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart + barriers	Moderate catchment: properly designed according to updates of Ritchie's ditch design chart	Limited catchment: wrongly designed	No catchment
Average vehicle risk (% of time)	25%	50%	75%	100%
Decision sight distance (% of design value)	Adequate (100%)	Moderate (80%)	Limited (60%)	Very limited (40%)
Roadway width	21.5 m	15.50 m	9.50 m	3.50 m
Slope Mass Rating (SMR)	80	40	27	20
Block size	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
Boulder volume	26 dm ³	0.21 m ³	0.73 m ³	1.74 m ³
Volume of rockfall per event	2.3 m ³	4.6 m ³	6.9 m ³	9.2 m ³
Annual rainfall and freezing periods	$h=300$ mm or no freezing periods	$h=600$ mm or short freezing periods	$h=900$ mm or long freezing periods	$h=1200$ mm or long freezing periods
Rockfall frequency	1 per 10 years	3 per year	6 per year	9 per year

La vulnérabilité est évaluée selon trois facteurs :

- ✓ L'exposition de la chaussée (facteur incluant la largeur de la bande de roulement et la hauteur de talus).
- ✓ Le niveau de visibilité.
- ✓ La fréquentation en tout point du réseau.

L'index RHRS est obtenu par la sommation des scores, sa distribution le long de la route, fournit une classification continue du risque (Tab. 2.5).

Tableau 2.5 : Qualification du risque chute de bloc en talus RHRS

Index RHRS	Risque qualifié
< 150	Nul
$150 < I_{RHRS} < 200$	Nul à négligeable
$200 < I_{RHRS} < 250$	Faible
$250 < I_{RHRS} < 300$	Modéré
$300 < I_{RHRS} < 350$	Moyen
$350 < I_{RHRS} < 400$	Fort
$I_{RHRS} \geq 400$	Très fort

5.2 Phénomène du versant

Pour classer le risque de chute de bloc en versant, il faut d'abord évaluer l'aléa et la vulnérabilité.

- Aléa

✚ L'aléa de rupture en versant est défini par un index décrivant la situation des zones de détachement, la structure du massif rocheux et son degré de fracturation, et l'examen des zones potentiellement susceptibles. En classant, par conséquent, la susceptibilité de rupture.

✚ L'analyse de trajectoire dévoile la densité de passage des blocs et les zones d'arrêt des blocs éboulés, au moyen de:

- Analyse des données historiques : traces de propagation et intensité ;
- Un logiciel informatique aidant à la cartographie.

Le modèle est basé sur une simulation simple du processus de la dissipation-gain d'énergie d'un bloc tombant d'une pente, une partie d'énergie est gagnée au cours du mouvement (énergie cinétique), une autre partie est perdue durant la collision entre le bloc et le sol.

La validation des résultats d'une étude trajectographique est fondée sur le retro-analyse des événements passés et sur la base de l'expertise géotechnique.

L'évaluation de l'aléa dans chaque maille du territoire est égale à la somme des aléas causés (rupture et propagation) situées en amont.

- **Vulnérabilité**

La vulnérabilité indique le degré des dommages que peut provoquer le phénomène, elle représente la capacité des enjeux exposés à résister à un phénomène d'une certaine intensité.

La vulnérabilité humaine est déterminée par la durée moyenne d'exposition aux blocs éboulés vers la route étudiée.

$$t_{\%} = \frac{\text{trafic (véh/j)} \times \text{longueur voie exposée (km)}}{\text{vitesse moyenne (km/h)} \times 24 \text{ h/j}}$$

Donc, la vulnérabilité augmente avec l'accroissement du trafic et la réduction de la fluidité.

Pour estimer la vulnérabilité, il faut prendre en considération les facteurs suivants :

- ✓ Exposition de la route : Avec une largeur de la chaussée plus grande, le risque d'atterrissement d'un bloc sur la route s'accroît et diminue avec la hauteur du talus en amont de la route. (Le bloc dépasse la route).
- ✓ Fréquentation de la route : (AVR Average vehicle risk).
- ✓ Distance de visibilité/décision (DSD Decision Sight Distance).

Les fosses au bord de la route ne peuvent pas bloquer les éboulis arrivant du versant.

La vulnérabilité est classée selon le total des scores de la vulnérabilité (Tab 2.6).

Tableau 2.6 : Index de vulnérabilité RHRS

Classe d'index	Vulnérabilité
0 – 50	Faible
50 – 120	Moyen
> 120	Elevé

- **Risque**

La qualification du risque est simplifiée lorsque l'on tient compte du fait qu'elle comprend à la fois les dommages potentiels aux individus et aux fonctionnalités. La classification de risque de chute de bloc en versant est jugée sur la base de la matrice d'évaluation du risque (Tab. 2.7).

Tableau 2.7 : Matrice d'évaluation du risque de chute de bloc en versant RHRS

Vulnérabilité	Aléa			
	Nul à négligeable	Très faible	Faible	moyen
Faible	Nul à négligeable	Très faible	Très faible	Faible
Moyen	Nul à négligeable	Très faible	Faible	Moyen
Elevé	Nul à négligeable	Faible	Moyen	Moyen

6. Études spécifiques d'aléa liées aux éboulements rocheux LCPC (Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées)

Il s'agit d'une étude spécifique, elle se concentre principalement sur la réduction du risque, plutôt que sur l'affichage du risque, ni au zonage réglementaire. Cela implique des recherches détaillées et exhaustives de la zone touchée par les éboulements.

La probabilité de rupture est révélée par le couple de (classe, probabilité/délai), et la probabilité de rupture est évaluée empiriquement en fonction des critères particuliers.

Des études de trajectoire qualitatives sont menées pour examiner l'aléa de propagation en premier lieu et, si nécessaire, une estimation quantitative est effectuée à l'aide d'un outil de simulation spécialisé. Ces simulations fournissent des informations concernant la limite d'atteinte, l'énergie et la hauteur du rebond des blocs.

La méthode est fondée sur une approche qui implique des couches d'informations consécutives, ce qui permet d'éviter la redondance (cas de plusieurs interventions refaites sur la même zone). Elle est constituée d'une couche sources et d'une couche d'évaluation qui inclut tous les deux, des enquêtes sur le terrain et la collection pertinente des documents.

✓ La couche source

Il consiste à la description exhaustive de l'ensemble du site d'investigation à travers la prise en compte de diverses rubriques ; ces aspects sont renseignés par l'interprétation de la documentation disponible, ainsi que par les informations récoltées du terrain.

Après cette approche préliminaire générale, la sectorisation de la zone d'étude en secteur homogène est effectuée ; cette sectorisation initiale du périmètre d'étude est une importante étape, car elle réunira implicitement les populations d'aléa à caractéristiques proches.

✓ La couche d'évaluation

L'étude est concentrée sur l'aléa de rupture et l'aléa de propagation, afin d'aboutir à l'évaluation de l'aléa résultant qui couvre l'ensemble du versant.

Cette étape de la démarche vise à individualiser et à désigner, puis à caractériser, à l'intérieur de chaque secteur spécifique prédéfini à l'étape précédente, les sous-ensembles rocheux potentiellement instables en qualifiant leur aléa résultant.

6.1 Collecte des données préliminaires (couche sources)

- ✓ **Recherche documentaire** : Une exploitation optimale des archives en rapport avec l'étude et de consulter et évaluer leur pertinence.
- ✓ **Approche historique** : documentation et analyse des informations historiques, dont le but est de reproduire des hypothèses sur les repères dans l'espace et dans le temps.
- ✓ **Approche géologique** : récolte et évaluation des données géologiques afin de déterminer le cadre géologique spécifique à chaque secteur identifié sur le site d'étude.
- ✓ **Approche structurale** : Vu l'importance de cette étape, elle est séparée de l'approche géologique, elle traite l'aspect structural de la zone d'étude et détermine leur relation avec les caractéristiques morphologiques observées.
- ✓ **Approche morphologique** : C'est l'identification et l'analyse des principales composantes morphologiques du site, en établissant une cohérence et les liaisons avec les approches géologiques et structurales. L'analyse morphologique constitue un élément important dans l'évaluation de la propagation, car elle est considérée comme la composante essentielle dans le tracé des trajectoires d'éboulement possibles.
- ✓ **Approche hydrogéologique et hydrologique** : l'accent est mis sur les études des apports hydriques ; les écoulements, les ruissèlements et l'évolution du système karstique dans les massifs calcaires.
- ✓ **Données relatives au couvert végétal** : C'est l'identification de la couverture végétale des versants, elle aide à reconnaître les zones instables particulièrement, là où les racines des végétaux jouent un rôle dans la dégradation du massif ou, à l'opposé, les arbres constituent une barrière contre la propagation des blocs.
- ✓ **Mécanisme d'évolution des versants rocheux** : Il s'agit de spécifier les principaux processus d'évolution (Tab. I) en annexe, qui régissent les compartiments à l'échelle du site. Cette étape particulière nécessite une synthèse des données récoltées des approches précédentes ainsi que les observations de terrain. Le but de cette approche est de distinguer les mécanismes de ruptures dominantes sur le site (Tab. II et III) en annexe et d'observer les indices d'évolution.
- ✓ **Sectorisation** : Créer des zones homogènes qui ont les mêmes caractéristiques de l'aléa. Cela implique de subdiviser la zone d'étude en secteur plus réduit montrant une certaine similitude.

6.2 Identification et caractérisation des instabilités (couche d'évaluation)

Elle consiste à désigner le compartiment instable comme étant le plus petit élément instable physiquement individualisable sur le terrain, ou bien par l'ensemble qui regroupe de multiples éléments dont la stabilité est interconnectée.

- ✓ **Localisation et identification des instabilités potentielles** : C'est le repérage final des compartiments 'suspectés'. Cette étape vise à rassembler et analyser les facteurs de prédisposition, ce qui permet de classer l'état de stabilité du compartiment rocheux et qualifier son aléa de départ.
- ✓ **Caractérisation des facteurs déterminants** : C'est la combinaison des facteurs qui incitent à la déstabilisation de bloc rocheux.
- ✓ **Descriptifs du compartiment rocheux** : La description est qualitative et quantitative. Elle comprend sa nature (typologie, lithologie, données structurales et hydrogéologiques-hydrauliques), sa géométrie (position, forme, dimension, volume total et unitaire, hauteur de chute) et son comportement géomécanique (surface de rupture, traction, cisaillement, fréquence, persistance, orientation et pendage).

6.3 Processus d'évaluation d'un compartiment rocheux

Pour évaluer la stabilité, les paramètres sont décrits qualitativement pour chacun des compartiments identifiés. Les éléments recueillis au cours de l'étape de la description des compartiments instables sont réévalués par rapport aux critères d'évolution (dégradation) pour enfin qualifier l'aléa de rupture.

✓ Mécanismes de rupture

Les mécanismes de rupture sont divers, certains comprennent un petit nombre de discontinuité et d'autre implique un mécanisme complexe. On spécifie aussi des configurations d'équilibre dit statiquement stable dans laquelle les processus d'évolution défavorables se produisent très lentement et autre dit statiquement instable, dont le bloc est à la limite de stabilité, il repose sur des conditions de résistance fragiles qui peuvent se dégrader vite. Seules les caractéristiques géomécaniques et les propriétés mécaniques de base ne permettent pas de garantir la stabilité.

✓ **Blocométrie prévisionnelle**

Au cours de la propagation, le bloc éboulé se fragmente en volume réduit, l'analyse des discontinuités à travers le massif aide à estimer les dimensions des blocs. En outre, un bon examen des anciens blocs éboulis, situés en aval d'une paroi permet de prévoir le fractionnement des blocs.

6.4 Qualification de l'aléa de rupture

Le couple (classe, probabilité/délai) permet de classer l'aléa de rupture

✓ ***Classes d'instabilité***

Il s'agit du volume total des compartiments susceptible à la rupture (Pierres : $V_t < \text{quelques dm}^3$, Blocs : $V_t \approx 1 \text{ m}^3$, Gros blocs $V_t > \text{quelques m}^3$)

✓ ***Probabilité/délai d'occurrence***

Ce concept qualitatif est basé sur un jugement portant sur la probabilité que le compartiment étudié s'éboule dans un temps donné. Le jugement est fondé sur les types de rupture et les processus d'évolution.

L'approche probabiliste est adoptée pour la prévision de la rupture d'une masse rocheuse, dans laquelle les probabilités d'occurrence sont données à titre indicatif (Tab.2.8).

Tableau 2.8 : Echelle qualitative de probabilité d'occurrence (probabilité)

Très élevée (te)	L'occurrence du phénomène est normale. Sa non-occurrence serait exceptionnelle
Elevée (e)	L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence
Modérée (m)	L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence
Faible (f)	La non-occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence
Très faible (tf)	La non-occurrence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle

La notion de probabilité/délai repose sur deux éléments inséparables :

- L'évaluation de la probabilité d'occurrence est qualifiée en fonction des facteurs essentiels (présence et/ou intensité) ;
- Le délai significatif au cours duquel le phénomène est estimé se produire (Tab. 2.9), ce délai est lié au rythme d'activité des phénomènes d'évolution naturelle.

Tableau 2.9 : Echelle temporelle proposée (délai)

Imminent	I	Prise en compte immédiate
Très court terme	Tct	2ans environs
Court terme	Ct	10ans environs
Moyen terme	Mt	30 à 50 ans
Long terme	lt	100 à 150 ans

La présente méthodologie est fondée essentiellement sur le jugement d'expert, l'opinion repose sur l'évolution de la fragilité de l'équilibre actuel et l'évolution des mécanismes de dégradation.

6.5 Qualification de la propagation : « approche qualitative »

Cette approche tient en compte les facteurs relatifs aux conditions de départ (hauteur de chute libre ; vitesse initiale, la cinématique de la rupture...ect), aux critères relatifs au versant (lithologie du versant, Pente du versant, l'existence d'aménagement anthropique...etc), et à l'existence des obstacles tels que la couverture végétale, contre-pente naturelle et ouvrages de protection. Les constatations de terrain sont nécessaires pour l'évaluation de l'aléa de propagation.

✓ Les blocs

Le départ de la propagation après le premier impact est influencé par la géométrie du bloc. La fragmentation des blocs dépend de la nature lithologique et la continuité des plans de discontinuités.

✓ Estimation de la trajectoire

La sélection des données suscitées dans l'analyse de la propagation nécessite la compétence d'un géologue expérimenté. On juge le besoin d'effectuer une simulation numérique selon les résultats de l'évaluation qualitative de la trajectoire.

6.6 Détermination de l'aléa résultant

Lorsque l'aléa de rupture et l'aléa de propagation sont combinés, cela conduit à évaluer qualitativement l'aléa résultant.

Dans le cas le plus défavorable, les conditions de propagation sont prises en considération comme suit :

- Si la falaise génératrice d'aléa est très proche de l'enjeu, la propagation est quasi certaine

- Si la falaise génératrice d'aléa est éloignée de l'enjeu, les blocs s'arrêtent en amont de l'enjeu.

Le risque qui en résulte implique de faire l'inventaire et de déterminer la sensibilité des vulnérabilités, situées dans l'aire couverte par les trajectoires des aléas.

7. Méthode de MATTEROCKING

La méthode MATTEROCK est développée par le centre de recherche sur l'environnement Alpin de Sion (CREALP), cette méthode postule que l'instabilité des roches ne peut exister sans discontinuités (F. Baillifard et al 2001). Pour expliquer et mieux présenter la méthode, nous nous sommes basés essentiellement sur le document intitulé « Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise Approche statistique et probabiliste » (M. Jaboyedoff, 1996) ainsi que quelques articles cités ci-dessous.

Les éboulements et la chute des blocs au niveau des falaises sont régis par la présence des discontinuités qui affectent la roche ainsi que par ses propriétés géomécaniques. L'instabilité au niveau des falaises dépend d'une disposition structurelle défavorable, car les éboulements ne se produisent que lorsque les plans ne montrent plus une résistance pour tenir la masse. Cette résistance diminue avec le temps en raison de l'altération irréversible de la roche causée par le contact avec l'eau.

Pour qu'un éboulement se produise, plusieurs conditions doivent être réunies:

- La structuration de la falaise en relation avec la topographie doit favoriser le glissement ou le basculement ;
- Ces discontinuités doivent avoir une forte probabilité d'occurrence et une extension importante pour créer un bloc instable ;
- Les résistances des discontinuités doivent dépasser ces limites sous l'effet des facteurs de déclenchement.

La méthode consiste à comparer la topographie avec les caractéristiques des discontinuités à l'aide du support informatique. Cette confrontation dévoile la répartition spatiale des structures dangereuses. Cette approche présente un grand avantage d'identifier rapidement les principales instabilités potentielles. Ainsi, des méthodes statistiques et probabilistes peuvent être utilisées pour évaluer en profondeur le degré de connectivité des discontinuités.

La méthode probabiliste est basée sur une loi de distribution aléatoire des espacements, cette distribution ne dépend que de la moyenne des espacements. La loi exponentielle négative est la représentation la plus appropriée de cette distribution observée.

A partir des caractéristiques structurales telles que l'espacement, la persistance, on peut calculer la probabilité d'occurrence des discontinuités. On peut également estimer la probabilité de recoupement de deux ou plusieurs discontinuités ayant des orientations différentes. Cette méthode ne porte plus sur l'état des plans de discontinuité, tels que l'ondulation ou la rugosité, et ne cherche pas à vérifier la stabilité des blocs.

7.1 Méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des instabilités rocheuses

Cette méthode consiste en premier lieu de spécifier les discontinuités affectant le massif rocheux, puis de visualiser les relations géométriques tridimensionnelles qu'elles existent entre elles, ensuite, établir une projection de ces agencements susceptibles sur la topographie ce qui permet la détection des secteurs potentiellement instables. Ces secteurs sont décrits sur le terrain, en fonction des critères intrinsèques liés aux mécanismes de dégradation et aux facteurs de déclenchement, aboutissant ainsi à un indice qui qualifie la probabilité de rupture.

7.2 Caractérisation du massif

L'étude débute par l'identification de secteurs homogènes du massif rocheux. Ensuite, un relevé des caractéristiques structurales est nécessaire, ces caractéristiques sont évaluées à l'aide de deux modes de collecte complémentaires, qui sont choisis en fonction de l'objectif :

- Scanline : c'est un relevé des caractéristiques des discontinuités sur un affleurement rocheux exposé;
- Fenêtre d'observations : Donne un aperçu sur la conception structurale de l'ensemble de la falaise.

Le traitement du levé des discontinuités permet de faire distinguer les familles de discontinuité.

7.2.1 Le nombre, la persistance et l'espacement moyens d'une famille de discontinuités

Soit S_{obs} la surface de la fenêtre, n le nombre de discontinuités contenues dans S_{obs} .

La persistance moyenne $T_i = \sum \frac{t_i}{n} = \frac{T_{tot}}{n}$

Avec :

t_i la persistance de chaque discontinuité i contenue dans la fenêtre.

Soit s la surface moyenne délimitée par deux discontinuités successives, $s = L.T$

De plus $n.s = S_{obs} = n.L.T$

Donc, l'espacement moyen $L = \frac{n.s}{n.T} = \frac{S_{obs}}{n.T} = \frac{S_{obs}}{T_{tot}}$

7.2.2 Nombre moyen de discontinuités contenues dans chacune des mailles topographiques

La section moyenne : ($s = L.T$), La surface topographique ($A = S$), Le nombre moyen de discontinuités contenues dans une surface A (Fig. 12) est donné par : $N_s = \frac{S_{obs}}{L.T}$

Si la surface topographique et les discontinuités ne sont pas perpendiculaires, L.T doit être corrigé : $L_{app} = L / \sin \theta$, avec θ l'angle entre la verticale de la discontinuité et la surface topographique.

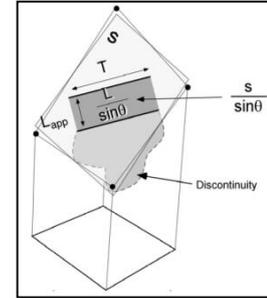


Figure 2.3 : N en fonction de L et T

7.2.3 Nombre moyen de dièdre contenu dans chacune des mailles topographiques

Les dièdres sont définis par deux familles de discontinuité. En supposant un réseau continu de discontinuités infinies pour les deux familles espacées respectivement par L_1 et L_2 , ce réseau dessine sur une surface perpendiculaire aux familles de discontinuité un réseau constitué de parallélépipèdes. Les parallélépipèdes sont considérés comme la section des dièdres et le nombre de ces dièdres dans une surface S (Fig. 13) est donné par :

$$n_w = \frac{S}{(L_1 \times L_2 / \sin \alpha)} \quad \text{avec : } \alpha \text{ est l'angle entre les deux familles.}$$

Cette valeur est augmentée si la ligne d'intersection des deux ensembles n'est pas perpendiculaire à la surface de topographie. Si β est l'angle entre la ligne d'intersection de discontinuité et le pôle de la surface de topographie, le nombre de dièdres apparents est

$$\text{donné par : } n_w^{app} = \frac{S \times \cos \beta}{(L_1 \times L_2 / \sin \alpha)}$$

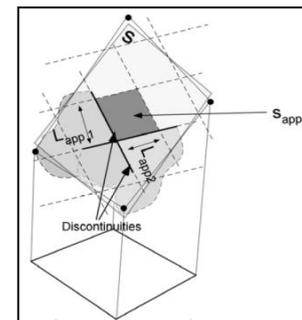


Figure 2.4 : N_w en fonction de L_1 et L_2

7.2.4 Nombre de discontinuité basé sur l'espacement apparent

Les traces de discontinuités sont parallèles sur une facette topographique plane. L'espacement apparent est perpendiculaire aux deux traces. Le nombre moyen de discontinuités peut être calculé selon cette direction.

Sur une facette de la topographie, la longueur maximale l d'une ligne parallèle à l'espacement apparent peut être estimée. Le nombre moyen de discontinuités (Fig. 14) que l'on peut trouver est donné par : $n = l/L$

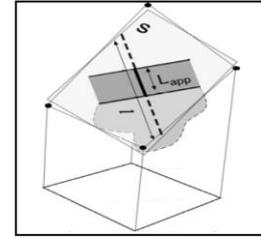


Figure 2.5 : N en fonction de L

7.3 La distribution des discontinuités dans une falaise

La distribution des espacements des discontinuités suit un modèle aléatoire, on peut assimiler la distance libre moyenne entre deux discontinuités au parcours moyen des particules (Feyman et al., 1979). On dit qu'une variable aléatoire X suit la loi exponentielle de paramètre λ , si elle admet pour la densité de probabilité la fonction :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{L} \text{ et } x : \text{c'est la distance perpendiculaire vers la prochaine discontinuité.}$$

On obtient la fonction de distribution en dérivant $f(x)$ par rapport à x , car nous voulons la valeur des fréquences pour une distance donnée dans un intervalle dx .

$$P(x) = \int_{x=0}^{x=d} f(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} = -[e^{-\lambda x}] = -(e^{-\lambda x} - e^{-\lambda 0}) = -(e^{-\lambda x} - 1)$$

La distribution est donnée par : $P(x) = 1 - e^{-\lambda x}$

Par conséquent la probabilité de rencontrer au moins une discontinuité à une distance x à partir d'un repaire donné, perpendiculairement à une famille de discontinuité donné, vaut :

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{L}} \text{ (Jaboydoff et al, 1996).}$$

Lorsque on connaît L , et on suppose une distribution exponentiel négative, à partir de la fréquence, on peut connaître la distance d en fonction d'un seuil w de probabilité qui indique la probabilité qu'une discontinuité au moins se trouve dans un intervalle d

$$d = -\frac{\ln(1 - w)}{\lambda} = -\bar{X} \ln(1 - w)$$

où : \bar{X} est l'espacement moyen entre les discontinuités.

7.3.1 Calcul de la Probabilité P

En supposant une distribution aléatoire des discontinuités, on peut calculer la probabilité P de trouver au moins une discontinuité sur une surface par : $P = 1 - e^{-N}$, où N est le nombre moyen de discontinuités calculé dans une surface.

Cette méthode peut être appliquée en comptant le nombre de discontinuités ou surface. L'application à chaque cellule n'est pas forcément appropriée car la taille de la discontinuité peut conduire à des résultats triviaux. Donc, il est plus logique d'estimer la probabilité de trouver une discontinuité dans une cellule en utilisant l'espacement.

7.4 Elaboration de la carte d'aléa

La méthodologie Matterock (Rouiller et al., 1998) est constituée de plusieurs étapes, une évaluation de la probabilité d'occurrence se fera en premier lieu ; elle est fonction de la probabilité de mobilisation et la probabilité d'atteinte. Cette dernière est estimée par des simulations de trajectoire. Par ailleurs, une évaluation d'énergie du phénomène est réalisée également par une analyse trajectographique. Enfin, chaque maille du MNT se voit attribuer un degré d'aléa, qui dépend de la probabilité d'occurrence du phénomène et de son intensité.

7.4.1 Probabilité de rupture

- **Détection des secteurs potentiellement instables :** La projection des structures dangereuses sur la topographie permet de déceler les secteurs potentiellement instables. Pour faciliter cela, un modèle numérique de terrain (MNT) peut être utilisé, cela permet de favoriser les outils informatiques. Une étude détaillée nécessite soit d'effectuer une investigation sur toute la zone d'étude, soit à préciser les secteurs susceptibles grâce à une analyse informatique.

Pour justifier la validité de l'approche, une analyse informatique a été effectuée pour évaluer les pentes du relief et la probabilité d'intersection entre les discontinuités suspectes et le terrain.

À partir de la carte des pentes et en fonction des caractéristiques des discontinuités, on peut distinguer des secteurs du MNT où il se peut générer des instabilités. Ces instabilités se produisent essentiellement sur les pentes raides. Encore, sur la base de la lithologie, il est possible de limiter une pente au-dessus de laquelle les instabilités rocheuses peuvent se produire.

Le MNT est constitué des mailles qui correspondent à une facette de la topographie de surface *Si*. La projection des discontinuités sur la topographie permet de calculer le nombre moyen de discontinuités d'une famille recoupant une facette topographique. Ainsi, chaque maille de la topographie digitalisée est affectée par un coefficient de densité de recoupement par une

famille de discontinuités. Les sections susceptibles doivent être identifiées sur le terrain. Cette étape permet la création d'une carte de susceptibilité.

7.4.2 Qualification de l'aléa de rupture

La probabilité de rupture est évaluée qualitativement (Tab. 2.10) à l'aide d'un système de notation décrivant les conditions d'instabilité d'un massif (Tab. IV) en annexe, elle est influencée par différents facteurs :

- Les facteurs de prédisposition du massif rocheux (structure, lithologie et le comportement géomécanique) ;
- Les mécanismes de dégradation : les agents physiques et chimiques ont un impact sur la stabilité des massifs ;
- Les facteurs de déclenchements : si l'intensité des facteurs externes (climat et sismicité) est suffisante, ils peuvent entraîner une rupture.

Tableau 2.10 : Classification des instabilités selon la méthode Materrocking

Echelle de pondération	Classe d'instabilité
0 à 3	Le site n'est pas une instabilité
4 à 8	Instabilité de probabilité de rupture faible
9 à 49	Instabilité de probabilité de rupture moyenne
> 49	Instabilité de probabilité de rupture élevée

7.4.3 Etude trajectographique

L'étude trajectographique est effectuée par la simulation des trajectoires des blocs, cette étude permet de caractériser la probabilité d'atteinte et l'énergie cinétique des blocs propagés le long de la pente.

✓ Probabilité d'atteinte

La probabilité d'atteinte fait référence à la probabilité qu'un objet qui s'est détaché propage et atteigne un endroit spécifique. L'étude trajectographique et les constatations des blocs déjà éboulis permettent d'estimer la probabilité d'atteinte, c'est le rapport entre le nombre total des trajectoires et le nombre des trajectoires traversant une zone particulière. Trois limites de propagation sont définies pour classer cette probabilité en forte moyenne ou faible. Ces limites correspondent aux abscisses parcourues par 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} des blocs par rapport au nombre total de trajectoires calculées ou (1, 10^{-2} , 10^{-4}) si c'est exprimé en pourcentage (**J. M. Abbruzzese et all 2009**).

✓ **Probabilité d'occurrence**

La probabilité d'occurrence est déterminée par des intervalles de temps pendant lesquels un événement a de forte probabilité de se produire (OFEFP, 1997). Elle est fonction de la probabilité de mobilisation et la probabilité d'atteinte (Tab. 2.11).

Une période de retour inférieure à 30 ans indique une fréquence élevée, par contre une période de retour qui dépasse les 100 ans correspond à une faible fréquence.

Tableau 2.11 : Classification qualitatives de la probabilité d'occurrence

Probabilité d'occurrence		Probabilité de rupture		
		Forte	Moyenne	Faible
Probabilité d'atteinte	Forte	Forte	Moyenne	Faible
	Moyenne	Moyenne	Faible	-
	Faible	Faible	-	-

✓ **Carte d'énergie**

Dans ce contexte, l'intensité du phénomène fait référence à l'énergie cinétique des blocs à cet endroit. Trois classes d'intensité sont distinguées selon (OFEFP, 1997), énergie élevée (>300Kj), moyenne (30-300kJ) et faible (< 30 kJ).

L'énergie cinétique des blocs est calculée à partir de l'étude trajectographique le long de la pente. Néanmoins, une estimation préliminaire de l'intensité peut être effectuée grâce aux observations des blocs déjà éboulis (volume, distribution dans la pente, traces d'impact ; etc.).

7.4.4 Elaboration de la carte d'aléa

Selon les directives Suisses qui définissent une matrice de trois niveaux d'aléa faible, modéré et élevé (Fig. 15), dont il est fonction de la probabilité d'occurrence (fréquence) et de l'intensité (Energie) (F.Ferrari et al, 2017). L'intensité du phénomène est exprimée par l'énergie cinétique E d'un bloc rocheux le long de sa trajectoire (E.P.Howald et J.M. Abbruzzese, 2022), Les classes d'intensité sont basées sur l'énergie d'impact que les différents types de construction de murs de bâtiments peuvent supporter (MJ.Eggers et al, 2021).

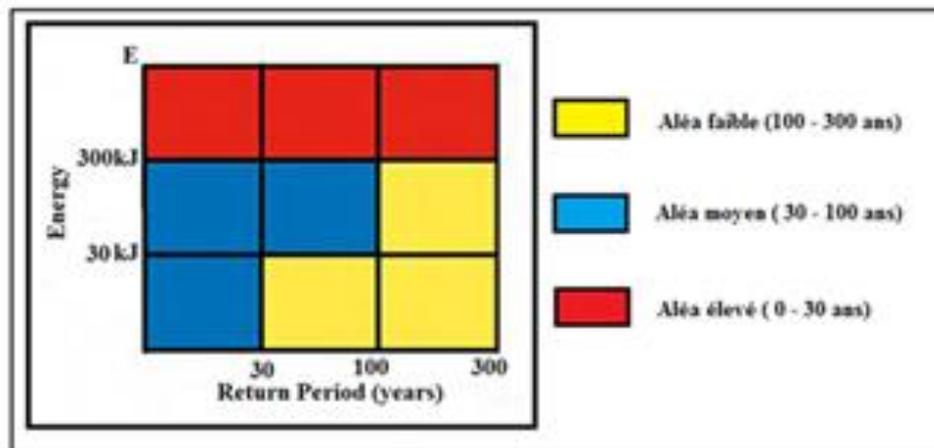


Figure 2.6: Matrice de classification de l'aléa (OFEFP, 1997)

8. Méthode ROCKFALL HAZARD AND RISK ASSESSMENT (Saroglou et al., 2012)

Pour évaluer le risque de chute de bloc à travers les falaises, une méthode qualitative basée sur un système de notation est développée par Saroglou et al (2012) ; elle est appliquée pour des sections individuelles le long des pentes qui présentent un risque sur les structures et les humains, spécialement dans les zones touristiques (Bozdağ A., 2022).

C'est un système basé sur des critères internes de prédisposition et sur la vulnérabilité et les conséquences. Il définit vingt (20) paramètres d'évaluations regroupés en quatre grandes catégories avec des poids différents qui varient selon l'importance des paramètres impliqués (Tab. V) en annexe. Le score de chaque paramètre est donné par la multiplication de la note attribuée par son facteur de poids.

La catégorie A reçoit un poids de 25 %, elle est liée à la géométrie de la pente et à la hauteur des zones sources des blocs ainsi qu'à la végétation. La catégorie B prend le poids de 25 %, elle se réfère aux paramètres géologiques de la matrice rocheuse et aux discontinuités. Le groupe C retient les facteurs externes tels que la sismicité et la circulation des eaux à travers le massif ; elle lui est attribuée le poids de 10 %. La catégorie D perçoit 40 % du poids total du risque, elle englobe les paramètres liés à la vulnérabilité comme la présence humaine, l'accessibilité des pentes et la largeur de la zone de captage.

Enfin, le score total du risque est calculé en additionnant le score individuel de chaque paramètre. La classification du risque est effectuée selon une échelle de cinq catégories (Tab. 2.12) allant du risque très faible à très élevé.

Tableau 2.12 : Classification de risque chute de bloc et indication des mesures de protection (Saroglou et al., 2012)

<i>Classe risque</i>	<i>Score total pondéré 1–100</i>	<i>Risk</i>	<i>Mesures de protection indicatives (le choix est spécifique au site)</i>
I	< 20	Très faible	Pas nécessaire. Il peut s'agir d'interventions ponctuelles éparées
II	20 – 40	Faible	Dans une mesure limitée
III	41 – 60	Moyen	Mesures légères (telles que boulons, filets, retrait de blocs instables, clôtures légères simples)
IV	61 – 80	Élevé	Combinaison de mesures actives (telles que boulons, ancrages) et passives (telles que filets, câbles métalliques, murs de contrefort, clôtures, élimination de blocs instables)
V	81 – 100	Très élevé	État critique de stabilité, combinaison de mesures actives et passives généralisées ou/et fortes. Risque résiduel à accepter

9. Conclusion

Le risque chute de bloc, c'est la réunion du phénomène dommageable avec ses résultats en croisant l'intensité et le taux d'occurrence des événements avec la vulnérabilité des enjeux.

L'aléa chute de bloc c'est la probabilité qu'un fragment de roche atteigne un endroit durant un laps de temps donné avec une intensité (énergie et hauteur).

La vulnérabilité, c'est la capacité d'être exposé ou résister à un phénomène d'intensité donnée.

L'étendue de la zone d'étude dirige le degré de détail de l'étude et fixe les objectifs souhaités par l'étude, en effet il existe trois types de zonages : Carte de susceptibilité (1/25000 à 1/50000) ; carte d'aléa (1/5000 à 1/25000) et carte de risque (1/5000 à 1/1000).

Pour détecter les zones sources des blocs susceptibles à la rupture, on distingue l'aléa diffus, dont les compartiments rocheux ne sont pas identifiés individuellement à travers la falaise, et l'aléa localisé dont les blocs rocheux instables sont nettement identifiés et localisés.

Pour évaluer l'aléa et le risque chute de bloc, il existe des approches globales qui consistent à identifier les zones susceptibles à la mobilisation sans chercher à reconnaître avec exactitude le bloc susceptible de se détacher, et d'autres approches détaillées dont le bloc susceptible à la rupture est identifié selon un mécanisme de rupture connu.

Il existe encore des méthodes quantitatives pour évaluer l'aléa diffus. Cela consiste à caractériser la probabilité de rupture et la densité des trajectoires avec une certaine énergie. L'inventaire des éboulements c'est l'approche la plus directe, une deuxième méthode consiste

à estimer la fréquence et modéliser la propagation, cette fréquence peut être évaluée en utilisant une approche d'événement à partir des mesures topographiques successives, un inventaire historique ou bien l'observation des cicatrices, sinon une approche bloc peut être employée au moyen d'un relevé exhaustif des blocs sur place ou bien l'impact des blocs sur les arbres.

L'évaluation de l'aléa diffus par les méthodes qualitatives permet d'estimer la susceptibilité de rupture dans les zones source des blocs, ainsi que la probabilité d'atteinte en fonction de l'énergie. Ces méthodes utilisent un système de notation et tiennent en considération plusieurs facteurs liés à la fréquence, à la rupture, à l'intensité, l'atteinte et à la vulnérabilité.

La méthode RES (Rock Engineering System) autorise le choix des paramètres à prendre en considération et tient en compte l'influence et l'interaction de plusieurs facteurs.

La méthode RHRS (Rock Fall Hazard Rating Systems) qualifie le risque le long des couloirs routiers et elle est basée sur une notation de plusieurs facteurs qui englobent onze paramètres influençant la stabilité et la vulnérabilité par rapport au phénomène de chute de bloc.

La méthode établie par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) est une étude spécifique d'aléa lié aux éboulements rocheux. Elle consiste à établir une étude spécifique, la probabilité de rupture est déterminée de façon qualitative basée sur l'évolution et l'état de dégradation des discontinuités, et les études de trajectoire sont menées pour examiner l'aléa de propagation ; l'approche empirique est constituée d'une couche de source et d'une couche d'évaluation nécessitant toutes les deux des investigations sur le terrain. La couche source contient la description détaillée d'ensemble du site d'investigation pour enfin le subdiviser en secteurs homogènes d'aléa à caractéristiques proches. La couche d'évaluation distingue et caractérise, à l'intérieur de chaque secteur, les sous-ensembles rocheux susceptibles de présenter un risque de mise en mouvement en qualifiant son aléa de rupture et son aléa de propagation.

La méthode MATTEROCKING postule que l'instabilité des roches ne peut exister sans discontinuités ; elle consiste à comparer la topographie digitalisée avec les discontinuités les plus importantes, cette confrontation donne un aperçu sur la distribution spatiale des discontinuités et permet l'identification rapide des principales instabilités potentielles. La description in situ des zones détectées permet d'attribuer un indice qui qualifie la probabilité de rupture. L'étude de la propagation permet d'estimer la probabilité d'atteinte et l'énergie cinétique, la période de retour est évaluée qualitativement en fonction de la probabilité de rupture et la probabilité d'atteinte, enfin une carte d'aléa est élaborée en intégrant la l'intensité du phénomène et la période de retour en un point donné de territoire.

La méthode RHRA (Rock fall Hazard and Risk Assessment) de SAROGLU 2012, c'est une méthode qualitative basée sur un système de notation. Elle prend en considération vingt critères regroupés en quatre catégories, englobant ainsi les facteurs internes, externes, de dégradation et de la vulnérabilité. Elle est applicable dans les versants qui présentent un risque sur les structures et les humains, notamment au niveau des lieux touristiques.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend des objectifs voulus, et la combinaison de plusieurs approches permet de créer des méthodologies adoptées au contexte de la zone d'étude et du phénomène.



**CHAPITRE III « ETUDE
TRAJECTOGRAPHIQUE »**



1. Introduction

La compréhension du phénomène de propagation a suscité l'intérêt des communautés scientifiques et industrielles, en particulier après le XXe siècle. Cet intérêt a été causé par le nombre croissant d'éboulements rocheux dus à l'urbanisation, suite à la croissance démographique et à la croissance industrielle, telles que le secteur automobile, qui a conduit à l'extension des villes et l'ouverture des couloirs routiers et ferroviaires en zone montagneuse. La propagation, en tant que phénomène, dépend des propriétés topographiques et des caractéristiques rhéologiques des compartiments éboulés et du sol du versant.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord explorer les différents modes de déplacement des blocs au cours de leur trajectoire sur un versant, ensuite nous présentons les principales techniques utilisées pour modéliser le processus de propagation des blocs éboulis. En outre, nous exposons les différentes approches utilisées dans l'étude trajectographique en fonction du volume ou de la masse des éboulis. Enfin, nous expliquerons les étapes fondamentales pour établir une étude pertinente sur les trajectoires des blocs rocheux.

2. Caractéristiques de la trajectoire d'un bloc en mouvement

Depuis les premières études menées sur le sujet des chutes de blocs, ce phénomène a été identifié comme ayant connu trois phases distinctes (Ritchie, 1963 ; Lied, 1977). Ces phases sont caractérisées par la rupture du bloc à partir des zones sources au niveau de la falaise, la propagation ultérieure du bloc interagissant avec le terrain, et l'arrêt final de la chute du bloc soit en aval de la falaise, soit sur une structure de protection (F.Bourier, 2008).

La chute d'un bloc est généralement décrite comme une série d'étapes impliquant un vol libre et des interactions avec le sol, notamment un rebond, un glissement et un roulement (Descoedres, 1997) (Fig. 3.1).

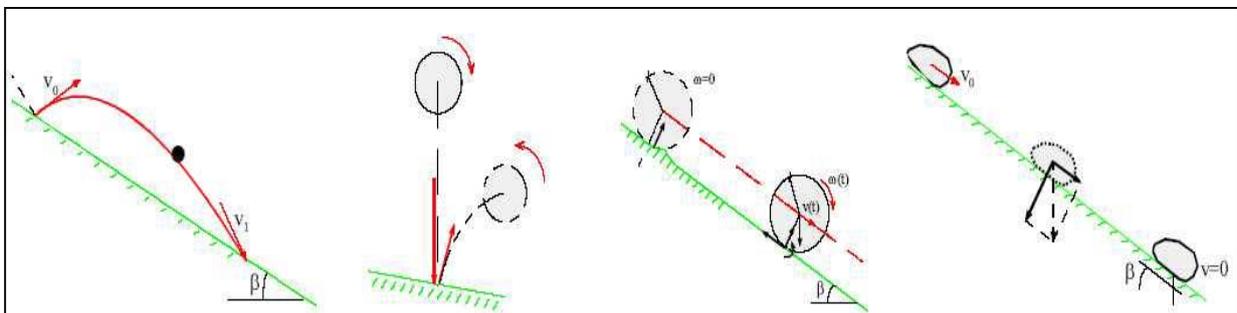


Figure 3.1 : Modes de déplacements possibles d'un bloc sur un versant Descoedres(1997).

Il existe plusieurs méthodes utilisées pour calculer les types de mouvements simulés. Certains modèles simulent le mouvement des blocs à l'aide d'algorithmes qui permettent une analyse détaillée des phases de rebond, de glissement et de roulement. En revanche, d'autres modèles considèrent ces trois modes de déplacement comme des mouvements similaires, qui sont décrits par une séquence d'impact et de rebond (Pfeiffer et Bowen, 1989).

Le déplacement du bloc sur le versant dépend de la pente moyenne du relief (Ritchie, 1963).

- Pente faible : glissement/roulement
- Pente intermédiaire : succession de vols libres, impact et rebond
- Pente raide : vol libre

On peut assimiler la propagation d'un bloc sur des distances importantes, à une série de rebonds pendant toute la durée de l'événement, car les mouvements par roulement ou par glissement sont peu fréquents, sauf dans des conditions spécifiques telles que, lorsque les vitesses sont faibles (au début et à la fin du phénomène de propagation) ou lorsque le bloc de roche s'enfonce fortement dans le sol (Volkwein et al. 2011).

La simulation de la trajectoire d'un projectile rocheux inclut la prise en considération de plusieurs paramètres. Le rebond fait référence au phénomène qui se produit lorsqu'un objet en mouvement change de direction lorsqu'il rencontre un obstacle. Ce processus peut être séparé en deux étapes distinctes (vol et l'impact). La trajectoire d'un bloc rocheux, lors de sa chute, est généralement décrite à l'aide d'un modèle de mouvement balistique. Le rebond étant le phénomène le plus complexe. Afin de modéliser ce phénomène avec précision, les simulations utilisent souvent des coefficients de restitution R_n normaux et tangentiels R_t . Cependant, il est crucial d'utiliser correctement ces coefficients dans les algorithmes pour garantir le réalisme physique et la robustesse. Sinon, ça risque l'arrivée de blocs de différentes tailles au même endroit.

La pénétration du projectile dans le sol influence également le calcul du rebond. Le modèle devrait être capable de calculer directement la pénétration. Ce facteur dépend des caractéristiques du sol, de l'énergie et de l'angle d'impact, ainsi que de la forme du compartiment ; il provoque une diminution d'énergie et influence le transfert entre les vitesses de rotation et de translation.

La forme du projectile a également un impact significatif sur sa trajectoire. Certains modèles actuels permettent l'utilisation de différentes formes de blocs, telles que des blocs rectangulaires, sphériques ou en forme de disque. Cependant, il convient de noter que dans la plupart des modèles, la forme n'affecte que les calculs de volume, de masse et de moment d'inertie du bloc.

3. Méthodes de modélisation de propagation

Il existe deux méthodes de modélisation :

- Modélisations *physiques* d'éboulement : il s'agit des expérimentations menées en laboratoire, utilisant des formes simplifiées et des matériaux idéaux de différentes natures. Il implique le lancement des particules sur un plan incliné. Des méthodes de modélisation physique, qu'elles soient en 2D ou plus récemment en 3D, sont utilisées pour examiner l'impact de plusieurs paramètres tels la pente, la hauteur, le volume, la forme, le nombre de particules, les caractéristiques rhéologiques, la structure de départ...) sur la dynamique de l'éboulement (MASSA).
- Modélisations *numériques* : l'utilisation des méthodes de modélisation numérique augmente davantage, afin de simuler la propagation des blocs, cela est dû à leur capacité à tenir compte des conditions topographiques réelles du site. Cependant la validation de ces modèles continue de poser un problème complexe en raison de l'incertitude liée à la détermination des paramètres rhéologiques des blocs et des terrains constituant le relief.

3.1 Méthodes de modélisation physique/analogique (expérimentale)

Il est difficile d'obtenir directement les informations sur la dynamique des éboulements et les caractéristiques rhéologiques des matériaux éboulis à partir des observations visuelles. Par conséquent, les modèles numériques développés pour analyser la propagation ne peuvent être validés qu'imparfaitement sur des cas réels en raison de la présence de paramètres inconnus ou très incertains.

À l'inverse, les tests de laboratoire, appelés modélisation physique, fournissent un environnement contrôlé pour étudier les caractéristiques géo-mécaniques des matériaux et la géométrie du modèle. Ces tests impliquent la libération des éléments granulaires sur un plan incliné relié à un plan horizontal. De plus, l'utilisation de caméras rapides permet de capturer des informations spécifiques pendant la propagation de la masse, telles que la vitesse et l'étalement (MASSA)

Il existe des expériences sur des sites réels visant à illustrer l'influence de la forme des blocs sur la propagation et les mécanismes d'interaction avec les forêts. Ces expériences, ainsi que les recherches associées, généreront des bases de données contenant non seulement des informations traditionnelles, mais également des détails complémentaires tels que les vitesses de rotation, la fracturation lors de la propagation et l'interaction avec la végétation. Les expériences faites sur la propagation sont indispensables non seulement pour appréhender la

physique du phénomène, mais également pour améliorer la fiabilité des outils informatiques (Y.Cuervo , 2015). Les tests analogiques se sont révélés efficaces, les données obtenues à partir de ces tests sont ensuite utilisées pour valider les modèles numériques avant leur application à des cas réels.

Il convient de noter que le comportement des blocs rocheux à l'échelle du terrain est plus complexe que ce qui est observé en laboratoire. Il est donc impératif de recueillir davantage de données expérimentales sur place. En outre, certains phénomènes physiques, tels que la dissipation d'énergie, sont difficiles à identifier uniquement par le biais d'expériences. Par conséquent, l'utilisation des modèles numériques prouvés dans des conditions bien contrôlées devient nécessaire.

3.2 Méthodes de modélisation numériques

Le phénomène de propagation sera entrepris de manière significative par le volume et la quantité de compartiments rocheux engagés dans l'éboulement (Bourrier et al. 2013). D'un point de vue expérimental, il est évident qu'on ne peut pas comparer la propagation d'un bloc individuel, qui interagit uniquement avec le sol, à celle d'une masse rocheuse dont les particules interagissent à la fois entre elles et avec le sol (Y.Cuervo, 2015).

3.2.1 Propagation de masses rocheuses

Les méthodes sont classées en quatre catégories principales (Y.Cuervo , 2015)

3.2.1.1 Méthode granulaire (discrète)

Elle gère la propagation d'un groupe de blocs qui interagissent les uns avec les autres. Cette méthode est particulièrement bien adaptée à ce problème en raison de sa formulation, qui inclut la loi fondamentale de la dynamique, les lois de contact entre les particules ou avec le substratum pour simuler les déformations et pour estimer les pertes d'énergie (MASSA). Cette méthode peut utiliser deux types de formulation (Y.Cuervo , 2015).

➤ *Dynamique de contact*

Dans cette formulation, il est supposé que les corps sont indéformables et les contacts entre blocs sont rigides, donc les éléments ne se chevauchent pas (Radjai and Richefeu, 2007). Également, les chocs sont instantanés et le contact se produit en un seul point (Y.Cuervo , 2015).

➤ *Dynamique moléculaire*

Elle implique des éléments déformables permettant le chevauchement local entre particules, Dans cette formulation, les blocs peuvent s'interpénétrer. La durée des contacts n'est pas nulle (Fig. 3.2). Pour évoluer un tel système, les équations différentielles du second ordre de la mécanique classique de Newton sont adéquates (Y.Cuervo , 2015).

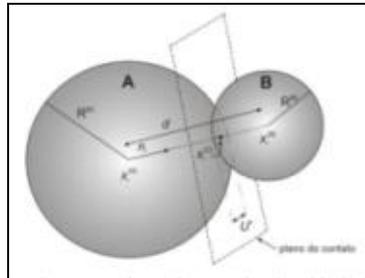


Figure 3.2 : Interpénétration entre blocs (Mejia et al , 2010 »

3.2.1.2 Méthode continue

La modélisation hydrodynamique implique l'assimilation de la diffusion des blocs rocheux à un flux de fluide dont les volumes des masses en mouvement sont plus importants par rapport aux volumes des blocs impliqués. Et les masses hétérogènes sont simplifiées en une seule phase homogène (fluide équivalent). La dynamique du mouvement des masses peut être décrite à l'aide des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

➤ *Méthode continue classique*

Le mouvement des roches granulaires est considéré comme un écoulement à surface libre, dont lequel l'épaisseur est considérée nettement inférieure à la géométrie globale de la masse en mouvement. Il est supposé que la vitesse est constante sur toute l'épaisseur de la masse, tous les mécanismes de dissipation d'énergie se produisant à la base de l'écoulement (Fig. 3.3).

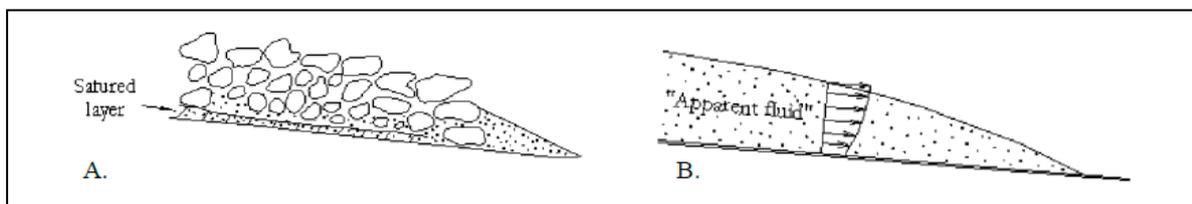


Figure 3.3 : modèles de milieu continu équivalent A : Avalanche rocheuse, B : Fluide homogène équivalent (Banton, 2009a)

Les rhéologies couramment utilisées dans ces méthodes peuvent être classées comme plastique, dans lequel la force de résistance dépend de la contrainte normale effective et de l'angle de frottement à la base.

Les simulations numériques ont généralement montré que les méthodes continues sont très sensibles à la géométrie des surfaces inclinées, et ne capturent pas avec précision les dissipations d'énergie à proximité des singularités, en particulier pour les volumes petits et intermédiaires. En revanche, lors de l'analyse des mouvements de roches contenant de grands volumes (avalanches et coulées boueuses), cette méthode devient pertinente car elle permet une meilleure évaluation des bilans quantitatifs et qualitatifs (Y.Cuervo, 2015).

➤ *Méthode MPM (Materiel point Method)*

La méthode MPM est introduite pour la première fois en 1996 (Schreyer.,1996), cette approche combine les avantages des formulations du continuum lagrangienne et eulérien. Le continuum est constitué par l'ensemble des points de Lagrangiens appelés «points matériels», et les points matériels possèdent toutes les propriétés mécaniques du continuum, tandis que le maillage eulérien et ses points de Gauss représentent la cinématique du flux, par conséquent, la déformation continue est prise en charge en suivant le mouvement des éléments au sein d'un maillage eulérien fixe.

La formulation MPM offre un moyen simple de gérer les déformations complexes et importantes et les grands déplacements (Fig. 3.4). Elle convient donc parfaitement aux problèmes d'instabilité impliquant de grandes déformations.

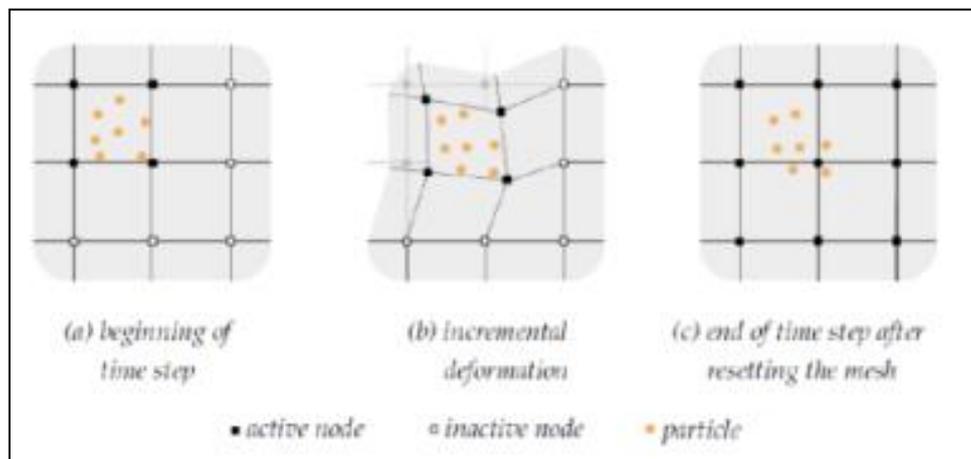


Figure 3.4 : Déplacement des particules lagrangiennes à travers un grille eulérien fixe (Al-Kafaji, 2013)

3.2.1.3 Approches combinées continue/discrets et continue/trajectographie

Il existe différentes méthodes pour coupler l'approche continue et l'approche granulaire. L'une des approches est le couplage de sous-domaines, qui permet de discrétiser les zones très sollicitées en adoptant un modèle discret et d'utiliser un modèle continu pour les zones présentant un comportement continu (Fig. 3.5).

Une autre approche consiste à utiliser des modèles mixtes pour étudier la déformation et la propagation des masses rocheuses. Le maillage initial par éléments finis est découpé en sous-domaines de maillage qui interagissent les uns avec les autres par des codes d'éléments discrets. Ces sous-domaines maillés peuvent représenter les éléments déformables discrets qui s'interfèrent via leurs points de contact pendant la simulation.

Cependant, cette méthode présente des limites dans la modélisation de la propagation finale du flux, car la nature tridimensionnelle de la propagation n'est pas prise en considération dans le modèle numérique.

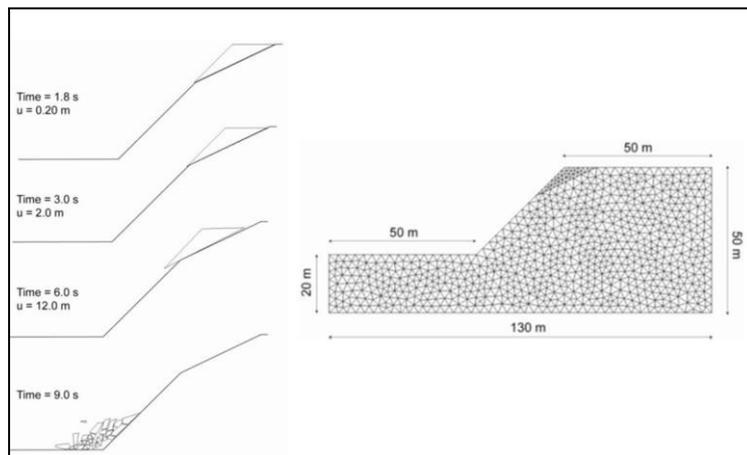


Figure 3.5 : Modélisation mixte de la propagation d'une masse rocheuse (Lisjak and Grasselli, 2011)

3.2.2 Propagation de blocs rocheux isolés (Approche type trajectographique)

3.2.2.1 - Modèle basé sur une analyse empirique

Les modèles empiriques sont fondés sur l'hypothèse que le type de déplacement des blocs est principalement par glissement ou roulement (Y.Cuervo, 2015), ces méthodes établissent une corrélation entre les éléments géométriques moyens du versant et la distance à laquelle les blocs s'arrêtent, elles sont utilisées pour estimer la position finale de la propagation ou les distances d'arrêt des blocs (F.Bourrier.2008).

Le principe de ces modèles repose sur l'hypothèse que le point auquel les blocs connaissent une propagation maximale peut être défini par l'intersection entre la topographie du versant et d'une ligne passant soit par le point de détachement, soit par le point d'arrêt (F.Bourrier.2008).

La première relation géométrique consiste à faire passer une droite qui relie le centre de gravité du bloc avant la rupture et l'emplacement du bloc après arrêt en fin de propagation (Heim, 1932).

Cette relation est quantifiée par deux approches :

- Un angle géométrique β_g dont $\tan(\beta_g) = (\Delta Z_1)/L_1$
- Un angle de propagation β_f « Fahrböschung » dont $\tan(\beta_f) = (\Delta Z_1)/L_2$

Où :

- ΔZ_1 représente la différence de hauteur entre le centre de gravité du bloc avant la mobilisation et le point d'arrêt.
- L_1 signifie la projection horizontale du chemin de propagation en ligne droite.
- L_2 désigne la longueur développée par la projection horizontale du L_1 (Fig. 3.6).

L'angle β_f sera toujours inférieur que β_g , car la distance $L_2 > L_1$.

D'autres chercheurs ont recommandé de déterminer ces angles, non pas à partir du centre de gravité des blocs, mais à partir de la position du premier impact entre bloc et le versant après la chute. Cet argument repose sur l'idée que la majeure partie de l'énergie cinétique gagnée pendant la phase de chute libre est perdue lors du premier impact avec le versant.

En conséquence, les deux nouveaux angles sont estimés par :

- Angle géométrique minimum β_n dont la $\tan(\beta_n) = \Delta Z_2/L_1$
- Angle de pente moyenne β_s dont la $\tan(\beta_s) = \Delta Z_2/L_2$

Avec :

ΔZ_2 représente la différence de hauteur entre la zone du premier impact et la zone d'arrêt

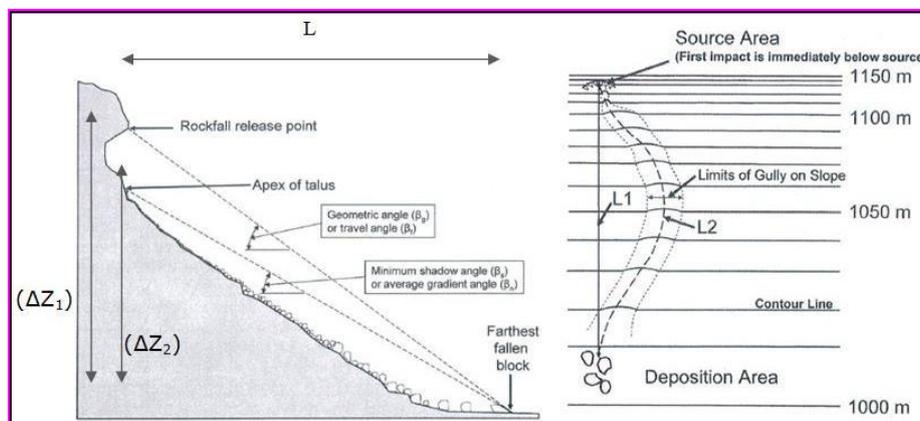


Figure 3.6 : Etude trajectographique par une approche empirique (Petje, 2005)

Étant donné que les diverses analyses sont effectuées pour différents types de terrain en examinant les chutes de blocs passées, les valeurs de ces angles se situent fréquemment entre 22° et 30°, quel que soit le point de référence utilisé pour leur estimation.

Cependant, du fait de leur grande facilité d'estimation, ces méthodes peuvent s'avérer être très utiles dans le cadre des études préliminaires qui couvrent des vastes surfaces (F.Bourrier.2008).

3.2.2.2 Modèles basés sur les logiciels de modélisation de la trajectoire

La trajectoire d'un bloc est l'évolution dans le temps de sa position et de sa vitesse par rapport à la topographie du versant, elle est décrite à tout instant par l'un des trois types de mouvement suivants :

- La **chute libre** dans l'air,
- Le **glissement frottant** (masse concentrée) ou le **roulement frottant** (bloc rigide) sur la surface du sol
- L'**impact** sur le sol

Selon la description physique de la trajectoire des compartiments rocheux isolés, il existe trois formulations physiques de modélisation (Volkwein et al, 2011):

- « **Lumped mass** » : Le bloc est assimilé à un point matériel
- « **Rigid body** » : Le bloc est assimilé à un corps rigide en mouvement,
- Les modèles « **hybrides** » : pour la période de vol, le compartiment rocheux est considéré comme étant une masse concentrée en un point, et pour l'interaction bloc-sol, le compartiment rocheux est assimilé à un corps rigide.

➤ Relation d'équilibre masse concentrée

La trajectoire d'un bloc doit vérifier la relation générale de l'équilibre dynamique pour les mouvements de translation :

$$\sum F = M \cdot \vec{a} = m \frac{d^2 X}{dt^2}$$

Avec : **F** : vecteur de force, **X** vecteur des coordonnées spatiales globales et **t** le temps

• *Cinématique de la chute libre non verticale*

Le déplacement du bloc en vol libre (Fig. 3.7) est considéré uniforme selon les directions « X » et « Y » et à un mouvement accéléré selon la direction verticale « Z » sous l'effet de l'accélération gravitaire.

Le frottement du bloc dans l'air est négligé, dans ces conditions, la seule force intervenant dans l'équation est le poids P du bloc, soit $F = P$, cette force étant conservative, aucune dissipation d'énergie ne se produit donc durant cette phase. Ainsi, la rotation est négligée.

On applique la 2^{ème} loi de Newton au système dont le référentiel terrestre est supposé galiléen, les frottements sont négligés par rapport au poids du projectile donc sa masse n'intervient pas.

Le bilan des forces : $\Sigma f = m \cdot \vec{a} \Leftrightarrow \vec{p} = m \cdot \vec{a} \Leftrightarrow -m g = m \cdot \vec{a}$

Donc : $\vec{a} = -g \vec{u}_y + 0 \vec{u}_x$

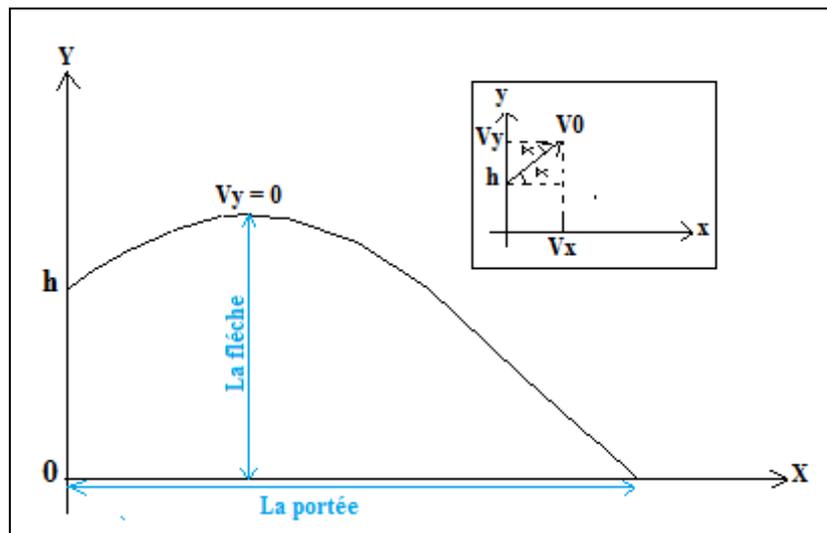


Figure 3.7 : Présentation en 2D du mouvement d'un projectile

En projetant la vitesse sur les axes x et y on obtient la forme scalaire suivante :

On note que dans le cas de la chute libre ou en vol, seul la vitesse selon l'axe OY varie en fonction du temps, la vitesse selon l'axe x est nulle.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_x(t) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_y(t) &= -g \end{aligned} \quad \vec{a} = \frac{dv}{dt} \quad \text{ou} \quad \vec{v} = \int \vec{a} dt \quad \text{donc} \quad \vec{v} \quad \begin{aligned} v_x(t) &= C_1 \\ V_Y(t) &= -gt + C_2 \end{aligned}$$

à $t = 0s \quad \varphi > 0$

$$\cos \alpha = \frac{v_{x0}}{v_0} \quad \text{donc} \quad v_{x0} = v_0 \cdot \cos \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{v_{y0}}{V_0} \quad \text{donc} \quad v_{y0} = v_0 \cdot \sin \alpha$$

$$\mathbf{v} \begin{cases} v_x = v_0 \cos \alpha \\ v_y = -gt + v_0 \sin \alpha \end{cases}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \quad \text{ou} \quad \vec{OM} = \int \vec{v} dt \quad \text{donc} \quad \vec{OM} \begin{cases} X_t = V_0 \cos \alpha t + C_3 \\ Y_t = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin \alpha t + C_4 \end{cases}$$

$$\text{à } t = 0s \quad \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = h \end{cases} \quad \text{donc } \vec{OM} \begin{cases} x_0 = v_0 \cos \alpha \cdot (0) + C_3 \\ y_0 = -\frac{1}{2}g(0)^2 + V_0 \sin \alpha (0) + C_4 \end{cases} \quad \text{ce qui donne } \begin{cases} C_3 = 0 \\ C_4 = h \end{cases}$$

$$\vec{OM} \begin{cases} x_t = v_0 \cos \alpha t \\ y_t = -\frac{1}{2}g t^2 + V_0 \sin \alpha t + h \end{cases}$$

- **Equation de la trajectographie**

$$x_0 = v_0 \cos \alpha t \rightarrow t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

Remplacé t dans y(t) on obtient

$$y_x = -\frac{1}{2}g \frac{x^2}{(v_0 \cos \alpha)^2} + v_0 \sin \alpha \frac{x}{(v_0 \cos \alpha)} + h$$

En simplifiant

$$y_x = -\frac{1}{2}g \frac{x^2}{(v_0 \cos \alpha)^2} + \tan \alpha x + h$$

- **Point d'impact**

C'est la portée, il s'agit de la distance horizontale maximale (y_{\max}) atteinte par le projectile retombé au sol.

$$y_{\max} = 0 = -\frac{1}{2}g \frac{x^2}{(v_0 \cos \alpha)^2} + \tan \alpha x + h$$

Ce paramètre est influencé par plusieurs paramètres tels que v_0 , h et α

- **La hauteur du rebond**

C'est la flèche, il s'agit de la hauteur maximale atteinte par le projectile, elle correspond au point pour laquelle la vitesse verticale est nulle.

$$v_y = -gt + v_0 \sin \alpha \quad \text{au } t_f \quad v_{y_{t_f}} = 0 \quad \text{ce qui donne } t_f = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

Remplaçant t_f dans y_x on obtient

$$y_{t_f} = -\frac{1}{2}g (t_f)^2 + \tan \alpha (t_f) + h = -\frac{1}{2}g \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right)^2 + \tan \alpha \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right) + h$$

Après simplification ;

$$y_{tf} = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} + h$$

- **Cinématique du glissement**

La cinématique du bloc est donc assimilée à un glissement frottant, le glissement frottant sur la surface du terrain est représenté par un modèle de frottement dynamique de Coulomb, dans lequel la force de frottement T est définie par : $\|T\| = k_s \cdot \|N\|$

Avec :

- T : force de frottement
- N : la force de réaction normale
- k_s : Coefficient de frottement dynamique

On applique la 2^{ème} loi de Newton : $\sum f = m \cdot \vec{a}$

$$\vec{p} + \vec{N} + \vec{T} = m \vec{a}$$

En considérant ici un plan défini par le repère local (n,h,d) tel qu'indiqué sur la figure 3.8, et notant qu'il n'y a pas de mouvement selon l'axe ($V_n = 0$), le bilan des forces donne ce qui suit :

$$\frac{dV_h}{dt} = k_s \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{V_h}{\|V\|} \quad \text{et} \quad \frac{dV_d}{dt} = k_s \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{V_d}{\|V\|} - g \cdot \sin \alpha \quad \text{Avec : } \|V\| = \sqrt{V_h^2 + V_d^2}$$

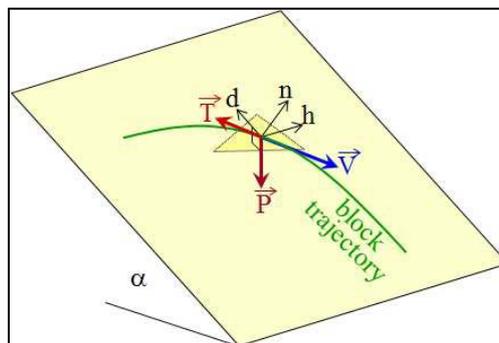


Figure 3.8 : Référentiel local utilisé pour la formulation du glissement frottant (h : axe horizontal de la face ; d : axe opposé à la direction de plus grande pente de la face; n : axe normal à la face) .

- **Phase d'impact**

La majorité des modèles de « blocs isolés » sont fondés sur l'étude des rebonds consécutifs d'un bloc qui interagit avec le terrain nature (Y.Cuervo , 2015).

La collision entre un bloc et la surface du sol est considérée comme un événement quasi instantané, dans lequel le mouvement est presque nul (l'impact se produit à une position fixe).

Ainsi, à chaque contact du bloc avec le sol, l'impact est caractérisé par une perte d'énergie, qui est représentée par le coefficient de rebond, également appelé le coefficient de restitution. Ce coefficient est utilisé pour ajuster les composantes de vitesse exprimées en coordonnées locales (composantes normales et tangentielles par rapport à la surface au point d'impact). Les vitesses réfléchies $V_N (r)$ et $V_T (r)$ après l'impact sont obtenues à partir des vitesses incidentes $V_N (i)$ et $V_T (i)$. Le coefficient de restitution est donc le moyen le plus simple de relier les vitesses relatives après et avant un impact.

La plupart des modèles de trajectoire spécifient deux paramètres de restitution : l'un est normale (R_n) et l'autre est tangentiel (R_t) lors de l'impact, sur la base des composantes normale (V_n) et tangentielle (V_t) de la vitesse poste (+) et avant (-) l'impact :

$$R_n = -\frac{V_n^+}{V_n^-} \quad \text{et} \quad R_t = -\frac{V_t^+}{V_t^-}$$

Le coefficient de restitution normal peut également être défini en fonction des hauteurs maximales avant (h_d) et après rebond (h_r) (Jaboyedoff et Labiouse, 2011). Cette approche est considérée importante, puisque dans le domaine de l'ingénierie, la hauteur de rebond est un élément crucial pour la conception des structures de protection.

$$R = \sqrt{\frac{h_r}{h_d}}$$

D'autres auteurs (Jaboyedoff et Labiouse, 2011) définissent le coefficient de restitution par le rapport entre l'énergie cinétique totale restaurée après et avant l'impact. En tenant compte des vitesses de glissement et de rotation normales et tangentielles :

$$R_{TE} = -\frac{E_{tot}^+}{E_{tot}^-} = \frac{m[(V_n^+)^2 + (V_t^+)^2] + I(\omega^+)^2}{m[(V_n^-)^2 + (V_t^-)^2] + I(\omega^-)^2}$$

Le coefficient de restitution est supposé constant pour la même lithologie, mais ce n'est pas le cas. En fait, il peut changer sous l'effet des conditions d'impact (la vitesse, l'angle d'incidence, la relation entre la taille du bloc et l'épaisseur de la couche, etc.) (Labiouse et Heidenreich, 2009). Il est observé une variabilité significative dans l'estimation de ce coefficient pour la même nature de terrain, ce qui suggère que sa caractérisation dépend fortement de la méthode de mesure.

L'existence de valeurs supérieures à l'unité s'explique par le fait que la rotation des blocs n'est pas prise en compte, et qu'une partie de l'énergie de rotation est convertie en énergie de translation après l'impact (Asteriou et al, 2012).

➤ **Relation d'équilibre bloc rigide**

La trajectoire d'un bloc rigide doit satisfaire l'équation générale d'équilibre dynamique pour les mouvements de translation

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$$

Où : \mathbf{F} désigne le vecteur des forces, \mathbf{X} le vecteur des coordonnées spatiales globales (i.e. décrivant la translation) et t le temps.

Cependant, la forme du bloc et sa rotation devant aussi être prises en compte, l'équation générale d'équilibre dynamique pour les mouvements de rotation doit donc aussi être satisfaite.

$$\sum \mathbf{M} = \mathbf{I} \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$$

Où : \mathbf{M} est le vecteur des moments, \mathbf{I} le moment d'inertie du bloc, $\boldsymbol{\omega}$ sa vitesse angulaire (ou de rotation) et $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$ son accélération angulaire .

- ***Cinématique de la chute libre***

Bien que le bloc ait une taille et une forme spécifiées, l'analyse de leurs trajectoires est réalisée en partant du principe que lorsque les vitesses sont subsoniques et que les tailles de blocs sont d'intérêt, ainsi que les forces de frottement avec l'air, sont négligées, cela implique que la vitesse de rotation reste constante pendant la chute libre du bloc, de sorte que la rotation n'affecte pas sa cinématique.

En outre, des géométries de base présentant des caractéristiques inertielles rotationnelles facilement déductibles sont fréquemment utilisées. Des formes comme les sphères, les parallélépipèdes et les cylindres sont couramment utilisées (Keaton, 2012).

Donc, de façon similaire à l'approche masse concentrée, la relation d'équilibre se réduit ici à l'équation de la relation d'équilibre (bloc rigide) dans laquelle la seule force est le poids \mathbf{P} du

bloc : $\mathbf{F} = \mathbf{P} \Leftrightarrow \mathbf{m} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g}$. Après simplification, on obtient : $\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{g}$

Cette force étant conservatrice, par conséquent aucune perte d'énergie ne se produit durant cette phase.

En projetant l'équation de l'équilibre sur un référentiel choisi localement (0, x1, x3) qui inclut le vecteur vitesse \mathbf{V} , et tel que l'axe (0,x3) soit vertical et orienté vers le haut. Également en l'intégrant doublement par rapport au temps, en tenant compte des conditions initiales à $t = 0$

pour la vitesse ($v(t=0)$) et la position ($x(t=0)$), on peut aisément déduire les équations explicites classiques (parabole) du projectile.

$$x_1(t) = v_{1(t=0)} \cdot t + x_{1(t=0)}$$

$$x_3(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + V_{3(t=0)} \cdot t + x_{3(0)}$$

Pour déterminer l'extrémité de la parabole (c'est-à-dire le point d'impact), l'équation paramétrique de la trajectoire peut être obtenue en éliminant le paramètre t .

$$x_{3(x_1)} = \frac{1}{2} g \frac{x_1^2}{v_{1(t=0)}^2} + x_1 \frac{v_{3(t=0)}}{v_{1(t=0)}}$$

- *Cinématique du roulement*

Dans l'approche bloc rigide (bloc d'une forme donnée, de rayon R et de moment d'inertie I), la cinématique du bloc sur une surface est assimilée à un roulement avec frottements. Une formulation similaire à celle proposée par (Azzoni et al. 1995) est utilisée. En supposant que le roulement se produit sans glissement pour un contact sphère/plan, la compatibilité géométrique entre V et ω impose que :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv}{dt}$$

En considérant que le contact sphère/plan est de rayon U (Fig. 3.9), l'équation d'équilibre en rotation (relation d'équilibre (bloc rigide)) s'écrit alors :

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = -T \cdot R + N \cdot U$$

où T est la force de frottement.

Les forces à considérer dans l'équation d'équilibre en translation (Relation d'équilibre (bloc rigide)) sont le poids P du bloc (conservative), la force de frottement au roulement T (dissipative) et la réaction normale N . L'équilibre en translation s'écrit donc :

$$\sum F = T + P + N = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$$

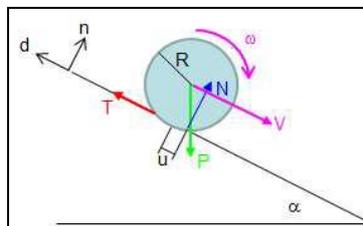


Figure 3.9 : Roulement frottant d'une sphère sur un plan

En considérant ici un plan défini par le repère local (n, h, d) et notant que $V_n = 0$, la combinaison des 2 équations précédentes donne finalement :

$$\frac{dV_h}{dt} = A \cdot k_r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{V_h}{\|V\|} \quad \text{et} \quad \frac{dV_d}{dt} = A \cdot k_r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{V_d}{\|V\|} - A \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Avec : $\|V\| = \sqrt{V_h^2 + v_d^2}$

où k_r est le coefficient de frottement au roulement : $k_r = \frac{u}{R}$

et A un coefficient représentant l'influence de la forme, de la masse et de la taille du bloc :

$$A = \frac{m}{m + \frac{I}{R^2}} = \frac{m}{m + \frac{f \cdot m \cdot R^2}{R^2}} = \frac{1}{f}$$

Avec f est un paramètre de forme ($f = 2/5$ pour la sphère pleine, $f = 1/2$ pour le cylindre plein).

- **Phase d'impact**

L'impact d'un bloc se produit à une position fixe sur la surface du sol (Fig. 3.10), de ce fait, l'impact est considéré comme un phénomène quasi-instantané. Ainsi, il est caractérisé par une dissipation énergétique, représentée ici de manière classique par les deux coefficients de restitution R_N (restitution Normale) et R_T (restitution Tangentielle). Ces coefficients sont utilisés pour modifier les composantes de la vitesse exprimées en coordonnées locales (composantes normale et tangentielle par rapport à la surface au point d'impact).

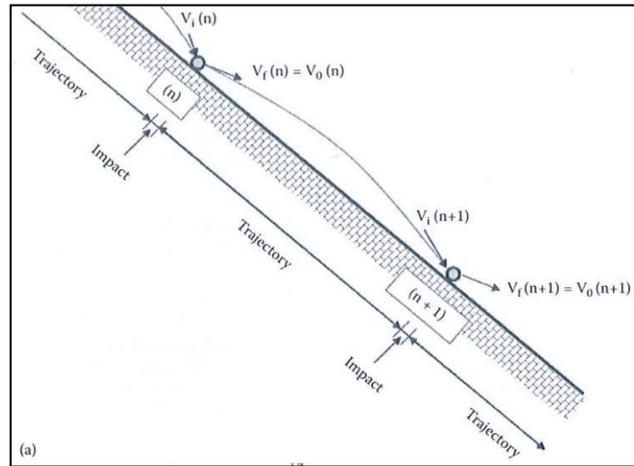


Figure 3.10 : Phase impact / rebond d'un bloc (Wyllie and Mah, 2014)

Néanmoins, l'influence de la vitesse de rotation doit être prise en compte. Selon la formulation proposée par Pfeiffer et Bowen (1989), Le coefficient de restitution normale est supposé être indépendant de la vitesse de rotation incidente $w(i)$, donc la vitesse normale réfléchi $V_N(r)$ est obtenue à partir de la vitesse incidente normale $V_N(i)$ selon :

$$V_{N(r)} = -R_n \cdot V_{N(i)}$$

Une dépendance du coefficient R_N en fonction de la vitesse normale incidente $V_N(i)$ est proposée d'après Pfeiffer et Bowen, 1989 :

$$R_N(V_N) = \frac{R_N}{1 + \left(\frac{|V_{Ni}|}{k}\right)^2}$$

Avec : la valeur par défaut du paramètre empirique $K = 9,1435$ m/s. Cette valeur corrigée de R_N est utilisée pour calculer la vitesse normale réfléchie $V_{N(r)}$

La vitesse de rotation réfléchie $w(r)$ est obtenue à partir de la contrainte géométrique :

$$\omega(r) = \frac{V_{T(r)}}{R}$$

La vitesse réfléchie tangentielle $V_{T(r)}$ est obtenue en fonction de la vitesse de rotation tangentielle incidente :

$$V_{T(r)} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot \omega_i^2 + m \cdot V_{T(i)}^2) \cdot FF \cdot SF}{1 + m \cdot R^2}}$$

Le facteur **FF** exprime la dépendance du coefficient de restitution tangentiel R_T par rapport aux vitesses incidentes tangentielles $V_{T(i)}$ et angulaires $\omega(i)$, en raison de leur incompatibilité à l'impact (dans le cas général)

$$V_{T(i)} \neq R \cdot \omega(i)$$

Le facteur **SF** exprime la dépendance du coefficient R_T par rapport à la vitesse normale incidente $V_{N(i)}$ et au coefficient normal R_N

$$FF = R_T + \frac{1 - R_T}{1.2 + \left(\frac{V_{T(i)} - R \cdot \omega(i)}{k_1}\right)^2}$$

$$SF = \frac{R_T}{1 + \left(\frac{V_{N(i)}}{k_2 \cdot R_N}\right)^2}$$

Avec les paramètres empiriques fixés à $k_1 = 6,096$ m/s et $k_2 = 76,2$ m/s.

3.2.2.3 Modèle trajectographique à l'échelle du versant

L'étude trajectographique des blocs à l'échelle des versants, est utilisée pour analyser les modes de mouvement des blocs, fournissant ainsi des informations importantes sur leurs distributions et les distances d'arrêt probable à travers le versant.

Ce modèle aide à déterminer les principales voies de propagation des blocs, les endroits d'accumulations potentielles et la distribution des hauteurs de rebond des blocs et des énergies cinétiques à n'importe quel endroit du versant. Ces résultats sont importants pour le dimensionnement des structures de protection et pour évaluer la stabilité des structures existantes suite aux modifications des caractéristiques des pentes.

Certains modèles de trajectoire permettent d'identifier les différents modes de mouvement des blocs sur le sol, tels que le glissement, le roulement ou une séquence d'impacts.

➤ *Modèle 2D*

Les modèles 2D supposent que chaque phase aérienne de la trajectoire se produit dans un plan vertical perpendiculaire aux courbes de niveau de la pente ; l'orientation de ce plan peut varier à chaque impact, selon les irrégularités topographiques locales.

Pour tenir compte des différents scénarios de détachement de blocs, il est important de définir préalablement plusieurs profils de propagation de blocs bidimensionnels, en suivant généralement la trajectoire présentant la pente la plus raide (Bozzolo & Pamini 1986, Pfeiffer & Bowen, 1998). Ensuite, les simulations de trajectoires de blocs sont effectuées pour chaque profil défini (F.Bourrier, 2008). Les paramètres calculés sont : la vitesse cinétique, la hauteur du rebond.

➤ *Modèle 3D*

Les modèles de trajectoire tridimensionnels réels (3D) simulent la trajectoire d'un bloc rocheux dans un espace tridimensionnel (x, y, z) à chaque intervalle du temps. A cet effet, le rebond du bloc est estimé à l'aide d'un modèle d'impact bidimensionnel. La direction du bloc après l'impact est évaluée sur la base d'une hypothèse simple, telle que prendre en considération la direction réfléchi par rapport à la plus grande pente et à la direction d'incidence. Bien que ces modèles tiennent avec précision la topographie du site, leur praticité est parfois compromise, car ils nécessitent un modèle numérique de terrain (MNT) dérivé de relevés topographiques précis ou l'utilisation de données LIDAR (F.Bourrier.2008).

En revanche, les modèles tridimensionnels sont privilégiés aux modèles 2D car ils éliminent le besoin de définir les profils préférentiels de propagation de blocs. Une retro-analyse menée par Labiouse (2004) à l'aide des simulations trajectographiques (2D vs 3D, déterministe vs probabiliste) a dévoilé que les modèles 2D ne donnent pas de résultats satisfaisants pour les sites à topographie complexe.

3.2.2.4 *Modèle trajectographique à l'échelle régionale*

Deux types de modélisation de trajectographie sont utilisés à l'échelle régionale ; soit des modèles empiriques tridimensionnels basés sur la méthode des cônes (Meissl, 2001; Jaboyedoff et Labiouse, 2002), soit des modélisations trajectographiques tridimensionnelles (Crosta et Agliardi, 2004;).

Dans le cas où les zones à étudier sont étendues, les levés topographiques et les MNT ont une précision limitée, ce cas empêche l'établissement d'une modélisation détaillée du terrain, et

les modèles de trajectoire ne fournissent qu'une estimation préliminaire de la propagation. Donc, les résultats obtenus dans cette étude doivent être utilisés avec prudence, car ils ne constituent qu'une estimation de la propagation des blocs. Néanmoins, ces prévisions peuvent orienter et définir les domaines à étudier de manière plus précise. Il est toutefois important de noter que se fier uniquement à ce type d'étude ne suffit pas pour positionner ou dimensionner une structure de protection. (F.Bourrier.2008).

3.2.2.5 Approche déterministe / Probabiliste

La modélisation des trajectoires présente l'avantage de représenter avec précision les aspects physiques des éboulements. Dans les applications pratiques, elle se distingue également par sa capacité à prévoir les hauteurs auxquelles les roches rebondissent et estimer les énergies cinétiques des roches en mouvement (Agliardi et al. 2009). De ce fait, Les trajectoires de chutes de pierres peuvent plutôt être reproduites par une approche déterministe ou probabiliste.

À l'origine, les premiers modèles numériques 2D ou 3D visaient principalement à représenter la cinématique d'un élément, sur la base d'équations classiques du mouvement. Leur objectif n'était pas de décrire l'impact lui-même, ni d'introduire des effets spécifiques liés aux irrégularités topographiques ou à la couverture végétale. Par conséquent, l'évolution des modèles de trajectoire implique l'incorporation d'approches probabilistes (Volkwein et al. 2011 ; Turner et Duffy 2012). Ces approches sont déterminées par des entrées de modèle qui fluctuent de manière aléatoire dans des plages prédéfinies en fonction d'une distribution de probabilité spécifique. Ils répondent ainsi aux incertitudes inévitables liées à la modélisation des chutes de pierres (Turner et Duffy 2012).

Il existe généralement deux types d'incertitude : ontique et épistémique (Van Asselt et Rotmans., 2002).

- L'incertitude antique, également appelée incertitude inhérente ou stochastique, provient de la variabilité inhérente des propriétés des objets complexes. Il représente une caractéristique inhérente à des phénomènes complexes et, en tant que tel, ne peut être éliminé par une meilleure compréhension ou des techniques analytiques améliorées des processus et entités impliqués.
- L'incertitude épistémique, également appelée incertitude informationnelle, résulte des connaissances limitées concernant les propriétés des objets complexes. Ces incertitudes

épistémiques peuvent être déclinées par l'acquisition de connaissances plus complètes et plus précises.

La nature stochastique inhérente aux chutes de pierres correspond à une incertitude ontique. À l'inverse, l'incertitude épistémique est intrinsèquement intégrée lorsque l'on tente de modéliser les trajectoires d'éboulements.

Donc, théoriquement parlant, c'est à la fois l'incertitude ontique (inhérente) associée aux éboulements et l'incertitude épistémique (informationnelle) associée à la modélisation numérique qui nécessitent l'adoption d'une approche probabiliste lors de la simulation des trajectoires de chutes de pierres.

➤ **Incertitude inhérente aux chutes de pierres**

Au cours des enquêtes sur le terrain, plusieurs roches individuelles sont souvent découvertes éparpillées sur les versants. On admettant une approche déterministe, la trajectoire d'un bloc rocheux dépend de la zone source du bloc détaché (y compris son emplacement, son volume ou sa taille, son mécanisme de rupture et sa vitesse initiale) ainsi que des caractéristiques de la pente (telles que la topographie, la rugosité, les matériaux et la couverture du sol).

En fait, la dynamique des éboulements est influencée par de nombreux facteurs variables. Les conditions de la zone source et les propriétés des roches peuvent varier, ce qui entraîne une incertitude inhérente aux phénomènes d'éboulement. Le détachement de différents blocs de divers endroits sur des pentes distinctes présentant des conditions initiales différentes peut entraîner une dispersion significative des trajectoires des chutes de pierres, même lorsque l'on utilise le même échantillon de roche (Lan et al. 2015).

Subséquentement, c'est l'incertitude inhérente à la zone de source du bloc et aux propriétés des pentes qui influe sur la dispersion des trajectoires d'éboulements, nécessitant ainsi l'utilisation d'une modélisation probabiliste.

➤ **Incertitudes dans la modélisation numérique**

La dynamique de la chute libre peut être prédite avec précision à l'aide de modèles analytiques, à condition que l'influence de l'air ne soit pas prise en compte. Par contre, les interactions entre les roches et les pentes sont extrêmement complexes (Bourrier et Hungr 2011) et impliquent l'impact, le rebond, le roulement et le glissement des roches sur les pentes.

Les erreurs de modélisation peuvent résulter du modèle lui-même ou de ses entrées (Lorenz 1963). Les erreurs du modèle peuvent découler de la physique ou de la solution du modèle, y compris des inexactitudes dans les équations mathématiques. Par exemple, l'impact et le rebond d'une roche, ainsi que la fonction temporelle des forces d'interaction au cours de ce processus, sont très complexes, dont il est peu probable qu'elle soit déterminée avec précision. De même, les erreurs dans les entrées du modèle ne peuvent pas être complètement évitées. Par conséquent, une approche probabiliste est essentielle, en particulier lors de la simulation des interactions entre les roches et les pentes (Labiouse et Heidenreich 2009 ; Bourrier et Hungr 2011), car les incertitudes liées à la modélisation numérique ne peuvent être éliminées.

3.2.2.6 Logiciel Roc Pro 3D

La modélisation des trajectoires des chutes de bloc n'est pas seulement compliquée par la nature stochastique inhérente aux chutes de pierres, mais également par l'incertitude épistémique associée à la modélisation numérique. Par conséquent, une approche de modélisation probabiliste est considérée comme indispensable et est couramment utilisée par de nombreux modèles de trajectoires de chutes de pierres.

Avec les progrès des outils informatiques et les expérimentations en laboratoire et sur site réel (Keaton, 2012), ont permis de mieux comprendre la sensibilité des simulations de la propagation par rapport aux caractéristiques géométriques et du site. Par conséquent, Les approches probabilistes sont largement acquises pour la modélisation des trajectoires des chutes de pierres.

Il existe plusieurs logiciels qui ont adopté l'approche probabiliste, notamment le logiciel RocPro3D, qui utilise deux types de formulation : celle de la masse concentrée et celle du corps rigide.

Lors de l'adoption de l'approche probabiliste, les trois paramètres du bloc peuvent être représentés par une variable de probabilité (uniforme), à savoir la position initiale, la masse (et la taille) et les conditions initiales de départ (vitesse ou hauteur de chute). Les cinq paramètres du sol peuvent être représentés par des variables probabilistes (uniformes ou gaussiennes), à savoir le coefficient de frottement dynamique, les coefficients de restitution normale et tangentielle, ainsi que la déviation latérale (horizontale) et d'aplatissement (verticale) de l'angle de rebond.

Le point de départ de chaque trajectoire présente une variation aléatoire, ce qui permet de répéter les simulations et obtenir des résultats différents.

Une caractéristique exceptionnelle de ce modèle est sa capacité à tenir compte de plus grandes incertitudes aux basses vitesses qu'aux hautes vitesses. La variabilité maximale est attribuée à la vitesse nulle, tandis que la variabilité résiduelle est attribuée à la vitesse seuil.

Enfin, on peut affirmer que les modèles initialement simplistes ont dû évoluer en incorporant le concept de variabilité ou de calcul stochastique (L.Li & H.Lan, 2015). Ces modèles de trajectoire sont passés d'une base de calcul déterministe à une analyse probabiliste, où certains paramètres sont définis de manière aléatoire pour prendre en considération la variabilité du phénomène.

4. Etablissement d'une étude trajectographique

Les chutes de blocs présentent des risques à la fois pour les biens et les personnes, car ce sont des phénomènes spontanés, rapides et dangereux. Afin d'anticiper les conséquences potentielles que représentent les chutes de blocs, il est impératif d'estimer les zones d'arrêt ainsi que d'évaluer la probabilité d'atteinte à n'importe quel point de leur trajectoire. De plus, il est important de calculer les paramètres cinématiques qui régissent leur propagation telles que l'énergie, la vitesse et la hauteur du rebond.

La réalisation d'une étude de trajectoire serait inconcevable sans utiliser un modèle de simulation de propagation. Donc, il est nécessaire de mettre en œuvre une approche procédurale méticuleuse et vérifiable, pour établir une étude trajectographique rigoureuse.

Pour réaliser une étude trajectographique, il faut suivre les six étapes suivantes :

1. Préparation de l'ensemble de données initial
2. La définition des hypothèses initiales de simulation
3. La simulation trajectographique
4. Vérification de la crédibilité des résultats de simulation
5. Fixer et identifier les résultats de l'étude
6. Conversion de ces résultats en une carte des dangers

La réalisation de ces six étapes est en fonction du niveau de détail requis pour l'étude de trajectoire. Conformément aux directives de l'OFEV (2011), trois degrés de détail sont définis. Le premier degré (D1) fournit une vue générale et complète du danger et est applicable à l'échelle régionale (1/25 000 à 1/10 000), ce qui donne lieu à des cartes de susceptibilité. Le deuxième degré (D2), mis en œuvre au niveau communal (1/10 000 à 1/5 000), offre une perspective plus ciblée et est souvent utilisé pour la cartographie des aléas. Le troisième degré (D3) est lié exclusivement à une échelle très limitée (1/5 000 à 1/2 000) et il est conçu pour répondre à des problèmes très spécifiques.

4.1 Préparation des données initiales

Elle implique l'identification, le regroupement et l'évaluation des événements historiques, des études antérieures et des documents historiques locaux afin d'obtenir une première compréhension de l'intensité du phénomène et de la fréquence des chutes.

Pour caractériser et cartographier à l'avance les zones de détachements, de passage et les zones d'arrêt potentielles, également, pour examiner les structures de protection existantes, une étude de terrain est indispensable.

La stabilité et les propriétés structurales de la masse rocheuse doivent être analysées minutieusement dans la zone de départ. En outre, les formations lithologiques qui couvrent le versant doivent être bien caractérisées et cartographiées dans les zones de propagation et d'arrêt.

Généralement, les caractéristiques de la formation géologique qui nappe le relief sont décrites par l'élasticité et la rugosité, ces paramètres influencent partiellement la cinématique des compartiments, spécifiquement la perte d'énergie et le transfert entre les composants de mouvement translation/rotation lors d'un rebond.

Si des forêts existent dans la zone d'étude, il est impératif qu'elles soient inventoriées, décrites et cartographiées. Cela implique de documenter sur la densité des arbres, la distribution des diamètres des arbres et la répartition spatiale des différents peuplements forestiers. Grâce à l'utilisation de données lidar et la comparaison entre le modèle numérique de surface et le modèle numérique de terrain, on peut cartographier des peuplements forestiers.

Toutes les preuves silencieuses liées à une activité de l'aléa doivent être identifiées et cartographiées, notamment :

- Les dimensions et la forme des blocs créés à partir des zones sources, ainsi que l'emplacement de leur point d'arrêt ;
- Les traces d'évolution dans les zones de départ ;
- La répartition spatiale des points d'impact au sol et leur profondeur ;
- La répartition spatiale et la hauteur des cicatrices sur les arbres causées par des chutes de blocs.

Les riverains et les experts locaux en la matière constituent de précieuses sources d'information. Afin d'utiliser efficacement le modèle de trajectoire, les données requises doivent être créées et paramétrées. Cela comprend :

- Génération d'un profil en travers du versant
- Réalisation d'un examen détaillé du modèle numérique de terrain MNT

Les résultats du processus de modélisation sont influencés de manière significative par la précision des levés topographiques ou les profils de pente. La résolution idéale d'un MNT se situe entre 2 et 5 mètres. La qualité des résultats de modélisation sera diminuée si les résolutions sont supérieures ou inférieures à cette plage.

4.2 Définition des scénarios de départ

L'objectif est d'identifier toutes les zones de départ, en incluant la détermination du volume des projectiles potentiels, la connaissance de sa fréquence à laquelle ces projectiles sont produits et le mesurage de la taille des blocs déposés à la base des zones de déclenchement.

Lors d'une étude de trajectoire pour une grande zone municipale, il est difficile de constituer des modèles géostructuraux/mécaniques représentatifs de plusieurs kilomètres de falaise. Dans de tels cas, il est plus pratique de combiner l'examen de la distribution des pentes avec un levé structural.

Pour prédire les probabilités que des événements futurs se produisent avec un volume donné, différents auteurs proposent l'utilisation d'une loi de puissance (Dussauge-Peisser et al.; 2002). Si nécessaire, l'évaluation de la fréquence peut être effectuée au moyen d'une analyse dendrogéomorphologique. Cette méthode repose sur l'examen des anneaux de croissance des arbres pour déterminer la date des blessures causées par des projectiles sur leurs troncs. Cependant, cette analyse ne fournit aucune information concernant le volume des projectiles de roche. La fréquence du phénomène de chute de blocs est généralement estimée en évaluant le nombre de blocs instables et leur évolution pour les falaises inaccessibles. Les incertitudes associées à ces estimations doivent être quantifiées et présentées avec précision.

4.3 Simulation des trajectoires

Dans les modèles de simulation de trajectoire, divers paramètres sont calculés pour chaque projectile à chaque point de son trajectoire simulée. Ces paramètres incluent la vitesse du mouvement, la hauteur de rebond, l'énergie cinétique et les zones d'arrêt ou non des blocs rocheux.

En outre, la simulation en 3D évalue également la direction de propagation latérale en fonction de la topographie. Cela comprend l'identification des points d'arrêt, la détermination des fréquences de passage à différents points des trajectoires, l'analyse de la répartition spatiale de l'énergie cinétique et de la hauteur de rebond le long de la trajectoire.

Un facteur important dans la simulation de trajectoire est le nombre de simulations nécessaires pour obtenir des résultats statistiquement fiables. Pour les modèles déterministes, une seule simulation est suffisante par zone de déclenchement. Cependant, pour les modèles probabilistes, des tests de convergence sont indispensables pour déterminer le nombre minimum de simulations requises. Si la différence entre les énergies moyennes, les hauteurs de rebonds moyennes et les distances d'arrêt moyennes entre deux simulations consécutives (n et $n+1$) à un point géographique donné est inférieure à 5 %, elle est considérée comme acceptable.

4.4 Contrôle de la plausibilité

Etape 1 : Le premier contrôle implique une évaluation basée sur l'intuition et l'expérience. Si les résultats concordent à la réalité observée sur le terrain, on peut juger qu'ils sont crédibles.

Etape 2 : Si les résultats ne concordent pas aux observations du terrain, il devient nécessaire d'identifier et d'examiner les sources d'erreurs potentielles dans les données d'entrée. Il s'agit d'évaluer si les éléments présents dans la réalité étaient correctement représentés dans le modèle. Si aucune erreur de cette nature n'est identifiée, il est peut-être nécessaire de recréer la simulation en utilisant une forme différente de projectiles de roche.

Etape 3 : La comparaison des résultats avec ceux obtenus en utilisant d'autres méthodes, telles que l'approche des lignes énergétiques (Jaboydoff et Labiouse, 2011), peut fournir des informations précieuses sur les zones d'arrêt extrêmes.

Si, après avoir terminé les étapes précédentes (1, 2 et 3), les différences entre les observations sur le terrain et les résultats de simulation restent inexplicables, il est nécessaire de refaire la simulation en modifiant légèrement les paramètres les plus sensibles caractérisant la surface de la pente. Il est conseillé de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois, car la caractérisation de ces paramètres sur le terrain peut s'avérer difficile.

4.5 Fixer et présenter les résultats

La fixation des résultats consiste à éliminer les valeurs aberrantes. Cela implique de supprimer les blocs présentant des déviations latérales extrêmes. De plus, déterminer une zone de propagation valide est essentiel, en tenant compte des hypothèses et de la pertinence des résultats. Les valeurs énergétiques moyennes et maximales, ainsi que les hauteurs de rebond, doivent être déterminées.

La dernière étape du processus consiste à présenter les résultats de manière claire et compréhensible. Cela inclut la transformation des résultats utilisables en une carte lisible. Les résultats simulés sont ensuite classés dans des catégories prédéfinies. Sur la base des données classifiées, une ou plusieurs cartes d'intensité ou cartes d'aléa peuvent être créées. Il peut également être possible d'associer une probabilité d'occurrence temporelle à chacune de ces cartes.

En conclusion, selon les outils choisis, le modèle de trajectographie peut être utilisé pour cartographier le risque de propagation d'un projectile. Cette cartographie peut être soit limitée au seuil maximal de la zone de propagation du projectile, soit exprimée en zones correspondant à différentes fourchettes de paramètres calculés. Alors que la première solution qui peut être mise en œuvre par un expert à l'aide d'outils de simulation de trajectoire, l'utilisation de systèmes d'information géographique peut fournir des outils supplémentaires aux experts pour évaluer le mieux l'impact des aléas. Un modèle de simulation est donc un atout précieux. De nos jours, il est impensable de réaliser une étude de trajectoire sans utiliser de modèle.

5. Conclusion

La survenue du phénomène de chute de bloc engendre beaucoup de dommage socio-économique néfaste, ce qui rend la prédiction des trajectoires de ses blocs susceptibles à l'éboulement souvent obligatoire et nécessaire afin d'évaluer l'aléa.

Une étude trajectographique rugueuse nécessite une identification minutieuse de la zone source des blocs, et une compréhension des caractéristiques morphologiques et rhéologiques du versant, car certains paramètres, comme la pente du versant, orientent le type de mouvement du projectile. Par contre, des facteurs tels que la forme, la taille et la position initiale du bloc influencent sa cinématique.

Jusqu'au jour d'aujourd'hui, l'étude de la trajectographie a connu des progrès considérables.

Les méthodes empiriques sont les premières méthodes utilisées dans les études trajectographiques. Cependant, l'arrivée de puissants outils informatiques, notamment des ordinateurs, a facilité le développement de modèles numériques. Ces méthodes numériques peuvent être classées en trois grandes familles :

- Approches par trajectographie : ces modèles simulent la trajectoire de blocs rocheux individuels. En raison de leur facilité et de leur nombre limité de paramètres, ils sont largement utilisés en ingénierie. Ils sont toutefois moins adaptés aux études de la propagation des moyennes et grandes masses rocheuses (Y.Cuervo, 2015).

- Approches granulaires ou discrètes : ces méthodes analysent le comportement des assemblages de particules, en tenant compte de la dissipation d'énergie par frottement lors des interactions des particules (Leine et al. 2013).
- Approches continues : Ces modèles simulent tous les blocs de roche comme un fluide équivalent. Ils sont particulièrement utiles pour analyser des mouvements d'intermédiaire ou grandes volumes.

En outre, des approches numériques mixtes sont également développées, pour simuler des mouvements combinés et plus complexes (Bourrier et al, 2013).

De plus, des approches expérimentales sont menées en laboratoire ou sur site pour valider les modèles numériques et calibrer les divers paramètres de terrain et de bloc. Cette approche est cruciale pour améliorer la précision des simulations numériques.

Actuellement, les défis concernent principalement les enquêtes phénoménologiques plutôt que les contraintes numériques. Cela explique la tendance croissante à étudier les mécanismes d'interaction et de dissipation sur des sites réels ou dans des conditions bien contrôlées (Y.Cuervo, 2015).



**CHAPITRE IV «PRÉSENTATION
DE LA ZONE D'ÉTUDE »**



1. Introduction

À travers ce chapitre, il est nécessaire de décrire les multiples aspects, pour présenter la zone d'étude. Ces aspects sont essentiels pour identifier les diverses caractéristiques de la région considérée, qui, à leur tour, ont un impact direct et indirect sur le phénomène de chute des blocs.

Au début de ce chapitre, nous allons d'abord commencer par situer la zone dans un contexte géographique, afin d'obtenir un aperçu complet de sa localisation. Par la suite, nous allons procéder à la projection de la zone dans un cadre géologique régional, en examinant ses caractéristiques structurales et stratigraphiques. Cela nous permettra ensuite d'exposer la géologie locale des secteurs pertinents au phénomène étudié. En outre, nous aborderons l'aspect climatique et nous finissons par l'exposition de la sismicité de la région.

2. Situation géographique

La zone d'étude est située dans la wilaya côtière de Béjaïa, au nord de l'Algérie. La région englobe les versants rocheux qui s'étalent en amont et longeant la route nationale N°9 qui relie les wilayas de Béjaïa et de Sétif. Plus précisément, il s'agit du tronçon routier qui va du PK24 à l'entrée de Talla Khaled dans la commune d'Aokas jusqu'au PK 52 à Bordj Mira (qui appartient à la commune de Derguina) tout en passant par la commune de Souk El Thnine (Fig. 4.1).

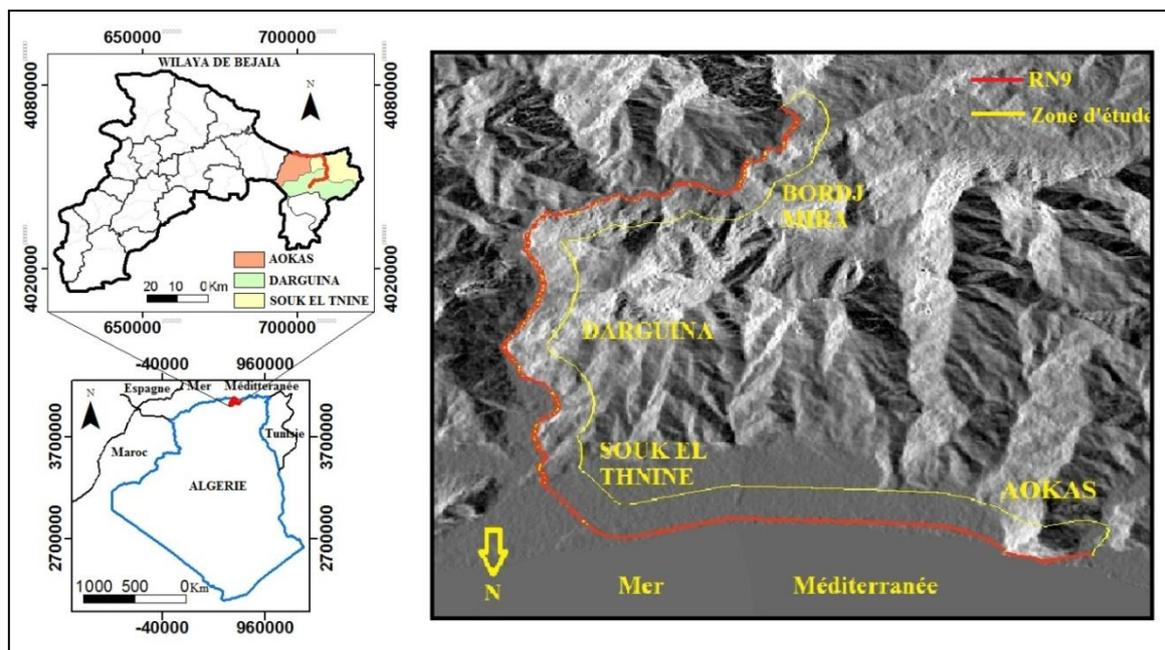


Figure 4.1 : Situation géographique de la zone d'étude

Dans la zone d'étude désignée, il a été observé qu'il existe trois zones distinctes. Ces endroits sont représentés par des versants rocheux et qui sont particulièrement susceptibles au phénomène de chute de bloc, soit au niveau des talus immédiats ou encore à travers les versants situés en amont de la route RN9. Ces sites sont : Le versant nord du mont Imma Tadrart (falaise du Cap Aokas) (fig. 4.2), Le talus en face de l'hôtel Safsaf à Souk El Tenine (fig. 4.3) et les talus rocheux du mont Ighil Louelane de Darguina (fig. 4.4).



Figure 4.2 : Versant nord du mont Imma Tadrart PK24 au PK 25 (Cap Aokas)



Figure 4.3 : Talus en face de l'hôtel SAFSAF PK37+300 (Souk El Ténine)



Figure 4.4 : Versant Sud et Est du mont Ighil Louelene PK43 à PK45 (Darguina)

3. Géologie régionale

L'Algérie est divisée en deux unités structurales ; le domaine cratonique au Sud et le domaine orogénique au nord (Fig. 4.5) ; ils sont séparés par l'accident sud-atlasique. Le domaine orogénique est subdivisé à son tour en deux : le sous domaine atlasique et le sous domaine allochtone, ce dernier est présenté par la chaîne des Maghrébides (Durand-Delgua et al 1980). La chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand-Delga, 1969). Ce domaine a connu des phases de déformation méso-cénozoïque aboutissant à la mise en place des nappes de charriages dans lequel on distingue trois grandes zones :

- La zone **interne** (socle kabyle) : il est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque ;
- La zone des **flyschs** : il s'agit essentiellement des dépôts de mer profonde mis en place par des courants turbidites ; ils se présentent en trois positions (interne, relativement externe et très externe) ;
- La zone **externe** : constituée par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires qui ont été charriées sur une centaine de kilomètres vers le Sud.

Le domaine externe (telliens) est formé par un ensemble de nappes allochtones, dont on distingue du Nord au Sud :

- Les nappes ultra-telliennes
- Les nappes telliennes
- Les nappes péni-telliennes
- Les séries de l'avant-pays allochtone

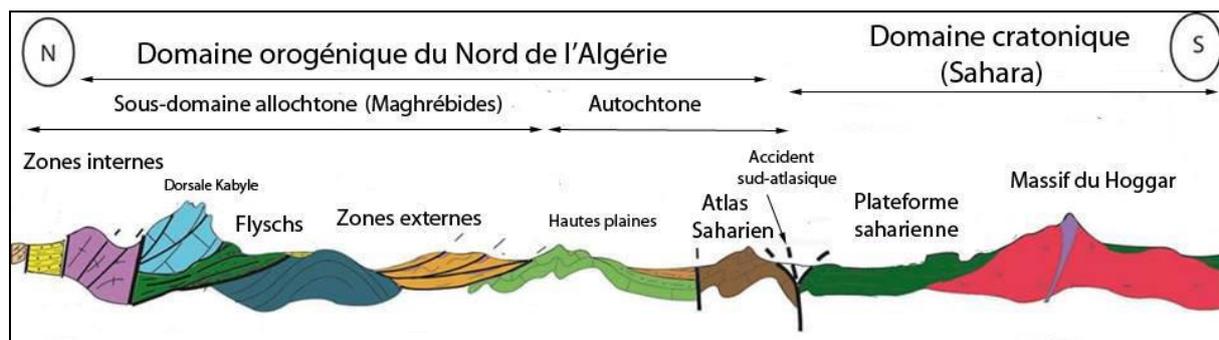


Figure 4.5 : Coupe Nord-Sud montrant les principales unités structurales de l'Algérie (Dessin de H. Haddoum, modifié)

Les reliefs situés entre Béjaïa, Jijel et Sétif appartiennent à la chaîne du Babors, ce domaine s'étend du sillon de la vallée de la Soummam à l'Est jusqu'au massif ancien de petite kabylie à l'Ouest (Dulpan, 1952). C'est un segment d'orogène, dont l'allongement général est de direction 60° Nord-est. Le jurassique carbonaté constitue des axes orographiques élevés (1000 à 2000 m), le crétacé occupe les dépressions entre les massifs et se particularise par ses facies pélitique et conglomératique au crétacé inférieur et marno-calcaire au crétacé supérieur (O Kirech, 1993).

D'après M. Leikine 1971 et D. Obert 1981, le domaine des Babors est constitué par une série de nappes répartie du Nord au Sud comme suit :

- La nappe de Brek-Gouraya Barbacha
- La nappe de Draa El Arba- Erraguène
- L'ensemble méridional de Babor
- La nappe de Beni Ourtilane

3.1 Aspect Structural

D'après la figure 4.6, visiblement la zone d'étude traverse l'unité de Barbacha au Nord et l'unité de Draa El Arba au Sud. Le complexe triasique est localisé entre les deux.

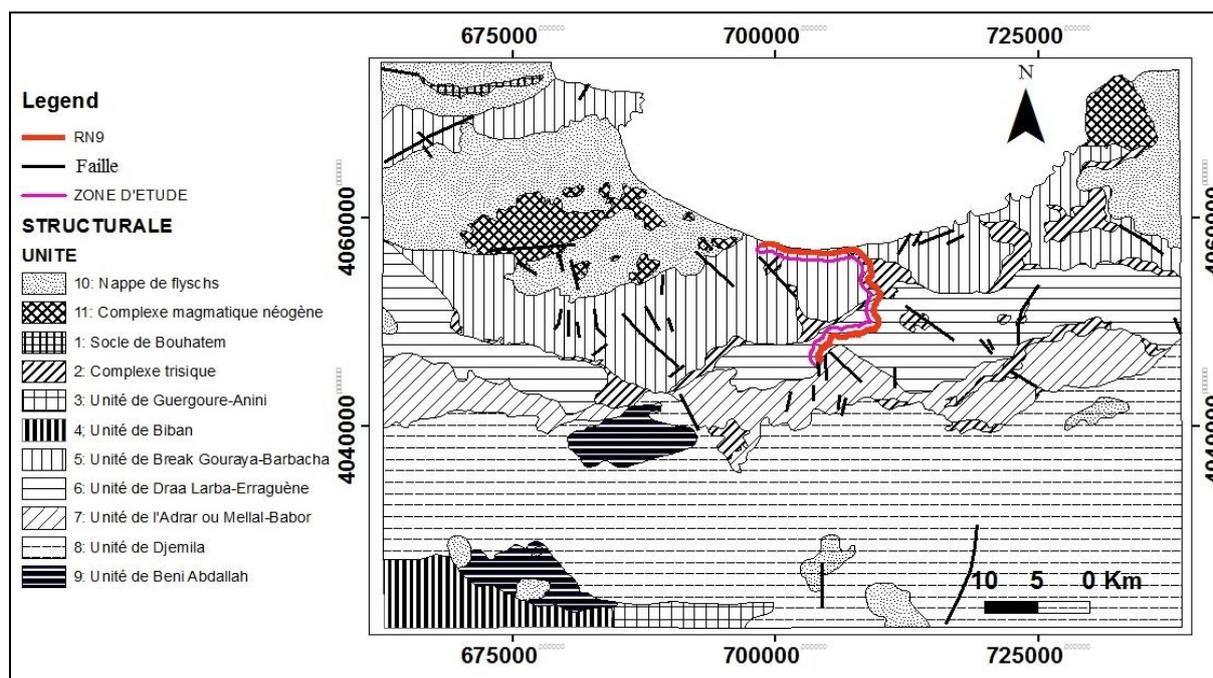


Figure 4.6 : Les unités structurales des Babors et du Tell nord-Sétifien (O. Kireche 1993)

D'après la notice explicative de la carte géologique de Ziama n°48 élaborée par M.Stephnov.E 1974 et le rapport final des travaux de recherche réalisé dans la zone de jonction de la petite et grande Kabylie par l'équipe dirigée par M. Gromov.M 1983, et la thèse de M. O Kireche 1993, nous décrivons les unités sus-citées :

- **La nappe de Barbacha :**

L'unité de Barbacha est située entre l'unité de Gouraya au nord et l'unité de Draa El Arbaa au sud, elle prolonge vers l'ouest l'unité de Break avec laquelle elle est en continuité.

La structure interne est constituée de plis relativement étendus (12 à 16 km) et un système de fractures de deuxième ordre. Le jurassique qui constitue les reliefs septentrionaux et méridionaux est relativement complet, épais 1000 m environ à l'est et se réduit à 600 m à l'ouest.

Le crétacé offre des épaisseurs atteignant 3000 m, dont près de 1500 m au crétacé inférieur ; les faciès sont sombres, essentiellement pélitique calcaire et conglomératique au crétacé inférieur et clair, marneux ou marno-calcaire à conglomérat et microbréchiq ue au crétacé supérieur.

Le crétacé inférieur est représenté par le Néocomien marno-conglomératique à la base, le Bérremien est pélitique, l'Aptien est microbréchiq ue, l'albien inférieur est pélitique.

Le crétacé supérieur débute avec l'Albien supérieur qui est composé de marno-calcaire dont le trias est ressédimenté à sa base, le Cénomaniens est conglomératique, discordant. Le Turonien, le Coniacien et le Santonien sont souvent réduits et érodés. Le Campanien est constitué de marno-calcaire à boules jaunes.

- **La nappe de Draa El Arba** : elle se trouve au sud des nappes de Barbacha et de Brek dont elle est séparée par la faille sublatitudinale d'Atten Chéria (D.Obert, 1981), Elle est chevauchée par l'unité de Barbacha au Nord et par la nappe de Guerrouch (Flysch Mauritanien) au Nord-Est.

Dans l'ensemble sa structure se représente en deux monoclinaux subparallèles. Le jurassique n'est représenté que par la longue échine du Dj Takoucht, lame liasique monoclinale à pendage nord.

Le crétacé offre une série complète, le crétacé inférieur (1500 m) est marno-calcaire et conglomératique au Néocomien, devient pélicite-gréseux au Bérremo-Apto-Albien inférieur. L'Albien supérieur-Cénomaniens y est marno-calcaire, le Turonien-Coniacien est carbonaté, Le Santonien est marneux et le Campanien est marneux sombre à boule jaune.

Le Maestrichtien débute par des calcaires et se poursuit par des argiles noires. L'ensemble du crétacé supérieur atteint 2000 m d'épaisseur.

- **Les terrains triasiques** couvrent de grandes espaces ; ils sont développés autour des points de jonction des fractures. La majorité des fractures disloquent les structures plissées reliant les formations gypsifères triasiques. Le contact frontal entre la nappe de Barbacha et Draa El Erba est jalonné de complexes à matériel triasique.

3.2 La tectonique

Dans les Babors, les mégastructures observées en plis et écailles sont le résultat d'une structure polyphasée dont l'essentiel de l'architecture a été acquise lors de deux phases tectoniques plicatives distinctes, la première phase longitudinale a généré des plis dissymétriques synschisteux à vergence NE et SW, tandis que la seconde phase transversale, qui est en relation avec des accidents coulissants transverses NNE-SSW était responsable des structures plicatives de direction atlasique, déversées au SE ou NW. Il est important de noter que cette phase était responsable des virgations des structures de phase I.

Cette architecture initiale post-crétacé a été considérablement perturbée de façons spectaculaires par un écaillage en grandes unités à vergence Sud au cours d'une phase

ultérieure de miocène, puis par des mouvements de coulissement et des rétrocharriages à vergence Nord localisées.

Les accidents cassants jouent un rôle important dans la structure tectonique de la région ; ces accidents se subdivisent en failles majeures délimitant les grands compartiments géologiques et en cassures de second ordre.

La faille d'atten-Chéria est l'accident majeur de la zone des Babors, séparant les nappes de Barbacha et de Brek de la nappe de Draa El Arba.

Parmi les fractures secondaires, les cassures orientées Nord-Est, dont on peut citer la faille d'Agrioun séparant la nappe de Barbacha et celle de Brek.

3.3 La stratigraphie

D'après la carte de Ziama N°48 et sa notice explicative, la zone d'études traverse les formations géologiques suivantes (Fig. 4.7) :

➤ Quaternaire

Les alluvions récentes et anciennes se localisent essentiellement à Oued Agrioun et Achrit à Souk El Tenine. Les plages et les dunes s'étendent du Cap Aokas jusqu'à Souk El Tenine.

Les Tufs et les travertins provenant des sources de Chaabat El akra ; de Beni Ismaél, de Darguina et des deux Fontaines.

Les brèches calcaires et les éboulis de pentes sont formés en majeure partie de débris liasiques et jurassiques fortement cimentés. Au cap Aokas, ces dépôts inclinés supportent les plages marines, ces dépôts détritiques sont très anciens, en partie Pliocènes et peut-être même antérieurs au Pliocène.

➤ Le Miocène

Il est représenté par l'étage Cartenien « m₁ », il est constitué de poudingues, grès et marnes grises rouges parfois violacées.

➤ Le Crétacé

Le crétacé supérieur est composé par le Sénonien « C₈₋₇ » qui est marneux schisteux noirs à filon et de calcite surmontées de marnes parfois conchoïdes à lentille de calcaires jaunes. Tandis que le Cénomaniens « C₅₋₄ » se débute par des marnes noires et marno-calcaire, surmontés de marno-calcaire et calcaire marneux.

Le crétacé inférieur est constitué de plus récent au plus ancien par :

- Albien « C₃₋₁ » : Schiste siliceux et quartzites noirs ou bruns
- Aptien-Barrémien « C_{I-1 II} » : Calcaire avec schiste tendre clair
- Néocomien-Aptien « C_{I-V} » : La série marno-calcaire et siliceuse
- Valangien-Hauterivien « C_{IV-V} » : Schiste siliceux et marno-calcaires, le faciès siliceux est nettement dominant, les schistes sont durs se débitant en grandes dalles, en plaques et plaquettes, il comprend des dépôts détritiques spéciaux « C_{vp} » à éléments triasiques, liasiques et jurassiques, ces conglomérats sont parfois puissants (100m) et sont inter stratifiés dans les schistes et marno-calcaires.

➤ **Le jurassique**

- Le Jurassique supérieur « J₃₋₄ » est représenté par une assise marno-calcaire et dolomitique claire. Le Jurassique moyen « J₃₋₁ » et « J_{I-IV} » sont représentés respectivement par une assise marno-gréseuse de couleur chaude (rouge, violet et vert) et une assise calcaro-siliceux, calcaire marneux bleutés et calcaire lités à lits siliceux.
- Le jurassique inférieur est constitué de haut en bas par le Lias supérieur « l₄ » qui est représenté par le calcaire marneux à petits bancs réguliers intercalés de marnes schisteuses et marno-calcaire. Ensuite, le Lias moyen « l₃₋₁ » qui est constitué de calcaire et dolomie, le calcaire est massifs et en gros banc, des nodules siliceux se montrent dans les parties supérieures. A la base, le Lias inférieur « l₁ » est composé de dolomie et calcaire dolomitique et à quelques endroits de calcaires en plaquettes.

➤ **Complexe Triasique T**

Se présentent sous son faciès classique nord-africain, avec association de masses bariolées de dolomies, cargneules calcaire dolomitique et calcaire jaunes en plaquettes, le gypse et le sel gemme.

➤ **Permien r**

Psammites (grés micacé) et grés rouge violacé verdâtre ou brune.

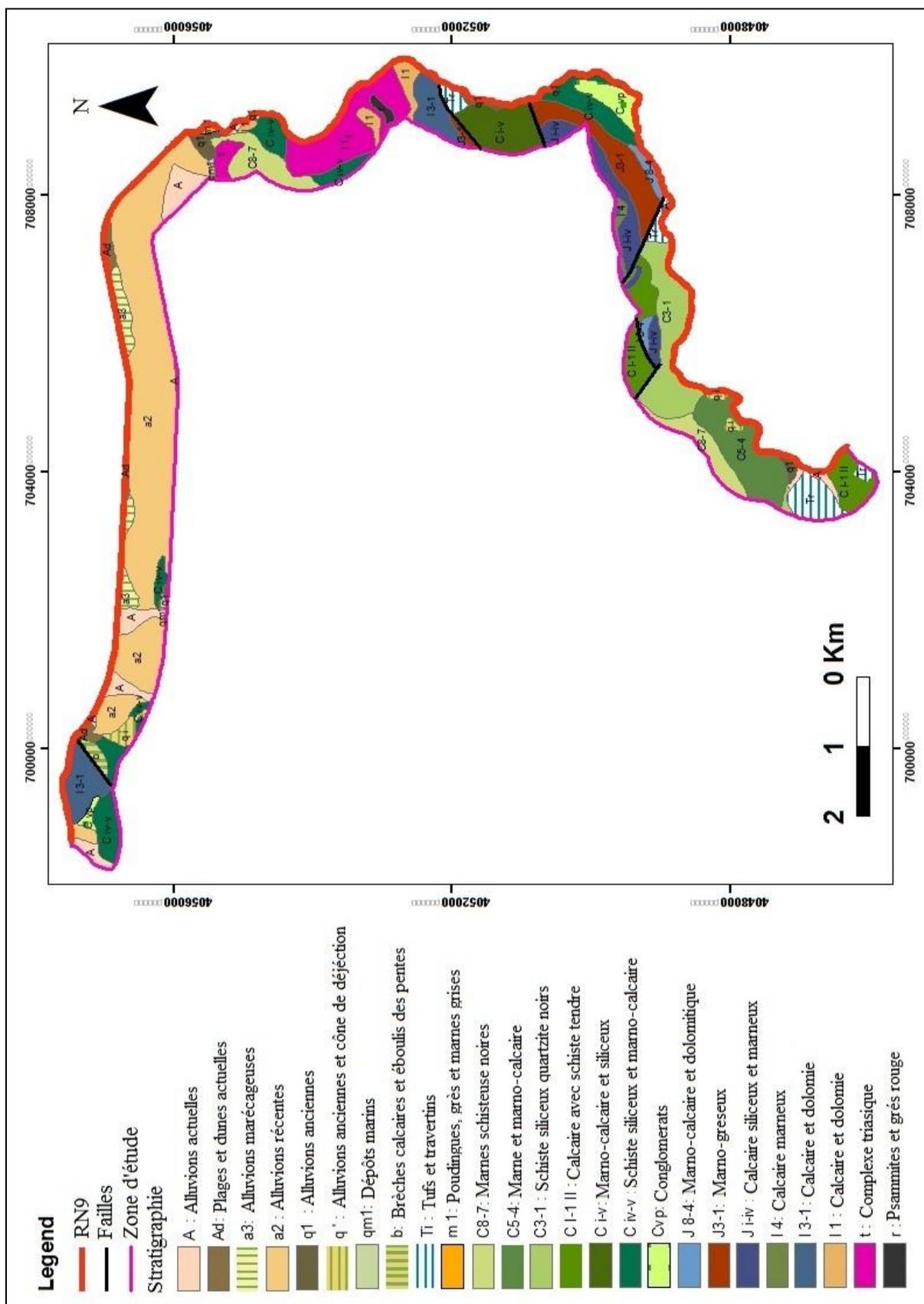


Figure 4.7 : Carte géologie de la zone d'étude extraite à partir de la carte de Ziamia

4. Géologie locale

Suite aux nombreuses visites sur le terrain, chacun des sites mentionnés ci-dessus a fait l'objet d'un examen minutieux. Les objectifs de ces missions étaient multiples, en commençant par la démarcation des zones sur la base de la lithologie. Ensuite, faire un relevé structural des discontinuités pour chaque secteur et enfin, observer et analyser les traces des anciennes zones sources précédentes des blocs détachés, dans le but d'identifier les familles de discontinuités qui ont contribué à la génération des blocs susceptibles à la rupture.

Dans le présent chapitre, nous allons aborder l'aspect géologique local, qui sera accompagné par la distinction et la présentation de diverses composantes structurelles de chaque site désigné.

4.1 Falaise du Cap Aokas

Il s'agit d'une falaise de 300m de hauteur environ, les observations et les mesures ont été effectuées au niveau des endroits accessibles, le long de l'ancienne et la nouvelle route nationale RN9. Sur la base des données recueillies lors de nombreuses missions sur le terrain, il a été possible d'identifier la lithologie et l'aspect structural de la falaise.

4.1.1 Lithologie

La falaise du cap Aokas est principalement composée par des calcaires dolomitiques de couleur gris sombre datant du Lias inférieur ; ces calcaires sont durs et possèdent une texture fine. Il convient de noter que le plan de la stratification est très rarement constaté dans la partie orientale et malgré cela, il a été enregistré la présence à différents endroits des structures sédimentaires laminaires (Fig. 4.8), dont le pendage varie entre 62° et 75° , plongeant vers le Nord-ouest ($N320^\circ$ à $N340^\circ$).



Figure 4.8 : Structure laminaire $N40^\circ < 62^\circ$ N-NW

Toutefois, les parties centrale et occidentale sont caractérisées par des bancs métriques (Fig. 4.9) de calcaire dolomitique dur, d'une épaisseur d'environ 2 à 2,5 m ; de plus, le pendage des couches sédimentaires dans cette zone varie entre 40° à 50° , avec une direction de pendage oscillant entre $N310^\circ$ et $N340^\circ$ et orienté vers le nord et le nord-ouest.

Les mesures effectuées le long de la falaise ont révélé qu'il s'agit d'un monoclinale caractérisé par des couches de calcaire dolomitique orientées vers une direction moyenne de N51°, et inclinées vers le N-NW avec un pendage des couches qui varie entre 50 et 65° à l'est et entre 40° et 55° à l'ouest du versant.

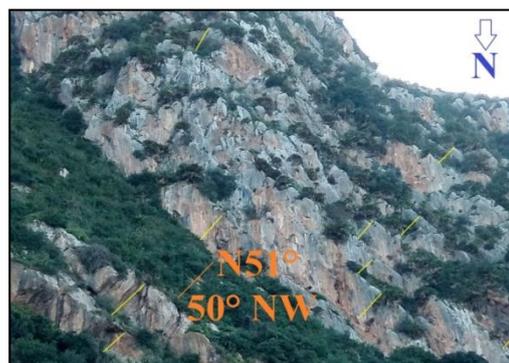


Figure 4.9: Calcaire dolomitique en banc métrique

- Ces calcaires dolomitiques massifs sont souvent couverts par une couche d'éboulis ancienne plus au moins consolidée et compacte (Fig. 4.10). Ces éboulis sont essentiellement constitués de blocs de calcaire dolomitique de taille décimétrique à métriques, entourés d'une matrice meuble et fine, principalement composée de limon argileux brunâtre. L'origine de ces éboulis peut être attribuée à l'altération et au détachement de blocs de calcaire dolomitique des parties les plus élevées de la falaise.



Figure 4.10 : Anciens éboulis localisés entre les failles dans les zones de broyages

- La présence des terrasses marines subhorizontales, d'une épaisseur varie entre 20 à 40 cm, elles sont constituées de galets calcaires aplatis et arrondis généralement bien cimentés, elles se trouvent à différents niveaux en aval de la falaise (Fig. 4.11), confirmant ainsi l'existence d'une érosion marine et indiquant les différentes étapes de la régression marine.



Figure 4.11 : Terrasse alluvionnaire

4.1.2 Levé structural

Le massif est affecté par plusieurs types de discontinuité : failles et diaclases de direction et importance variable.

❖ Les failles

- Il est signalé la présence d'une faille majeure verticale et subméridienne (N10°Est), elle est décrochante sénestre (Bougdal 2009) et elle est observée sur le talus amont de l'ancienne route.

Le prolongement de cette faille est vers le nord, il coïncide avec la falaise verticale qui délimite le tunnel à son entrée Est (Fig. 4.12). Cependant, il convient de noter que cette faille est située hors de la zone de notre étude.



Figure 4.12 : Faille majeure décrochante sénestre (N10°)

- Plusieurs failles sub-verticales, s'étendant sur plus d'une centaine de mètres, ont été identifiées, dont certaines de ces failles traversent la falaise de sa base à son sommet. La direction de ces failles varie de N120° à N145°, ce qui indique la présence des zones de broyage, souvent masquées par des éboulis de pentes anciennes et compactes.

De l'est vers l'ouest, nous avons constaté la présence de six failles (Fig. 4.13), dont la première témoigne l'endroit de déclenchement d'un petit éboulement à l'intérieur de l'ancien tunnel 13-10-2019. La deuxième faille correspond à l'endroit où s'est produit l'éboulement, survenu en 2005 à proximité de la sortie du tunnel, tandis que la troisième faille coïncide avec l'emplacement de l'éboulement de 2017, la quatrième faille correspond à la zones source des blocs éboulis en 2015.



Figure 4.13 : Six failles « N125° » de l'Est vers l'Ouest de la falaise

Les zones de broyage présentent souvent la configuration d'un vaste talweg rempli d'éboulis et recouvert de végétation. D'après l'examen de la zone de broyage n°1, nous avons observé que les calcaires dolomitiques se débitent en feuilles (Fig. 4.14), ainsi que la présence des calcaires bréchiques est constatée (Fig. 4.15). La deuxième zone de broyage est actuellement inaccessible en raison de la rupture de l'ancienne route provoquée par l'éboulement survenu en 2005. Sur le miroir de la faille n° 3 (Fig. 4.16), des surfaces présentant une karstification ont été observées, ce qui a créé des petites cavités avec le plan de stratification.



Figure 4.14 : Altération des calcaires



Figure 4.15 : Calcaire bréchique

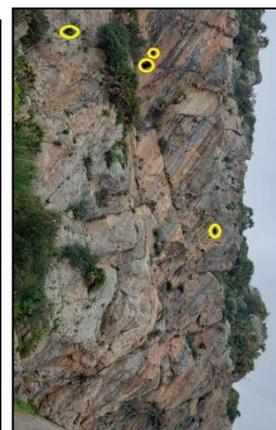


Figure 4.16 : Surface de karstification

- Il convient de signaler qu'en aval de la falaise et sous chacune de ces failles, il a été constaté la présence des cavités karstiques (Fig. 4.17), de volume plurimétrique. Ce qui est expliqué par la forte circulation des eaux pluviales à travers ce réseau de faille sous l'effet de la gravité, qui favorise et engendre par conséquent le phénomène de karstification et la création des cavités en aval.

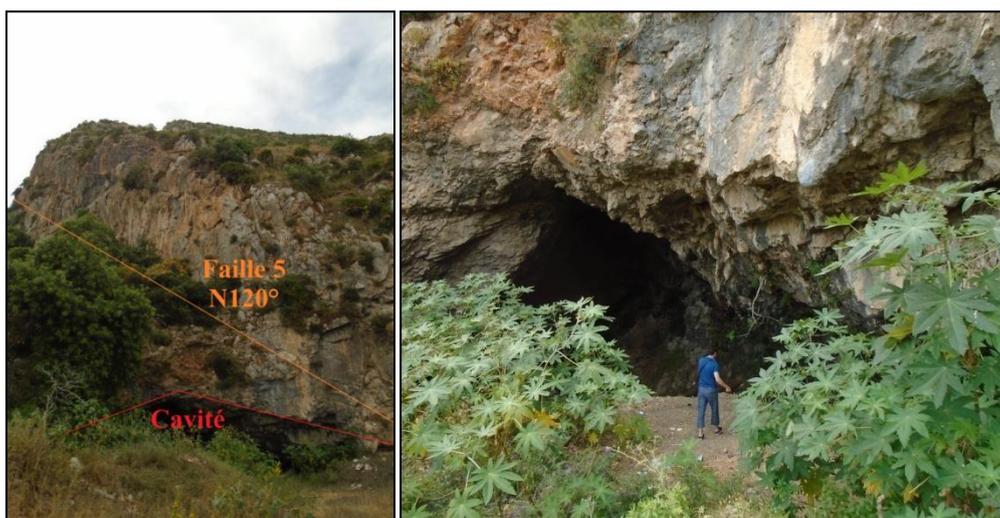


Figure 4.17 : Cavité de volume plurimétrique au-dessous de la faille 5

❖ Les familles de discontinuité

Sur le terrain, Cinq familles de discontinuités sont constatées, elles sont caractérisées par une persistance d'ordre métrique, elles découpent le massif suivant un espacement moyen variable, oscillant entre 1 et 3m ; ces fractures sont **F2** « N89° <77°N », **F3** « N60° <74°NO », **F4** « N133° <69° NE », **F5** « N154° <64°SW » et **F6** « N187° <87°E ». Ces fractures participent au morçèlement et à la fragilisation du massif.

- Les fractures **F2** « **N89° <77°N** » : Sont les moins visibles au droit du versant Nord, car le plan de la fracture est parallèle à l'orientation du versant, cependant elles sont mieux perceptibles au niveau du versant Est du mont (Fig.4.18), elles sont inclinées de 77° environ vers le nord.
- Les fractures **F3** « **N60° <74° NW** » et **F4** « **N133° <69°NE** » : Sont bien visibles sur le terrain, elles sont d'assez grande extension dans le massif, elles présentent une inclinaison de l'ordre de 69° à 74° vers le nord-est et le nord-ouest (Fig. 4.19), elles sont souvent ouvertes et peu rugueuses.



Figure 4.18 : F2 visible sur le versant Est

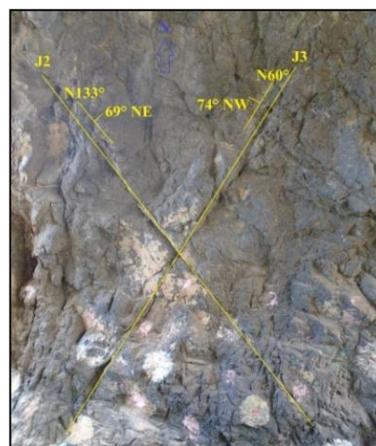


Figure 4.19 : F3 et F4 à l'intérieur du l'ancien tunnel en amont

- Les fractures **F5** « **N154° <64° SW** » : Sont les moins répandues à travers le massif, elle présente une inclinaison moyenne de l'ordre de 64° plongeant vers le Sud-Ouest , Ces diaclases sont généralement fermées, sans recristallisation et peu continue (Fig. 4.20).
- Les fractures **F6** « **N-S <87° E** » : Sont sub-verticales, persistantes de quelques plusieurs mètres, avec un espacement moyen de 2 m ; elles sont visibles le long du versant nord. Elles sont peu ouvertes et peu rugueuses, et sans recristallisation (Fig. 4.21).



Figure 4.20 : F5 visible sur le versant Est

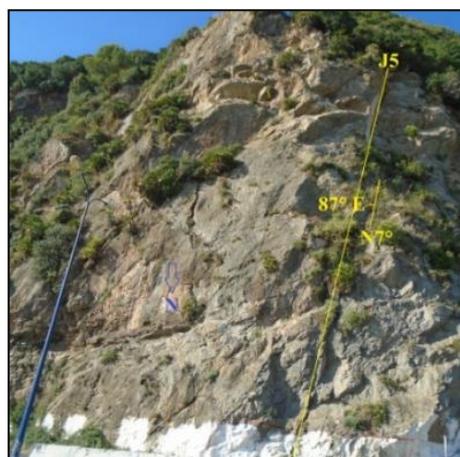


Figure 4.21 : La fracture F6

4.2 Talus en face de l'hôtel Safsaf

La paroi se situe à l'aplomb de la RN09 au niveau du PK 37+300, en face du complexe touristique SAFSAF, elle s'étend sur 40 ml de long et 50 m de hauteur. Au-delà de 30 m de haut, la paroi forme un surplomb débordant de 3 à 4 m environ et 10 m de hauteur (Fig. 4.22).



Figure 4.22 : Talus en face du complexe SAFSAF

Ce surplomb est probablement dû aux tirs de mines (des traces sont visibles à plusieurs endroits de la paroi) mis en œuvre lors de la réalisation de la route (Fig. 4.23).



Figure 4.23: Traces des tirs de mine (BET CAN)

À l'Est et à l'Ouest de la zone principale, il existe des affleurements sur 50 ml de part et d'autre. La hauteur est estimée à 30 m pour le talus Est, tandis que celle de l'Ouest est de 20 m de hauteur.

4.2.1 Lithologie

Le talus est composé essentiellement par des calcaires d'apparence beige clair ; il s'agit d'un affleurement réduit composé des travertins (Fig. 4.24), la roche calcaire possède un aspect plus ou moins vacuolaire et hétérogène, elle présente une dureté variable et elle est faiblement indurée par endroits. À l'est et à l'ouest de la zone principale se trouvent des affleurements de roche calcaire peu dure.

La stratification est peu visible, néanmoins quelques mesures ont permis d'identifier la direction des couches calcaires (Fig. 4.25). Il s'agit des bancs décimétriques de direction N129° moyennement inclinés, la pente varie entre 25° et 45°, inclinée vers le Nord-Est.



Figure 4.24 : Calcaire travertineux



Figure 4.25 : Plan de stratification des travertins

4.2.2 Levé structural

Les observations en surface de la paroi sont limitées en raison de la présence de grillages pendus sur l'ensemble de la zone principale ainsi que le grillage plaqué (Fig. 4.26) et le béton projeté (Fig. 4.27) sur les talus Est et Ouest.



Figure 4.26 : Grillage pondus et plaqué



Figure 4.27 : Béton projeté sur les calcaires

Le levé de discontinuité est élaboré sur la base des affleurements très réduits, ainsi que l'exploitation du rapport d'étude établi par le BET CAN en date du 26/01/2018, qui est élaboré dans le cadre du projet des travaux de protection de la RN09 contre les éboulements rocheux, au PK37+300.

❖ Les failles

Il existe une faille normale subverticale (Fig.4.28) orientée vers le nord-sud, à l'Est de la partie centrale du talus et une autre faille subverticale localisée à l'Ouest (Fig. 4.29). Ces deux failles ont contribué à la subdivision du talus en trois secteurs : centrale, Est et Ouest.

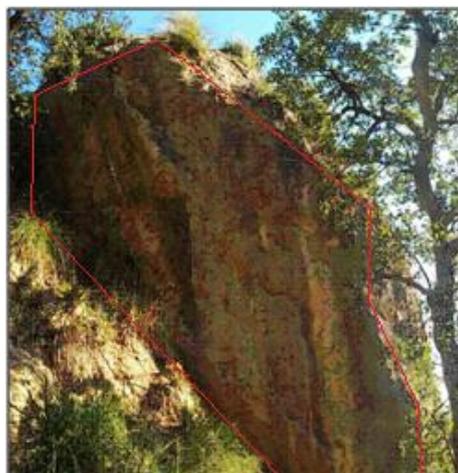


Figure 4.28: Faille normale N-S zone Est **Figure 4.29 :** Faille subverticale N160° zone Ouest (BET CAN)

❖ Les familles de discontinuité

L'ensemble présente un aspect hétérogène dû aux plans de fracturation affectant le massif.

- Les fractures **F2** « N78° < 64° S »

Sont les fractures les plus dominantes et les plus répandues sur le talus, elles sont persistantes (1 à 2 m) environ et leur espacement est inférieur à 1 m. C'est le plan de rupture des blocs rocheux (Fig. 4.30).

- Les fractures **F3** « N176° < 78° E »

Cette famille de discontinuité participe à la fragilisation du talus et au découpage des bancs de calcaire en blocs décimétriques, son espacement varie entre 0,5 et 1 m et sa persistance oscille entre 1,5 et 2 m) (Fig. 4.30).

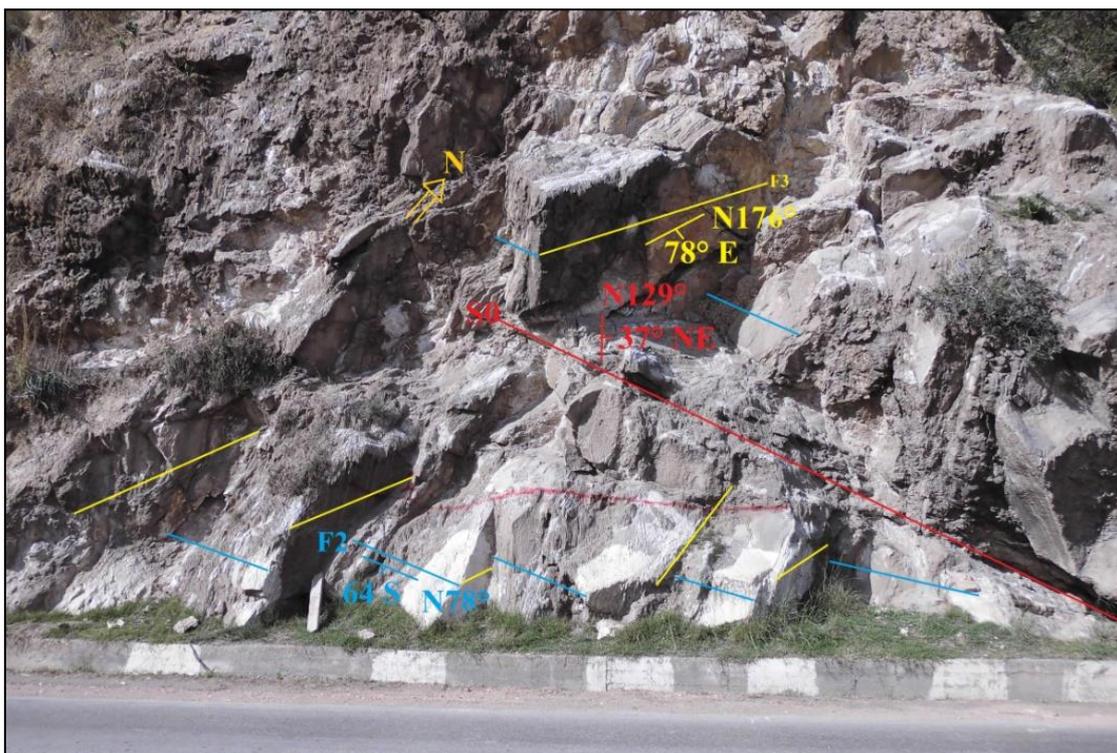


Figure 4.30 : Levé de discontinuité au niveau du talus Est

- L'aspect accidenté de l'affleurement est renforcé par la présence de cavités visibles depuis la route. On note la forte influence de l'eau sur le massif, les eaux d'infiltration dans le réseau karstique ont creusé les cavités apparentes à plusieurs endroits particulièrement la cavité importante sous le surplomb (Fig. 4.31).



Figure 4.31 : cavité située sous le surplomb

4.3 Les talus rocheux de Derguina

Le site est représenté par le versant Est et Sud du mont Ighil Loulene, il est situé au Nord de la commune de Derguina, il s'étend sur 2 km du PK 43 au PK 45.

Les talus rocheux qui longent la route nationale RN 9 ont une pente raide et ils ont une hauteur oscillant entre 5 et 12 m environ, ces talus sont couverts par les éboulis de pente dont le relief devient moins accidenté (Fig. 4.32).

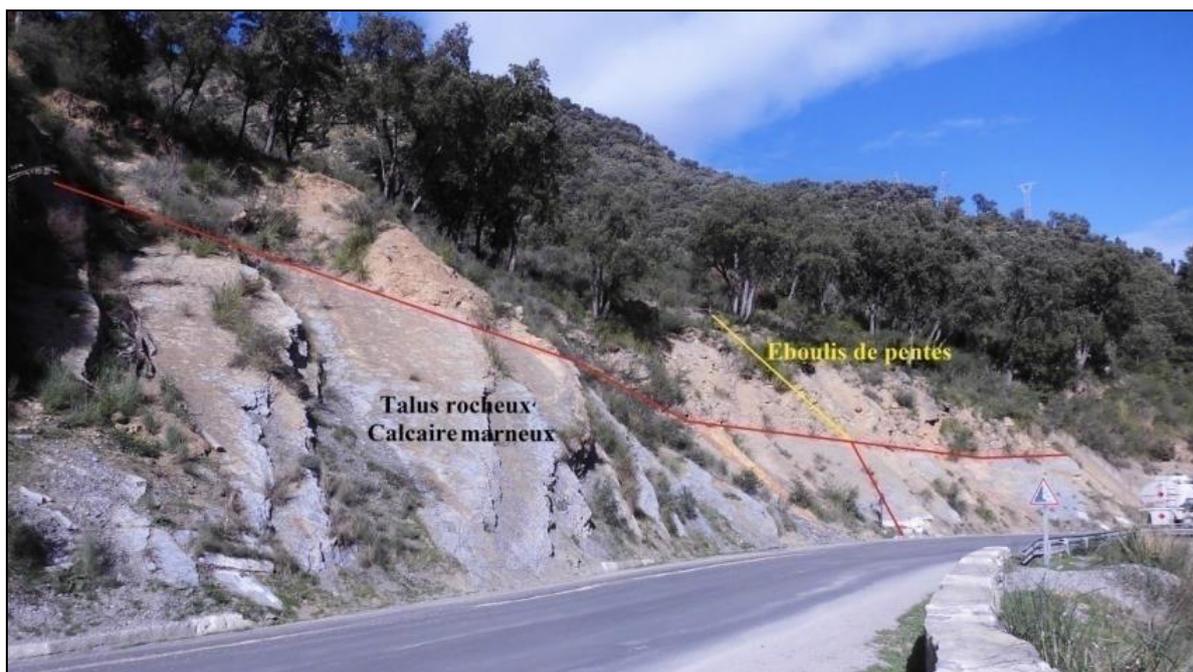


Figure 4.32 : Morphologie et lithologie des talus du mont Ighil Loulene

4.3.1 Lithologie

Le site est constitué par des formations d'âge Valangien-Hauterivien, constituées essentiellement par des calcaires marneux durs qui se débitent en grandes dalles, en plaques et plaquettes (Fig. 4.33) ; il y a aussi un passage conglomératique (Fig. 4.34) intercalant la formation sus-citée.

Les calcaires marneux sont gris clair à patine jaune, ils possèdent une texture fine et une structure en plaquettes centimétriques par endroits, ils se disposent en bancs décimétriques qui n'excédant pas les 30 cm et parfois même moins. Ces bancs de calcaires ont une direction moyenne dirigée vers le N47° et inclinés avec une pente moyenne de 43° vers le Sud- Est.



Figure 4.33 : Calcaire marneux en plaquettes



Figure 4.34 : Formation conglomératique

4.3.2 Levé structural

Le levé de discontinuité est élaboré le long des talus longeant immédiatement la route nationale RN9, sur la base de plusieurs stations d'observation, nous avons pu ressortir les grands traits structuraux de la zone d'étude. Néanmoins, aucune faille d'ordre majeur au mineur n'a été signalée le long du tracé, par contre les fractures sont présentes sous forme de deux familles ;

❖ Les familles de discontinuité

- Les fractures **F2** « $N40^{\circ} < 78^{\circ} NW$ »

Cette famille est présente en abondance à travers les talus, à cause de sa petite persistance (10 à 50 cm) et son espacement réduit (25 à 70 cm), c'est la famille qui contribue au découpage des blocs en petits blocs décimétriques (Fig. 4.35).

- Les fractures **F3** « $N113^{\circ} < 76^{\circ} SW$ »

C'est une fracture très répandue dans le massif, sa persistance varie entre 1 et 2 m et son espacement est inférieur à 1 m. En compagnie du plan de stratification, c'est la fracture responsable de la création des blocs détachés à travers les talus le long du tracé étudié (Fig. 4.35).



Figure 4.35 : Plan de stratification et les deux familles F2 et F3

5. Climat

Le climat est considéré comme étant un facteur déclenchant très important, car il intervient directement et indirectement sur le comportement mécanique des joints et il influence le taux de l'érosion du massif (matrice et joint).

Selon le centre de climatologie de l'Algérie et l'office national de météorologie, l'Algérie est un pays de zone subtropicale, caractérisé par un climat dominant chaud, sec et très ensoleillé. Le long de la langue bande littorale sur la côte méditerranéenne, le climat est typiquement méditerranéen, dans lequel, la zone d'étude fait partie. L'été est chaud et sec, tandis que l'hiver est doux et pluvieux et parfois même enneigé sur les altitudes proches. C'est la zone la plus humide en Algérie, avec une précipitation annuelle oscillant entre 400 et 1000 mm d'eau (Fig. 4.36). Les températures présentent des variations considérables entre l'hiver et l'été ; elles diminuent jusqu'à 8° en mois de janvier et parfois moins, elles montent à 25° au mois de mai, pour atteindre jusqu'à 38° en juillet et août. Lorsque le vent souffle du désert, les températures seront augmentées directement. Cependant, les forces éoliennes ne dépassent pas le seuil de 120 km/h.

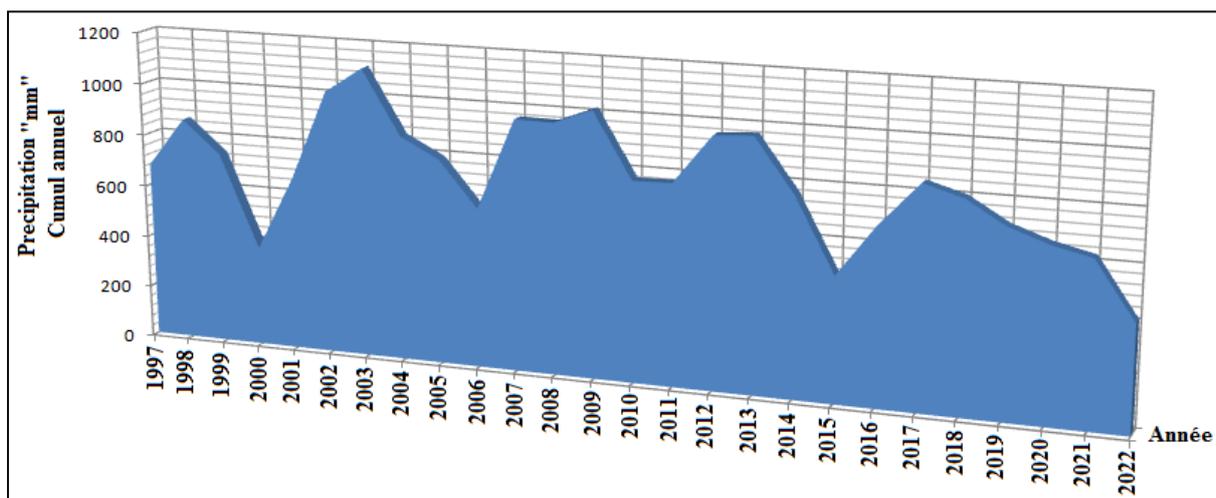


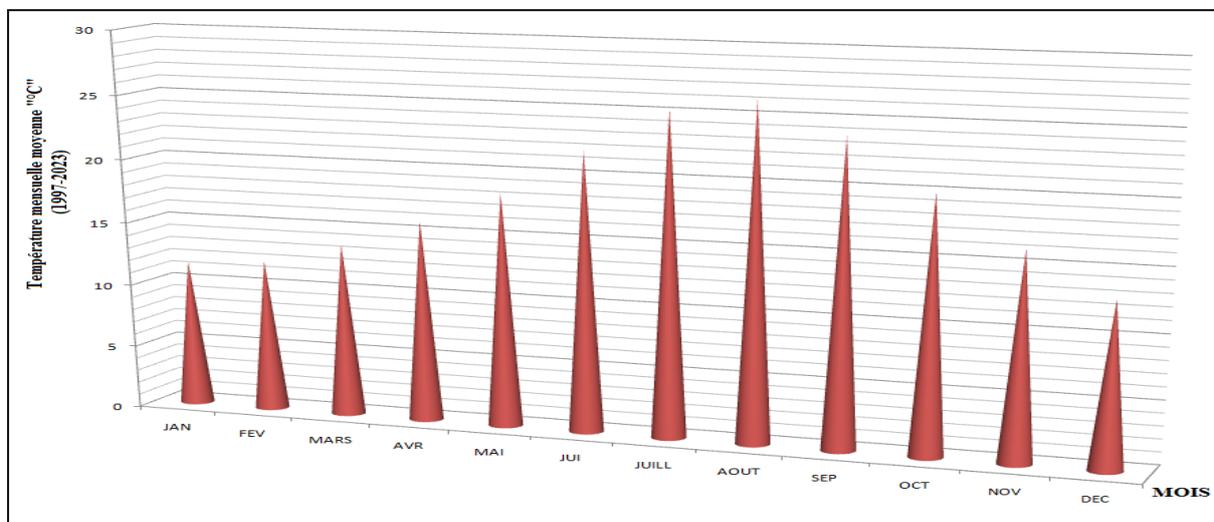
Figure 4.36 : Précipitation annuelle entre la période 1997-2022

La température et la précipitation représentent les éléments essentiels qui définissent le climat de la région. D'après les données météorologiques enregistrées entre 1997 et 2023, sur une période de 27 ans, qui sont obtenues auprès de la station de Béjaïa au niveau de l'aéroport, on peut ressortir ce qui suit :

❖ Température

La région est caractérisée par une température annuelle moyenne estimée à 18°C, la période chaude est enregistrée entre le mois de juin jusqu'au mois d'août et elle peut se prolonger

jusqu'au mois de septembre, avec des températures moyennes variant entre 22^{oc} et 26^{oc}. La période hivernale est comprise entre le mois de décembre jusqu'au mois de février, dont les températures sont douces et oscillantes entre 12^{oc} et 13^{oc}. Les mois restants sont considérés



comme étant des températures printanières, changeant entre 14^{oc} et 20^{oc} (Fig. 4.37).

Figure 4.37 : Températures mensuelles moyennes durant la période (1997-2023)

Au cours de ces dernières années, la région a connu souvent, durant le mois de juillet et août, des incendies violents. Par exemple, et suite à l'incendie d'août 2021 (Fig. 4.38), la couverture végétale est brûlée, causant ainsi des chutes de pierre (Fig. 4.39) sur la Route nationale N°9 au niveau du Cap Aokas.



Figure 4.38: l'incendie août 2021 Cap Aokas **Figure 4.39:** Chute des blocs Aokas août 2021

❖ Précipitation

La zone d'étude fait partie de la zone climatique méditerranéenne, elle est caractérisée par un hiver doux et pluvieux (Fig. 4.40), dont les précipitations mensuelles varient selon les saisons. La période la plus arrosée durant l'année s'étend entre le mois de novembre et le mois de mars, avec une précipitation mensuelle qui varie entre 81 mm et 114 mm, tandis que la période sec est caractérisée par une faible précipitation, oscillant entre 6 mm et 14 mm, elle

est enregistrée entre le mois de juin et le mois d'août. Le reste de l'année est caractérisé par une pluviométrie mensuelle moyenne, comprise entre 45 mm et 70 mm.

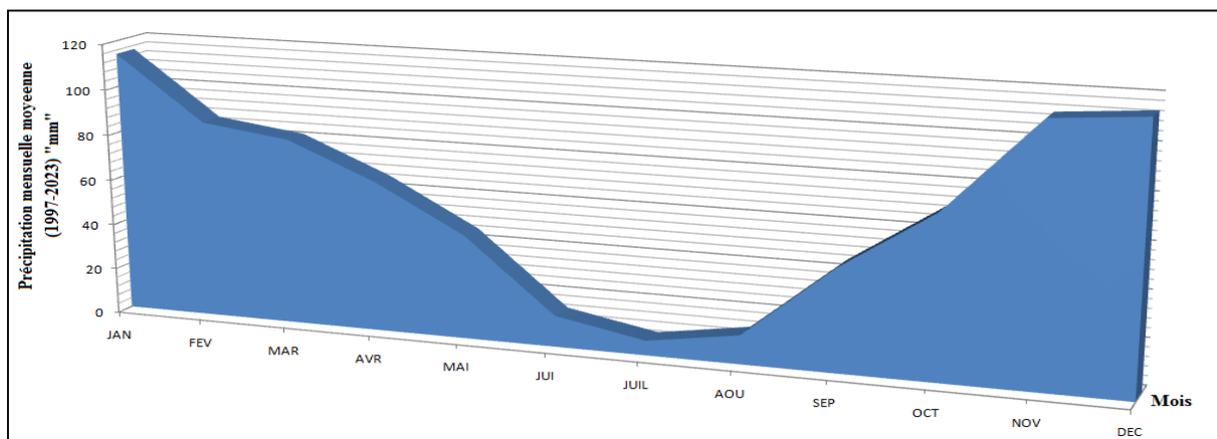


Figure 4.40 : Précipitation mensuelle moyenne durant la période 1997-2023

Si on coïncide les dates de quelques éboulements déjà vécus avec le paramètre précipitation (Tab. 4.1), on remarque que certains événements sont déclenchés durant ou juste après la période de forte à moyenne précipitation.

Tableau 4.1 : Précipitations enregistrées durant les éboulements enregistrés

Eboulement		Précipitation mensuelle mm	Précipitation journalière mm (infoclimat et freemeteo)
Date	lieu		
09 / 05 / 2005	Aokas	8	6 mm (6/5/2005)
05 / 04 / 2014		16	13.9 mm
24 / 02 / 2015		140	16 mm
12 / 10 / 2019		66	22 mm (3/10/2019)
08 / 09 / 2024		61.8	9 mm
14 / 01 / 2017	Souk El Tnin	288	23mm (11/01/2017) 18mm (12/01/2017)
14 / 05 / 2023	Darguina	113	11mm
09 / 09 / 2024		61.8	9.9 mm

La comparaison entre la date de déroulement des éboulements (Fig. 4.41) connus avec la précipitation, indique une étroite relation entre le paramètre eau et l'instabilité des blocs, rendant la précipitation un important facteur de déclenchant parmi d'autres.



Figure 4.41 : Chute de bloc au niveau du Cap Aokas (8/9/2024) et Derguina (9/9/2024)

6. Sismicité

La localisation dans une zone de convergence de plaque (rapprochement des plaques eurasiatique et africaine), engendre une occurrence de l'activité sismique en Algérie, notamment dans la région tellienne.

Le Nord Algérien est la zone la plus active (Fig. 4.42), les séismes se produisent de façon permanente mais environ 90 % de cette activité est caractérisée par une faible magnitude. Sur la base de plusieurs catalogues qui s'intéressent à l'historique de la sismicité de l'Algérie, plusieurs séismes importants se sont produit au cours de l'histoire tels que : (1716 Alger : magnitude 7.5 ; 1891 Gouraya : 15 janvier 1891 magnitude 7.5 ; 1980 Chlef : magnitude 7.3 ; 1999 Aïn Témouchent : 22 décembre 1999 magnitude 6.1 ; 2003 Boumerdès : 21 mai 2003 magnitude 6.8).

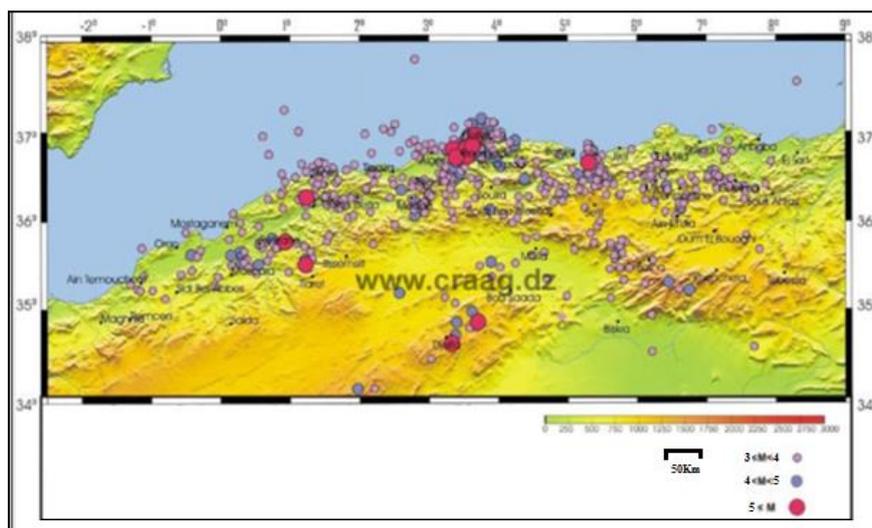


Figure 4.42 : Carte de sismicité de l'Algérie du Nord période 2002-2006 (Craag)

D'après le centre de recherche en astronomie, astrologie et géophysique (CRAAG), la région de Bejaia a enregistré plusieurs forts séismes entre 1900 et 2023, dont la magnitude de 29

séismes est supérieure à 5 sur l'échelle de Richter, on cite à titre d'exemple : **1960 Béjaia** (magnitude 5.6) ; **1977 Darguina** (intensité V) ; **20 mars 2006 Laâlam** (magnitude 5) ; **18 mars 2021 Béjaia** (magnitude 5.9) ; **20 mars 2022 Béjaia** (magnitude 5.5). L'épicentre de ces deux séismes est localisé à 28 km nord-est du Cap Carbon, suggère l'existence des failles actives le long de la marge sous-marine de la région.

D'après le CRAGG et le catalogue de la sismicité historique de (A. Mokrane et AL 1994), la zone d'étude a connu au cours de son histoire plusieurs séismes, dont la magnitude varie entre 3 et 4 sur l'échelle de Richter, indiquant ainsi une activité sismique modérée de la zone d'étude.

Quand l'intensité de l'activité sismique est assez importante, l'accélération sismique peut déranger l'état de l'équilibre des blocs rocheux susceptibles à la rupture, et par conséquent, elle peut provoquer la chute des blocs dans les zones montagneuses rocheuses (Fig. 4.43), comme déjà vécu, aux séismes de Darguina (28/6/1974) et Béjaia (19/3/2022).



Figure 4.43: Eboulement à Cap Carbon (19/3/2022)

Selon la carte de zonage sismique du territoire national (RPA 2024) (Fig. 4.44). La zone d'étude est située dans la zone de sismicité élevée (zone VI) et tenant compte de la relation directe entre l'accélération sismique et la stabilité des blocs rocheux ; la sismicité de la région est considérée comme un facteur de déclenchement à ne pas le négliger.

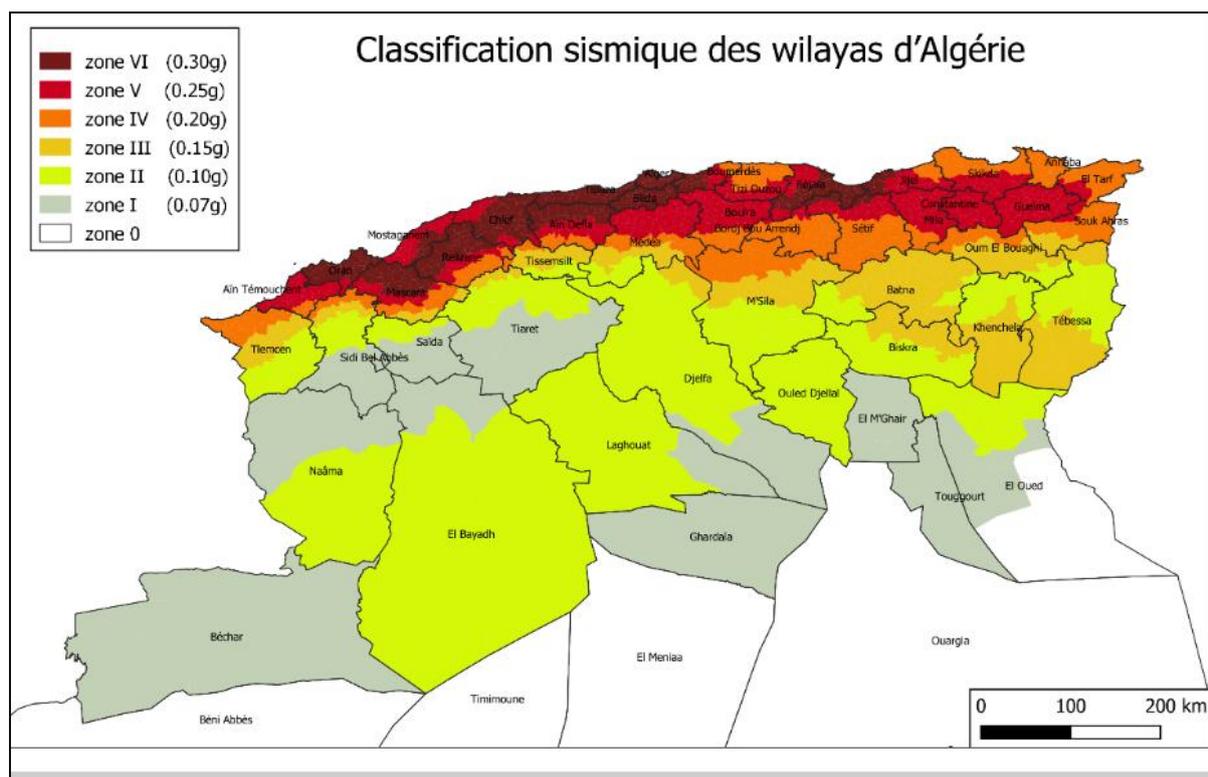


Figure 4.44 : Zonage sismique de l'Algérie (RPA 2024)

7. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons identifié la zone d'étude sur la base de divers aspects. Nous avons abordé la situation géographique et cerné les zones concernées par le phénomène de chute des blocs. Ensuite, nous avons présenté la géologie régionale et identifié la géologie locale. A la fin, les données climatiques sont exposées et la sismicité de la région est dévoilée.

D'après les informations suscitées dans le chapitre, nous avons pu ressortir ce qui suit :

- La zone d'étude est présentée par les talus et les versants rocheux qui logent la route nationale N°9, reliant les wilayas de Béjaïa et de Sétif, et les trois sites susceptibles au phénomène étudié sont : le site du Cap Aokas (K24-PK25) ; le talus rocheux en face de l'hôtel SAFSAF (PK37+300) à Souk El Ténine et les talus rocheux de Derguina (PK43-PK45).
- Sur le plan géologique, la zone d'étude est située dans le domaine orogénique externe, sur la nappe tellienne, elle appartient à la chaîne des Babors et elle traverse l'unité du Barbacha au nord et l'unité de Draa El Arba au sud, où sont séparés par le complexe triasique. Le jurassique est calcaro-dolomitique, le crétacé est discordant sur les séries jurassiques, le

crétacé inférieur est pélitique et conglomératique clair, tandis que, le crétacé supérieur est constitué par des marno-calcaires.

Localement, chaque site possède ses particularités uniques :

➤ **Falaise de Cap Aokas** : Le site est présenté par un monoclinal, constitué principalement par des calcaires dolomitiques durs d'âge Lias inférieur ; les couches ont une direction de N45° et inclinées avec un pendage moyen de 50° vers le nord-ouest. Cependant une couverture d'anciens éboulis nappes les reliefs de pente moyenne. De point de vue structural, le massif est très fracturé ; il est affecté par une série de failles subverticales, de direction moyenne N125° et cinq familles de fractures. Les failles contribuent à la création des reliefs très accidentés, tandis que les fractures participent à la fragilisation du massif et à la création des blocs susceptibles à la rupture.

➤ **Talus hôtel SAFSAF** : il est constitué de calcaire travertineux beige, moyennement dur, la stratification est peu visible, néanmoins ; les bancs sont décimétriques dirigés vers le N129°, incliné de 37° vers le nord-est. Le levé structural a dévoilé que le talus est subdivisé en trois parties par des failles subverticales de direction nord-sud. Les deux familles de discontinuités ont participé à la fragilisation du talus et à la création des blocs de volume décimétrique à métrique.

➤ **Talus de Derguina** : Il s'agit des talus rocheux de hauteur oscillant entre 5 et 10 m, ils sont surmontés par une couverture de formation de pente couvrant un relief moyennement accidenté. La roche est présentée par des bancs décimétriques de calcaire marneux gris clair et dur ; ils sont d'âge crétacé inférieur. Ces calcaires se décomposent en dalles et en plaques, la direction moyenne de ces calcaires est N45°, incliné de 43° vers le sud-est. Ce talus est affecté par deux familles de fractures participant à la création des petits blocs de volume décimétriques.

- Le climat de la zone d'étude est méditerranéen, il est caractérisé par un été chaud et sec marqué par des températures moyennes, dépassant les 26°C et des précipitations faibles, diminuent jusqu'à 6 mm, tandis que l'hiver est doux et pluvieux, la température moyenne diminue jusqu'à 8°C et la précipitation mensuelle approche de 114 mm.

La superposition des dates des éboulements avec la précipitation révèle une étroite liaison entre eux, ce qui est expliqué par le fait que l'eau joue un rôle important dans l'érosion et

l'altération des joints rocheux, rendant les précipitations ainsi, un facteur déclenchant important.

- L'activité sismique de l'Algérie est concentrée essentiellement au nord, elle est due au rapprochement des plaques eurasiatique et africaine. Cette activité est permanente, dont 90% d'elle est classée de faible magnitude. Cependant, la zone d'étude a connu plusieurs événements importants à différents endroits (Aokas , Souk El ténine et Derguina) et certains éboulements rocheux se sont déclenchés, suite à l'accélération sismique engendrée par cette activité.

Enfin, d'après les informations fournies par ce chapitre, on peut conclure que le phénomène chute des blocs est influencé par des facteurs multiples de prédisposition comme la lithologie et la structure du massif rocheux, ainsi que par des facteurs incitant le déclenchement ; tel que la précipitation et la sismicité de la région.



CHAPITRE V « ANALYSE
CINÉMATIQUE »



1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse cinématique des discontinuités des trois sites. Les données structurelles collectées sur le terrain seront exploitées dans ce chapitre, en commençant d'abord par la distinction des différentes familles de discontinuités, ensuite selon les caractéristiques mécaniques de ces familles et les caractéristiques géométriques de la pente, une analyse cinématique sera effectuée afin de sélectionner les différentes possibilités des plans selon divers mode de ruptures (glissement plan, dièdre et basculement).

2. La collecte des données

La première étape consiste en un travail de terrain. À cette fin, plusieurs campagnes d'investigations ont été réalisées dans les zones accessibles des trois sites. La collecte des données a pour but de définir les propriétés du massif rocheux de point de vue lithologique et structurel afin d'établir un modèle géologique et structurel détaillé.

L'enquête sera menée en mesurant directement le pendage et la direction de pendage des discontinuités, la persistance et l'espacement.

L'acquisition des propriétés géométriques des discontinuités nécessite un échantillonnage semblable et cohérent afin que l'échantillonnage soit spatialement homogène car toute information récoltée permet de préciser les caractéristiques et de tester l'homogénéité du massif. Il existe deux méthodes d'échantillonnage : celle de fenêtre et celle de scanline (V Netshilaphala, T Zvarivadza. 2021)

La scanline : La procédure consiste à tracer une ligne droite appelée « scanline » et de relever toutes les discontinuités de persistance apparente dépassant un seuil spécifique. Il convient de veiller à la représentativité de scanline en ce qui concerne les caractéristiques du secteur étudié, en notant les abscisses et les orientations pour chaque famille de discontinuités. Il faut autant que possible suivre un tracé rectiligne ; sans tenir compte des caractéristiques qui ne sont pas recoupées par cette ligne droite. Dans le cas le plus favorable, la scanline permet une évaluation fiable de la persistance.

La procédure de cartographie consiste à mesurer et d'enregistrer les éléments suivants :

- a. Angle d'inclinaison et direction d'inclinaison de chaque discontinuité.
- b. Espacement des discontinuités et longueurs de leurs traces.

La fenêtre : Cette méthode d'échantillonnage permet l'identification à distance des caractéristiques structurales sur une surface essentiellement plane avec une orientation moyenne relevée.

La technique implique la segmentation systématique de la zone à cartographier (face, mur ou paroi latérale) en sections uniformes de formes variées. Telles que des rectangles ou carrés selon Nicholas & Sims (2000). Des observations visuelles sont effectuées dans chaque fenêtre, en mettant l'accent sur l'enregistrement des propriétés des joints (orientation, espacement, longueur, etc.). Cette démarche permet de dériver les espacements moyens et les persistances moyennes.

2.1 Levé structural du Cap Aokas

Le levé est réalisé sur 12 fenêtres (Fig. 5.1), et les caractéristiques géométriques des discontinuités sont présentées dans le tableau 5.1.

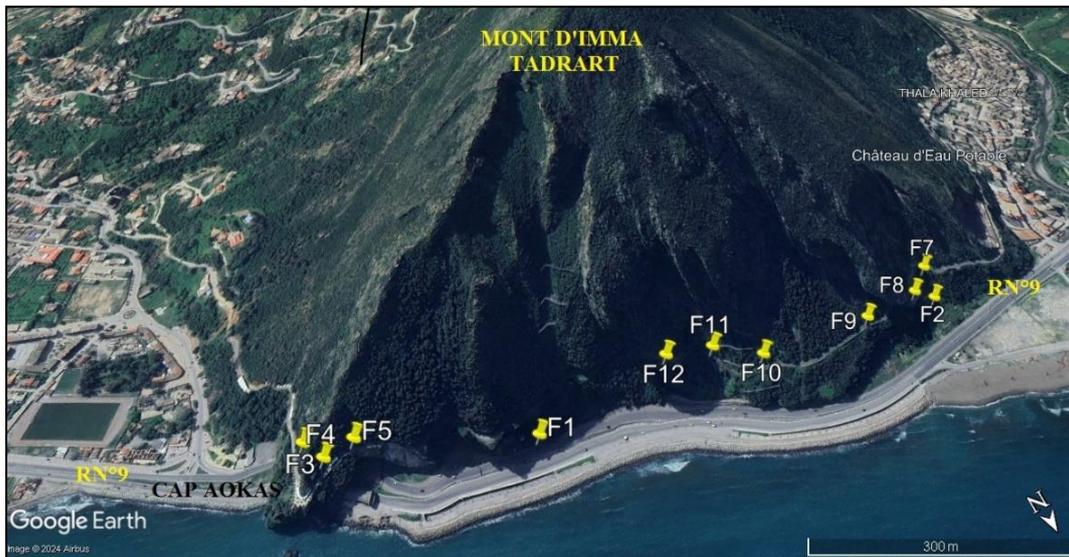


Figure 5.1 : Implantation des fenêtres d'observation sur le versant du Cap Aokas

Tableau 5.1 : Levé de discontinuité du versant du Cap Aokas

F	Coordonnées géographiques	Levé structural		Photos
		Dip	Dip direction	
1	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088'$	70	240	
		60	264	
		69	267	
		70	260	
		72	267	
		68	269	
		87	74	
		87	97	
		87	88	
		87	96	
		87	102	

		87	109	
		87	79	
		87	117	
		87	81	
		87	113	
2	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		82°	N24°	
		86°	N33°	
		60°	N20°	
		66°	N24°	
		69°	N21°	
		64°	N27°	
		69°	N18°	
		63°	N34°	
		70°	N39°	
		69°	N32°	
		65°	N20°	
		74°	N36°	
		62°	N248°	
		63°	N251°	
		61°	N258°	
		58°	N254°	
		56°	N249°	
		87°	N81°	
		87°	N68°	
		87°	N72°	
87°	N66°			
87°	N64°			
87°	N70°			
87°	N71°			
87°	N83°			
87°	N74°			
87°	N65°			
3	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		82°	N335°	
		80°	N315°	
		70°	N341°	
		74°	N312°	
		71°	N310°	
		76°	N317°	
		79°	N308°	
		72°	N310°	
		68°	N318°	
		63°	N255°	

		70°	N261°	
		64°	N253°	
		60°	N237°	
		59°	N232°	
		65°	N265°	
		62°	N260°	
		63°	N262°	
		67°	N258°	
		68°	N243°	
4	<p>X = 36°34.176'</p> <p>Y = 5°20.088</p>	Dip	Dip direction	
		55°	N52°	
		59°	N49°	
		51°	N55°	
		74°	N45°	
		56°	N62°	
		63°	N34°	
		90°	N68°	
		87°	N72°	
		87°	N74°	
		87°	N77°	
		87°	N64°	
5	<p>X = 36°34.176'</p> <p>Y = 5°20.088</p>	Dip	Dip direction	
		67°	N250°	
		62°	N268°	
		68°	N267°	
		63°	N277°	
		65°	N272°	
		87°	N120°	
		87°	N114°	
		87°	N128°	
		87°	N131°	
6	<p>X = 36°34.176'</p> <p>Y = 5°20.088</p>	Dip	Dip direction	
		87	101	
		87	97	
		87	98	
		87	93	
		87	105	
		87	92	
		87	94	

7	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		70°	N232°	
		68°	N220°	
		65°	N230°	
		64°	N238°	
		62°	N224°	
		65°	N227°	
		67°	N227°	
		70°	N218°	
		68°	N221°	
		85°	N35°	
		80°	N37°	
		77°	N40°	
		74°	N32°	
		72°	N38°	
		76°	N37°	
		79°	N42°	
		81°	N40°	
78°	N38°			
75°	N32°			
78°	N30°			
8	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip Direction	
		75°	N27°	
		80°	N38°	
		72°	N33°	
		78°	N37°	
		74°	N43°	
		81°	N32°	
		79°	N25°	
		65°	N235°	
		62°	N228°	
		59°	N233°	
		67°	N242°	
		68°	N218°	
		87°	N225°	
		87°	N230°	
		87°	N228°	
		87°	N232°	
		87°	N230°	
87°	N235°			
87°	N222°			

9	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		65°	N58°	
		62°	N69°	
		68°	N61°	
		61°	N75°	
		73°	N353°	
		75°	N345°	
		73°	N350°	
		72°	N342°	
		78°	N348°	
		87°	N68°	
		87°	N57°	
		87°	N50°	
		87°	N72°	
87°	N63°			
10	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		68°	N320°	
		70°	N323°	
		64°	N319°	
		78°	N327°	
		71°	N321°	
		66°	N334°	
		74°	N338°	
		72°	N58°	
		74°	N62°	
		71°	N60°	
		78°	N51°	
		75°	N67°	
		72°	N61°	
		87°	N111°	
		87°	N99°	
		87°	N97°	
		87°	N110°	
87°	N101°			
87°	N109°			
87°	N117°			
87°	N98°			
87°	N101°			
87°	N97°			

11	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip Direction	
		82°	N338°	
		75°	N342°	
		80°	N330°	
		82°	N337°	
		74°	N330°	
		65°	N342°	
		68°	N327°	
		71°	N330°	
		68°	N328°	
		74°	N327°	
		77°	N332°	
		82°	N330°	
		65°	N45°	
		72°	N40°	
		74°	N28°	
		62°	N38°	
		68°	N37°	
		67°	N48°	
		77°	N39°	
		74°	N44°	
		69°	N47°	
		87°	N110°	
87°	N105°			
87°	N121°			
87°	N125°			
87°	N118°			
87°	N120°			
87°	N111°			
87°	N124°			
12	$X = 36^{\circ}34.176'$ $Y = 5^{\circ}20.088$	Dip	Dip direction	
		78°	N345°	
		74°	N352°	
		74°	N338°	
		76°	N354°	
		74°	N355°	
		65°	N54°	
		68°	N50°	
		77°	N40°	
		70°	N47°	
		52°	N57°	
		55°	N52°	
		87°	N125°	
		87°	N132°	
87°	N128°			

		87°	N121°	
		87°	N127°	

2.2 Levé structural Talus Hôtel SAFSAF

Vu l'état actuel du talus après son confortement par un filet tendu et plaqué ainsi que le béton projeté ; les endroits destinés à être levé sont très limités (Fig. 5.2).

Les caractéristiques géométriques des discontinuités sont présentées dans le tableau 5.2.



Figure 5.2 : Implantation du scanline sur le talus rocheux en face de l'Hôtel Safsaf

Tableau 5.2 : Levé de discontinuité talus Hôtel Safsaf

S	Coordonnées géographiques	Levé structural		Photos
		Dip	Dip Direction	
1	X = 36°36.870' Y = 5°20.078'	85°	N82°	
		85°	N100°	
		80°	N78°	
		80°	N90°	
		86°	N82°	
		85°	N105°	
		81°	N103°	
		70°	N90°	
		75°	N93°	
		75°	N85°	
		70°	N85°	
		65°	N72°	
		65°	N165°	
		85°	N180°	
75°	N174°			
68°	N160°			

		55°	N178°	
		65°	N162°	
		53°	N169°	
		70°	N179°	
		70°	N165°	
		55°	N170°	
		70°	N160°	
		25°	N65°	
		30°	N50°	
		45°	N40°	
		30°	N35°	
		40°	N40°	
		35°	N40°	
		45°	N30°	

2.3 Levé structural talus Derguina

Le levé est réalisé sur neuf (9) scanlines réparties le long de la route (Fig. 5.3). Les caractéristiques géométriques des discontinuités sont présentées dans le tableau 5.3.

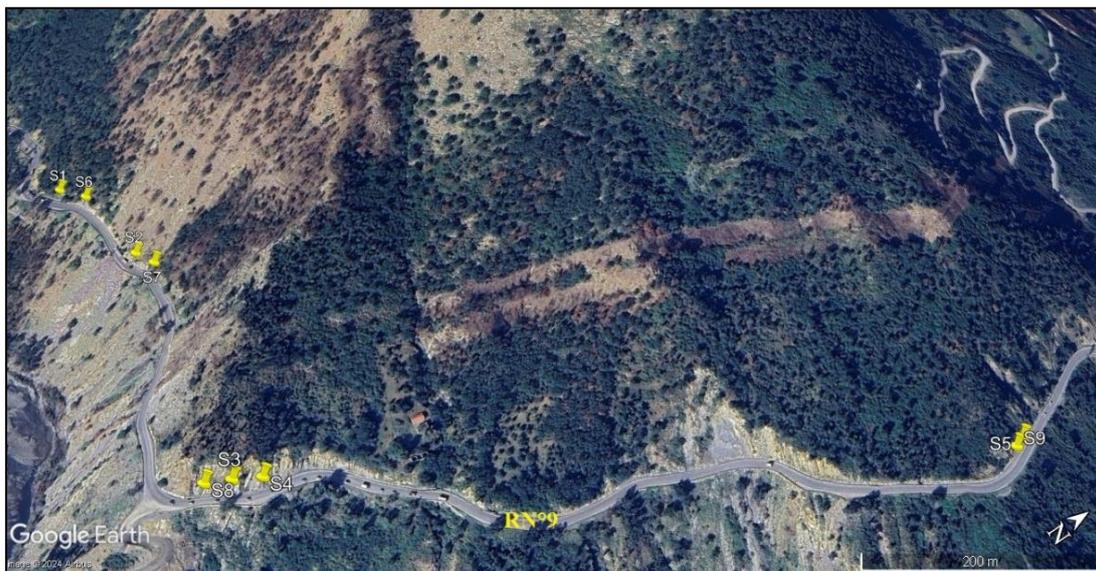


Figure 5.3 : Implantation des scanlines le long du versant rocheux à Derguina

Tableau 5.3 : Levé de discontinuité talus Derguina

S	Coordonnées géographiques	Levé structurale	Photos																
1	X = 36°34.176' Y = 5°20.088'	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dip</th> <th>Dip direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>75°</td> <td>N 125°</td> </tr> <tr> <td>75°</td> <td>N124°</td> </tr> <tr> <td>80°</td> <td>N200°</td> </tr> <tr> <td>80°</td> <td>N185°</td> </tr> <tr> <td>15°</td> <td>N100°</td> </tr> </tbody> </table>	Dip	Dip direction	75°	N 125°	75°	N124°	80°	N200°	80°	N185°	15°	N100°					
Dip	Dip direction																		
75°	N 125°																		
75°	N124°																		
80°	N200°																		
80°	N185°																		
15°	N100°																		
2	X = 36°34.195' Y = 5°20.189'	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dip</th> <th>Dip direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40°</td> <td>N 95°</td> </tr> <tr> <td>32°</td> <td>N120°</td> </tr> <tr> <td>40°</td> <td>N101°</td> </tr> <tr> <td>80°</td> <td>N180°</td> </tr> <tr> <td>75°</td> <td>N187°</td> </tr> <tr> <td>10°</td> <td>N100°</td> </tr> </tbody> </table>	Dip	Dip direction	40°	N 95°	32°	N120°	40°	N101°	80°	N180°	75°	N187°	10°	N100°			
Dip	Dip direction																		
40°	N 95°																		
32°	N120°																		
40°	N101°																		
80°	N180°																		
75°	N187°																		
10°	N100°																		
3	X = 36°34.191' Y = 5°20.406'	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dip</th> <th>Dip direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>45°</td> <td>N 132°</td> </tr> <tr> <td>40°</td> <td>N135°</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>N297°</td> </tr> <tr> <td>68°</td> <td>N280°</td> </tr> <tr> <td>15°</td> <td>N75°</td> </tr> <tr> <td>18°</td> <td>N135°</td> </tr> </tbody> </table>	Dip	Dip direction	45°	N 132°	40°	N135°	45°	N297°	68°	N280°	15°	N75°	18°	N135°			
Dip	Dip direction																		
45°	N 132°																		
40°	N135°																		
45°	N297°																		
68°	N280°																		
15°	N75°																		
18°	N135°																		
4	X = 36°34.196' Y = 5°20.408'	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dip</th> <th>Dip direction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>65°</td> <td>N 110°</td> </tr> <tr> <td>61°</td> <td>N100°</td> </tr> <tr> <td>65°</td> <td>N110°</td> </tr> <tr> <td>72°</td> <td>N204°</td> </tr> <tr> <td>67°</td> <td>N194°</td> </tr> <tr> <td>80°</td> <td>N196°</td> </tr> <tr> <td>10°</td> <td>N316°</td> </tr> </tbody> </table>	Dip	Dip direction	65°	N 110°	61°	N100°	65°	N110°	72°	N204°	67°	N194°	80°	N196°	10°	N316°	
Dip	Dip direction																		
65°	N 110°																		
61°	N100°																		
65°	N110°																		
72°	N204°																		
67°	N194°																		
80°	N196°																		
10°	N316°																		

5	X = 36°34.490' Y = 5°20.615'	Dip	Dip direction	
		70°	N 113°	
		65°	N98°	
		67°	N113°	
		69°	N16°	
		85°	N17°	
		85°	N20°	
		20°	N286°	
		24°	N290°	
		20°	N283°	
6	X = 36°34.186' Y = 5°20.113'	Dip	Dip direction	
		45°	N 130°	
		49°	N135°	
		49°	N 140°	
		41°	N136°	
		40°	N 143°	
		41°	N125°	
		65°	N212°	
		53°	N206°	
		80°	N205°	
		30°	N203°	
		61°	N195°	
		14°	N130°	
		8°	N135°	
14°	N141°			
7	X = 36°34.201' Y = 5°20.210'	Dip	Dip direction	
		40°	N 135°	
		40°	N143°	
		29°	N141°	
		71°	N280°	
		80°	N220°	
		71°	N216°	
		84°	N220°	
		80°	N223°	
		15°	N135°	
		8°	N110°	
		13°	N132°	
10°	N150°			

8	X = 36°34.174' Y = 5°20.392'	Dip	Dip direction	
		47°	N124°	
		44°	140°	
		57°	N96°	
		76°	N206°	
		64°	245°	
		70°	N187°	
		10°	N130°	
		25°	N104°	
9	X = 36°34.484' Y = 5°20.617'	Dip	Dip direction	
		38°	N145°	
		45°	N148°	
		55°	N52°	
		75°	N240°	
		85°	N245°	
		76°	N170°	
		84°	N148°	
		85°	N150°	
		76°	N84°	
		55°	N170°	
		75°	N181°	
87°	N210°			

3. Familles de discontinuités

Les contraintes tectoniques ont affecté la région, notamment les massifs rocheux et l'aspect structural et géomorphologique actuel témoignent de ce qu'ils ont vécu tout au long de leur histoire géologique. Toutefois, chaque site est marqué par plusieurs types de discontinuité genre sédimentaire et tectonique.

Pour la distinction et la visualisation des différentes familles de discontinuité nous avons utilisé le logiciel Dips7 du Rocscience.

3.1 Site 1 : Falaise d'Aokas

La falaise est considérée comme étant un massif très fracturé, la projection stéréographique des points du levé des discontinuités a mis en évidence 7 familles (Fig. 5.4).

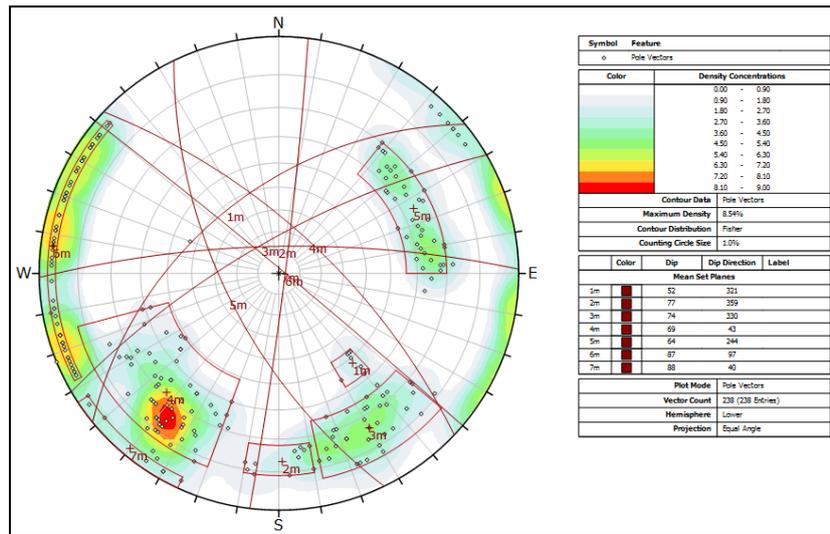


Figure 5.4 : Projection stéréographique des discontinuités (Falaise Aokas)

La famille 1 représente le plan de la stratification et la famille 7 représente la série de 6 failles qui découpe le massif de haut en bas (Fig. 5.5), les familles 2, 3, 4, 5 et 6 contribuent à la fracturation et à la fragilisation du massif, ainsi que la génération des blocs. Les caractéristiques géométriques de ces familles sont résumées dans le tableau 5.4 :

Tableau 5.4 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Aokas »

Famille	Pendage	Direction de pendage	Direction de la couche	Espacement (m)	Persistance (m)	Rugosité
1	51°	321° N	N 51°	3	15	-
2	77°	359° N	N 89°	1	1.2	2-4
3	74°	330° N	N 60°	1	1	2-4
4	69°	43° N	N 133°	1	1.5	2-4
5	64°	244° N	N 154°	1	0.8	1-2
6	87°	97° N	N 187°	2	8	-
7	88°	40° N	N 130°	300	> 50	-

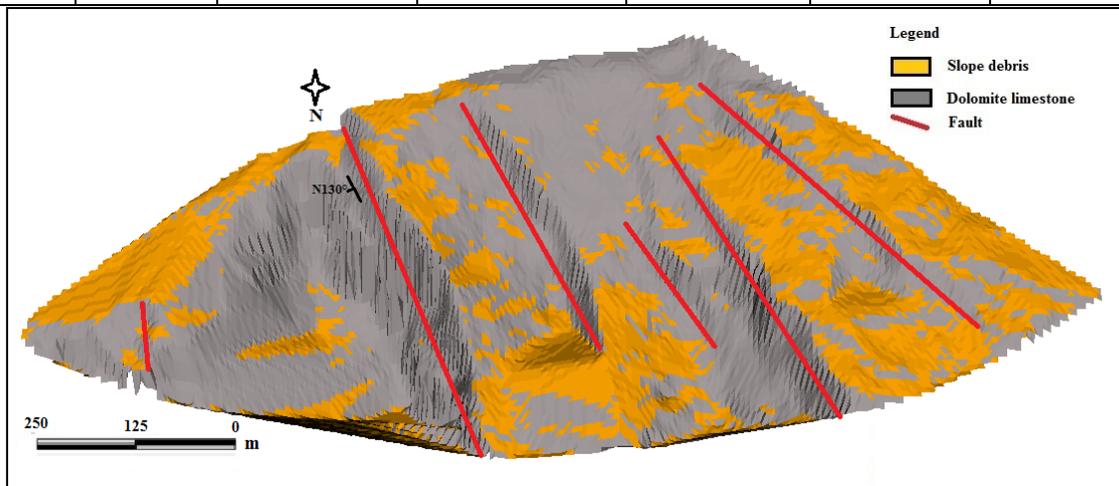


Figure 5.5 : La série des failles N130° qui découpe le versant Nord Falaise d'Aokas

3.2 Site 2 : Talus en face d’Hôtel SAFSAF

Le talus est considéré moyennement fracturé, la projection stéréographique (Fig. 5.6) a dévoilé la présence de trois pôles. La famille 1 représente le plan de stratification, tandis que les deux familles 2 et 3 contribuent à la fracturation du massif en bloc à volume variable, la persistance de la famille 2 oscille entre à 0.5 et 1.5 m et l’espacement varie entre 43 cm et 85 cm. Cependant, la persistance de la famille 3 varie entre 1,5 et 2 m et l’espacement varie entre 50 cm et 1,10 m. Les caractéristiques géométriques de ces familles sont résumées dans le tableau 5.5.

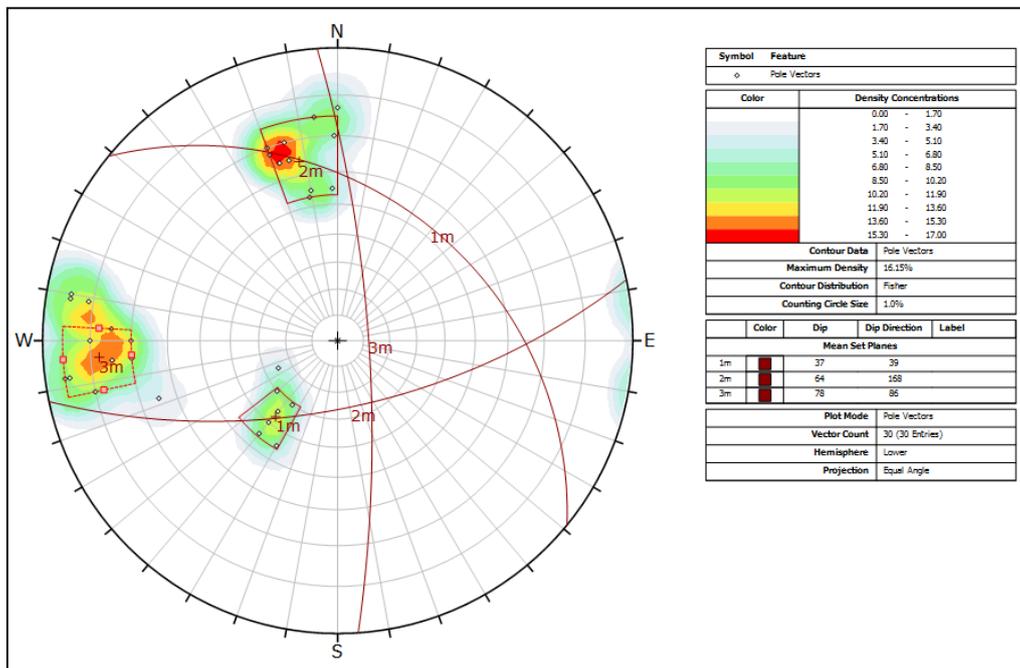


Figure 5.6 : Projection stéréographique des discontinuités talus hôtel Safsaf

Tableau 5.5 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Safsaf »

Famille	Pendage	Direction de pendage	Direction de la couche	Espacement MOY (m)	Persistance MOY (m)	Rugosité
1	37°	39° N	N 129°	0.5	5	-
2	64°	168° N	N 78°	1	0.70	2-4
3	78°	86° N	N 176°	1.75	0.57	2-4

3.3 Site 3 : Talus de Derguina

Les talus rocheux qui logent la route nationale RN°9 au Nord de la commune de Derguina sont composés de bancs de calcaire sous forme de dalle. Mis à part le plan de stratification, la projection stéréographique a mis en évidence deux familles de discontinuités (Fig. 5.7) qui participent au découpage des blocs sous forme rectangulaire.

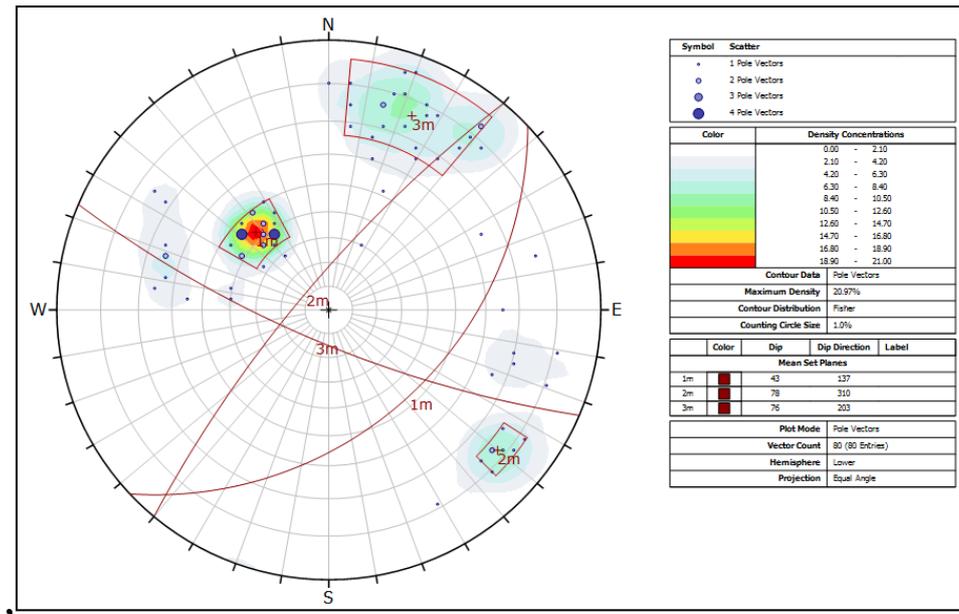


Figure 5.7 : Projection stéréographique des discontinuités Derguina

Les talus sont moyennement fracturés, ils sont affectés par trois familles de discontinuité, dont les caractéristiques géométriques sont mentionnées dans le tableau 5.6. La famille 1 représente le plan de la stratification et les familles 2 et 3 participent à la fracturation de ces dalles.

Tableau 5.6 : Les caractéristiques géométrique des familles de discontinuités « Derguina »

Famille	Pendage	Direction de pendage	Direction de la couche	Espacement MOY (m)	Persistance MOY (m)	Rugosité
1	43°	137° N	N 27°	0.33	10	-
2	78°	310° N	N 40°	0.41	0.22	2-4
3	76°	203° N	N 113°	0.65	1.30	2-4

4. Analyse cinématique

4.1 Détermination de l'angle de frottement des discontinuités

La relation non linéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte normale est proposée par Barton Bandis (1990). La condition de résistance au cisaillement de la roche selon Barton Bandis prend la forme suivante :

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Où :

JRC : Coefficient de rugosité de la surface

σ_n : Contrainte normale agissant sur la surface du joint de roche

JCS : Résistance à la compression des parois des discontinuités

ϕ_b : Angle de frottement interne élémentaire de la surface de glissement

Les valeurs des paramètres mécaniques (Tab. 5.7, 5.8 et 5.9) des discontinuités sont obtenues à l'aide du logiciel Roc Data du Rocscience (Fig. 5.8, 5.9 et 5.10), en utilisant les relations telles que celle proposée par (Barton Bandis, 1990).

Site 1 : Falaise de Aokas

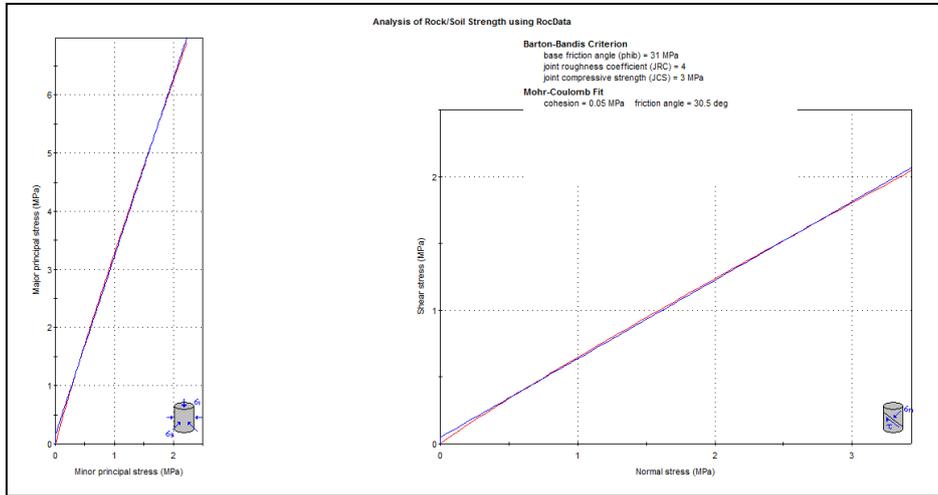


Figure 5.8 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) Aokas

Tableau 5.7 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (site Aokas)

<i>Lithologie</i>	<i>Densité MN/m³</i>	<i>JCS (Résistance à la compression simple) «MPa »</i>	<i>Rugosité JRC</i>	<i>Hauteur du Talus (m)</i>	<i>Angle de frottement</i>
Calcaire dolomitique	0.027	3	4	100	30°

Site 2 : Talus de complexe touristique Safsaf

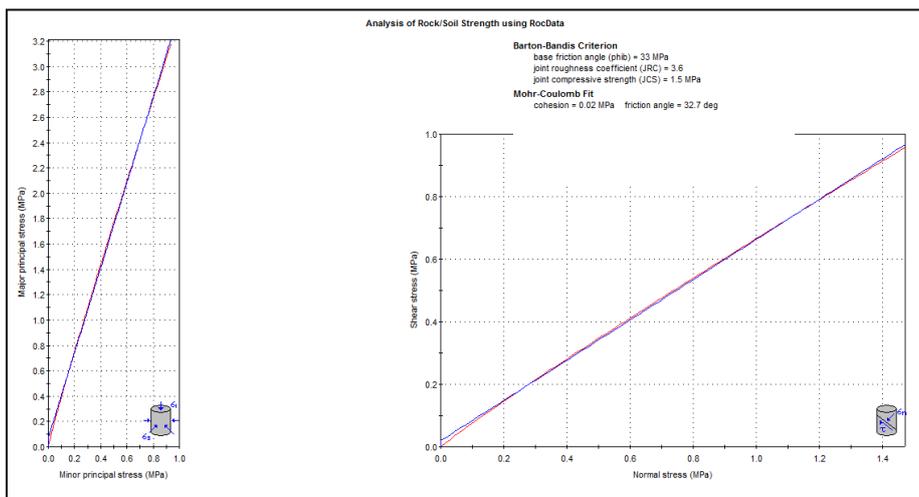


Figure 5.9 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) Talus Safsaf

Tableau 5.8 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (site talus Safsaf)

<i>Lithologie</i>	<i>Densité MN/m³</i>	<i>JCS (Résistance à la compression simple) «MPa »</i>	<i>Rugosité JRC</i>	<i>Hauteur du Talus (m)</i>	<i>Angle de frottement</i>
Calcaire travertineux	0.022	1.5	3.6	52	32.7°

Site 3 : Talus de Derguina

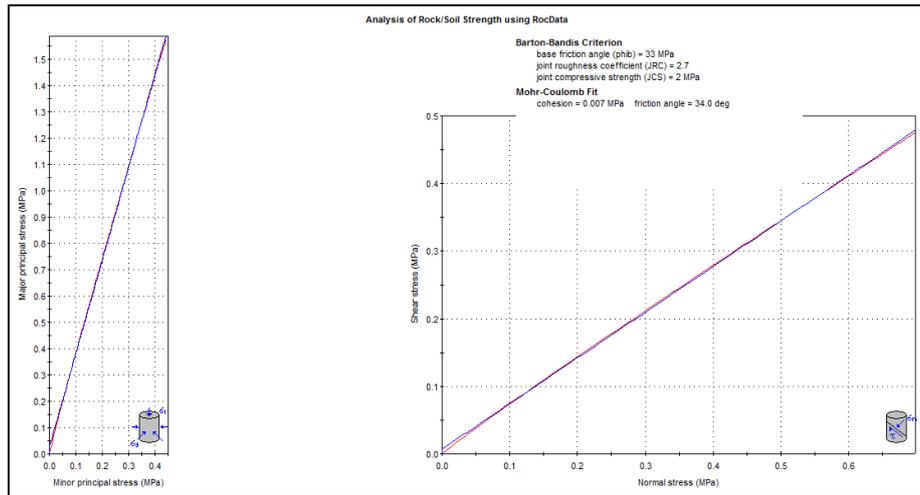


Figure 5.10 : Angle de frottement des discontinuités selon (Barton Bandis, 1990) talus Derguina

Tableau 5.9 : Caractéristiques mécaniques moyennes des discontinuités (Talus DERGUINA)

<i>Lithologie</i>	<i>Densité MN/m³</i>	<i>JCS (Résistance à la compression simple) «MPa »</i>	<i>Rugosité JRC</i>	<i>Hauteur du Talus (m)</i>	<i>Angle de frottement</i>
Calcaire marneux	0,025	2	2.7	20	34

4.2 Résultats de l’analyse cinématique

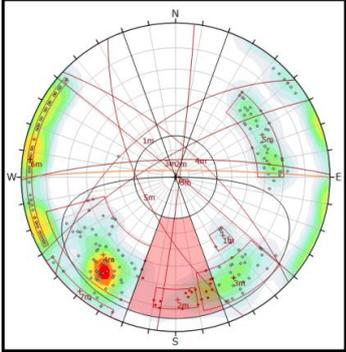
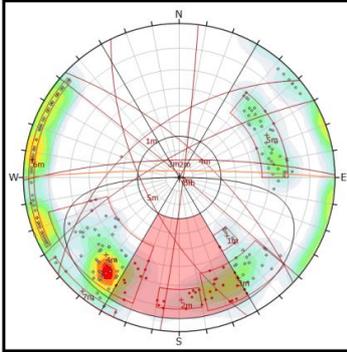
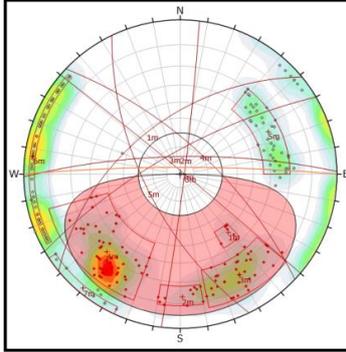
Le versant est marqué par la présence de six familles de discontinuité, en tenant compte de la pente et l’orientation du versant qui varient largement, ainsi que l’angle de frottement (30°). L’analyse cinématique a révélé selon les modes de rupture diverses possibilités :

4.2.1 Site 1 : Falaise d’Aokas

Glissement plan

Nous avons effectué plusieurs analyses cinématiques, en prenant en compte, la variation de l’orientation du versant (Tab. 5.10) et la variation de la pente (Tab 5.11).

Tableau 5.10 : Analyse cinématique - Glissement plan - selon l'orientation du talus

Limite latérale 20°				Limite latérale 30°				Sans limite latérale			
											
20°	Critique	Total	%	30°	Critique	Total	%	360°	Critique	Total	%
Tous	22	223	9.24	Tous	42	238	17.6	Tous	115	238	48.3
F1	0	0	0	F1	1	7	14.3	F1	7	7	100
F2	11	11	100	F2	11	11	100	F2	11	11	100
F3	8	34	23.5	F3	19	34	55.9	F3	34	34	100
F4	2	60	3.33	F4	10	60	16.7	F4	60	60	100

Selon les résultats qui figurent sur le tableau 5.10, nous constatons que, plus l'intervalle de l'orientation du versant, est vaste, plus les familles F2, F3 et F4 sont impliquées. Nous remarquons aussi que les quatre familles F1, F2, F3 et F4 sont incluses dans le mode de rupture plan type glissement, avec un taux global de 48%. La famille F2 est incluse à 100%, cela veut dire que c'est la famille la plus susceptible à la rupture. Dans cette étude, nous choisissons les résultats de l'analyse cinématique sans prendre en compte les limites latérales, et c'est afin de prendre en considération les irrégularités topographiques locales dues aux failles ;

La pente du versant représente également un facteur de prédisposition important. Le tableau ci-après (Tab. 5.11), représente les résultats de l'analyse cinématique en fonction de la variation de la pente, dont nous constatons des familles telles que F1 et F4 qui se manifestent à partir d'une pente variant entre 56° et 62°. À partir de 67°, la famille F3 commence à s'exprimer alors que la famille F1 est déjà engagée à 100%. Finalement la famille F4 commence à se manifester à partir de 74°. Donc la famille F1 représente le plan le plus défavorable à la rupture, type glissement plan.

Tableau 5.11 : Analyse cinématique -Glissement plan- selon la variation de la pente du versant (site d'Aokas)

<i>Pente</i>	<i>Analyse cinématique</i>	<i>Familles de discontinuités impliquées</i>			
		<i>Plan de glissement</i>	<i>Critique</i>	<i>Total</i>	<i>%</i>
56°		TOUTES	2	238	0.84
		F1	2	7	28.57
		F2	-	-	-
		F3	-	-	-
		F4	-	-	-
62°		TOUTES	6	238	2.52
		F1	5	7	71.43
		F2	-	-	-
		F3	-	-	-
		F4	1	60	1.67
67°		TOUTES	15	238	6.30
		F1	7	7	100
		F2	-	-	-
		F3	1	34	2.94
		F4	7	60	11.67
74°		TOUTES	41	238	17.23
		F1	7	7	100
		F2	2	11	18.18
		F3	12	34	35.29
		F4	18	60	30

Glissement dièdre

Tableau 5.12 : Analyse cinématique - Glissement dièdre - (Falaise d'Aokas)

	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>
F1					
Taux	79%	Peu probable	53%	39%	14%
F2	-				
Taux		74%	55%	45%	27%
F3	F2-F3 = F3-F2	-			
Taux			72%	Peu probable	52%
F4	F2-F4 = F4-F2	F3-F4 = F4-F3	-		
Taux				43%	55%
F5	F2-F5 = F5-F2	F3-F5 = F5-F3	F4-F5 = F5-F4	-	
Taux					Peu probable

Les possibilités de créer des dièdres instables sont multiples (Tab. 5.12). Il existe 12/15 cas susceptibles à la mobilisation. Chaque couple de discontinuités montre une capacité de rupture à partir d'un seuil de pente (Tab. 5.13).

Tableau 5.13 : Les seuils de pente déclenchant le glissement type dièdres

Pente	Dièdres Possibles
41° – 52°	(F ₁ - F ₆) ; (F ₁ - F ₄) ; (F ₄ - F ₅)
65° - 71°	(F ₄ - F ₆) ; (F ₅ - F ₁) ; (F ₄ - F ₃) ; (F ₆ - F ₃)
77° - 90°	(F ₄ - F ₂) ; (F ₂ - F ₃) ; (F ₂ - F ₅) ; (F ₂ - F ₆) ; (F ₂ - F ₁)

La pente du versant en question est variable (Fig. 5.11), cela veut dire que toutes les possibilités suscitées sont prédisposées à la rupture si les conditions géométriques du versant sont présentes. En revanche la surface occupée par la zone jaune est largement supérieure à celles des zones bleue et rouge qui sont concentrées essentiellement dans les parties très accidentées du versant (les miroirs de failles) et qui sont présentées par des endroits très restreints. Donc les dièdres situés dans la zone jaune dont la pente varie entre 41° et 65° sont très répandus spatialement à travers le versant, par conséquent se sont eux qui ont le plus de probabilité d'être déclenchés.

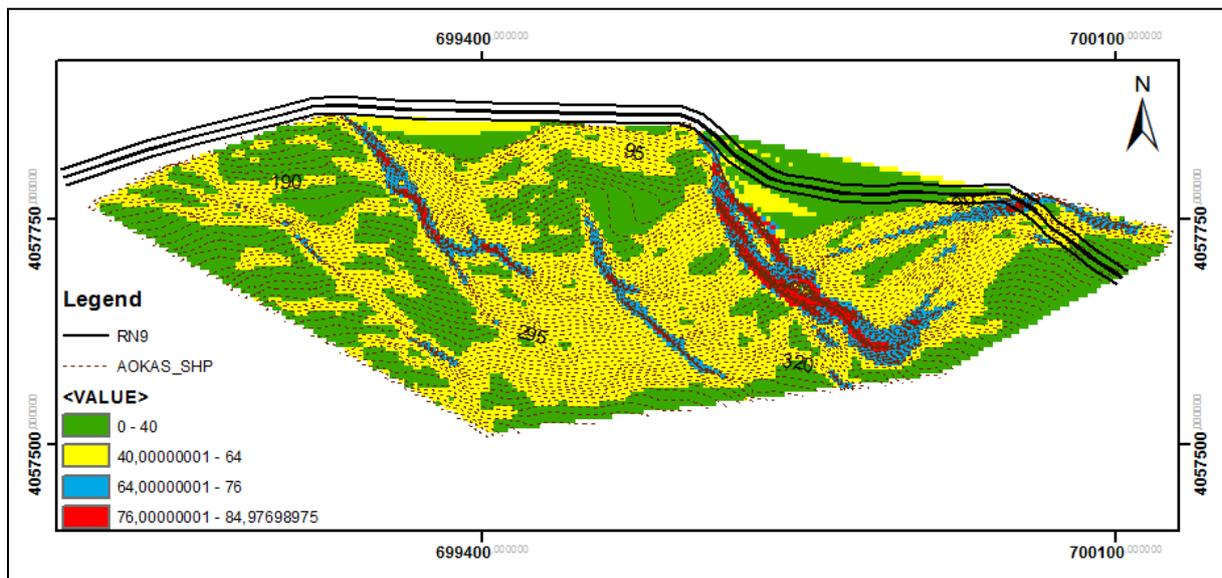


Figure 5.11 : Carte des pentes du versant nord du Cap Aokas

Basculement

L'analyse cinématique montre bien que ce type de rupture est possible (Fig. 5.12), ainsi les familles qui sont concernées directement sont F₁, F₂, F₃ et F₄. Néanmoins leur probabilité de mobilisation est variable, la famille F₂ est engagée à 100%, tandis que la famille F₃ est exposée à 55%, les familles F₁ et F₄ sont peu mobiles avec un taux qui varie entre 14% et 16%.

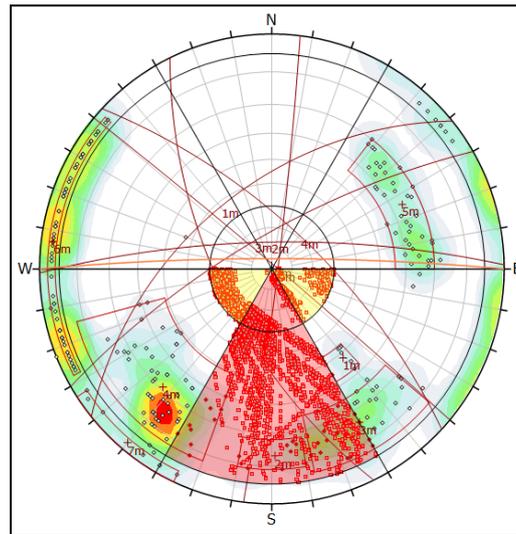


Figure 5.12 : Analyse cinématique - Basculement - (Falaise d'Aokas)

Sur le site, il n'a été jamais signalé un mode de rupture type basculement dans cette falaise, car les blocs résultant de découpage par les familles de discontinuité créent des formes orthogonales rectangulaires allongées à la base avec des hauteurs réduites. Donc la projection du centre de gravité du bloc résultant est située toujours à l'intérieur du bloc, ce qui favorise le mécanisme de rupture type glissement plan ou dièdre plutôt que le renversement.

Basculement par flexion

D'après les résultats de l'analyse cinématique pour le mode de rupture type basculement par flexion (Fig. 5.13); il est bien évident que ce mode n'est pas à craindre, car aucune possibilité n'a dévoilé une susceptibilité à la mobilisation.

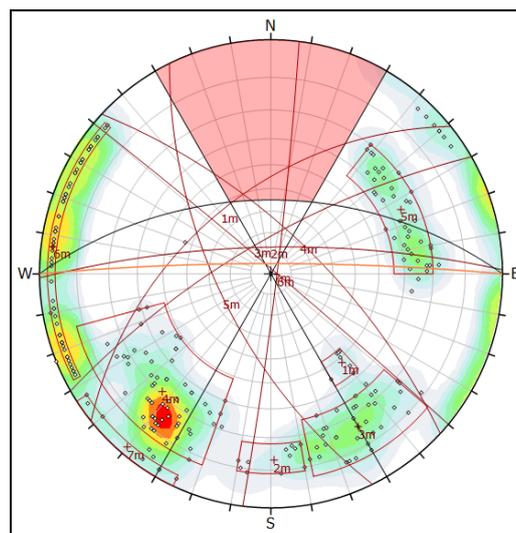


Figure 5.13 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Falaise d'Aokas)

4.2.2 Site 2 : Talus de complexe touristique Safsaf

Le talus est affecté par trois familles de discontinuité, en tenant compte de la pente moyenne abrupte (80°) du talus et son orientation (N140°), ainsi que l'angle de frottement (32°). L'analyse cinématique a révélé selon le mode de rupture diverses possibilités :

Glissement plan

D'après les résultats de l'analyse cinématique (Fig. 5.14), la seule et unique famille concernée par le mode de rupture type glissement plan est la famille F2 avec un taux de 70%, tandis que les deux familles F1 et F3 participent au démantèlement des blocs.

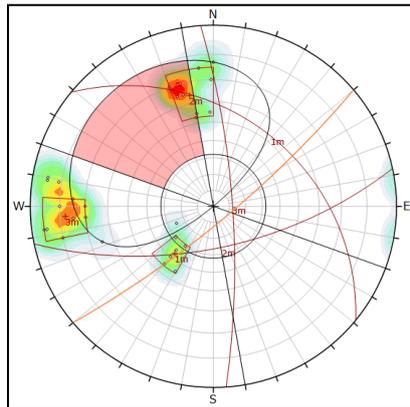


Figure 5.14 : Analyse cinématique - Glissement plan - (Talus Safsaf)

Glissement dièdre

L'analyse cinématique a dévoilé deux possibilités de rupture (Tab. 5.14), l'intersection F1-F2 représente un taux de 45% et la concentration des cercles critiques est située entre un intervalle de pente oscillant entre 25° et 30°. L'intersection F2-F3 montre un taux de 66%, et les intersections critiques se concentrent entre la pente de 70° et 80°. La création des dièdres susceptibles au glissement par l'intersection F1-F3 est peu probable.

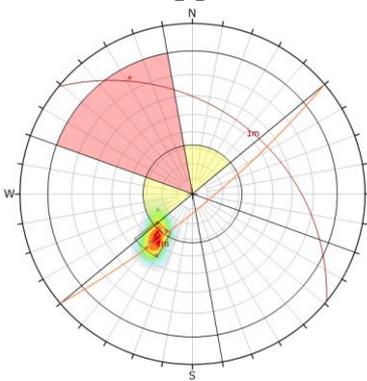
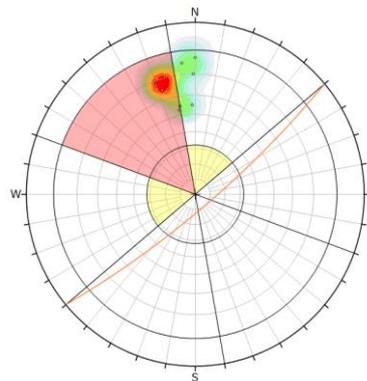
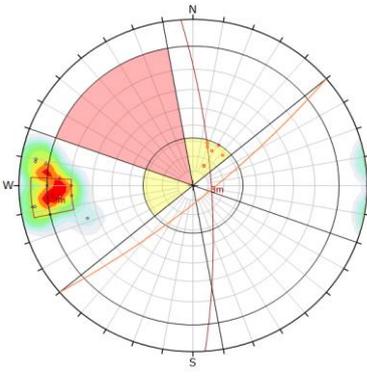
Tableau 5.14 : Analyse cinématique – Glissement dièdre – (Talus Safsaf)

F1- F2			F1- F3			F2- F3		
Critique	Total	%	Critique	Total	%	Critique	Total	%
69	153	45	14	171	8	167	253	66

Basculement

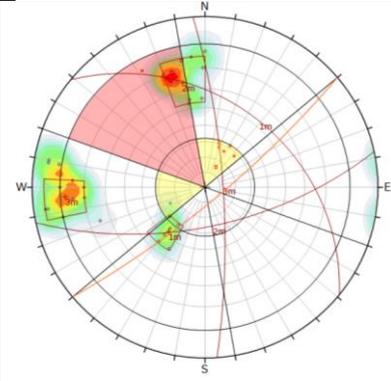
L'analyse cinématique (Tab, 5.15 et 5.16) nous a montré que la possibilité de rupture type basculement direct concerne la famille F₁ avec un taux très faible (4.76 %), tandis que la famille F₃ est prédisposée au basculement oblique, avec un taux faible de 10 %.

Tableau 5.15 : Analyse cinématique – Basculement – (talus Safsaf)

Basculement								
F1			F2			F3		
								
Basculement direct								
Critique	Total	%	Critique	Total	%	Critique	Total	%
1	21	4.76	0	55	0	0	66	0
Basculement oblique								
Critique	Total	%	Critique	Total	%	Critique	Total	%
0	21	0	0	55	0	7	66	10

La possibilité d'avoir un cercle critique provoquant un basculement (direct ou oblique) est très faible à faible. Ces résultats sont soutenus par le fait que le talus n'a pas enregistré ce type de rupture, ceci peut être justifié par la forme des blocs engendrée par le découpage subi par cette famille (espacement > persistance).

Tableau 5.16 : Analyse cinématique pour les trois discontinuités - Basculement - (Talus Safsaf)

	Basculement	Critique	Total	%
	Direct	2	435	0.46
	Oblique	7	435	1.61
	Plan de base	Critique	Total	%
	total	9	30	30
	F1	1	6	16.67
F2	7	10	70	

Basculement par flexion

Selon les résultats de l'analyse cinématique (Fig. 5.15), le mode de rupture basculement par flexion n'est pas susceptible de se reproduire au niveau de ce talus.

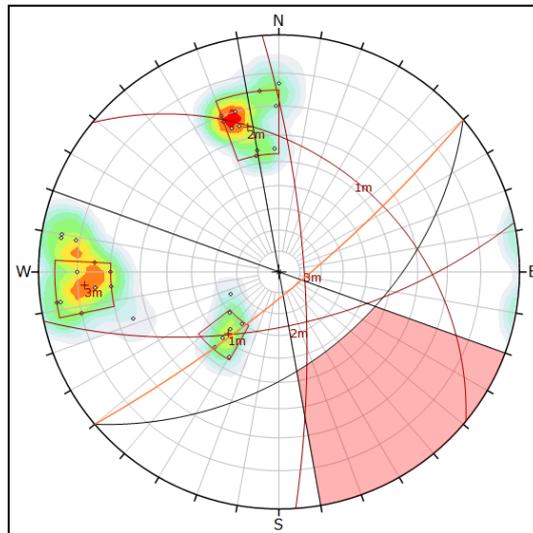


Figure 5.15 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Talus Safsaf)

4.2.3 Site 3 : Talus de Derguina

Pour établir une analyse cinématique fiable le long des talus rocheux du tronçon routier de Derguina, il faut prendre en compte la variation des orientations des talus (Fig. 5.16), dont nous constatons que l'orientation varie entre 45° et 225°. L'angle de frottement des discontinuités à prendre en considération est de l'ordre de 34°, tandis que la pente varie entre 30° et 60°.

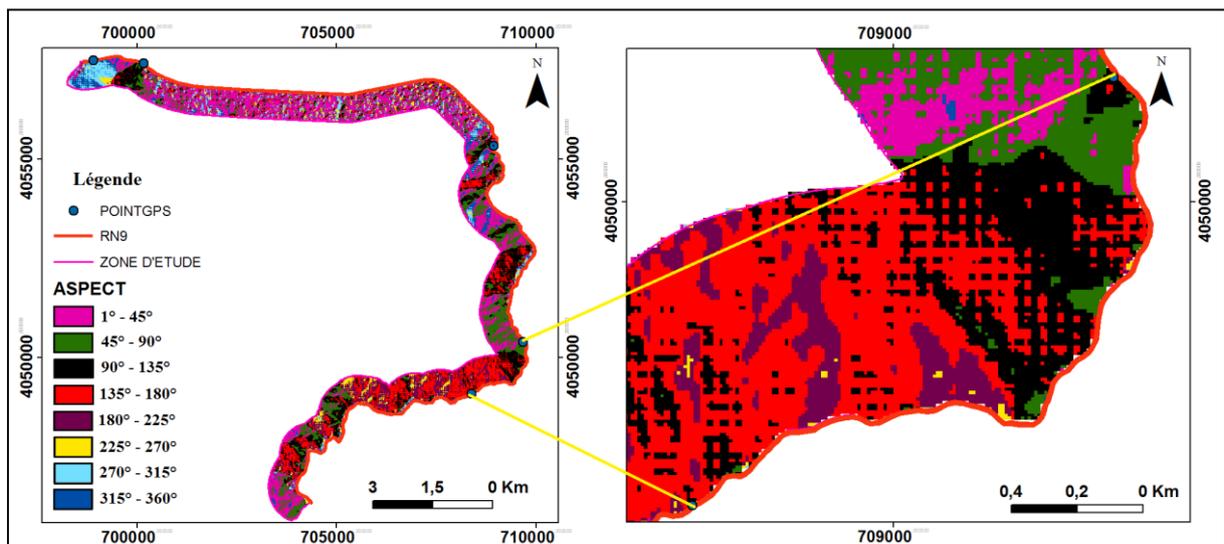


Figure 5.16 : Carte de variation de l'orientation des versants et talus exposés à la route RN9 au niveau de Derguina

Glissement plan

Les résultats de l'analyse cinématique nous ont montrés que la famille F1 est prédisposée à la rupture type glissement plan. Cependant l'orientation du talus constitue un facteur clé dans la susceptibilité de cette famille (Tab. 5.17), car elle ne peut se manifester que par des orientations comprises entre N115° et N170° et elle atteint son maximum pour les talus orientés N135° avec une limite latérale de 30°. La pente de talus est considérée également, comme un autre paramètre dont il faut le prendre en considération (Tab. 5.18), car il influence directement la susceptibilité à la rupture des blocs rocheux. L'analyse nous a montrées qu'à partir de 36°, les blocs selon le plan F1 commencent à se manifester avec un pourcentage de 4.17%, plus la pente augmente plus le taux s'amplifie et il atteint 50% pour une pente de 44° et atteint 100% à seulement 50°.

Tableau 5.17 : Analyse cinématique - Glissement plan en fonction de la variation de l'orientation des talus de Derguina

Orientation des talus	N115°			N135°			N170°		
	Critique	Total	%	Critique	total	%	Critique	total	%
F1-F2- F3	1	80	1.25	4	80	5	1	80	1.25
F1	1	24	4.17	4	24	16.67	1	24	4.17

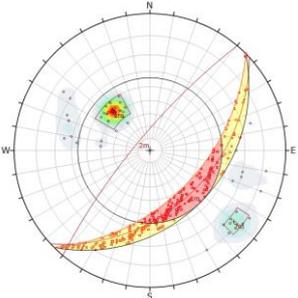
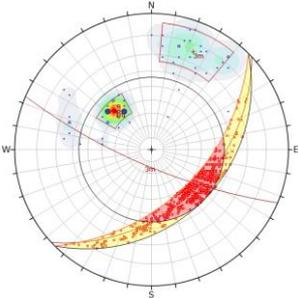
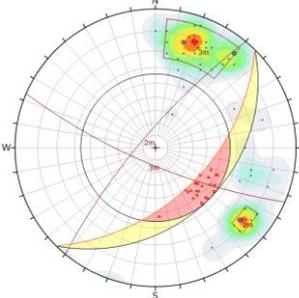
Tableau 5.18 : Analyse cinématique - Glissement plan en fonction de la variation de la pente des talus de Derguina

Pentes des talus	36°			44°			50°		
	Critique	Total	%	Critique	total	%	Critique	total	%
F1-F2- F3	1	80	1.25	12	80	15.20	24	80	30
F1	1	24	4.17	12	24	50	24	24	100

Glissement dièdre

D’après les résultats de l’analyse cinématique concernant le mode de rupture glissement dièdre (Tab. 5.19), l’intersection des deux familles F2 et F3 avec la famille F1 fournit des dièdres potentiellement dangereux et prédisposés au glissement. Par contre les dièdres formés par l’intersection de la famille F2 avec la famille F3 ne sont pas prédisposés à la rupture.

Tableau 5.19 : Analyse cinématique - Glissement dièdre (Talus Derguina)

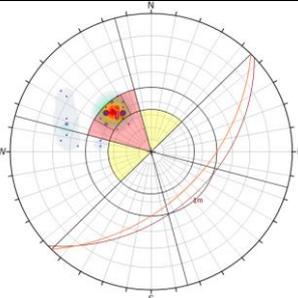
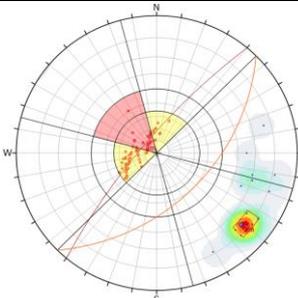
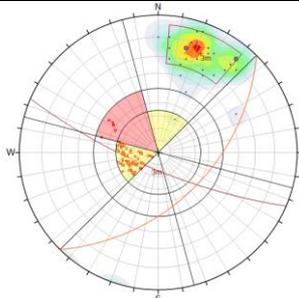
F1-F2			F1-F3			F2-F3		
								
Critique	total	%	Critique	total	%	Critique	total	%
595	1316	42.21	1162	2006	57.93	28	946	2.96

La morphologie des blocs issus du découpage par ces trois familles est représentée par des parallélogrammes favorisant ainsi le glissement type plan plutôt que glissement type dièdre.

Basculement

D’après les résultats de l’analyse cinématique (Tab. 5.20), la famille F2 possède un potentiel moyen au basculement, tandis que la famille F3 est faiblement susceptible au basculement. En revanche le basculement selon le plan F1 n’est pas à craindre. Par ailleurs, il faut signaler que les blocs produits par ses trois plans possèdent une forme allongée selon le plan F1 qui est défavorable au basculement. Donc ce mode de rupture est peu probable.

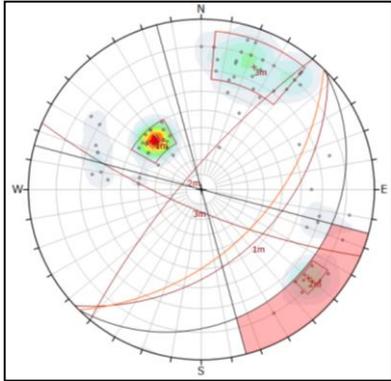
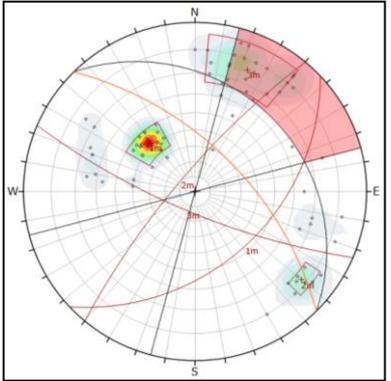
Tableau 5.20 : Analyse cinématique - Basculement - (Talus Derguina)

Famille	F1			F2			F3			
Analyse cinématique rupture type basculement										
	Direct	Critique	Total	%	Critique	Total	%	Critique	Total	%
		0	620	0	21	120	17.5	7	378	1.85
Oblique	Critique	Total	%	Critique	Total	%	Critique	Total	%	
		0	620	0	63	120	52.5	69	378	18.25

Basculement par flexion

Selon les conditions morphologiques (orientation et pentes) des talus de Derguina, nous avons pu ressortir deux cas possibles de mode de rupture type basculement par flexion (Tab. 5.21), le plan F2 et le plan F3. Ces deux plans se manifestent dans des conditions bien particulières. Cependant la famille F2 offre des blocs de petits volumes en recoupant le plan F3, ce qui rend ce mode de rupture peu envisageable du point de vue géométrique. De plus, il est peu probable de voir la discontinuité F3 se manifester, en raison de la variation de l'orientation des talus entre l'est et le sud.

Tableau 5.21 : Analyse cinématique - Basculement par flexion - (Talus de Derguina)

Famille	F2			F3		
Pente	50°			60°		
Orientation	N135°			N45°		
Basculement par flexion						
	Critique	total	%	Critique	total	%
	6	6	100	17	21	81

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'aspect structural de nos trois zones d'étude, en premier lieu, nous avons distingué et exposé les caractéristiques géométriques des diverses familles de discontinuités, ensuite et à travers l'analyse cinématique, nous avons comparé ses caractéristiques aux paramètres géométriques des pentes de chacune des zones d'étude et par conséquent, nous avons fait ressortir toutes les possibilités des divers modes de rupture susceptible. La validation de ces résultats est faite sur la base des constatations sur le terrain et nous avons pris en considération l'aspect géométrique des blocs.

Le levé géostructural est réalisé sur la base de deux méthodes de prélèvement celle de la fenêtre et celle de la scanline. Le choix de la méthode dépend des conditions de sécurité et d'accessibilité sur le terrain. La méthode de fenêtre est adoptée sur le versant du Cap Aokas tandis que la méthode du scanline est utilisée sur le talus de l'Hôtel Safsaf et les talus de Derguina.

Sur le plan structural, le versant Nord du Cap Aokas est considéré comme étant un massif très fracturé, mis à part le plan de la stratification et la série de failles, il est affecté par cinq familles de discontinuité. Ces familles contribuent à la fragilisation du massif et la génération des blocs de divers volumes qui sont susceptibles à la rupture selon différents modes de rupture. Le talus en face de l'Hôtel Safsaf est affecté par deux familles de discontinuité en plus du plan de stratification, le phénomène de karstification au niveau de ces familles accentue l'action d'altération des joints et fragilise le talus. Par conséquent, les blocs engendrés sont de taille et de volume très variables décimétrique à métrique. Les talus de Derguina sont imprégnés par un plan de stratification très marqué, ils sont fracturés par deux familles de discontinuité, formant ainsi des blocs rectangulaires de volume décimétrique.

De point de vue analyse cinématique, plusieurs possibilités sont dévoilées pour chacun des sites, Le site du Cap Aokas est caractérisé essentiellement par deux modes de rupture, glissement plan et glissement dièdre, dont le plan de stratification représente le plan le plus favorable au glissement. Le site du talus Hôtel Safsaf est marqué par le mode de rupture type glissement plan et glissement dièdre. A travers les talus rocheux de Derguina, le glissement plan est très répandu et il représente le mode de rupture le plus probable dans ce site.

L'analyse cinématique et les observations sur le terrain ont montré qu'en plus de l'agencement structural entre les différentes familles de discontinuités, il y a les paramètres géométriques des blocs et les caractéristiques morphologiques de la pente qui jouent un rôle déterminant dans le choix des plans de rupture probables à prendre en considération dans l'évaluation de l'aléa et du risque de chute de bloc.



**CHAPITRE VI « ÉVALUATION DE
LA SUSCEPTIBILITÉ AUX
CHUTES DES BLOCS »**



1. Introduction

Le présent chapitre va aborder l'évaluation de la susceptibilité à la rupture des blocs rocheux de chaque site, sachant que le phénomène sera étudié soit au niveau des talus, soit à travers l'intégralité du versant, ainsi l'échelle d'étude diffère d'un site à l'autre. Par conséquent, le choix de la méthode d'évaluation sera sélectionné en fonction des objectifs souhaités qui dépendent du degré de précision.

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent (analyse cinématique) nous ont permis de focaliser l'évaluation de la susceptibilité à la mobilisation uniquement sur les possibilités structurales défavorables validées sur le terrain.

Le site d'Aokas sera évalué selon la méthode MATTEROCKING, basée sur la distribution aléatoire des discontinuités ; par conséquent, des cartes de probabilité à la rupture seront fournies pour chaque possibilité détectée par l'analyse cinématique et une carte de susceptibilité à la mobilisation sera établie. Vu la surface restreinte, le talus de l'hôtel Safsaf est examiné selon la technique Alpine, c'est-à-dire un constat direct est réalisé sur les lieux, et la probabilité à la rupture est évaluée sur la base des observations des blocs susceptibles et l'appréciation de l'ingénieur géologue-cordiste. Au niveau du site de Derguina, on s'intéresse uniquement au phénomène du talus, le phénomène du versant est exclu puisque la taille des blocs est réduite, donc les blocs rocheux seront fragmentés et n'atteignent jamais la route RN9. Pour évaluer la susceptibilité à la rupture, nous avons adopté une méthode globale qui consiste à comparer les caractéristiques des discontinuités avec la pente des reliefs et faire ressortir la répartition spatiale des zones susceptibles selon les conditions révélées par l'analyse cinématique, et en se basant sur les constatations sur le terrain et en utilisant le SIG.

2. Evaluation de la probabilité de rupture (versant cap Aokas)

Pour l'évaluation de la probabilité de rupture, la méthodologie d'auscultation des falaises MATTEROCK (Jaboyedoff et al. 1999) sera adoptée. Elle est basée sur le principe que la présence d'un nombre de discontinuité dans une surface topographique représente une probabilité \mathbf{P} ($\mathbf{P} = 1 - e^{-N}$) qu'une structure dangereuse existe ; (N est le nombre moyen de discontinuités trouvées sur une distance ou une surface). Donc, plus le nombre de discontinuité N est élevé, plus la probabilité de la présence des structures dangereuses est élevée et elle se rapproche de 100% (Pour N =1 P ≈ 63%, pour N =3, P ≈ 95% et pour N =4.6, P ≈ 99%). Par conséquent, la susceptibilité à la rupture augmente. Pour calculer le nombre de

structures dangereuses N, nous avons utilisé le logiciel open source de MATTERKING V.2 de CREALP.

En utilisant le MNT, ce programme permet de comparer les données structurales aux données topographiques (pente et orientation) dans le but d'estimer le nombre moyen des discontinuités susceptibles qui intersectent les surfaces topographiques du relief. Ainsi, il permet de localiser les instabilités rocheuses et de définir leur répartition spatiale à travers le relief.

Le programme MATTEROCKING utilise souvent l'orientation de la surface topographique afin de calculer le nombre de discontinuité pour chaque cellule. Toutefois, il compare les caractéristiques géométriques moyennes des discontinuités avec le MNT. Il s'agit de la pente et la direction de la pente, l'espacement (L) et la persistance (T). Entre autres, ce programme peut calculer la pente et l'orientation du relief, ainsi que de détecter les zones de glissement potentiel.

La probabilité de la rupture des blocs est donnée par la densité pondérée de la fracturation (M. Jaboyedoff et al, 2004) et la classification de la susceptibilité à la rupture en zones (faible, moyen et fort) est obtenue en additionnant et en normalisant pour chaque cellule du MNT toutes les possibilités de présence des structures dangereuses de différents types, soit plans ou dièdres (A.Pedrazzini et al, 2011 ; B.Matasci et al, 2015).

2.1 Résultats d'évaluation CAP AOKAS

L'évaluation est effectuée sur la base d'un levé topographique issu de la photogrammétrie. Ce levé est fourni par la DTP de la wilaya de Béjaia et il est établi par le bureau d'études IMSRN_{Algérie}. Le levé est établi en 2016 sur la base de 800 photos d'hélicoptère, un nuage de 32 millions de points et 13 points de calage topographique au sol. Selon le BET IMSRN_{France}, la distance entre la caméra et le sol n'a pas été enregistrée pendant le vol. Les prises des vues ont été essentiellement réalisées à l'horizontale, mais certaines ont été inclinées vers le bas et qu'il n'y a pas eu de vol nadiral. Le levé est exporté vers le logiciel ARCGIS10.8, dont nous avons converti les données vectorielles en données Raster, et nous avons généré un MNT de 5m de résolution (Fig. 6.1).

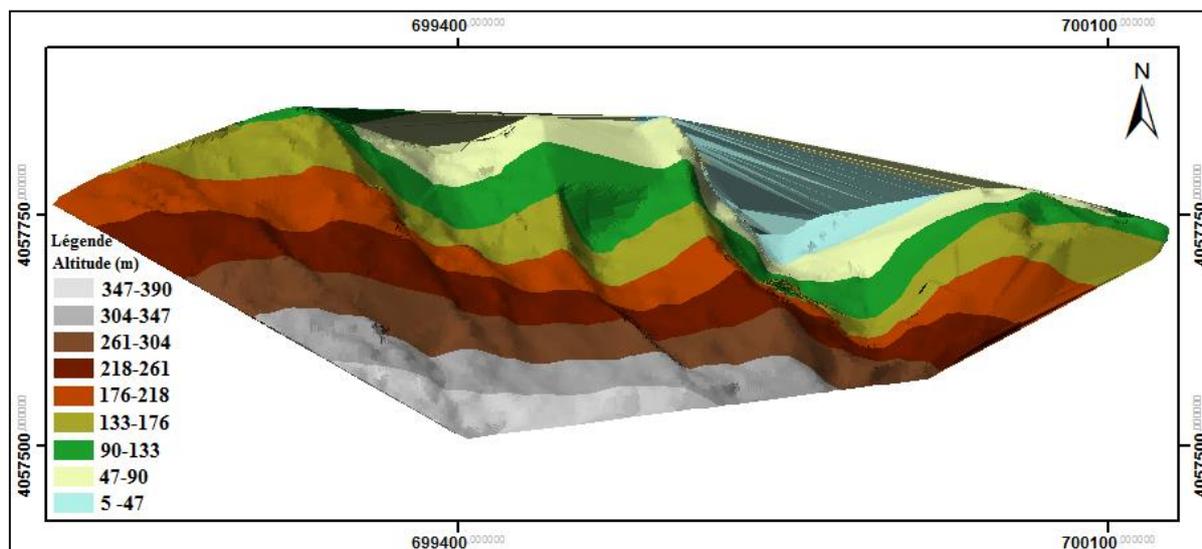


Figure 6.1 : Modèle numérique du terrain de 5m de résolution (Cap Aokas)

Sur la base de l'analyse cinématique, seules deux modes de rupture sont désignés défavorables. Il s'agit de glissement plan et de glissement dièdre selon différents et plusieurs plans de discontinuités. La comparaison des caractéristiques géométriques des discontinuités susceptibles à la rupture avec les caractéristiques topographiques du relief a mis en évidence les résultats suivants :

➤ **Glissement plan**

Les familles de discontinuité qui sont concernées par ce mode de rupture sont F1, F2, F3 et F4. La comparaison de la pente et la direction de la pente de ces familles avec la topographie nous ont dévoilé ce qui suit (Fig. 6.2):

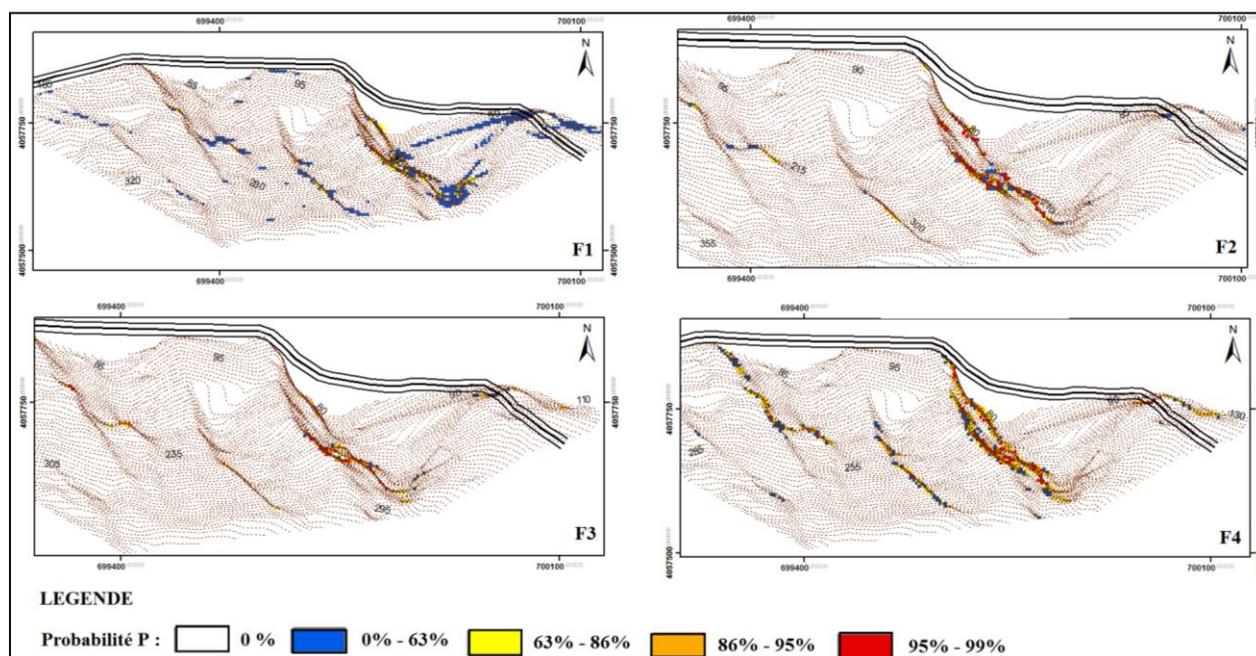


Figure 6.2 : Répartition spatiale des probabilités de rupture type glissement plan des plans de discontinuités (F1, F2, F3 et F4) à travers le versant du Cap Aokas

À travers ces résultats, nous constatons que la répartition de ce mode de rupture est concentrée essentiellement dans les pentes très accidentées. Ceci est expliqué par le fait que les failles ont créé une irrégularité d'orientation locale des talus par rapport à la direction moyenne du versant, également elles contribuent à l'augmentation brusque de la pente des talus ce qui permet de créer des conditions de prédisposition au glissement plan pour ces quatre familles de discontinuités.

Le nombre des cellules topographiques occupées par des probabilités de présence d'une structure dangereuse diffère d'une famille à l'autre (Fig. 6.3). Cependant, la famille F1 occupe plus de cellules par rapport aux autres, c'est la possibilité la plus répandue à travers la falaise dans le mode de rupture glissement plan. Ceci est expliqué par le fait que la direction de pendage de cette famille correspond à la direction moyenne du versant. Toutefois, la famille F4 présente une répartition spatiale également importante et le nombre de cellules qui ont une probabilité de trouver une structure dangereuse égale à 100% occupe 13 cellules, c'est une surface considérée importante et c'est expliqué par le fait que la direction de pendage de cette famille correspond à l'orientation des talus créés par les failles.

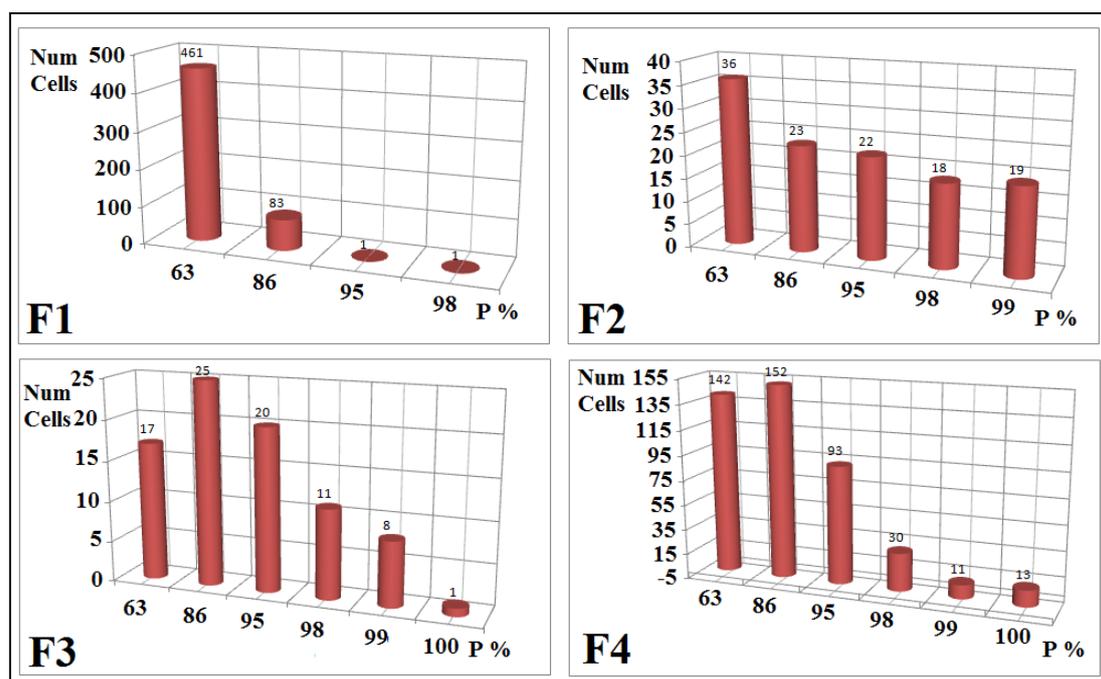


Figure 6.3 : La distribution des nombres de cellules occupés par les probabilités de rupture type glissement plan à travers le versant Nord du Cap Aokas

➤ **Glissement dièdre**

Selon les résultats de l'analyse cinématique douze sur quinze (12/15) intersections sont susceptibles à la rupture, en comparant les paramètres géométriques de ses plans avec le MNT nous avons obtenu les résultats ci-après (Fig. 6.4).

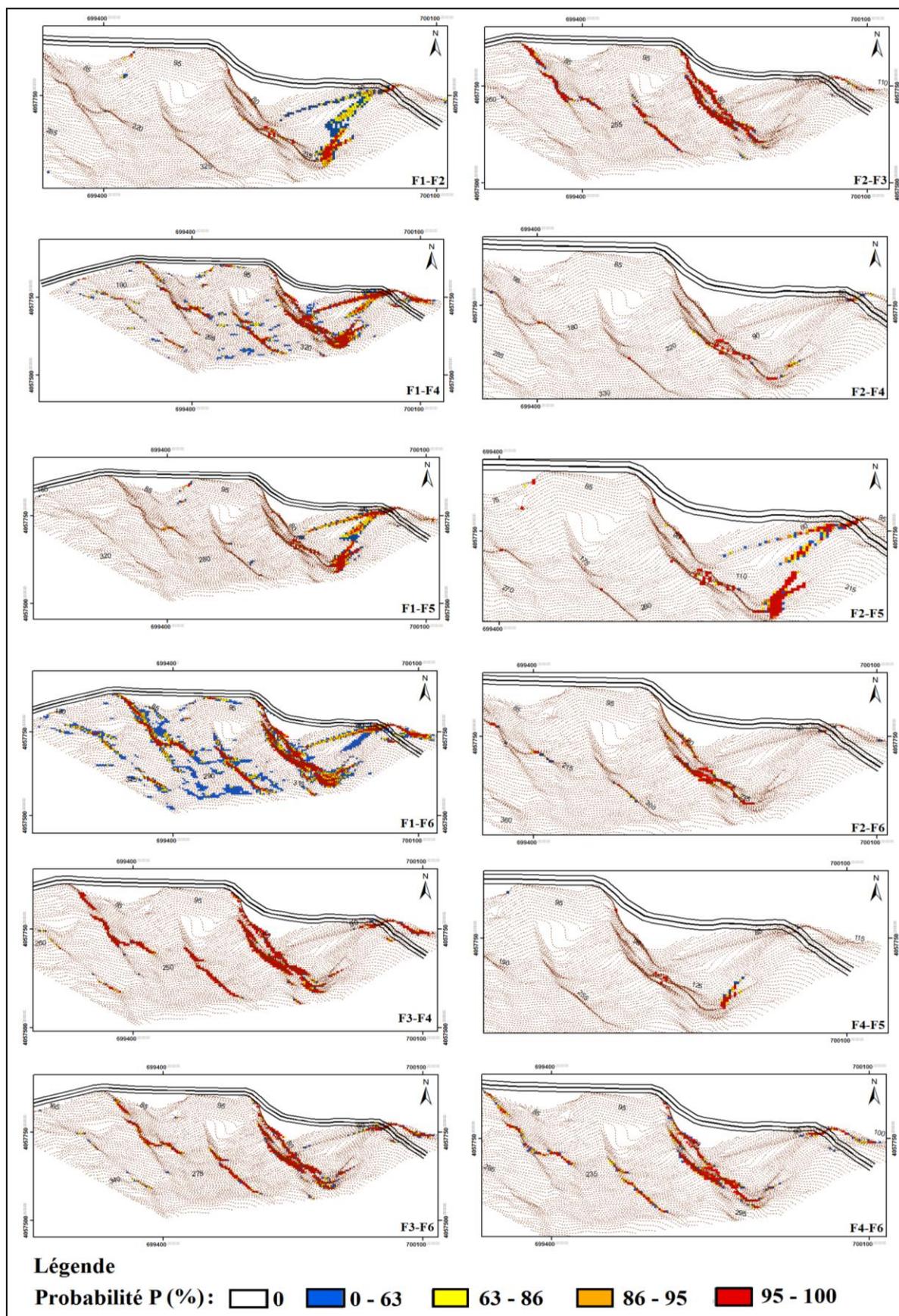


Figure 6.4 : La répartition spatiale des structures dangereuses type dièdre à travers le versant Nord d'Aokas

D'après les résultats, nous remarquons que pour la totalité des intersections, il y a une forte concentration des dièdres dangereux et susceptibles à la rupture dans les pentes très raides (pente > 70°). Ceci concorde avec les résultats de l'analyse cinématique, en revanche nous constatons que l'intersection F1-F6 est très répandue spatialement à travers le versant avec 330 cellules possédant une probabilité de 100% de trouver un dièdre susceptible (Fig. 6.5). Ceci est expliqué par le fait que l'intersection F1-F6 est instable à partir d'une pente minimale comprise entre 41° et 52° selon l'analyse cinématique.

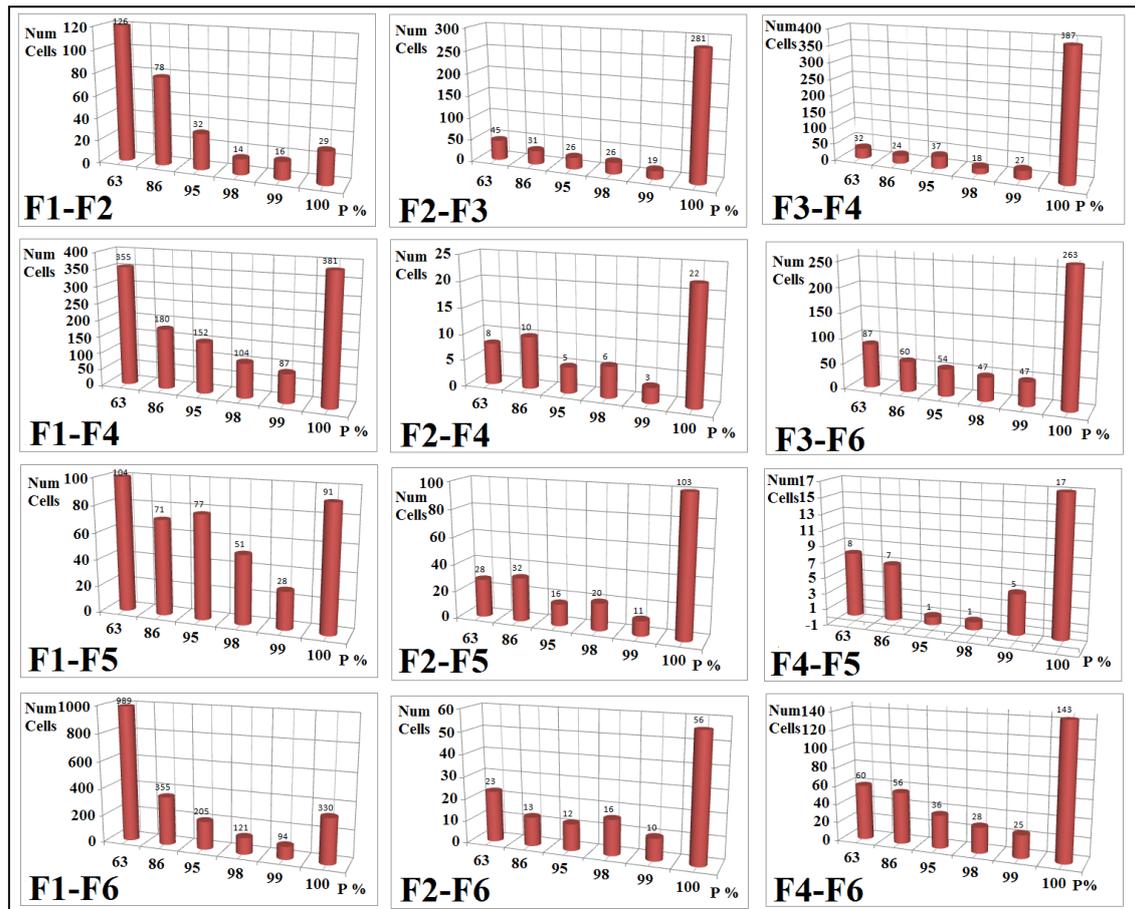


Figure 6.5 : la distribution des nombres de cellules occupés par les probabilités de rupture type glissement dièdre à travers le versant Nord du Cap Aokas

Pour obtenir la carte de probabilité à la mobilisation, on fait une sommation de toutes les possibilités plan et dièdre puis, on fait la normalisation pour obtenir en fin une classification de probabilité de rupture (Fig. 6.6)

$$P = \sum P_{plans} + P_{dièdres}$$

La classification est établie selon la classification des ruptures naturelles de Jenks, en regroupant les données dans des classes, de telle façon à minimiser l'écart moyen de chaque

classe par rapport à la moyenne de la classe, et à maximaliser l'écart de chaque classe par rapport à la moyenne des autres classes.

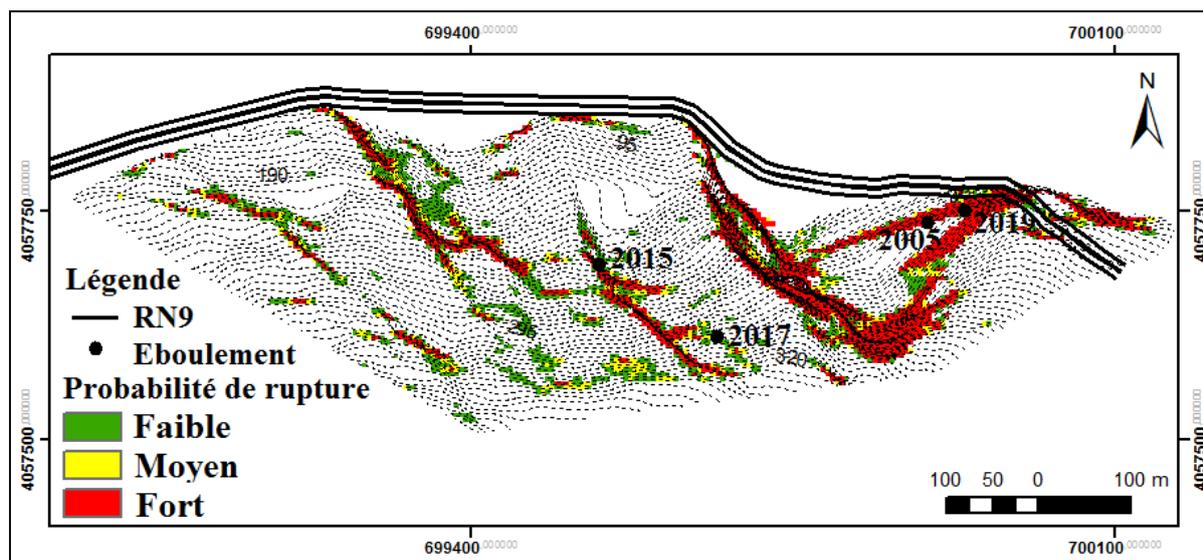


Figure 6.6 : Carte de susceptibilité à la rupture versant Nord Cap Aokas (Ladjel et al., 2024)

Nous avons superposé les zones sources des blocs des éboulements déjà vécus à travers la falaise (figure). Il est bien évident que tous les événements enregistrés sont situés dans la zone rouge de forte probabilité de rupture.

La répartition spatiale des zones de forte et moyenne probabilités de rupture est localisée essentiellement, dans les pentes très raides orientées vers le Nord et le Nord-Est.

Pour valider les résultats obtenus, nous avons exploité et examiné les photos aériennes du versant (Fig. 6.7) et nous avons constaté des traces d'arrachement des blocs le long des miroirs des failles qui constituent les reliefs très accidentés du versant. Donc, les observations sur le terrain confirment les résultats obtenus par cette évaluation.



Figure 6.7 : Répartition des zones sources des blocs à travers la falaise (DTP Béjaia 2016)

3. Evaluation de la probabilité de rupture (talus SAFSAF)

Lorsque le talus contient des blocs rocheux potentiellement instables et nettement identifiés et localisés, il s'agit d'un aléa localisé. De ce fait, chaque bloc sera caractérisé par son volume et son mécanisme de rupture spécifique. Pour évaluer la susceptibilité de rupture de ces blocs localisés, il faut adopter une approche détaillée basée sur une connaissance déterministe des discontinuités par observation directe (in-situ). Afin de caractériser le massif en surface et mieux connaître l'extension de certaines fractures critiques délimitant des compartiments rocheux, la technique Alpine semble être efficace. La reconnaissance en falaise par technique Alpine est adaptée pour effectuer un examen rapproché de zone d'accès difficile ou impossible, les inspections de terrains sont réalisées par des géologues cordistes expérimentés assistés de techniciens cordistes. En revanche l'étude se limite aux observations en surface de la paroi, les objectifs de cette technique sont multiples : - La collecte des informations structurales locales ;

- Caractérisation des critères d'évolution ;
- Détermination des critères dimensionnels ;
- Possibilité de prises de vues latérales sur d'autres points de falaise.

3.1 Résultats d'évaluation Talus SAFSAF

La zone d'étude est caractérisée par une étendue réduite. La zone principale est constituée par un talus sub-vertical de 52 m de hauteur sur 40 ml de long. Suite à l'éboulement survenu le 14/1/2017 au niveau de ce talus, dont certains blocs ont atteint la route et le parking du complexe touristique (Fig.6.8). Le site a fait l'objet d'une étude et travaux de protection contre les chutes de blocs. Le Bureau d'études CAN a été sollicité et il a effectué un diagnostic géotechnique type G5 selon la norme européenne NFP94-500. Le but de cette intervention est la protection des usagers de la route et de l'hôtel contre le risque de chute de blocs. Vu l'état actuel du talus qui est protégé et soutenu, nous avons exploité les constats de terrain et le rapport du BET CAN, pour évaluer l'état du talus avant confortement.



Figure 6.8: Eboulement Safsaf (14/01/2017)

D'après l'étude menée par le BET CAN, le talus est marqué par la présence de neuf secteurs instables situés dans la partie centrale du talus (Fig. 6.9), le volume des blocs diffère d'un bloc à l'autre (Tab. 6.1)

Il existe également un surplomb qui déborde de 3 à 4m. Les parties Est et Ouest du talus n'ont pas enregistré la présence des blocs susceptibles à la rupture, donc elles ne présentent pas une menace sur les usagers de la route RN9.

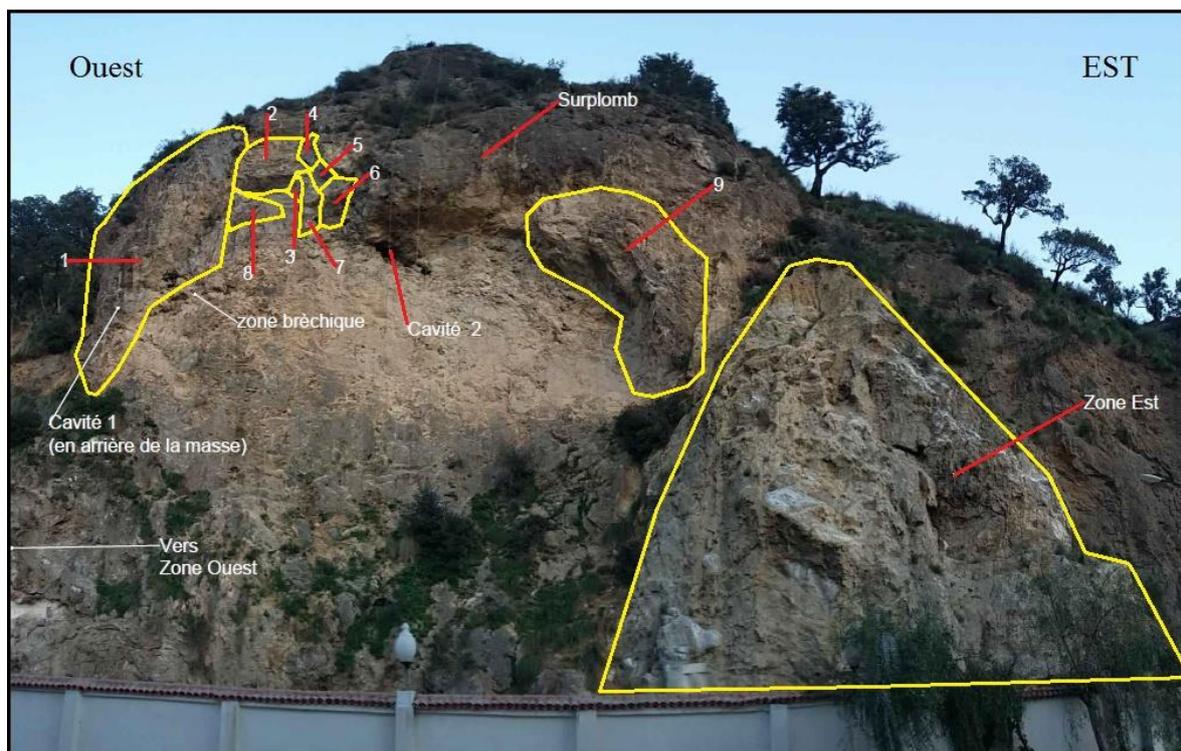


Figure 6.9 : Les instabilités rencontrées sur le talus en face de l'hôtel Safsaf (BET CAN)

La description géométrique de ces instabilités est résumée dans le présent tableau :

Tableau 6.1 : Mesures géométriques des instabilités et leurs mécanismes de rupture talus hôtel SAFSAF

N° Instabilité	Hauteur (m)	Largeur (m)	Épaisseur (m)	Volume (m ³)	Inclinaison du plan de glissement	Mécanisme de rupture
1	24	10.6	4.7	1195	35°	Glissement
2	5	4.5	1.3	29	70°	Glissement / rupture surplomb
3	1.8	1.2	0.2	0.4	70°	Glissement dièdre
4	3.5	1.2	0.7	2.9	70°	Glissement /Basculement
5	2	1.4	0.4	1.1	70°	Glissement
6	2	1.5	1.25	3.8	70°	Glissement / rupture surplomb
7	5	1.1	1.3	7.2	70°	Glissement
8	3	2	0.7	4.2	70°	Glissement / rupture surplomb
9	A	8	5	400	60°	Surplomb
	b	16	4			

Au niveau de l'instabilité 1 (Fig. 6.10), les constats ont révélé un plan de fracturation qui est incliné à 70° , et un plan de glissement incliné à 35° . Il existe également une large cavité étendue sous la masse, avec un ruissellement des eaux important et calcification des parois. L'érosion régressive grignote la roche d'Ouest en Est, vu le volume important de la masse, le risque d'éboulement (glissement en masse) dépend de la vitesse de l'érosion.

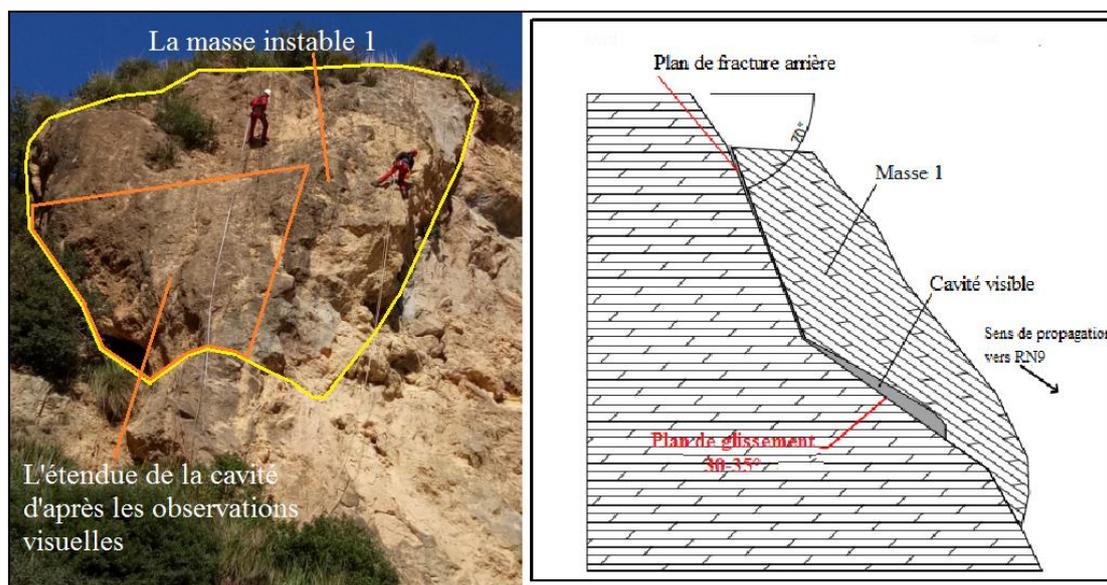


Figure 6.10 : Vue de face de la masse 1 et la coupe de principe de la masse 1 (BET CAN)

L'ensemble des blocs formant les instabilités de 2 à 8 sont en surplomb et situés sur la zone de départ des éboulements précédents (Fig. 6.11). Ils sont déposés sur une pente d'environ 70° , ils sont découpés par divers plans de fracture et possèdent des volumes variables, divers mécanismes de rupture sont observés notamment le glissement plan et dièdre et rupture surplomb (Fig. 6.12). Les instabilités sont classées dans la catégorie chute de blocs (Tab. 6.1).

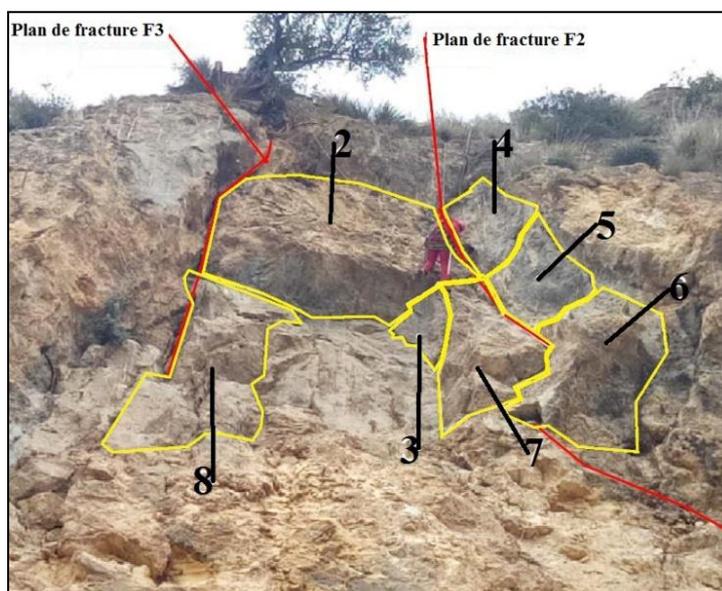


Figure 6.11 : Planche photographique des instabilités 2-8 (BET CAN)

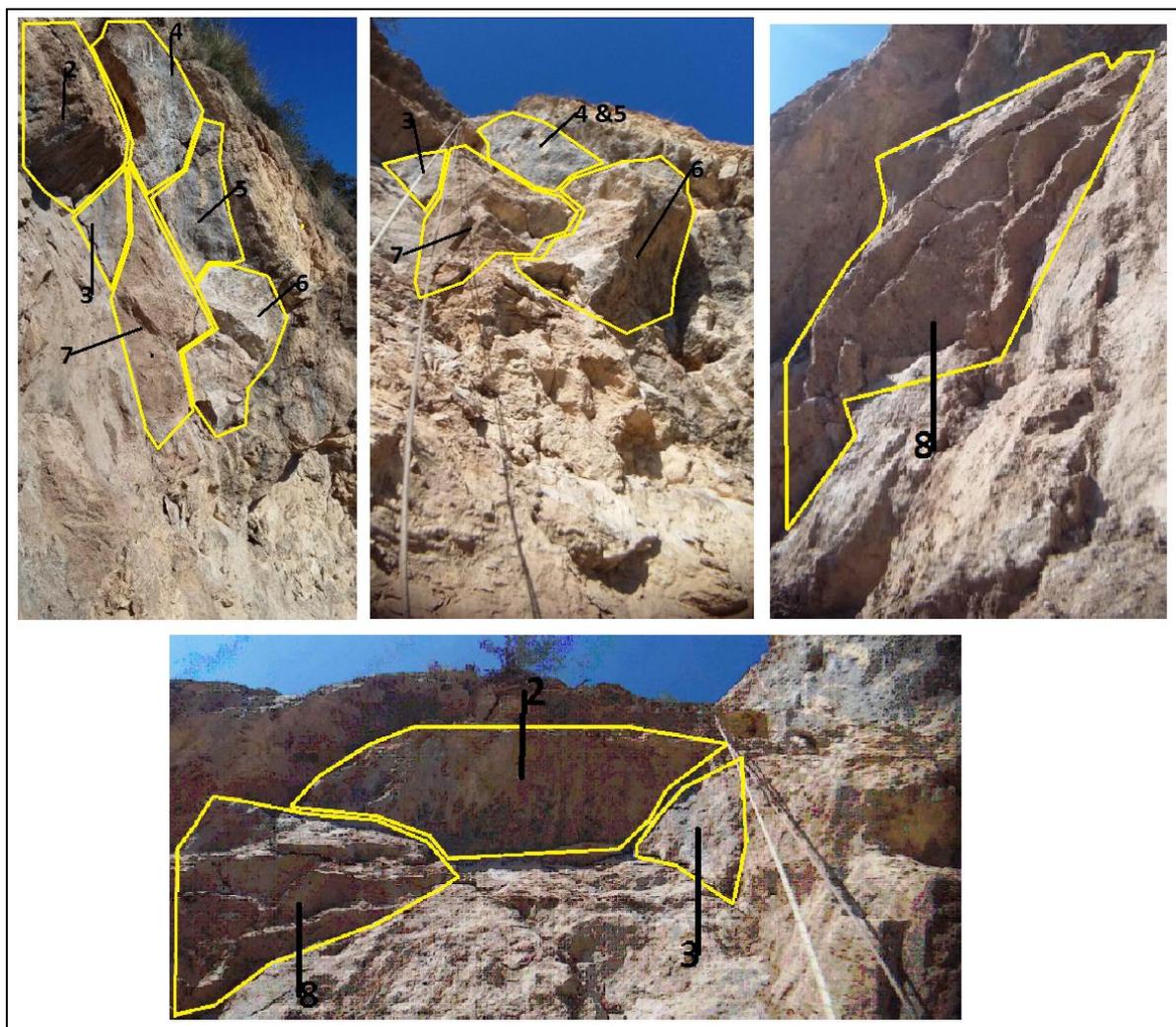


Figure 6.12 : Différentes position de prise des photos pour l'ensemble de stabilité 2-8 (BET CAN)

L'instabilité 9 (Fig. 6.13) est constituée de deux compartiments en écaille, formant un surplomb sur une pente qui varie entre 60° et 70° . Le plan de fracture arrière est visible du côté Ouest, le volume total est estimé à 400 m^3 classant ainsi cette instabilité dans la catégorie mouvement en masse (éboulement).

Le surplomb est situé à 10m de hauteur et il déborde de 3 à 4m au-dessus de la route (Fig. 6.14). Il existe des traces visibles des tirs de mines à plusieurs endroits de la paroi, qui ont été mis en œuvre lors de la réalisation de la route et qui ont contribué à leur création. Ce surplomb est aggravé par la présence d'une cavité qui existe au pied du surplomb, le volume de cette cavité est en évolution suite à l'érosion régressive.



Figure 6.13 : Planche photographique de l'instabilité 9 (BET CAN)

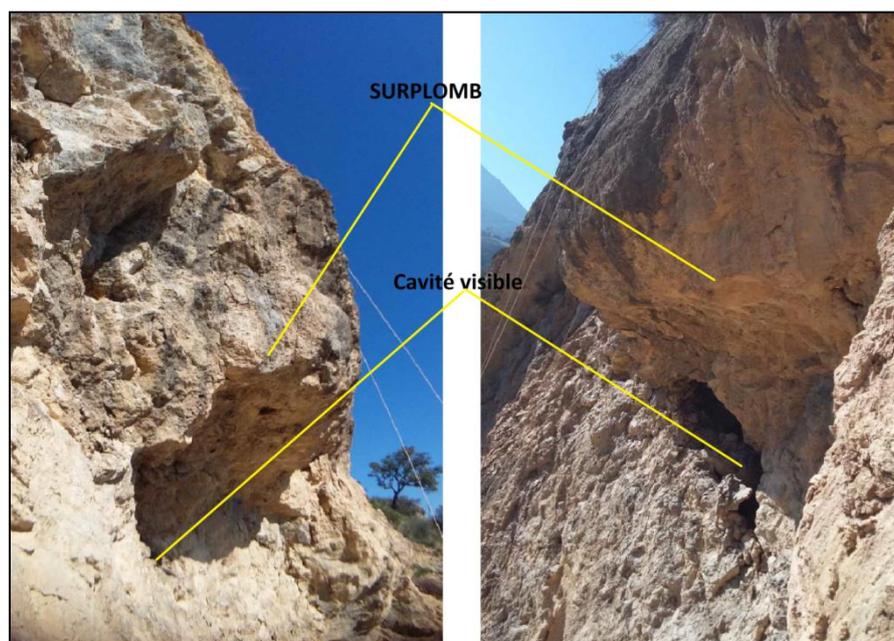


Figure 6.14 : Planche photographique du surplomb (BET CAN)

4. Evaluation de la probabilité de rupture (talus DERGUINA)

L'évaluation de la susceptibilité à la rupture des blocs au niveau des talus rocheux de Derguina sera effectuée sur la base des résultats de l'analyse cinématique. Cette dernière a dévoilé essentiellement un mode de rupture de type glissement plan selon le plan F1 qui représente le plan de stratification. Et pour que ce plan se mette en mouvement, il nous faut deux conditions, la première est que le seuil minimal de la pente doit être supérieur ou égal à 36° et le deuxième, également, c'est qu'il faut avoir une orientation des talus comprise entre 115°N et 170°N .

En utilisant le SIG (logiciel ARCGIS10.8), et sur la base du MNT de la zone d'étude, on fait l'extraction des zones où l'orientation des talus est comprise entre 115°N et 170°N. C'est au niveau de ces talus qu'on peut trouver des blocs rocheux susceptibles à la rupture puisque les pentes sont essentiellement supérieures à 45°. Les constats sur le terrain valident ces résultats soit par la présence des blocs au bord de la route, soit des traces d'arrachement des blocs sur les talus, ou encore, la présence des blocs en état critique vis-à-vis de la stabilité sur les talus.

4.1 Résultats d'évaluation talus de DERGUINA

Le MNT de la zone d'étude (Fig. 6.15) est téléchargé depuis le site Earth Science (USGC), il possède une résolution de 12m. À l'aide du logiciel ARCGIS, nous avons établi une carte d'orientation des talus (Fig. 6.16) pour définir les zones susceptibles au glissement plan. En raison du manque de la précision souhaitée du MNT, l'évaluation de la susceptibilité à la rupture sera effectuée uniquement au niveau des talus et non pas à travers le versant.

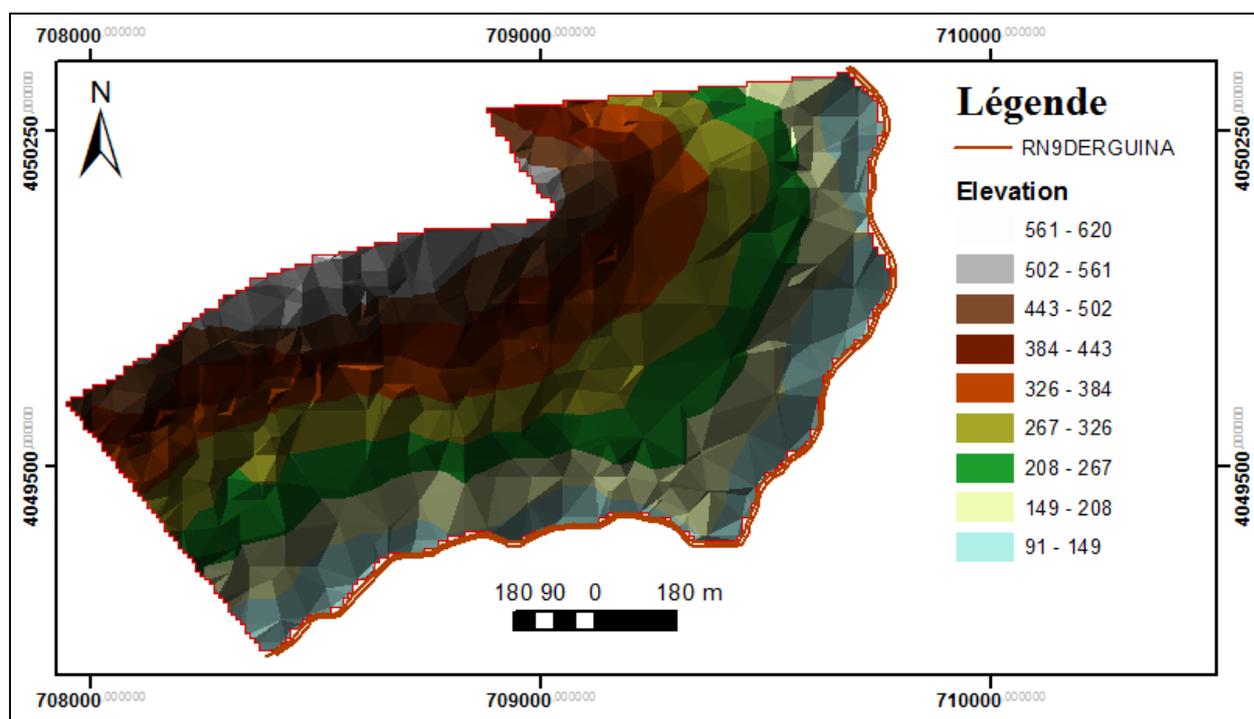


Figure 6.15 : Modèle numérique de terrain (talus de Derguina)

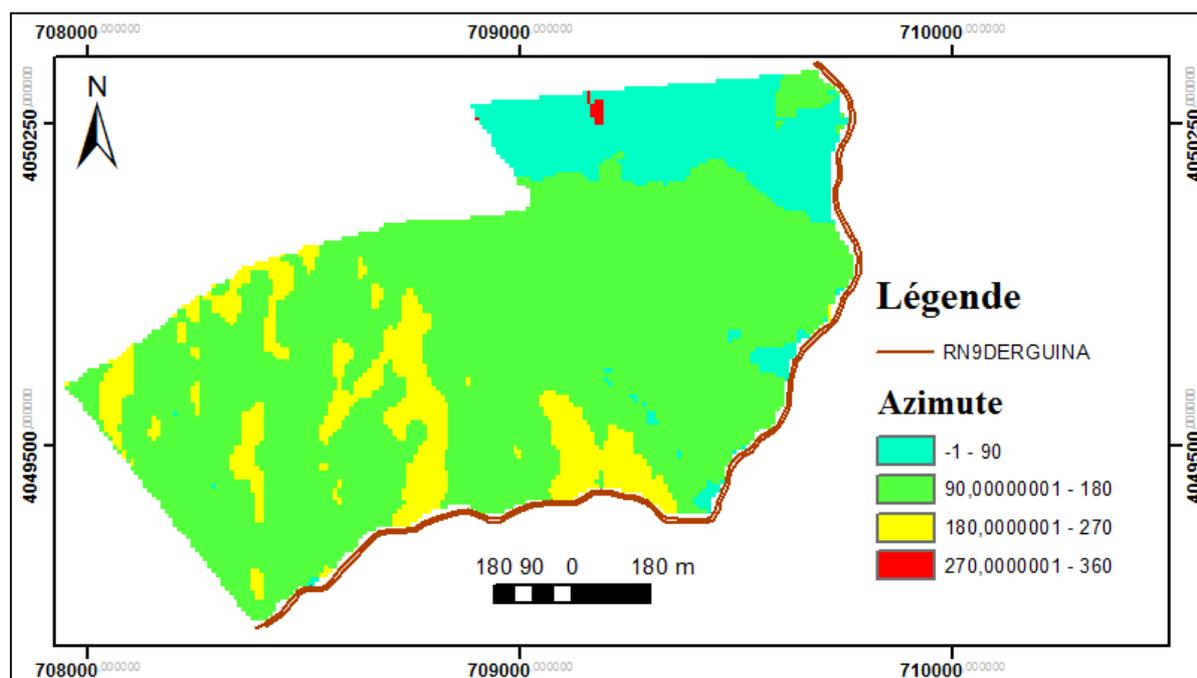


Figure 6.16 : Carte d'orientation des talus (talus Derguina)

Après l'extraction des orientations comprises entre 115°N et 170°N, et sachant que les talus qui sont directement exposés à la route RN9 sont caractérisés par une pente moyenne supérieure à 45°, nous avons obtenu une carte qui représente les talus contenant probablement des blocs prédisposés à la rupture planaire selon le plan de stratification (Fig. 6.18).

La classification de probabilité de rupture est établie en fonction de la probabilité d'obtenir un plan critique selon la variation de l'orientation des talus issue de l'analyse cinématique (Fig 6.17).

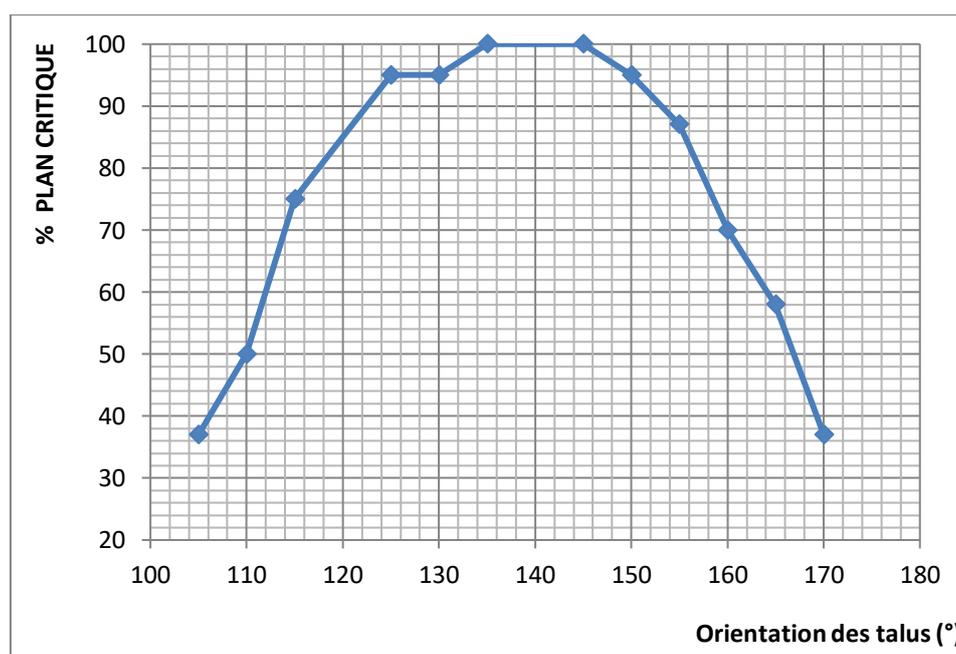


Figure 6.17 : Influence de l'orientation du talus sur la probabilité de trouver un plan critique

Selon ce graphe, la possibilité optimale (100%) d'avoir un plan critique est atteinte, lorsque l'orientation des talus est comprise entre 135° et 145° .

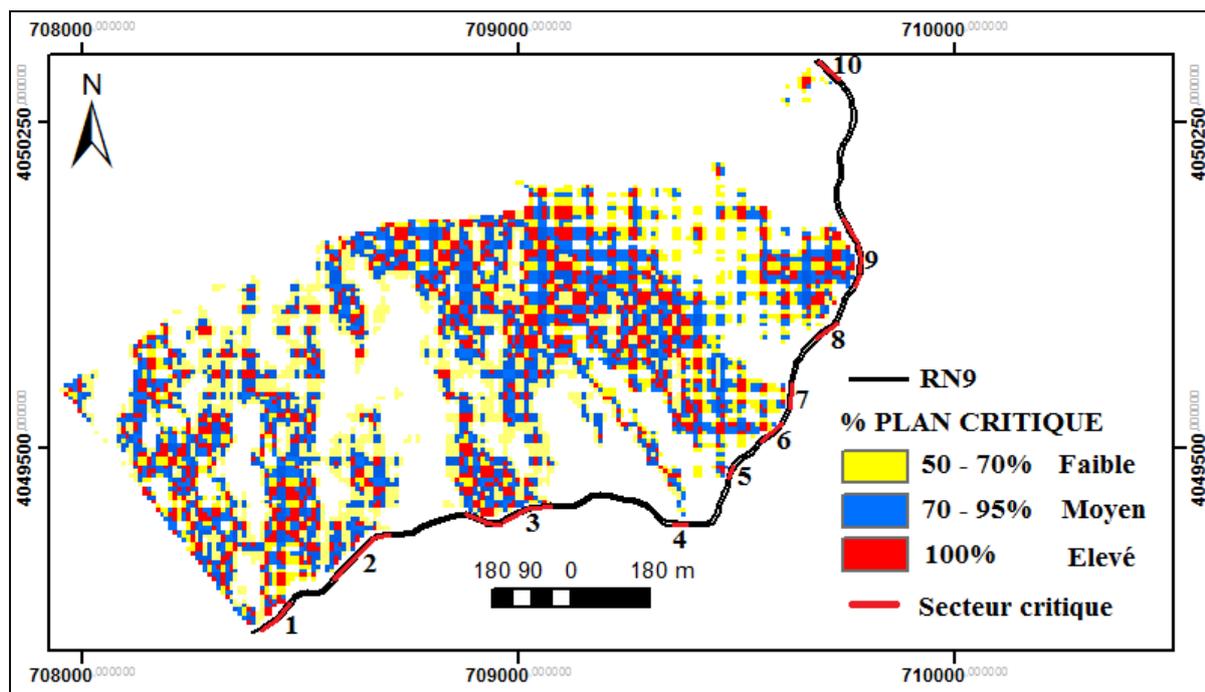


Figure 6.18 : Secteurs routiers exposés au talus contenant des blocs susceptibles à l'éboulement

L'évaluation a mis en évidence dix (10) secteurs qui sont susceptibles à la rupture des blocs rocheux, répartis en fonction de l'orientation des talus. En fait, les observations sur le terrain dans divers endroits ont révélé la présence de plusieurs zones susceptibles aux chutes de blocs, et qui sont situées dans les secteurs détectés par la méthode suscitée (Fig 6.19).



Figure 6.19 : Trace des blocs détachés et blocs susceptibles à la rupture (talus Derguina)

5. Conclusion

L'évaluation de la susceptibilité des blocs rocheux à la rupture peut se faire soit au niveau des talus situés directement en amont du relief soit à travers l'intégralité du versant.

Le choix de la méthode d'évaluation de la susceptibilité diffère d'un site à l'autre selon les conditions géographiques et géomorphologiques du site, la nature du phénomène et la disponibilité des données.

L'aléa de rupture au niveau des sites du Cap Aokas et des talus de Derguina est diffus, donc la susceptibilité est évaluée selon les méthodes globales, telles que le Matterocking. Par contre l'aléa au niveau du site de l'hôtel Safsaf est de type localisé, l'évaluation est donc établie selon la méthode détaillée en adoptant la technique alpine.

Selon la méthode employée, chaque site a dévoilé les conclusions suivantes :

Site de la falaise d'Aokas

- Les failles ont un rôle significatif dans la morphologie du relief en offrant des pentes très accidentées et des irrégularités d'orientations locales des talus en favorisant le glissement.
- La famille F1 représente le plan le plus défavorable vis-à-vis de la stabilité, et le plan le plus répandu spatialement à travers la falaise.
- La famille F4 représente le plan le plus prédisposé à la mobilisation dans les talus très accidentés et il est réparti le long des miroirs des failles.
- Nous constatons une concordance entre les résultats de la méthode d'osculation des falaises MATTEROCKING et les résultats de l'analyse cinématique.
- L'intersection F1-F6 qui représente le cas d'éboulement 2015 est le plus répandu à travers le versant et le plus défavorable du point de vue de la pente du relief. Donc, il est le plus probable de se manifester.
- Plus la pente augmente, plus la probabilité de rencontrer les dièdres susceptibles à la rupture accroît.

Site de l'Hôtel SAFSAF

Le talus est affecté par neuf instabilités de volume et mécanisme de rupture variables, dont :

- L'instabilité 1 présente un risque de glissement en masse, à cause de la morphologie de la masse et l'effet de l'érosion régressive au niveau de la cavité sous-jacente.

- L'ensemble des blocs de 2 à 8 en surplomb sont identifiés au niveau de la dernière zone d'arrachement ; il présente le risque d'occurrence le plus élevé à très court terme.
- L'instabilité 9 est présentée par une masse en surplomb avec fissure arrière et une cavité en dessous qui s'agrandit sous l'effet de l'érosion régressive ;
- Il est difficile de se prononcer sur le risque d'écroulement à court terme du surplomb car il n'y a pas de fissure arrière traversant qui est identifiée visuellement. De plus, il existe une cavité dont l'étendue et son extension ne peuvent être estimées par investigation en surface par observation.

Site de DERGUINA

- Vu le volume réduit des blocs rocheux et la couverture végétale très abondante sur les reliefs, l'évaluation de la susceptibilité est focalisée uniquement sur le phénomène du talus.
- Les conditions morphologiques des talus influencent directement la répartition spatiale des zones ayant probablement des blocs susceptibles à la rupture.
- L'évaluation a révélé dix secteurs routiers dont les talus ayant des blocs prédisposés à la rupture, et les constatations sur le terrain ont validé cette sectorisation.



**CHAPITRE VII « ÉVALUATION
DE L'ALÉA ET RISQUE DE
CHUTE DE BLOCS »**



1. Introduction

Le présent chapitre abordera l'évaluation de l'aléa et le risque de chute de blocs pour chacun des sites. La méthode adoptée diffère d'un site à l'autre selon le contexte géographique et géologique du site ainsi que la nature du phénomène.

Pour le site d'Aokas, la combinaison de plusieurs approches semble nécessaire pour évaluer l'aléa et le risque de chute de blocs. Une étude trajectographique est indispensable pour évaluer la probabilité d'atteinte des blocs et estimer l'énergie des blocs le long de leurs trajectoires (Ladjel et al., 2024). La méthode qualitative basée sur un système de notation (Rock fall Hazard and Risk Assessment) qui est proposée par Saroglou et al. (2012) est adoptée pour l'évaluation du risque de chute de blocs.

Pour évaluer le risque de chute de blocs à travers les deux sites de Derguina et Hôtel SAFSAF, nous avons choisi la méthode (Rock fall hazard rating system) développée par le département des transports de l'Oregon aux États-Unis pour évaluer les probabilités d'atteinte d'objets linéaires (Pierson et al 1990-Hoek 1999).

Les deux méthodes de classification du risque suscitées ne seront pas appliquées sur l'intégralité des sites, mais elles seront orientées uniquement sur les zones susceptibles à la mobilisation, en exploitant les résultats du précédent chapitre (évaluation de la susceptibilité à la rupture).

2. Évaluation et cartographie de l'aléa et le risque de chute de blocs du site cap Aokas

L'approche d'évaluation de l'aléa sera basée sur l'exploitation des résultats de l'approche MATTEROCKING, la simulation et l'étude trajectographique 3D des blocs rocheux propagés. Toutefois, la classification de l'aléa sera effectuée conformément aux directives fédérales suisses (OFAT, OFEE, OFEFP, 1997 ; Raetzo et al., 2002).

L'aléa chute de blocs est exprimé comme la probabilité que le phénomène chute de blocs puisse se produire avec une intensité donnée dans un laps de temps donné. Le couple intensité-période de retour est donc le paramètre clé pour évaluer le risque de chute de blocs.

L'intensité du phénomène est exprimée par l'énergie cinétique totale (translation et rotation) des blocs qui tombent, qui est obtenue par des simulations de trajectoires de chutes de blocs.

La période de retour est définie comme le temps moyen de référence dans lequel une chute de blocs peut se produire ; elle est considérée comme l'inverse de la fréquence moyenne des chutes des blocs, la probabilité d'occurrence d'un bloc (Tab. 2.11) est évaluée en tenant compte de la probabilité de rupture et de la probabilité d'atteinte.

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

La probabilité de rupture est estimée par la probabilité de trouver au moins une structure dangereuse prédisposée à la mobilisation à travers la zone d'étude.

La probabilité d'atteinte est évaluée par simulation de la trajectoire à partir de la répartition des blocs déposés le long de la pente. Plus précisément, trois limites de propagation sont définies pour classer cette probabilité en forte moyenne ou faible. Ces limites correspondent aux abscisses parcourues par 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} des blocs par rapport au nombre total de trajectoires calculées (J. M. Abbruzzese et al., 2009).

Enfin, L'aléa chute de blocs est classé en trois niveaux : faible, modéré et élevé selon le diagramme matriciel combinant l'intensité et la période de retour.

L'évaluation du risque de chute de bloc est effectuée selon une méthode qualitative basée sur un système de notation (Saroglou et al., 2012). Ce système met l'accent sur les critères morphologiques et structurels de la pente rocheuse et sur la vulnérabilité et les conséquences.

L'évaluation est basée sur la notation de vingt (20) paramètres regroupés en quatre catégories avec des poids qui varient en fonction de l'importance de ces paramètres impliqués. Le score de chaque paramètre est obtenu par la multiplication de la note attribuée par son facteur de poids. La somme des scores individuels de chaque paramètre donne le score total du risque. La classification du risque est effectuée selon une échelle de cinq catégories allant du risque très faible à très élevé.

Les différentes étapes figurent dans l'organigramme (Fig. 7.1) présenté ci-après :

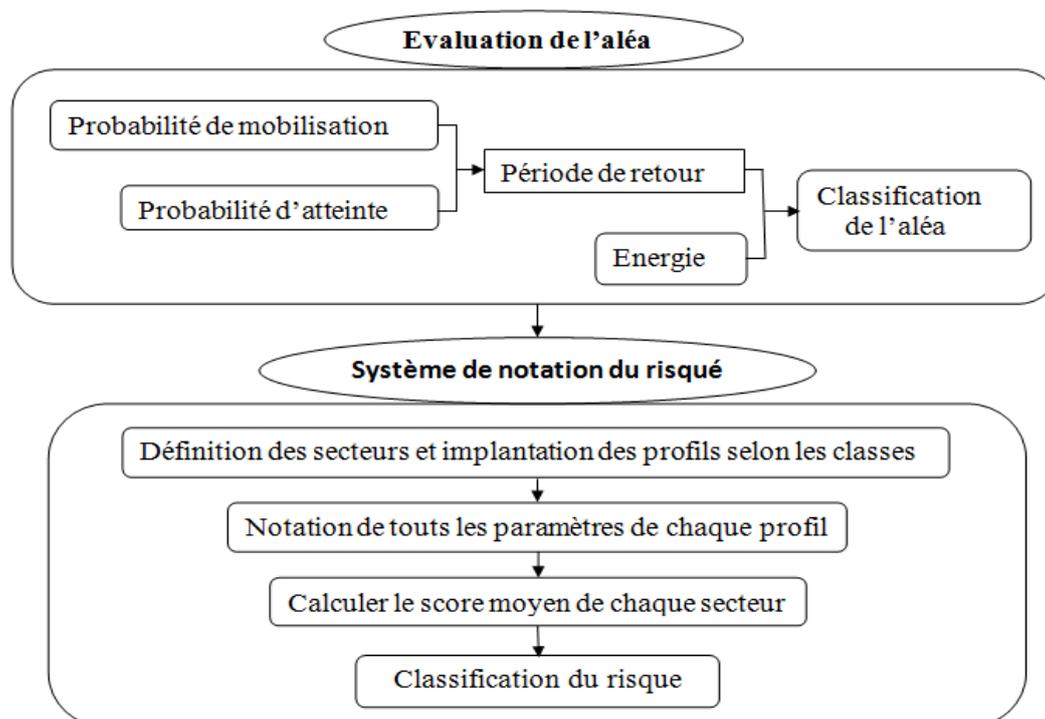


Figure 7.1 : Organigramme méthodologique de l'évaluation du risque chute de blocs

2.1 Étude trajectographique et évaluation de l'aléa chute de blocs

La modélisation 3D des trajectoires est établie à l'aide du logiciel RocPro3D (2014), il permet la génération d'un maillage de terrain tridimensionnel par triangulation et permet l'évolution latérale de la trajectoire dans la simulation (T. Morales et al., 2021). Cet outil est très pratique et efficace, il prend en considération les caractéristiques du sol et les irrégularités du terrain par une approche probabiliste (M.Akin et al, 2021).

Vu l'étendue vaste de la zone d'étude, il y aura toujours des modifications et des incertitudes au niveau des paramètres inclus dans le calcul. C'est pour cette raison, un modèle probabiliste est choisi pour l'étude de trajectoires des blocs rocheux. La base théorique de la probabilité d'évaluation à l'intérieur des chutes de pierres est fondée sur une analyse Bayésienne, (probabilité des théories au vu de certains événements). Cette analyse considère les paramètres du modèle comme des variables aléatoires, et à partir de la première modélisation, on estime les ordres de grandeur vraisemblables des résultats (Moy, Q_t ...) et on leur associe une distribution de probabilité. D'une manière générale, c'est une statistique construite à partir d'observation de phénomène aléatoire raisonnée sur les lois qui produisent des observations pour analyser des phénomènes passés ou prédire des événements futurs. En utilisant le modèle probabiliste, les paramètres des blocs sont présentés par des variables probabilistes uniformes ; les paramètres de sol sont présentés par des variables probabilistes gaussiennes.

Pour la simulation des trajectoires, la formulation bloc rigide est choisie. Elle consiste à satisfaire l'équation générale d'équilibre dynamique pour les mouvements de translation. Durant la chute libre, le frottement du bloc dans l'air est négligeable et sa rotation n'a pas d'effet sur sa cinématique. Tandis que, la cinématique du bloc sur une surface est assimilée à un roulement avec frottement sans glissement. La phase d'impact est un phénomène quasi instantané, durant lequel le mouvement est nul et il y a une dissipation énergétique.

Les paramètres inclus dans le logiciel (Tab. 7.1) sont sélectionnés et attribués aux formations lithologiques du site sur la base des caractéristiques proposées dans le logiciel RocPro 3D, dont elles sont déterminées d'une part, à partir des trajectoires observées et étudiées, et d'autre part, à partir des valeurs qui existent dans la littérature et utilisées dans des logiciels tels que le RocFall. Les valeurs utilisées ont subi des ajustements par rapport à la nature des terrains de la zone d'étude en se référant à plusieurs articles tels que (J-Y Zhang et al, 2021), (M. Akin et al, 2021) (K.He et al, 2020), (A-M.Fanos& B. Pradhan, 2019) (R-M. Mateos et al, 2015), (R.Sarro et al 2018 et 2014), (H.Lan et al, 2007).

La vitesse initiale de 0,5 m/s est attribuée aux blocs. Selon quelques auteurs tels que (A. M Fanos & B. Pradhan, 2019 et 2020), elle est considérée comme une valeur de précaution, à cause de l'importance du site du point de vue stratégique (route nationale) et aux conditions sismiques et pluviométriques de la région, et pour des raisons de sécurité, cette valeur représente les conditions de chutes de pierres à long terme (N.E. San et al, 2020).

Les points des sources des blocs susceptibles à la rupture sont répartis le long de la ligne de source à intervalles égaux de 1m. Ensuite dix blocs sont jetés sur chaque point de source dans des directions différentes.

La simulation probabiliste 3D avec une formulation bloc rigide de trajectoire sur les mailles du MNT, nous a permis de calculer la densité, le point d'arrêt des trajectoires, la hauteur du rebond, la vitesse et l'énergie cinétique, pour chacun des blocs détachés. Ainsi que différentes cartes sont obtenues telles que la carte de fréquence des trajectoires, et la carte d'énergie cinétique.

Tableau 7.1 : Paramètres de terrain inclus dans le modèle de simulation

<i>Paramètres</i>	<i>Calcaire Dolomitique</i>	<i>Éboulis compact</i>
<i>Coefficient de restitution</i>		
Mean normal value, μ_{RN} (-)	0.67	0.45
Mean tangential value, μ_{RT} (-)	0.88	0.70
Standard deviation, σ_R [%]	0.011	0.016
Limit velocity, V_R (lim) (m/s)	10	10
Limit standard deviation, σ_R (lim) [%]	0.0055	0.012
<i>Déviations latérales</i>		
Standard deviation, $\sigma_{\theta h}$ [°]	10	7.5
Limit velocity, $V_{\theta h}$ (lim) (m/s)	10	10
Limit standard deviation, $\sigma_{\theta h}$ (lim) [°]	5	3.75
<i>Déviations verticales (d'aplatissement)</i>		
Standard deviation, $\sigma_{\theta v}$ (°)	1	1
Limit velocity, $V_{\theta v}$ (lim) (m/s)	10	10
Limit standard deviation, $\sigma_{\theta h}$ (lim) [°]	2	2
<i>Coefficient de frottement</i>		
Mean value, μ_k [-]	0.4	0.6
Standard deviation, σ_k [%]	0.036	0.045
Limit velocity, V_k (lim) (m/s)	10	10
Limit standard deviation, σ_k (lim) [%]	0.03	0.03
<i>Paramètres de transition</i>		
Angle β_{lim} (acute case) (°)	4	6
Angle β_{lim}' (obtuse case) (°)	30	45

Probabilité d'occurrence

Le nombre total de trajectoires calculé est de 86449 et le nombre total d'impact calculé est de l'ordre de 3704550. Les trajectoires des blocs et la répartition de la densité de ces trajectoires à travers le versant (Fig. 7.2), présentent une direction préférentielle en suivant des couloirs topographiques (talwegs) qui convergent vers le pied du versant, dont certains de ces blocs atteignent la route nationale RN9.

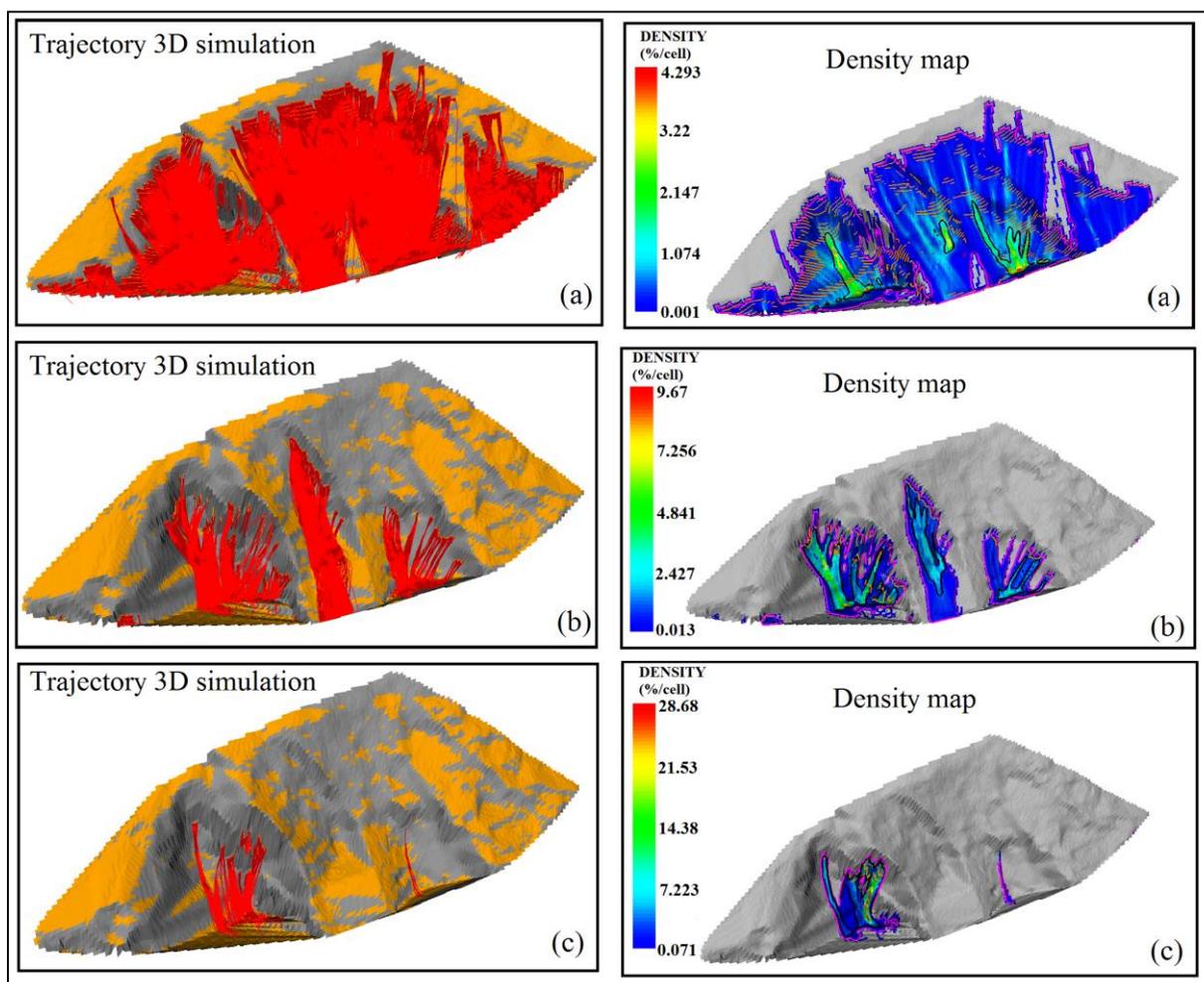


Figure 7.2 : Trajectoires de la simulation 3D et les cartes de densité des trajectoires à partir des zones sources ; a) faible, b) moyenne, c) forte

Les zones d'arrêt des blocs sont caractérisées par les densités de trajectoires les plus élevées, avec une fréquence maximale de ($D_{low\ mobil} = 4.293\%$, $D_{Moderate\ mobil} = 9.67\%$, $D_{Highmobili} = 28.68\%$) (Fig. 7.3). Donc, plus la zone est traversée par des blocs, plus le nombre de points d'arrêt est élevé.

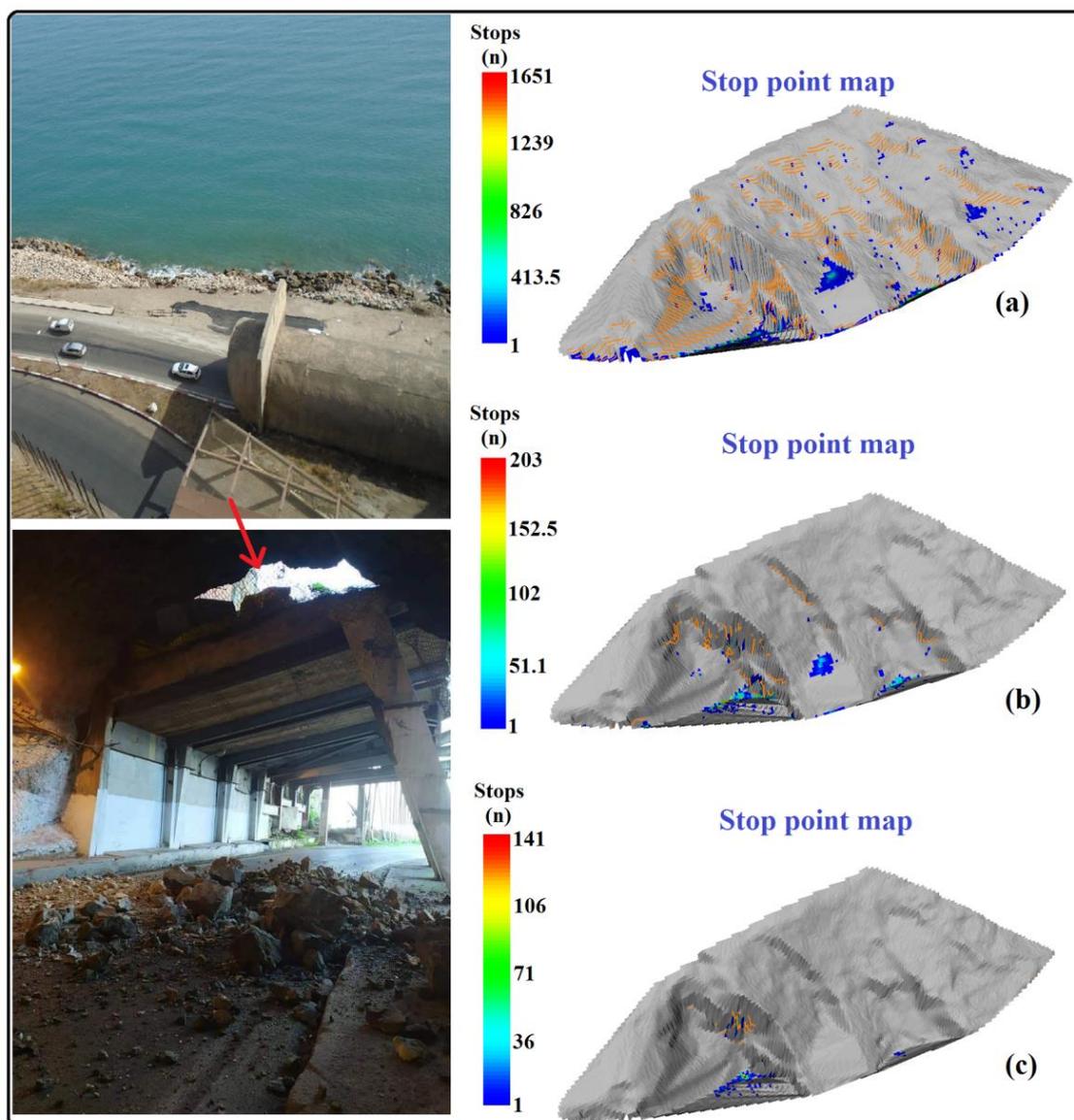


Figure 7.3 : (1) : Photo de chute de blocs 2019, les blocs ont atteints l'intérieur du tunnel sortie ouest ; (2) : Les cartes de point d'arrêt pour les zones de mobilisation : a) faible, b) moyen, c) fort

La reclassification et la superposition des trois cartes d'atteinte pour chacune des zones de mobilisation (faible, moyenne et forte) selon le tableau (Tab. 2.11), nous a conduit à l'établissement d'une carte d'occurrence de la zone d'étude (Fig. 7.4).

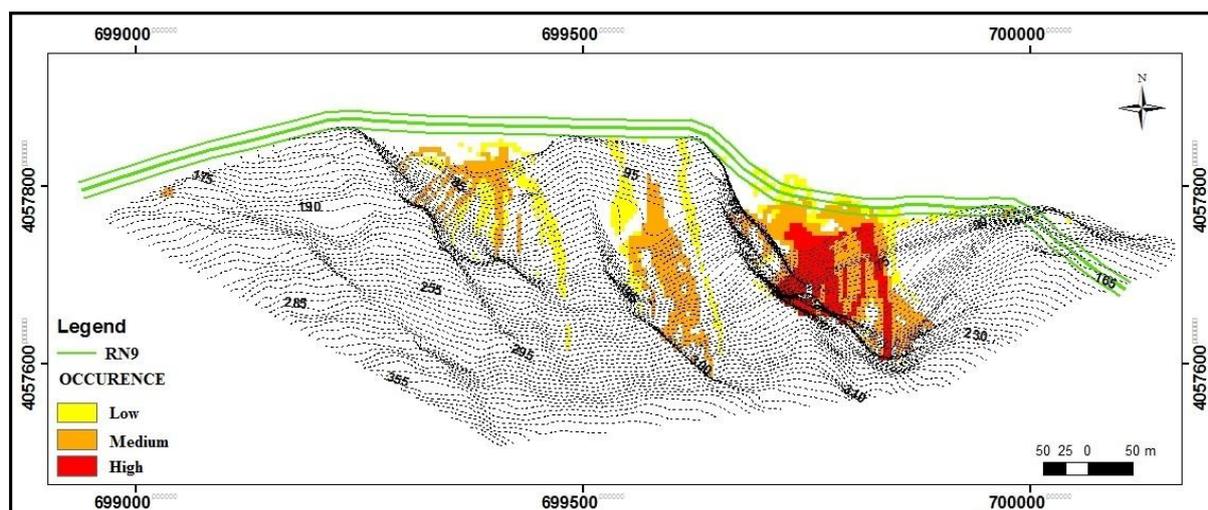


Figure 7.4 : Carte d'occurrence de chute de blocs du versant Nord du CAP AOKAS (Ladjel et Al., 2024)

D'après la carte d'occurrence, 17% de la zone d'atteinte est caractérisée par une occurrence élevée, localisée principalement dans le secteur oriental du tronçon routier. 52,44 % de cette zone est représentée par une occurrence moyenne, tandis que les 30 % restantes montrent une occurrence faible.

- **Intensité du phénomène (Énergie cinétique des blocs)**

Afin d'analyser l'énergie cinématique, la vitesse et la hauteur du rebond, nous avons considéré un quantile de 90% pour représenter les paramètres statistiques des populations de grille de cellules et pour éviter les conditions extrêmement défavorables à la cartographie de l'aléa et surestimer le risque, par conséquent.

La répartition spatiale des vitesses concorde avec celles des hauteurs de rebond à travers la falaise (Fig. 7.5). Donc, il existe une étroite relation entre la pente du versant et la vitesse des blocs en mouvement. Au droit des talus très raides, la vitesse et la hauteur du rebond atteignent des valeurs maximales à l'endroit de l'impact des blocs, après une chute libre. Donc plus la hauteur de chute des blocs est grande, plus la vitesse obtenue est élevée et plus la hauteur du rebond est importante.

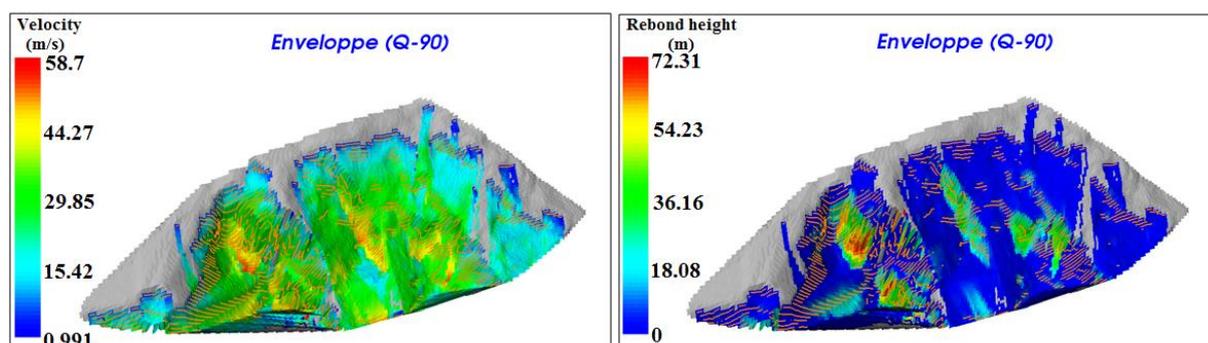


Figure 7.5 : Carte de la vitesse et de la hauteur du rebond de la simulation 3D

Les conditions de départ (vitesse initiale, densité,...etc.), les caractéristiques lithologiques du terrain et la forme du relief ont fait que nous avons obtenu des énergies très élevées (Fig.7.6). La classe d'énergie 3 (> 300 kJ) est obtenue lorsque les blocs subissent, durant leurs trajectoires, une chute libre (Fig. 7.7a), cette classe occupe la majeure partie de la falaise (71,2%). Pour la classe 2 (30 et 300 kJ), la pente varie entre 50° et 65° et les blocs ne subissent pas durant leurs trajectoires une chute libre. Cette classe occupe les périphéries de la classe 3 et représente 27% de la zone affectée (Fig. 7.7b). La zone où l'énergie est inférieure à 30kJ (classe 1) est très réduite (1,88%). Il s'agit des endroits où la pente est inférieure à 50° (Fig. 7.7c) et la vitesse est relativement faible (2.25-5m/s). Cette classe est localisée, essentiellement, dans la limite Ouest de la falaise.

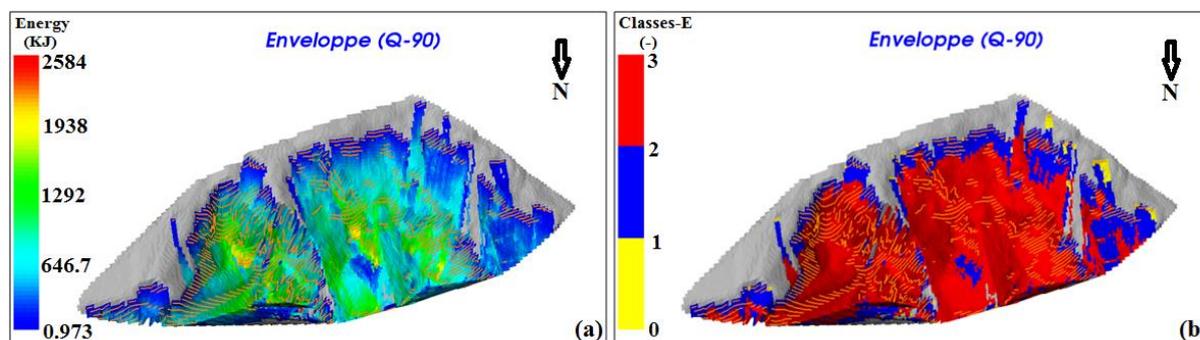


Figure 7.6 : Carte de l'énergie et les classes d'énergies issues de la simulation 3D

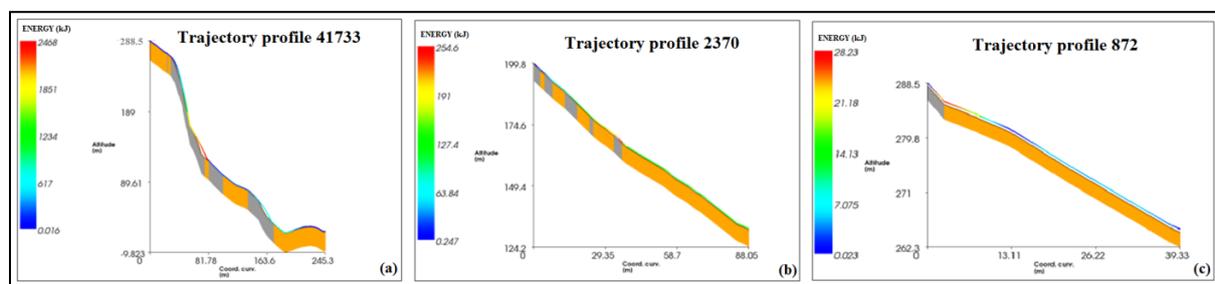


Figure 7.7 : Profils des trajectoires ; (a) : classe 3, (b) : classe 2, (c) : classe 1

Aléa chute de blocs

La modélisation raster du couple énergie et période de retour a permis l'établissement d'une carte d'aléa (Fig. 7.8).

Le versant est affecté, dans sa majeure partie, par la classe d'énergie 3 (> 300kJ). Ce qui dénote que l'énergie cinétique a plus d'impact sur la classification de l'aléa que l'occurrence (période de retour).

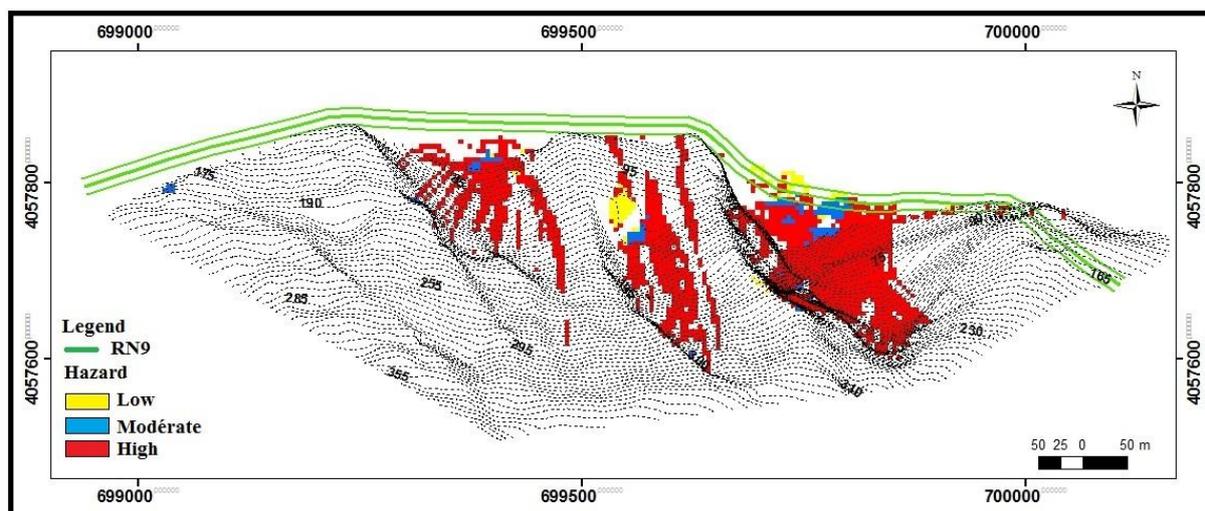


Figure 7.8 : Carte d'aléa chute de bloc de la falaise Cap Aokas (Ladjel et al., 2024)

L'aléa élevé est situé entre les talus à pente très raide. Il occupe la majeure partie de la zone atteinte par les éboulements. Tandis que l'aléa moyen et faible, occupe les parties basses du talus et les zones de faible pente.

La route nationale n°9, située en aval de la falaise, est exposée sur des sections très particulières à un aléa élevé, notamment au niveau de la sortie ouest du tunnel jusqu'à environ 600m.

Les résultats obtenus à travers la simulation trajectographique sont vérifiés et validés sur le terrain à partir d'une rétro-analyse des événements qui ont touché la zone d'étude tels que ceux survenus en 2005, 2015 et 2019, où nous avons constaté une cohérence typique entre les points d'arrêt des blocs avec la probabilité d'atteinte obtenue par la simulation.

2.2 Risque de chute de blocs

Pour contribuer à l'évaluation du risque par le système de notation, la zone d'étude est subdivisée en trois secteurs (Fig. 7.10), dont chaque secteur est traversé par trois profils. Il faut signaler que la sectorisation concerne uniquement les zones touchées par l'aléa chute de blocs dans le versant. Chaque profil est évalué selon les vingt paramètres et chaque secteur prend la note moyenne des trois profils (Tab. 7.2, 7.3 et 7.4).

Mise à part le trafic important qui caractérise la RN9, la présence des cavités féeriques au niveau du tunnel et la zone touristique au niveau de l'ancienne route en amont, ont accentué l'activité et la présence humaine dans les secteurs 1 et 2 (Fig. 7.9).



Figure 7.9: (a) et (b) : transformation de l'ancienne route en amont en une zone touristique, (c) et (d) activité touristique au niveau des cavités féeriques situées au niveau du RN9

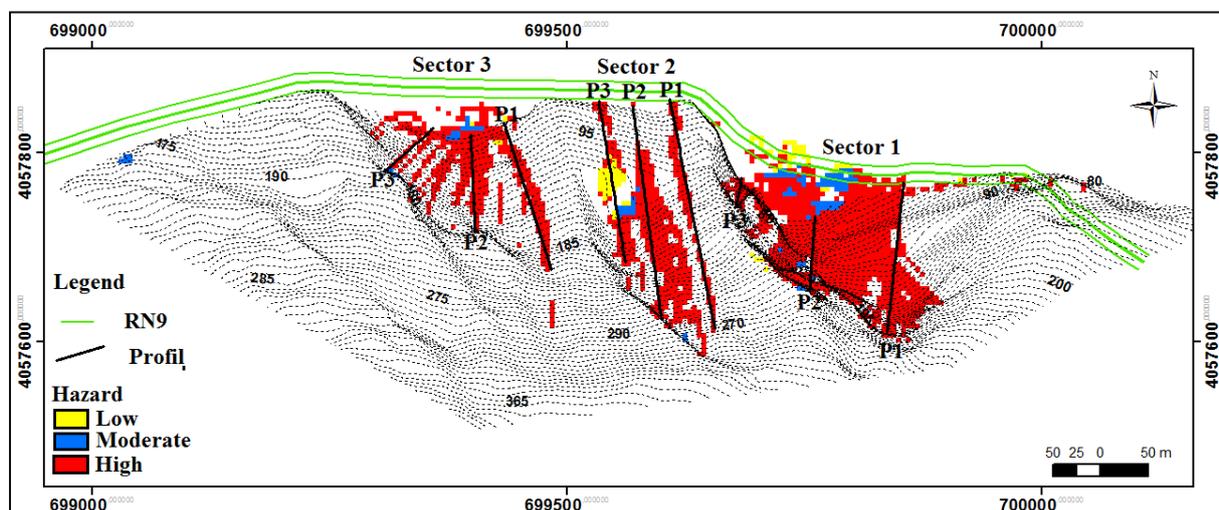


Figure 7.10 : Division de la zone d'étude en secteurs et implantation des profils

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

Tableau 7.2 : Notation des trois profils du secteur 1 selon les divers critères

SECTEUR 1									
PARAMETRES		Weight factor	PROFIL 1		PROFIL 2		PROFIL 3		Score moyen
			Raiting	Score	Raiting	Score	Raiting	Score	
1	La pente du relief	7	100	7	100	7	100	7	7,0
2	La hauteur du relief	4	100	4	100	4	100	4	4,0
3	Hauteur de départ des blocs	7	60	4,2	100	7	30	2,1	4,4
4	Rugosité de la pente	3	100	3	100	3	100	3	3,0
5	Végétation de la pente	4	30	1,2	60	2,4	100	4	2,5
6	Rugosité/matériaux de remplissage. ouverture des discontinuités	6	30	1,8	30	1,8	30	1,8	1,8
7	Orientation des discontinuités	5	60	3	60	3	60	3	3,0
8	persistance des discontinuités	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
9	Résistance à la compression des joints (angle de frottement)	1	30	0,3	30	0,3	30	0,3	0,3
10	Résistance à la compression simple RC de la roche (MPa)	1	60	0,6	60	0,6	60	0,6	0,6
11	Blocométrie de masse rocheuse /volume des blocs	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
12	Estimation du nombre de blocs	2	100	2	100	2	100	2	2,0
13	Caractéristique Karstique	2	60	1,2	60	1,2	60	1,2	1,2
14	Précipitation conditions et intensité	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
15	Permeability. Condition of slope drainage	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
16	risque sismique (coefficient d'accélération)	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
17	Largeur de la zone de captage	10	100	10	30	3	60	6	6,3
18	Historique des chutes de pierres	5	30	1,5	30	1,5	30	1,5	1,5
19	accessibilité des pentes	5	100	5	100	5	100	5	5,0
20	résultat potentiel de l'impact et valeur des structures	20	60	12	60	12	60	12	12,0
SOMME		100	65,8		62,8		62,5		63,7

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

Tableau 7.3 : Notation des trois profils du secteur 2 selon les divers critères

SECTEUR 2									
PARAMETRES	Weight factor	PROFIL 1		PROFIL 2		PROFIL 3		Score moyen	
		Raiting	Score	Raiting	Score	Raiting	Score		
1	La pente du relief	7	30	2,1	30	2,1	30	2,1	2,1
2	La hauteur du relief	4	100	4	100	4	100	4	4,0
3	Hauteur de départ des blocs	7	100	7	100	7	60	4,2	6,1
4	Rugosité de la pente	3	100	3	100	3	100	3	3,0
5	Végétation de la pente	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
6	Rugosité/matériaux de remplissage. ouverture des discontinuités	6	30	1,8	30	1,8	30	1,8	1,8
7	Orientation des discontinuités	5	60	3	60	3	60	3	3,0
8	persistance des discontinuités	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
9	Résistance à la compression des joints (angle de frottement)	1	30	0,3	30	0,3	30	0,3	0,3
10	Résistance à la compression simple RC de la roche (MPa)	1	60	0,6	60	0,6	60	0,6	0,6
11	Blocométrie de masse rocheuse /volume des blocs	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
12	Estimation du nombre de blocs	2	100	2	100	2	100	2	2,0
13	Caractéristique Karstique	2	60	1,2	60	1,2	60	1,2	1,2
14	Précipitation conditions et intensité	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
15	Permeability. Condition of slope drainage	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
16	risque sismique (coefficient d'accélération)	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
17	Largeur de la zone de captage	10	100	10	100	10	100	10	10,0
18	Historique des chutes de pierres	5	30	1,5	30	1,5	30	1,5	1,5
19	accessibilité des pentes	5	60	3	60	3	60	3	3,0
20	résultat potentiel de l'impact et valeur des structures	20	60	12	60	12	60	12	12,0
SOMME		100	62,9		62,9		60,1		62

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

Tableau 7.4 : Notation des trois profils du secteur 3 selon les divers critères

SECTEUR 3									
PARAMETRES	Weight factor	PROFIL 1		PROFIL 2		PROFIL 3		Score moyen	
		Raiting	Score	Raiting	Score	Raiting	Score		
1	La pente du relief	7	30	2,1	30	2,1	60	4,2	2,8
2	La hauteur du relief	4	100	4	100	4	100	4	4,0
3	Hauteur de départ des blocs	7	100	7	100	7	100	7	7,0
4	Rugosité de la pente	3	100	3	100	3	100	3	3,0
5	Végétation de la pente	4	30	1,2	30	1,2	30	1,2	1,2
6	Rugosité/matériaux de remplissage. ouverture des discontinuités	6	30	1,8	30	1,8	30	1,8	1,8
7	Orientation des discontinuités	5	60	3	60	3	60	3	3,0
8	persistance des discontinuités	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
9	Résistance à la compression des joints (angle de frottement)	1	30	0,3	30	0,3	30	0,3	0,3
10	Résistance à la compression simple RC de la roche (MPa)	1	60	0,6	60	0,6	60	0,6	0,6
11	Blocométrie de masse rocheuse /volume des blocs	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
12	Estimation du nombre de blocs	2	60	1,2	60	1,2	60	1,2	1,2
13	Caractéristique Karstique	2	60	1,2	60	1,2	60	1,2	1,2
14	Précipitation conditions et intensité	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
15	Permeability. Condition of slope drainage	3	30	0,9	30	0,9	30	0,9	0,9
16	risque sismique (coefficient d'accélération)	4	60	2,4	60	2,4	60	2,4	2,4
17	Largeur de la zone de captage	10	15	1,5	15	1,5	15M	1,5	1,5
18	Historique des chutes de pierres	5	30	1,5	30	1,5	30	1,5	1,5
19	accessibilité des pentes	5	60	3	60	3	60	3	3,0
20	résultat potentiel de l'impact et valeur des structures	20	60	12	60	12	60	12	12,0
SOMME		100	52,4		52,4		54,5		53,1

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

Tableau 7.5: Classification du risque chute de blocs dans les trois secteurs

	PARAMETRES	Weight factor	SECTEUR 1	SECTEUR 2	SECTEUR 3
			SCORE	SCORE	SCORE
1	La pente du relief	7	7	2,1	2,8
2	La hauteur du relief	4	4	4	4
3	Hauteur de départ des blocs	7	4,4	6,1	7
4	Rugosité de la pente	3	3	3	3
5	Végétation de la pente	4	2,5	2,4	1,2
6	Rugosité/matériaux de remplissage. ouverture des discontinuités	6	1,8	1,8	1,8
7	Orientation des discontinuités	5	3	3	3
8	persistance des discontinuités	4	2,4	2,4	2,4
9	Résistance à la compression des joints (angle de frottement)	1	0,3	0,3	0,3
10	Résistance à la compression simple RC de la roche (MPa)	1	0,6	0,6	0,6
11	Blocométrie de masse rocheuse /volume des blocs	4	2,4	2,4	2,4
12	Estimation du nombre de blocs	2	2	2	1,2
13	Caractéristique Karstique	2	1,2	1,2	1,2
14	Précipitation conditions et intensité	3	0,9	0,9	0,9
15	Permeability. Condition of slope drainage	3	0,9	0,9	0,9
16	risque sismique (coefficient d'accélération)	4	2,4	2,4	2,4
17	Largeur de la zone de captage	10	6,3	10	1,5
18	Historique des chutes de pierres	5	1,5	1,5	1,5
19	accessibilité des pentes	5	5	3	3
20	résultat potentiel de l'impact et valeur des structures	20	12	12	12
SOMME		100	63,6	62	53,1
CLASSIFICATION DU RISQUE			ELEVE	ELEVE	MOYEN

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

D'après les résultats de cette évaluation (Tab. 7.5), les critères qui impactent le plus la notation du risque sont ceux liés à la morphologie du versant et les critères liés à la vulnérabilité. Ensuite, les critères qui sont en relation avec les caractéristiques des discontinuités et de la roche influencent modérément la notation ; en revanche, les critères liés aux facteurs de déclenchements (précipitation et accélération sismique) sont les moins agissants sur la classification.

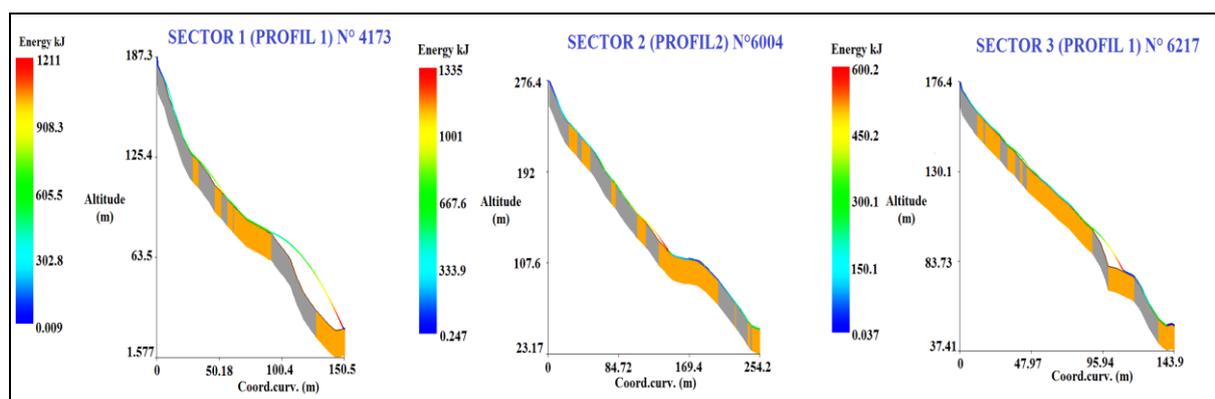


Figure 7.11: exemples des profils d'énergie des trois secteurs 1, 2 et 3

Les trois profils énergétiques (Fig. 7.11) dévoilent une énergie supérieure à 300Kj, indiquant ainsi le potentiel destructif des blocs qui traversent le versant en arrivant jusqu'à la route RN9, validant ainsi le système de classification du risque établi.



Figure 7.12 : Classification de risque de chute de blocs au niveau de la falaise du Cap Aokas
Le système de notation adopté a dévoilé que les secteurs 1 et 2 sont classés dans la classe de risque élevé, tandis que le secteur 3 est classé dans la catégorie risque moyen (Fig. 7.12). Globalement, nous constatons que l'impact de la catégorie D (24,8/40 et 26,5/40) est important sur la classification du risque. L'exposition directe de la route au-dessous de la

falaise ainsi que la présence des structures (route nationale et la sortie du tunnel) et la présence humaine (zone touristique) ont augmenté significativement le risque dans les deux secteurs 1 et 2. La morphologie du versant (pente > 60°) et les caractéristiques géologiques et géo-mécaniques du massif rocheux ont également contribué considérablement dans l'augmentation du score total du risque avec une note de 13,7/20. Les facteurs de déclenchement (Catégorie C) ont moyennement affecté l'évaluation du risque avec un score moyen de 4,2 /10. Le secteur 3 est classé moyennement risqué, cette diminution est due à plusieurs paramètres tels que la diminution de la pente (40°-50°), une large zone de captage des blocs, ainsi que l'éloignement de la zone touristique.

3. Évaluation de l'aléa et risque de chute de blocs au niveau des sites hôtel Safsaf et Dergina

Le risque de chute de blocs au niveau des talus rocheux logeant directement la RN9 est évalué suivant une approche qualitative. Elle est basée sur un système de notation qui est nommé Rockfall Hazard Rating System (RHRS), l'objectif de ce système de notation est de classer le risque de chute de blocs de chaque section homogène de la route, selon l'état des critères qui agissent sur l'aléa et la vulnérabilité.

Les critères guidant l'aléa sont :

- La hauteur du talus : critère pouvant influencer l'index RHRS, car il commence d'agir à partir de 15m de hauteur ;
- Mécanisme de rupture et lithologie : c'est l'orientation, la persistance et la rugosité des joints du massif ;
- Intensité du phénomène : présentée par la taille et le volume des blocs
- Contexte climatique local : facteur déclenchant le phénomène de chute de blocs
- Historique événementiel : La base de données et l'information historique sont indispensables pour évaluer la fréquence de chute.

Les critères caractérisant la vulnérabilité

- Efficacité du fossé : c'est la capacité d'éviter la diffusion des blocs d'accéder à la bande de roulement de la route ;
- Taux de fréquentation (Trafic) : Le taux moyen de temps d'exposition des véhicules aux chutes de blocs sur les parties de réseau routier ;
- Distance de visibilité : c'est la distance nécessaire pour qu'un conducteur aperçoive un obstacle et immobilise son véhicule ;
- Largeur de la voie : c'est la capacité du conducteur à éviter un problème de chute de blocs.

3.1 Classification de risque au niveau du site talus hôtel SAFSAF

Les instabilités principales sont localisées au-dessus de la route, au niveau d'une paroi calcaire altérée de 50m de hauteur sur 40ml de long. Il s'agit de neuf instabilités dont deux sont classées mouvement en masse et sept sont classées chute de blocs.

Les critères guidant l'aléa et la vulnérabilité sont notés selon l'état des différents facteurs de ce talus (Tab. 7.6), le score obtenu est de l'ordre de 485, qualifiant ainsi le risque très élevé.

Tableau 7.6 : Notation du talus SAFSAF selon la méthode RHRS

<i>Critères</i>	<i>Facteurs</i>	<i>Description</i>	<i>Points</i>
géométrique	Hauteur du talus	52m	81
Géomécanique Cas 1	Condition structures	Joints discontinus, orientation défavorable	27
	Condition de frottement	Présence de matériaux de remplissage	81
Intensité	Volume	$V > 3m^3$	81
météorologique	Précipitation	1000 ml	27
	Période gel/dégel	Aucune	
	Ruissèlement	Intermittent	
Fréquence de chute	événement	Chaque grosse précipitation	9
Vulnérabilité du réseau	Efficacité de la fosse	Pas de fosse	81
	Taux de fréquentation	AVR > 100 %	81
	Distance de décision	DSD = 180	3
	Largeur de voie	L = 8m	14
Score total			485
Qualification du niveau de risque			Très élevé

La hauteur du talus, l'intensité du phénomène, les conditions géomécaniques et les caractéristiques liées à la vulnérabilité (efficacité de la fosse et le taux de fréquence) sont les critères qui ont contribué à l'augmentation du score en qualifiant le risque de ce talus très élevé. Cependant, ce talus a connu des travaux de confortement pour justement protéger les usagers de la route et le complexe du danger lié à ce phénomène. Les instabilités 1 et 9 présentent un risque d'éboulement en masse, un confortement mixte est préconisé ; il s'agit d'un système d'ancrage renforcé par un système de filet métallique plaqué et ancré en

pourtour des masses susceptibles. Les instabilités 2 à 8 sont menées d'un ensemble de clous de confortement qui permettra de renforcer leurs stabilités. Le surplomb ne peut être traité sans moyens de type minage ou démolition contrôlée. Afin d'éviter la propagation des petites pierres depuis la falaise, il est installé au niveau de la zone principale un grillage pendu et au niveau des deux zones Est et Ouest un grillage plaqué (Fig. 116), compte tenu du faible espace en pied par rapport à la route.



Figure 7.13 : Grillage pendu et grillage plaqué déposés au niveau du talus hôtel SAFSAF

3.2 Classification de risque au niveau du site talus de DERGUINA

Le tronçon routier de la RN9 situé entre PK43 et PK45 a fait l'objet d'une évaluation qualitative vis-à-vis du risque de chute de blocs. En exploitant les résultats de l'évaluation de l'aléa au niveau de ce tronçon, la méthode RHRS sera orientée et appliquée uniquement sur les dix sections présentant une susceptibilité de rupture.

Ce tronçon de la route est considéré comme étant une section homogène de point de vue géologique, la différence entre ces sections réside dans la longueur de la voie exposé, la hauteur du talus et le volume total et unitaire des blocs.

- Critère liés à la vulnérabilité

Puisqu'il s'agit de la même route, les critères de vulnérabilité (Tab. 7.7) sont les mêmes sur tous les points des sections

Tableau 7.7 : Notation des critères de vulnérabilité

Facteur	Description	Note
Efficacité de la fosse	Modérée à localement limité (Fig.7.14): les éléments rocheux atteignent occasionnellement à régulièrement la bande de roulement	20
Distance de décision	$V_{Limite} < 60$ Km/h donne un DSD>100	3
Largeur de la voie	L= 8m Distance suffisante pour éviter un obstacle	14

En revanche le facteur taux de fréquentation varie en fonction de l'AVR (Tab. 7.8) qui est en fonction du trafic (25000 véh/j), la longueur de la voie exposée et la vitesse moyenne des véhicules (50km)

Tableau 7.8 : Notation du critère taux de fréquentation des dix sections

Section	Longueur du secteur (m)	AVR %	Note
1	95	> 100	81
2	176		
3	213		
4	35		
5	34		
6	67		
7	60		
8	61		
9	169		
10	65		

AVR > 100, signifie que la vulnérabilité augmente avec le flux de trafic et avec la diminution de fluidité.



Figure 7.14 : Présence limitée de fosse par endroits avec efficacité moyenne

- Les critères de prédisposition et déclenchant

- Le critère **géomécanique** est identifié dans le contexte du cas 1, c'est-à-dire les conditions de structure et de frottement, au niveau de ces talus. Les chutes de blocs sont déterminées essentiellement en fonction du plan de stratification. Ce plan présente une persistance importante avec une orientation régulière défavorable vis-à-vis de la stabilité, ces conditions valent une notation maximale de **81** points. Le type de contact entre les deux faces rocheuses de part et d'autre du joint désigne la résistance au glissement sur cette discontinuité. Le plan de stratification au niveau des talus est de type roche/roche. L'instabilité peut se manifester quand les pentes des talus sont supérieures à l'angle du frottement du joint, ces états permettent d'attribuer la note **27** points au facteur type de joint.

- Le critère **climatique** est représenté essentiellement par les précipitations ; elles réagissent sur les ruissèlements, l'érosion et la mise en charge du réseau de discontinuité du massif rocheux. La notation de ce facteur climatique est basée sur une description qualitative des agents climatiques tels que la pluie, la période de gel et le ruissèlement. Le secteur est situé dans une zone de fortes précipitations, pas de période de gel et ruissèlement intermittent. Ce contexte climatique offre une note de **27** points.

- Le critère **fréquence de chute** symbolise l'aléa dans son étendue temporelle, il est qualifié par description. En effet, ce tronçon routier a connu quelques chutes, ainsi, la fréquence de chute est qualifiée comme un événement régulier à chaque grosse précipitation, impliquant ainsi une notation de **9** points.

- Le critère **hauteur du talus** est considéré comme facteur aggravant, car plus la hauteur est grande plus la vitesse de chute augmente et l'énergie s'amplifie. Donc la hauteur influence l'intensité du phénomène, cependant, selon la classification RHRS, elle n'est significative qu'à partir de 15m d'altitude. La notation de ce critère varie en fonction de la hauteur des talus des sections susceptibles au phénomène de chute de blocs (Tab. 7.9), les hauteurs sont variables, allant de 5 m jusqu'à 22 m. La notation est effectuée selon l'équation : $y = e^{0.146 \cdot H}$, elle représente la courbe de tendance (Fig. 7.15) de système de notation proposé dans la méthode RHRS.



Figure 7.15 : Courbe exponentielle exprimant le score par rapport à la hauteur du talus

Tableau 7.9 : Notation du facteur Hauteur du talus

Section	Hauteur du talus (m)	Note
1	13	7
2	5	2
3	5	2
4	22	25
5	16	10
6	9.5	4
7	13	7
8	16	10
9	9	4
10	15	9

- Le facteur **taille/volume de bloc** : Plus la taille ou le volume des blocs éboulés est important plus l'énergie d'impact est grande, donc ils sont liés directement au critère d'intensité du phénomène. On retient la taille du bloc en cas de chute de bloc isolé, et on opte pour la notion volume en cas d'éboulement.

La taille des blocs varie d'un secteur à l'autre (Fig 7.17), de ce fait la notation diffère également (Tab. 7.10). Elle est établie selon l'équation de la courbe de tendance (Fig. 7.16). Cependant, la section 9 est caractérisée par une instabilité en masse dont le volume total

($2 < V_T (m^3) < 2.5$) est constitué de plusieurs compartiments de différentes tailles (36 à 46 cm), le score attribué à cette instabilité est **27** points.

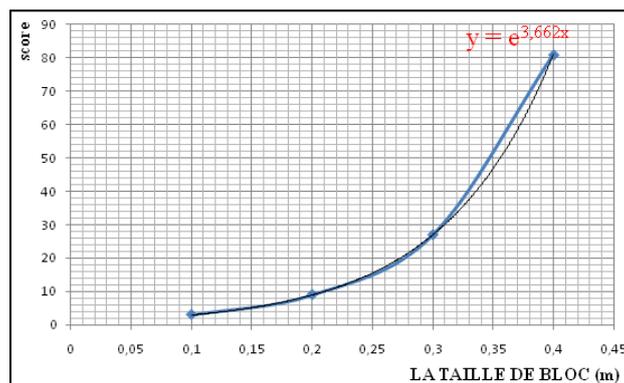


Figure 7.16 : Courbe exponentielle exprimant le score par rapport à la taille du bloc

Tableau 7.10 : Notation du facteur taille des blocs

Section	Taille de blocs m	Note
1	0.7	81
2	0.3	27
3	0.4	81
4	0.4	81
5	0.2	9
6	0.3	27
7	0.25	16
8	0.4	81
10	0.3	27

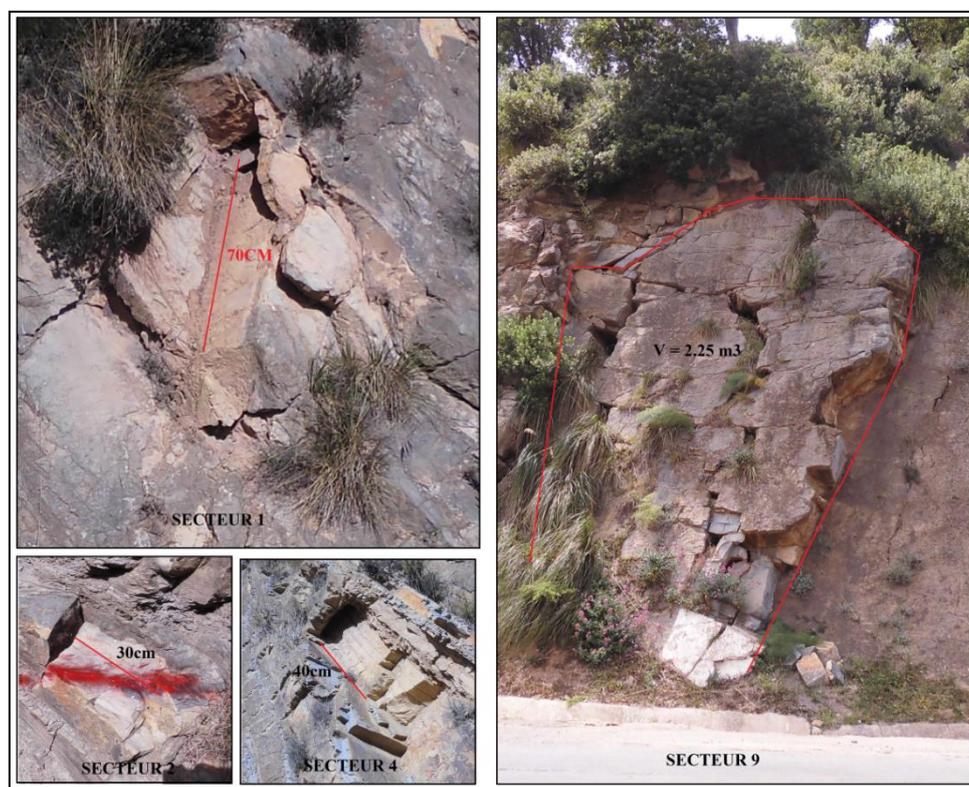


Figure 7.17 : Variation de la taille et du volume des blocs susceptibles à l'éboulement

Pour classer le risque de chute de blocs en talus au niveau des dix sections, on doit effectuer la sommation des scores de différents critères suscités, afin d'obtenir l'index RHRS. La distribution de ces index le long du tracé de la RN9 fournit une hiérarchisation du risque de chute de blocs le long des talus susceptibles (Fig. 7.18).

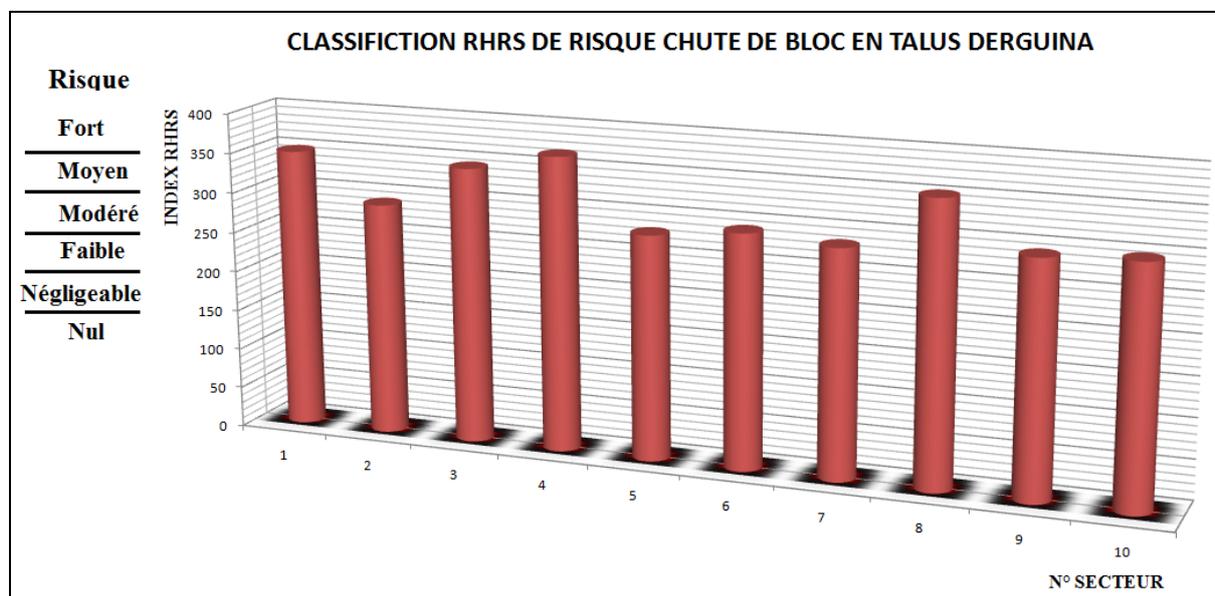


Figure 7.18 : Variation de l'index RHRS au niveau des secteurs susceptibles

Les résultats de cette évaluation montrent que les secteurs 1, 2 et 8 sont caractérisés par un risque fort. Le secteur 3 montre un risque moyen, tandis que les secteurs 2, 5, 6, 7, 9 et 10 indiquent un risque modéré (Fig. 7.19). Les facteurs qui ont fait la différence et qui ont influencé l'index RHRS sont les critères liés à l'intensité du phénomène (la hauteur des talus et la taille des blocs susceptibles aux chutes). La cartographie résultante est présentée sur l'illustration suivante :



Figure 7.19 : Cartographie du risque hiérarchisé de chute de blocs en talus le long de la RN9

4. Conclusion

Le choix de la méthode d'évaluation du risque de chute de bloc varie d'un site à l'autre. Au niveau de la falaise du Cap Aokas, le phénomène est étudié à l'échelle du versant, de ce fait, il est nécessaire d'effectuer une étude trajectographique pour caractériser l'aléa de propagation, et pour qualifier l'aléa, la méthode RHRA est adoptée pour qualifier le risque. Au niveau des talus de Derguina et Safsaf, le phénomène étudié est à l'échelle du talus, le risque chute de bloc est qualifié suivant la méthode RHRS.

Site du Cap Aokas

La simulation trajectographique est entamée par un modèle 3D qui permet de prendre en compte la dispersion latérale des trajectoires (Volkwein et al. 2011), suivant un modèle probabiliste adéquat pour prendre en considération les problèmes des incertitudes liées au processus d'éboulement.

Le logiciel RocPro3D est un puissant outil pour analyser les trajectoires des chutes de blocs. Cependant, sa modélisation ne tient pas compte de la fragmentation du bloc éboulis. Néanmoins, la collision entre un bloc et le terrain est considérée comme collision point face. La vitesse n'est, donc, influencée que par l'emplacement de la source des blocs, la pente et la lithologie du talus. Le volume non plus n'affecte pas le comportement du mouvement de l'éboulement (Jiang et coll. 2020) et comme l'énergie des chutes de blocs est égale à la vitesse de chute de pierres que multiplie la masse (Palau et al. 2013). Donc l'énergie peut décrire la cinématique des blocs éboulis.

Dans ce travail, chaque trajectoire de chute de bloc est évaluée en matière de densité, de point d'arrêt, de hauteur du rebond, de la vitesse et de l'énergie.

D'après la simulation, de nombreuses trajectoires rejoignent la route nationale RN9. Les hauteurs du rebond les plus élevées sont obtenues lorsque la hauteur de chute initiale depuis les zones sources est élevée, et les vitesses et les énergies les plus élevées des blocs rocheux sont enregistrées lorsque les modes de déplacements sont en vol ou en chute libre. Donc la répartition spatiale des zones sources, le long des failles, influence considérablement les paramètres des trajectoires.

La répartition spatiale de l'aléa chute de blocs montre que la route nationale RN9 est exposée à un aléa moyen à fort, notamment dans sa partie Est, depuis la sortie du tunnel jusqu'à environ 600 m en allant vers l'ouest. Ces zones sont confortées depuis l'évènement tragique de 2015, mais pas suffisamment pour empêcher toute la zone de mobilisation probable de se mettre en déplacement.

Le risque de chute de blocs est présent sur plusieurs sections de la RN9 situées au-dessous du versant ainsi qu'au niveau de l'ancienne route qui est aménagée en un endroit touristique. Toutefois, les caractéristiques géomorphologiques, géologiques et géotechniques ainsi que les critères de vulnérabilité ont montré la présence de deux classes de risque, la première est classée risque élevé, elle est localisée essentiellement au niveau de la section située immédiatement après la sortie Ouest du tunnel, également au niveau de la section située entre 500m et 600m après le tunnel. La seconde classe à risque modéré est située dans la partie Ouest du versant, à environ 800m.

Il faut signaler également que la zone touristique située au niveau de l'ancienne route nationale est exposée à un risque élevé de chute de blocs, dont aucune disposition de protection n'existe pour protéger les visiteurs de ce lieu.

Sites complexe touristique Safsaf et Derguina

La méthode qualitative adoptée pour évaluer le risque de chute de blocs en talus au niveau du complexe touristique SAFSAF et DERGUINA est basée sur un système de notation (RHRS). Elle prend en considération plusieurs critères englobant à la fois les facteurs de prédisposition et déclenchant, ainsi que les facteurs liés à la vulnérabilité.

Compte tenu du contexte géologique, le talus du complexe SAFSAF présente une aptitude de prédisposition très élevée. La hauteur de chute et la géométrie des blocs susceptibles à la rupture produit une intensité importante du phénomène. La route décrit des conditions de vulnérabilité très éminentes. Suite à ce contexte, la méthode RHRS a qualifié le risque de chute de blocs au niveau du talus de très élevé. Néanmoins, le talus est conforté par plusieurs techniques, du type passif tel que grillage pendu et plaqué, et du type actif comme l'ancrage de confortement et l'emballotage (filet plaqué avec ancrage de fixations).

Les talus situés entre PK43 et PK45 au niveau de la RN9 dans la commune de DERGUINA sont caractérisés par la variation des scores de différents critères qui sont pris en compte dans la classification du risque selon la méthode RHRS.

Les critères de vulnérabilité ont agi par la longueur importante des secteurs susceptibles, en augmentant ainsi l'index RHRS. La vitesse limite et la largeur de la route ont permis d'obtenir le temps et la distance moyennement suffisante pour agir et éviter un obstacle.

Les critères de prédisposition sont présentés par la disposition structurale défavorable vis-à-vis de la stabilité et les conditions de frottement qui sont moyennement défavorables.

Les critères déclenchants tels que la précipitation agissent d'une façon modérée, la fréquence de chute est liée étroitement avec les fortes précipitations.

CHAPITRE VII « ÉVALUATION DE L'ALÉA ET RISQUE DE CHUTE DE BLOCS »

L'intensité du phénomène est liée à la hauteur de chute et à la taille des blocs ; elle varie d'un secteur à l'autre. Ces deux facteurs sont responsables de la distinction de plusieurs classes de risque à travers le tronçon routier.

L'évaluation du risque de la RN9 entre PK43 et PK45 a révélé dix sections à risque variable allant du modéré jusqu'à fort. Les sections 1, 2 et 8 présentent un risque fort, la section 3 est classée dans la zone à risque moyen, tandis que les sections 4, 5, 6, 7, 9 et 10 sont classées dans la catégorie à risque modéré.

Mise à part la présence de fossés au bord de la route, aucun dispositif de protection n'est présent ; les usagers de la route sont confrontés au risque de chute de blocs d'une manière constante durant la période de fortes précipitations. Du grillage pendu et parfois plaqué peut diminuer efficacement le risque de chute de blocs dans ces sections susceptibles.



CONCLUSION GÉNÉRALE



CONCLUSION GÉNÉRALE

Les éboulements rocheux constituent une menace importante pour les territoires sur lesquels ils se manifestent. Pour atténuer les risques engendrés par les chutes de blocs, il est impératif de procéder à l'identification et la hiérarchisation préventives des zones susceptibles. Le travail de recherche mené dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans ce contexte et concerne la prise en compte de l'échelle d'étude, la nature du phénomène et les facteurs de prédisposition et de déclenchement.

Dans le cadre de ce travail, nous avons fixé des objectifs qui mettent principalement l'accent sur la combinaison de multiples méthodes, ainsi que sur l'application de plusieurs approches et formulations, dans le but d'ajuster ces méthodologies suggérées en fonction des divers contextes spécifiques à chaque site étudié.

La compréhension du phénomène et sa typologie, ainsi que les causes de prédisposition et déclenchant, contribue à un meilleur choix de la méthode d'évaluation adoptée. Les méthodes sont multiples, dont chacune est destinée à étudier un phénomène particulier et conçue pour atteindre un objectif différent allant de l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa jusqu'à la qualification de risque chute de blocs. L'étude trajectographique des blocs est particulièrement indispensable pour caractériser le phénomène de propagation.

Pour une meilleure compréhension du phénomène, plusieurs sorties sur le terrain sont effectuées et l'exploitation de multiples documentations est faite, afin de déterminer les caractéristiques géographiques, géologiques, climatiques et sismiques de la zone d'étude. Cette étape a mis en évidence trois principaux secteurs, le versant du Cap Aoka (K24-PK25), le talus en face du complexe touristique Safsaf (PK37+300) et les talus rocheux de Derguina (PK43-PK45). Sur le plan géologique, la zone d'étude appartient à la chaîne des Babors ; elle fait partie de l'unité de Barbacha au Nord et l'unité de Draa El Arba au sud séparés par le complexe Triasique. Le jurassique est calcaro-dolomitique, le Crétacé inférieur est pélitique et conglomératique et devient marno-calcaireux au Crétacé supérieur. Du point de vue climatique, la région est connue par des fortes précipitations durant la période hivernale, et des intenses averses occasionnelles en printemps et l'automne qui peuvent déclencher des événements. L'activité sismique de la zone d'étude est élevée, constituant ainsi un facteur très influant. Tous ces facteurs précités incitent au déclenchement du phénomène de chute des blocs.

L'évaluation de la susceptibilité et l'aléa chute de blocs est en fonction de l'échelle d'étude, par conséquent, le versant du Cap Aokas est attribué au niveau D2, le talus en face du complexe Safsaf est évalué selon le niveau D3 et les talus au Nord de la commune de Derguina sont évalués suivant le niveau D1, tandis que le risque au niveau de ces trois sites est évalué qualitativement selon un système de notation des critères influençant le phénomène.

Les structures géologiques constituent les principaux facteurs de prédisposition des instabilités de pente, car elles influencent la possibilité d'occurrence cinématique des mécanismes de rupture des massifs rocheux. Il est donc essentiel de privilégier une approche géologique, et donc structurale, pour résoudre ce type de problème. Toutefois, les conclusions dévoilées par l'analyse cinématique sur les trois sites, sont présentées comme suit :

- Le plan de la stratification représente le plan le plus défavorable vis-à-vis de la stabilité des compartiments rocheux ; le mode de rupture, type glissement plan ou dièdre, se manifeste avec la contribution du plan de stratification dans les trois sites.
- Les caractéristiques topographiques des talus et versants contrôlent les conditions de départ des blocs rocheux, dont il faut tenir compte des irrégularités locales de la topographie. Donc un MNT de bonne résolution est indispensable pour une meilleure analyse.
- Les familles de discontinuité contribuent à la génération des blocs à forme et volume divers, dont la géométrie du bloc contrôle significativement le mode de rupture.

Les méthodes d'évaluation de la susceptibilité à la mobilisation diffèrent d'un site à l'autre. L'aléa de départ est de type diffus pour le site de Cap Aokas et Derguina, tandis qu'au niveau de talus de Safsaf, il est de type localisé :

- Le site d'Aokas est évalué selon la méthode Matterocking, qui est basée sur une distribution aléatoire des discontinuités à travers la falaise, en comparant les dispositions dangereuses probables avec la topographie pour obtenir, en fin, pour chaque maille du MNT la probabilité de trouver au moins une structure susceptible à la rupture. Les résultats obtenus ont dévoilé ce qui suit :
 - Les failles ont participé à la création des conditions topographiques favorisant la mobilisation des blocs.
 - Une étroite liaison entre la répartition spatiale des zones susceptibles à la mobilisation et les miroirs des failles (N142°).

- Le glissement plan selon le plan de stratification et le glissement dièdre selon l'intersection (F1-F6) sont les plus répandus à travers la falaise donc, ils sont les plus prédisposés à la rupture.
- Le talus du SAFSAF est examiné suivant la technique alpine qui est basée sur la détection des blocs susceptibles par les constatations directes du massif. Il est noté que :
 - La présence de neuf instabilités de volume et mode de rupture différents (glissement plan, dièdre et surplomb).
 - L'altération au niveau du plan de stratification accélère le processus d'évolution et met l'état de l'équilibre de certains compartiments rocheux à la limite de stabilité.
 - L'existence des karsts perturbe l'état de contrainte au sein du massif et fragilise la roche.
- Les talus de la région de Derguina occupent une large étendue, la méthode utilisée pour évaluer la susceptibilité est globale ; elle consiste à comparer les orientations défavorables des talus avec les orientations des discontinuités prédisposées, en utilisant des outils du SIG. Il a été défini ce qui suit :
 - La structure des roches, qui se débite en plaque et en dalle, favorise le glissement plan selon le plan de la stratification.
 - Les caractéristiques géométriques des discontinuités font en sorte que le volume des blocs est très variable. Elles engendrent des volumes importants selon le plan de stratification qui seront divisés en petits volumes unitaires selon les deux familles de discontinuités moins espacées.
 - La répartition des sections prédisposées à la rupture est en fonction des conditions topographiques des talus.

Les constatations sur le site, les photos aériennes et les photos de site ainsi que les événements déjà vécus ont permis de valider les résultats obtenus.

L'évaluation du risque de chute de blocs au niveau de ces trois sites est qualifiée qualitativement, en adoptant une approche basée sur un système de notation de plusieurs critères ; ces critères sont en relation avec les facteurs de prédisposition, de déclenchements et de vulnérabilité. En revanche, la classification de l'aléa de chute de blocs en versant nécessite une étude trajectographique robuste ; elle donne une estimation spécifique sur la probabilité d'atteinte et l'intensité du phénomène. Pour faire face au problème des incertitudes antiques et épistémiques, une approche probabiliste est utilisée.

Vu le caractère touristique du Cap Aokas, la méthode RHRA proposée par Saroglou et al. (2012), est jugée la mieux adéquate à employer. Cette approche a mis la lumière sur ce qui suit :

- La pente du relief et la hauteur de départ des blocs représentent les facteurs de prédisposition qui ont augmenté le score global de la classification. Les conditions de déclenchement telles que la sismicité et le climat n'ont pas assez d'influence sur la classification du risque.
- Les paramètres liés à la vulnérabilité, comme la largeur de la zone de captage et la présence humaine et d'infrastructure, ont agi considérablement sur le score et la qualification du risque dans ce versant.
- Vu la présence du tunnel et la fréquentation élevée des touristes et des véhicules dans les secteurs routiers situés auprès de la sortie du tunnel et un peu plus loin, ainsi qu'au droit de l'ancienne route située en amont, le risque de chute de blocs est qualifié d'élevé.
- Les conditions morphologiques du versant et l'éloignement de la zone touristique ont fait en sorte que le risque au niveau du secteur routier occidental est classé moyen.

L'évaluation du risque au niveau du talus situé en face du complexe Safsaf est également qualitative, en adoptant la méthode RHRS, vu le volume important de la masse susceptible à l'éboulement, la hauteur du talus, ainsi que les critères liés à la vulnérabilité qui sont importants, le risque est classé très élevé.

Le risque au niveau des talus de DERGUINA est évalué selon la méthode RHRS, et elle est appliquée uniquement sur les dix sections présentant une susceptibilité à la mobilisation.

- Les critères liés à la vulnérabilité sont les mêmes dans toutes les sections susceptibles. Néanmoins, la longueur des sections présente un taux de fréquentation élevé et a augmenté le score global de la classification.
- Les critères hauteur de talus et volume de bloc sont les deux facteurs qui ont fait différencier la qualification du risque dans les dix sections.
- Le risque dans les secteurs étudiés est classé globalement fort à modéré.

Nos résultats ont dévoilé d'un côté que la méthode d'évaluation de l'aléa de départ dépend du type de l'aléa localisé ou diffus et que le degré de détail dépend de l'échelle d'étude et de la disponibilité des données. D'un autre côté, les informations recueillies lors d'une étude

trajectographique sont très importantes pour évaluer l'aléa de propagation. Il est toutefois important de signaler les problèmes et certaines limites liées à l'évaluation des risques de chute de blocs ; spécialement les incertitudes dérivant de la collecte des données et des mesures sur le terrain, un modèle numérique de terrain de bonne résolution, ainsi que les hypothèses proposées lors de l'analyse.

Pour minimiser les conséquences relatives aux chutes de blocs, il est nécessaire de mettre en place des parades adaptées. Ces mesures doivent prendre en compte la morphologie spécifique du site et prendre en compte l'énergie associée aux blocs propagés. Il est recommandé également d'examiner l'état des dispositifs de protection existants pour vérifier leur efficacité.

Pour mieux comprendre le phénomène, la réalisation des recherches est nécessaire dans des contextes géologiques similaires, afin d'améliorer la précision des évaluations de risque. À l'avenir, il est recommandé de continuer à surveiller les différentes composantes de ce phénomène spécialement dans la région des falaises de Cap Aokas. Des programmes de surveillance à long terme peuvent fournir des informations utiles sur la période de retour, volume et forme des blocs, ainsi que l'intensité des événements, participant ainsi à préciser la qualification des risques.

Ce travail ouvre des perspectives importantes sur l'évaluation probabiliste de l'aléa chute de blocs. En particulier, il serait intéressant de compléter ce travail par une étude paramétrique afin de préciser la caractérisation des données d'entrée telles que les caractéristiques du rebond et de frottement. Il serait très utile également d'intégrer des techniques de reconnaissance géophysiques et les outils de cartographie développés, dont le but d'améliorer la qualité des MNT et mieux visualiser l'extension des cavités karstiques et des discontinuités au sein du massif. Il sera important de prendre en compte la relation entre le réseau de discontinuité et la fragmentabilité des blocs propagés le long des pentes. Chercher la relation entre le phénomène de karstification et le phénomène de chute de blocs peut s'avérer nécessaire.

Enfin, pour une meilleure gestion des risques de chutes de blocs ; il est conseillé d'établir une collaboration entre les chercheurs, les ingénieurs géotechniciens et les autorités locales. Afin de mettre en application des stratégies globales pour atténuer les risques de chute de blocs.



ANNEXE



Tableau I : Processus d'évolution des parois rocheuses

Processus	Agents	Dynamique
Altération physico chimique	Un peu d'eau Cycle hydro-climatique Acide humique	Lente et souvent masquée
Dislocation	Evolution gravitaire Racine Fluage d'une assise Dislocation active d'un versant Gel, faible profondeur	Lente sous nos latitudes
Erosion mécanique, ablation, mise en surplomb, déchaussement	Ecoulement d'eau Abrasion (eau chargée) Erosion éolienne	Variable peut être rapide
Action mécanique de l'eau (pression hydraulique)	Infiltration provenant d'écoulement superficiel Circulation internes du massif Marnage Karstification	Variable, peut être rapide phénomène cyclique ou accidentel
Gélifraction	Gel	lente
Fatigue mécanique (cycle lent, cycle journalier)	Sollicitation physique cycliques saisonnières Niveau moyen de contrainte élevé	Rarement processus significatif à l'échelle humaine
Application de force extérieure	Variation d'effort transmis par l'ouvrage Déstabilisation anthropique Modification des conditions hydraulique Séisme	Variable, éventuellement rapide, Peut être accidentel

Tableau II : Mécanisme de rupture simple

Mécanisme	Processus	Stabilité mécanique	Indice d'évolution	Cinématique
Rupture de surplomb	Décohésion	Statiquement instable Contrôlé par la cohésion et la résistance à la traction sur le plan arrière	Peu perceptibles à l'examen visuel	Rapide, absence de signes prémonitoires
Décollement de dalle en toit	Rupture en traction	Statiquement instable Contrôlé par la résistance à la traction	Parfois, indice de décollement	Rapide, généralement absence de signes prémonitoire
Glissement plan	Perte de cohésion et mobilisation de frottement	Variable, fonction de l'inclinaison du plan et de la géométrie des épontes, contrôlé par la cohésion, le frottement et les pressions interstitielles	Ouvertures des fissures arrière	Progressive avec signes prémonitoires : fraicheur des fissures chutes de petits blocs, évolution des remplissages Activité hydraulique
Glissement dièdre	Perte de cohésion et mobilisation de frottement		Ouvertures des fissures arrière et latérales	
Basculement, Déversement	Excursion progressive de la projection verticale du centre de gravité à l'extérieur du polygone d'appui	Statiquement stable, contrôlé par la résistance à la compression de la base ou de l'appui, ou par la poussée exercée par les matériaux de remplissage des fractures arrières	Ouverture des fissures arrière et latérales Fissuration de la base écaillage coté vide Déformation d'ensemble	Evolution progressive avec indice d'évolutions observables Accélération rapide en fin de processus
Flambement	Excès de compression dans le plan, entraînant une instabilité mécanique	Stabilité statique limitée par les déformations, contrôlée par l'état des contraintes, les caractéristiques géométriques, structurales et lithologiques	Ventre (bombement) Fissure de cisaillement du banc comprimé	Généralement progressive dans une phase initiale rapide en phase terminale
Rupture en compression	Ecrasement par excès de contrainte	Statiquement stable, contrôlé par la résistance à la compression	Ecaillage et fissures verticales d'extension, fissures obliques de cisaillement, gonflement transversal	Evolution progressive rupture brutale

Tableau III : Mécanisme de rupture composée

Mécanisme	Processus	Stabilité mécanique	Indice d'évolution	Cinématique
Glissement suivant une surface basale induite par du fauchage	Fauchage : cisaillement inter banc + basculement et localisation d'une surface de rupture	Variable selon la pente du versant et de la surface basale. Contrôlé par de degré de désolidarisation le long de la surface de rupture, l'altération dans matériaux et les pressions interstitielles	Basculement vers le vide des têtes de couches. Indices morphologiques actifs (fissures, escarpement, bombement)	Variable, glissement lent susceptible d'accélération en période de crise temporaire et en phase terminale. Appréciation du degré d'activité par auscultation pour les gros volumes
Stabilisation d'un ensemble chaotique de blocs ou de blocs isolés	Perte d'équilibre d'un empilement instable	Précaire, contrôlé par l'imbrication de blocs, l'érosion et la stabilité du substratum	Trace de mouvement relatif des blocs	Variable, reptation lente d'éboulis, éboulement brutal d'accumulation de blocs, remobilisation de blocs isolés
Glissement suivant une surface basale induite par mécanisme de ruture interne	Aboutissement d'un processus de déformation par rupture interne	Variable selon le degré de localisation d'une surface enveloppé de rupture basale	Indices morphologique actifs : sillons d'effondrement contre-pentes, ouverture de fractures	Lente dans la phase de déformation, peut être rapide après localisation d'une surface de rupture basale. Le suivi instrumenté de la cinématique de l'ensemble du mouvement est un bon indicateur de l'état d'évolution de l'instabilité

Tableau IV : échelle de pondération des critères de stabilité Matterocking

Critère	Facteurs et processus	
Continuité	<ul style="list-style-type: none"> - Agencement structural - Probabilité de recoupement - Activité (reflète la continuité) 	0 à 5 (5 = plan continu)
Degré d'activité	<ul style="list-style-type: none"> - chute de blocs - état de fragmentation, dislocation - Déplacement - autre 	0 à 5 : latente 5 à 50 : modérée ≥ 50 : forte
Eau	Présence ou absence	0 à 5
Degré de sensibilité aux facteurs dégradant	<ul style="list-style-type: none"> - Altération - Météo et climat - sismicité de base - facteur géologique : dissolution tassement, glissement - Facteur anthropogènes 	0 à 10
Degré de sensibilité aux situations déclenchantes	Facteur dégradent fortement amplifiant	0 à ≥ 50
Degré de sensibilité aux facteurs stabilisants	<ul style="list-style-type: none"> - effet de butée - perte de masse - permafrost - facteurs anthropiques 	0 à ≥ -50 (attention : signe négatif)
Facteur de sécurité ou appréciation subjective	<ul style="list-style-type: none"> - structural - géomécanique Facteurs déclenchants/stabilisant - autre	- 20 à 20

Tableau V : Système d'évaluation du risque chutes de bloc destiné aux pentes rocheuses naturelles (H. Saroglou. 2012)

Parameter	Category/ parameter weight factor	Rating					Score (Multiply rating with weight factor of parameter)
1. Slope angle (°)	A/7 %	25–40	Medium 40–50	High 50–60	Very high >60 Overhanging		
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15–30	30–60	>60		
Rating		10	30	60	100		
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfalls from low slope areas (H/4)	Rockfalls from middle slope areas (H/2)	Rockfalls from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfalls from whole slope (H)		
Rating		10	30	60	100		
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches, (helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches		
Rating		10	30	60	100		
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation		No vegetation	
Rating		10	30	60		100	
Joint roughness / Filling material in joints/ Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10 mm	Slightly rough planar or filling with stiff clay >5 mm independent of roughness or very wide opening of joints 10–100 mm	Smooth planar or filling soft clay >5 mm independent of roughness or extremely wide opening > 100mm	
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	
Rating		10		30	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1–2 m	Moderate 2–5 m	High 5–10 m	Very high >10 m	
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (JCS, MPa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20–30	5–20		<5, weathered	
Rating		10	30	60		100	
10. Strength of intact rock (MPa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10–30	30–60		>60 MPa	
Rating		10	30	60		100	
11. Rock mass blockiness / Block volume (m ³)	B/4 %	<1	1–2.5	2.5–4.0	4.0–8.0	>8.0	
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessment)	B/2 %	Null	1–5	5–10		>10	
Rating		10	30	60		100	
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions		Frequent Undermined conditions	
Rating		10	30	60		100	
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	seasonal	often	Very often, during whole year	
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability/ Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	
Rating		10	15	30	60	100	

Paramètre	Facteur de pondération catégorie/ paramètre	Notation					Score (Multiplier la note par le facteur de poids de Paramètre)
		$\alpha < 0,16$	$0,16 < \alpha < 0,24$	$0,24 < \alpha < 0,36$	$\alpha > 0,36$		
16. Risque sismique (coefficient d'accélération α)	C 4	$\alpha < 0,16$	$0,16 < \alpha < 0,24$	$0,24 < \alpha < 0,36$	$\alpha > 0,36$		
Notation		10	30	60	100		
17. Largeur de la zone de captage (m)	D 10	>20	10-20	5-10	2-5	No	
Notation		10	15	30	60	100	
18. Historique des chutes de pierres	D 5	service multiorigine-quelques destinations	occasionnel	De nombreuses	Souvent	Continu	
Notation		10	15	30	60	100	
19. Accessibilité des pentes	D 5	toutes les étanchéités sont possibles	La plupart des types de stabilisation possibles	Un certain nombre de types de stabilisation possibles	Peu de stabilisations possibles	L'accès est très difficile.	
Notation		10	15	30	60	100	
20. Résultat potentiel de l'impact et valeur des structures	D 20.	Négligeable ; pas de structures humaines et d'activités permanentes	Faible ; zones de faible activité humaine	Présence humaine modérée ; faible fréquence des maisons	Élevé ; présence humaine fréquente, nombreux maisons	Présence humaine très élevée, constante, densément habitée areas	
Notation		10	15	30	60	100	
Score total (maximum possible 33)							



**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUE**



A

- Abbruzzese, J. M., Sauthier, C., & Labiouse, V. (2009).** Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1095-1109.
- Abbruzzese, J. M., & Labiouse, V. (2014).** New Cadanav methodology for quantitative rock fall hazard assessment and zoning at the local scale. *Landslides*, 11, 551-564.
- Achour Y., Boumezbeur A., & Hadji R., (2017),** Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria, *Arab Journal of Geosciences*, 10(8), 194. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3049-9>
- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2009).** Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1059-1073.
- Antoine, P., & Giraud, A. (1995).** Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 51(1).
- Akin, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akin, M. K., & Topal, T. (2021).** Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. *Engineering Geology*, 283, 106001.
- Asteriou, P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2012).** Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103-113.
- AUDIBERT, M (2011).** Hiérarchisation du risque de chute de blocs Réseau routier, départemental du Gard RD 713. Etude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM/RP-58975-FR.
- Aven, T. (2016).** The reconceptualization of risk. In *Routledge handbook of risk studies* (pp. 58-72). Routledge.

B

- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J. D., & Tosoni, D. (2001).** Matterock. Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises: Confrontation des méthodes d'étude des éboulements dans l'arc alpin, 70-83.
- Banton, J. (2009a).** Reconnaissances géophysiques d'un dépôt d'éboulement et modélisations numériques de la propagation des avalanches rocheuses. Thesis, Université de Grenoble & Politecnico de Torino.
- Belytschko, T., Ong, J. S. J., Liu, W. K., & Kennedy, J. M. (1984).** Hourglass control in linear and nonlinear problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 43(3), 251-276.
- Besson L., Durville JL., Hubert T et al. (1999).** Plan de prévention des risques naturels, risques mouvements de terrain, guide méthodologique, éd. La documentation Française, 71p.

- Bougdal R., (2009)**, Doubling of the Cap Aokas tunnel, synthesis of geological and geotechnical data, Geological report (Internal document).
- Bourrier, F. (2008)**. Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel, application à la trajectographie des chutes de blocs (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- Bourrier, F., & Hungr, O. (2011)**. Rockfall dynamics: a critical review of collision and rebound models. *Rockfall engineering: from prediction to mitigation*, 175-203.
- Bozdağ, A. (2022)**. Rockfall hazard assessment in a natural and historical site: The case of ancient Kilistra settlement (Konya), Turkey. *Journal of Mountain Science*, 19(1), 151-166.
- Bozzolo, D., & Pamini, R. (1986)**. Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63(1), 113-130.
- Budetta, P. (2004)**. Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 71-81.
- Bureau d'étude Ingénierie des mouvements de sol et des risques naturel**

C

- Calvino A. Dumont P., Durville JL. et al. (2001)** - Parades contre les instabilités rocheuses, éd. LCPC, 143 p.
- Cancelli, A., & Crosta, G. (1993)**. Rockfall hazard and risk mapping. In International conference and field workshop on landslides (pp. 69-75).
- Corominas J., Matas G., Ruiz-Carulla R., (2019)**, Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls, *Landslides*, 16(1), 5-21. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1049-9>
- CRAAG**. Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique.
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2004)**. Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(4), 583-598.
- CRUALP**. Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin
- Cruden D.M., Varnes D.J., (1996)**, Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, (pp. 36-75). Transportation Research Board Special Report No. 247. National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/4917>
- Cuervo, Y. (2015)**. Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets: application aux évènements réels (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- Cundall, P. A. (1971)**. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. In *Proceedings of the international symposium on rock mechanics* (Vol. 8, pp. 129-136).

D

- Dahoua L., Usychenko O., Savenko V.Y., & Hadji R. (2018)**, Mathematical approach for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments during an earthquake, *Mining Science*, 25, 207-217.
- Delga, M. D. (1969)**. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie
- Descoeudres, F. (1997)**. Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. *Publications de la société suisse de mécanique des sols et des roches*, 135, 3-11.
- Dorren L., Berger F., (2013)**, Trajectory models: asset or constraint. In Lambert A., Tang A.M., & Jaboyedoff M. (Eds.), *Slope Trajectories: Processes, Modeling, and Monitoring* (pp. 311-327), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
<https://doi.org/10.14375/NP.9782880747123.311>.
- Duplan, L. (1952)**. La région de Bougie. (No Title).
- Durand-Delga, M. (1980)**. Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Geologie des chaînes alpines issues de la Tethys*, 67-85.
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J. R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., & Giraud, A. (2002)**. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural hazards and earth system sciences*, 2(1/2), 15-26.

E

- Eggers, M. J., Nash, T., Dwumfour, D., Turbitt, S., & Dixon, J. (2021)**. Natural slope hazard management and integration with mining operations (pp. 261-276). Australian Centre for Geomechanics.
- Erne-Heintz, V., & Martin, B. (2020)**. De l'aléa à la vulnérabilité: du sens à donner aux mots (ou aux maux)...Riseo: risques études et observations, (1), 174-181.
- Evans, S. G., & Hungr, O. (1993)**. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geotech. J.*, 30, 620-636.

F

- Fanos, A. M., Pradhan, B., Alamri, A., & Lee, C. W. (2020)**. Machine learning-based and 3d kinematic models for rockfall hazard assessment using LiDAR data and GIS. *Remote Sensing*, 12(11), 1755.
- Farid, Z., Riheb, H., Karim, Z., Younes, G., Rania, B., & Aniss, M. (2019)**. Stability analysis of jointed rock slopes using geomechanical, kinematical, and limit equilibrium methods: the Chouf Amar career, M'Sila, NE Algeria. *Mining Science*, 26.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008)**. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, 102(3-4), 85-98.

- Ferrari F., Giacomini A., Thoeni K., (2016)**, Qualitative rockfall hazard assessment: A comprehensive review of current practices, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2865-2922. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z>
- Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K., & Lambert, C. (2017)**. Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98, 88-101.
- Fleurisson, J. A. (2001)**. Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux: description, analyse et modélisation. *Revue française de géotechnique*, (95-96), 103-116.
- Frayssines, M. (2005)**. Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux (rupture) (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

G

- Goodman, R. E. (1985)**. Block theory and its application to rock engineering.
- Goodman RE (1989)** Introduction to rock mechanics, 2nd edn. Wiley, New York
- Gunzburger, Y., &Magenet, V. (2014)**. Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the Paris basin, France. *Tectonophysics*, 617, 44-57.
- Gentier S. (2002)** - *Projet ROCC. Stabilité des falaises côtières : les mécanismes d'éboulement*. BRGM/RP-51743-FR, 45 p., 37 fig. © BRGM, 2002,

H

- Hadji R., Boumazbeur A., Limani Y., Baghem M., Chouabi A., (2013)**, Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: A case study of Souk Ahras region, NE Algeria, *Quaternary International*, 302, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.02.011>
- Hantz D., Dussauge-Peisser C., Jeannin M., Vengeon J. M., (2002, April)**, Rock fall Hazard: from expert opinion to quantitative evaluation, In *Geomorphology: From Expert Opinion to Modelling* (pp. pp-115). [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00019-2)
- Hantz D. 2010**. Évaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise. In: Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Grenoble.
- Hantz D., Corominas J., Crosta G.B., Jaboyedoff M., (2021)**, Definitions and concepts for quantitative rockfall hazard and risk analysis, *Geosciences*, 11(4), 158. <https://doi.org/10.3390/geosciences11040158>
- He, K., Li, Y., Ma, G., Hu, X., Liu, B., Ma, Z., & Xu, Z. (2021)**. Failure mode analysis of post-seismic rockfall in shattered mountains exemplified by detailed investigation and numerical modelling. *Landslides*, 18, 425-446.
- Heim, A.: Bergsturz und Menschenleben, Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp., 1932** (in German)
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981)**. Rock slope engineering. CRC press.
- Homand F. (1983)** - Stabilité des pentes rocheuses - cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy - n° 3308/2 - 51 p.

Hungr, O., Leroueil, S., &Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.

J

Jaboyedoff M., Philipposian F., Mamin M., Marro C., Rouiller J.D., (1996), Spatial distribution of discontinuities in a cliff: Statistical and probabilistic approach. Work Report PNR31, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Marro, C., Philipposian, F., &Rouiller, J. D. (1999). Detection of rock instabilities: Matterock methodology. Joint Japan-Swiss Sem. on Impact Load by Rock Falls and Protection Structures, Kanazawa, Japan, 37-43.

Jaboyedoff, M., &Labiouse, V. (2002). Etablissement d'une méthodologie de mise en oeuvre des cartes de dangers naturels du Canton de Vaud CADANAV-Méthodologie instabilités rocheuses. Rapport pour le canton de Vaud.

Jaboyedoff, M., &Labiouse, V. (2003, September). Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. In ISRM Congress (pp. ISRM-10CONGRESS). ISRM.

Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipposian, F., &Rouiller, J. D. (2004). Assessing fracture occurrence using " weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 83-93.

Jaboyedoff, M., &Labiouse, V. (2011). Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3), 819-828.

Jeannin, M. (2005). Etude des processus d'instabilités des versants rocheux par prospection géophysique-Apport du radar géologique (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

Jiang N., Li H.B., Liu M.S., Zhang J.Y., Zhou J.W., (2020), Quantitative hazard assessment of rockfall and optimization strategy for protection systems of the Huashiya cliff, southwest China, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1939-1965. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1829762>

K

Kafaji, I. K. A. (2013). Formulation of a dynamic material point method (MPM) for geomechanical problems.

Kallel A., Ksibi M., Dhia H.B., Khélifi N., (Eds.). (2018), Recent advances in environmental science from the Euro-Mediterranean and surrounding regions: proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1), Tunisia 2017. Springer International Publishing.

Keaton, J. R. (2012). Rockfallcharacterisation and control. *Rockfallcharacterisation and control. Environmental& Engineering Geoscience.*

Kireche, O. (1993). Evolution géodynamique de la marge tellienne des maghrébides d'après l'étude du domaine par autochtone schistosé" massifs du Chélib et d'Oranie de Blida-Bou Maad des Babors et biban" (Doctoral dissertation).

L

- Labouse, V. (2004, June).** Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on Alpine sites and experimental investigation of boulder impacts. In 9th International Symposium on Landslides (Vol. 1, pp. 457-466). Rio de Janeiro: Balkema.
- Labouse, V., &Heidenreich, B. (2009).** Half-scale experimental study of rockfallimpacts on sandy slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 1981-1993.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (2004).** Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux.
- Ladjel, Z., Zahri, F., Hadji, R., Hamed, Y., Zighmi, K., &Benmarce, K. (2024).** Integrated hazard assessment of rockfall incidents in the Cap Aokas Cliff Region. *Journal of Mountain Science*, 21(6), 1916-1929.
- Lan, H., Li, L., & Wu, Y. (2015).** Stochasticity of rockfalltrajectory revealed by a field experiment repeated on a single sample. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes* (pp. 1713-1721). Springer International Publishing.
- Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., & Bonnard, C. (2005).** Landslide risk management in Switzerland. *Landslides*, 2(4), 313-320.
- Leikine, M. (1971).** Etude géologique des Babor occidentaux (Algérie) (Doctoral dissertation, Toulouse).
- Leine, R. I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., & Gerber, W. (2014).** Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody System Dynamics*, 32, 241-271.
- Li, L., &Lan, H. (2015).** Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 1163-1176.
- Lied, K. (1977).** Rockfall problems in Norway. ISMES Publication, 90, 51-53.
- Lisjak, A., &Grasselli, G. (2011, October).** Combined finite-discrete element analysis of rock slope stability under dynamic loading. In *Proc., 2011 PAN-American CGS GeotechnicalConf.*
- Lorenz, E. N. (1963).** Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., &Pedrazzini, A. (2009).** Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1643-1653.

M

- MASSA (2013) ;** Projet Interreg ALCOTRA MASSA. Medium and Small Size rockfall hazard Assessment.Projet simple n°065. Janvier 2010 – Janvier 2013.
- Matasci, B., Jaboyedoff, M., Loye, A., Pedrazzini, A., Derron, M. H., &Pedrozzini, G. (2015).** Impacts of fracturing patterns on the rockfall susceptibility and erosion rate of stratified limestone. *Geomorphology*, 241, 83-97.

- Matasci, B., Stock, G. M., Jaboyedoff, M., Carrea, D., Collins, B. D., Guérin, A., ...&Ravel, L. (2018).** Assessing rockfall susceptibility in steep and overhanging slopes using three-dimensional analysis of failure mechanisms. *Landslides*, 15, 859-878.
- Mateos, R. M., García-Moreno, I., Reichenbach, P., Herrera, G., Sarro, R., Rius, J., ...& Fiorucci, F. (2016).** Calibration and validation of rockfall modelling at regional scale: application along a roadway in Mallorca (Spain) and organization of its management. *Landslides*, 13, 751-763.
- Mejia, L., Quadros, R., Vargas, E., &Figueiredo, R. (2010).** Aplicación del Método de Elementos Discretos (DEM) en el Modelamiento de la Propagación y Coalescencia de Fracturas en Taludes de Gran altura. In *PERUMIN - 30 convencion minera*. Lima.
- Meissl, G. (2001).** Modelling the runout distances of rockfall using a geographic information system. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband*, (125), 129-137.
- Michoud, C., Derron, M. H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F. J., Loye, A., ...&Queyrel, A. (2012).** Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 615-629.
- Monjuvent, G., &Marnezy, A. (1986).** Processus d'évolution des versants dans les Alpes françaises. *Géologie alpine*, 62, 87-104.
- Morales, T., Clemente, J. A., Mollá, L. D., Izagirre, E., &Uriarte, J. A. (2021).** Analysis of instabilities in the Basque Coast Geopark coastal cliffs for its environmentally friendly management (Basque-Cantabrian basin, northern Spain). *Engineering Geology*, 283, 106023.
- Mougin, J. P. (1973).** Les mouvements de terrain: recherches sur les apports mutuels des études géologique et mécanique à l'estimation de la stabilité des pentes (Doctoral dissertation, Université Scientifique et Médicale de Grenoble).

N

- Nédellec, J.L., Cruche, M. (2003).** Typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés. Etude bibliographique. Applications au contexte de l'île de La Réunion. BRGM/RP-52909-FR.
- Netshilaphala, V., &Zvarivadza, T. (2022).** Fall of ground management through underground joint mapping: shallow chrome mining case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(4), 2231-2254.
- Nicholas, D., and Sims, D. 2000.** Collecting and using geologic structure data for slope design. In *Slope stability in surface mining*. Edited by W.A. Hustrulid, M.K. McCarter, and D.J.A. Van Zijl. Society of Mining Engineers, New York. pp. 11–26.
- Norrish N., Willy W. (1999)** - Rock slope stability analysis , In . *Landslides Investigation and Mitigation*, chap. 15, p. 391-425

O

- Obert, D. (1981).** Étude géologique des Babors orientaux (domaine tellien, Algérie) (Doctoral dissertation, Toulouse).

OFAT/OFEE/OFEFP (1997) Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire, édité par OFAT/OFEE/OFEFP (1997), Berne. http://www.planat.ch/ressources/planat_productfr_1032.pdf

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

P

Pahl, P. J. (1981, June). Estimating the mean length of discontinuity traces. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 18, No. 3, pp. 221-228). Pergamon.

Palau J., Janeras M., Prat E., Pons J., Ripoll J., Martínez P., Comellas J., (2013), Preliminary assessment of rockfall risk mitigation in access infrastructures to Montserrat, *Landslide Science and Practice: Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation*, 255-261. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_34

Panet M. (1991) - Rapport général : les talus rocheux. In : proceedings of the T*" International congress on rock mechanics, 1991, Aachen, Germany , vol. 3 , p. 1577-1585

Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., Froese, C. R., Langenberg, C. W., & Moreno, F. (2011). Structural analysis of Turtle Mountain: origin and influence of fractures in the development of rock slope failures. *Geological Society, London, Special Publications*, 351(1), 163-183.

Petje, U., Ribičič, M., & Mikoš, M. (2005). Computer simulation of stone falls and rockfalls. *Acta geographica slovenica*, 45(2), 93-120.

PFEIFFER, T. J., & BOWEN, T. D. (1989). Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the association of Engineering Geologists*, 26(1), 135-146.

Pierson, L. A., Davis, S. A., & Van Vickle, R. (1990). Rockfall Hazard rating system: implementation manual (No. FHWA-OR-EG-90-01).

PrinaHowald, E., & Abbruzzese, J. M. (2022). A framework for assessing the performance capabilities of rock fall protections for hazard analysis and zoning. *Applied Sciences*, 12(17), 8834.

R

Radjai, F., & Richefeu, V. (2007). Contact dynamics method. Montpellier

Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D., Tripet J., (2002), Hazard assessment in Switzerland—Codes of Practice for mass movements, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 263-268. <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0178-6>

Renn, O. (2008). Concepts of risk: An interdisciplinary review—part 2: Integrative approaches. *GAIA—Ecological Perspectives for Science and Society*, 17(2), 196-204.

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway research record*, (17).

Rives, T., Razack, M., Petit, J. P., & Rawnsley, K. D. (1992). Joint spacing: analogue and numerical simulations. *Journal of structural geology*, 14(8-9), 925-937.

RPA. Règles Parasismiques Algériennes RPA 2024

Rouiller, J. D. (1998). Pentes instables dans le Pennique valaisan: Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. vdfHochschulverlag AG.

S

San, N. E., Topal, T., & Akin, M. K. (2020). Rockfall hazard assessment around Ankara Citadel (Turkey) using rockfall analyses and hazard rating system. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 3831-3851.

Saroglou, H., Marinou, V., Marinou, P., & Tsiambaos, G. (2012). Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1823-1836.

Sarro, R., Mateos, R. M., García-Moreno, I., Herrera, G., Reichenbach, P., Laín, L., & Paredes, C. (2014). The Son Pocrockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation. *Landslides*, 11, 493-503.

Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J. C., Mateos, R. M., Tomás, R., Pastor, J. L., ...& Herrera, G. (2018). Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: Application at a cultural heritage site. *Remote sensing*, 10(12), 1923.

Stephanov, E. (1970). Notice explicative de la carte du levé géologique de la feuille de Ziama Mansouria (N° 48), échelle 1/50000, année 1969-1970, Sonarem 1967-1970, inédite.

Sulsky, D., & Schreyer, H. L. (1996). Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1-4), 409-429.

Sulsky, D., & Schreyer, H. L. (1996). Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1-4), 409-429.

T

Turner, A. K., & Duffy, J. D. (2012). Evaluation of rockfall mechanics. *Rockfall Characterization and Control*, 285-333.

U

United States Geological Survey (USGS)

V

Van Asselt, M. B., & Rotmans, J. (2002). Uncertainty in integrated assessment modelling. *Climatic change*, 54(1), 75-105.

- Van Veen, M., Hutchinson, D. J., Bonneau, D. A., Sala, Z., Ondercin, M., & Lato, M. (2018).** Combining temporal 3-D remote sensing data with spatial rockfall simulations for improved understanding of hazardous slopes within rail corridors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2295-2308.
- Varnes, D. J., (1958),** Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47
- Varnes, D. J. (1978).** Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., ... Jaboyedoff M., (2011),** Rockfall characterisation and structural protection—a review, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617-2651.
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>

W

- Wittke, W. (2014).** *Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM)*. John Wiley & Sons.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2004).** *Rock slope engineering*. CRC Press.

Z

- Zahri, F., Boukelloul, M. L., Hadji, R., & Talhi, K. (2016).** Slope stability analysis in open pit mines of Jebel Gustar career, NE Algeria—a multi-steps approach. *Mining Science*, 23, 137-146.
- Zhang, J. Y., Li, H. B., Yang, X. G., Jiang, N., & Zhou, J. W. (2021).** Quantitative assessment of rockfall hazard in post-landslide high rock slope through terrestrial laser scanning. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(10), 7315-7331.