

METHODOLOGIE POUR LA CARTOGRAPHIE A FINE ECHELLE DE L'ALEA ET DU RISQUE ROCHEUX SUR LA CÔTE BLEUE (FRANCE)

A METHODOLOGY FOR FINE-SCALE MAPPING OF ROCKFALL HAZARD AND RISK ON THE BLUE COAST TERRITORY (FRANCE)

Lisa ZAHARIAS¹, Pierre AZEMARD¹, Nathalie BERENGER¹, Nathalie MARÇOT², Sophie SEJALON³, Caroline ILLIEN³

¹ Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, France

² BRGM, Marseille, France

³ Conservatoire du Littoral, PACA, France

RÉSUMÉ – La méthodologie développée pour la caractérisation de l'aléa et du risque chute de blocs et sa cartographie à fine échelle sur la Côte Bleue est une conjonction de la démarche MEZAP avec la méthode LCPC, toutes deux adaptées et associées à un abaque d'aide à la décision développé dans le cadre du projet « *Rock The Alps* ». Elle a permis de caractériser près de 300 instabilités rocheuses sur les villages du Rove et de la Vesse.

ABSTRACT – A methodology was developed for characterizing rockfall hazard and risk and its fine-scale mapping on the Blue Coast. It consists of a conjunction of the MEZAP approach with the LCPC method, both adapted and associated with a decision support chart developed within the « *Rock The Alps* » project. It enables the characterization of nearly 300 rock instabilities in the Rove and La Vesse villages.

1. Introduction

Le massif calcaire de la Côte Bleue, situé dans les Bouches-du-Rhône, est l'un des plus vastes sites naturels protégés par le Conservatoire du Littoral. Il est soumis à une forte pression urbaine étant donné sa proximité avec la métropole de Marseille et son attractivité touristique.

Ces dernières années, ce territoire connaît un accroissement d'événements de chutes de blocs à la suite d'intempéries. Afin de minimiser les dommages sur les biens et les personnes, le Conservatoire du Littoral a souhaité lancer un programme d'études visant à dresser un bilan complet de l'aléa et du risque de chute de blocs sur son territoire et à proposer des préconisations en matière de gestion du risque. Pour répondre à cette demande, un contrat de coopération entre entités publiques a été mis en place entre le Conservatoire du Littoral, le Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Deux premières phases d'études générales ont été pilotées par le BRGM. Elles ont conduit à identifier, sur des enjeux linéaires (sentiers) et surfaciques (zones urbanisées), des secteurs à risque prioritaires sur l'ensemble de la Côte Bleue à l'échelle 1/25000 (BRGM, 2020).

La troisième phase du programme, pilotée par le Cerema, a pour objectif de développer une méthodologie permettant de produire une cartographie détaillée (1/5000) de l'aléa et du risque de chutes de blocs pour un secteur urbanisé et de proposer des solutions de gestion du risque qui prennent en compte les contraintes environnementales et financières du Conservatoire du Littoral. Le village du Rove et la calanque de la Vesse ont servi de sites pilotes pour cette phase.

2. Développement méthodologique

La méthodologie est résumée dans le logigramme ci-après. Elle est la conjonction de la démarche MEZAP avec la méthode LCPC, toutes deux adaptées et associées à un abaque d'aide à la décision développé dans le cadre du projet « *Rock The Alps* ».

Dans un premier temps, elle est développée pour des enjeux surfaciques uniquement (bâti et piéton dans son jardin), qui sont identifiés prioritaires car plus vulnérables. Le résultat final est la caractérisation d'un aléa résultant différencié selon le type d'enjeu.

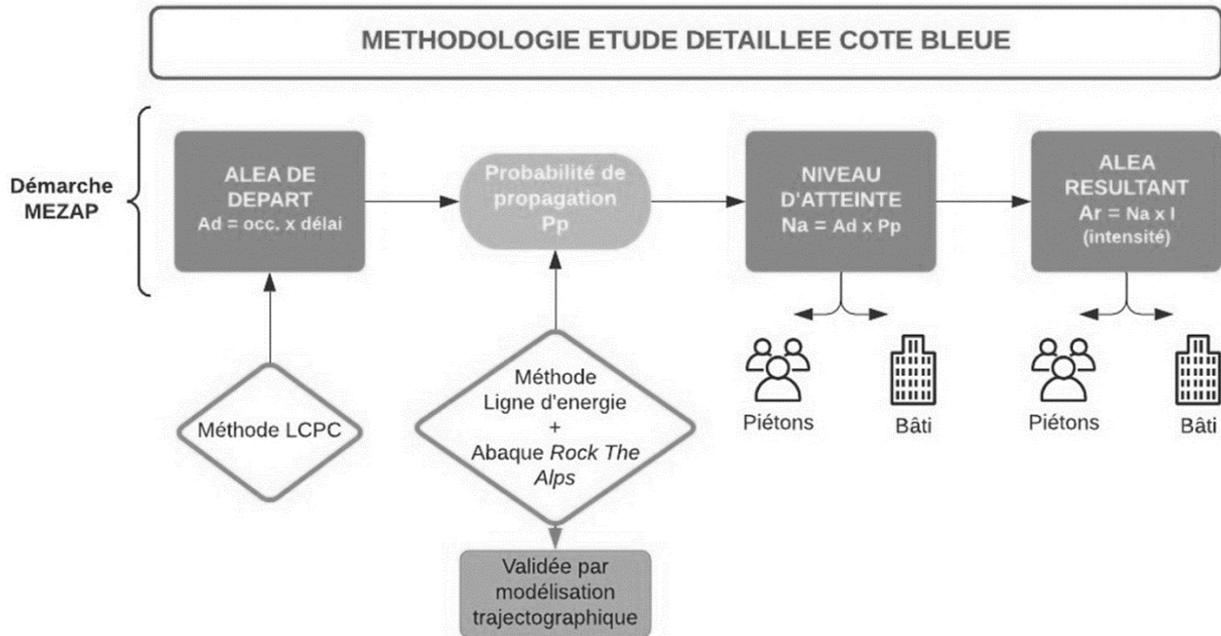


Figure 1. Logigramme résumant la méthodologie

2.1. Identification et caractérisation des instabilités rocheuses : aléa de départ

La cartographie à 1/25000 établie lors de la phase 2 du programme d'études a identifié des zones de départ potentielles à partir d'un MNT au pas de 1 mètre et d'un seuil de pente $\geq 50^\circ$. Cette base de travail, combinée à des pré-visites de terrain, a permis de découper les versants rocheux selon des secteurs géographiques. Vingt-cinq jours de reconnaissances in-situ, pédestres et sur cordes, ont été nécessaires pour recenser et caractériser près de 300 instabilités rocheuses pouvant atteindre un ou des enjeux.

Une base de données a été créée sous Excel. Elle sert de base de travail et est utilisée en tant que table attributive pour les traitements SIG sous Qgis ainsi que de base de données pour générer des fiches de qualification de l'aléa pour chaque compartiment.

La méthodologie établie dans le guide LCPC (2004), reposant sur le concept de couple probabilité/délai, a été utilisée pour qualifier l'aléa de départ. L'aléa de rupture d'un compartiment identifié est qualifié « à dire d'expert » à partir des différents facteurs de prédisposition internes et externes observables sur le terrain (géométrie, processus d'évolution, facteurs aggravants, mécanismes de rupture). Deux adaptations ont été faites :

- 1) l'occurrence de chute est évaluée de « faible » à « élevée » ;
- 2) quatre délais sont considérés en référence à la durée de vie moyenne des ouvrages de protection : très court terme (deux ans) ; court terme (dix ans), moyen terme (trente ans), long terme (supérieur à trente ans).

Une matrice d'évaluation de l'aléa de départ est créée en croisant ces deux notions (figure 2). Quatre niveaux d'aléa de départ sont proposés : « faible », « modéré », « élevé » et « très élevé ».

ALÉA DE DÉPART		Délai			
		Long terme (>30 ans)	Moyen terme (entre 10 et 30 ans)	Court terme (entre 2 et 10 ans)	Très court terme (<2 ans)
Probabilité d'occurrence	Faible	faible	faible	modéré	modéré
	Moyenne	faible	modéré	élevé	élevé
	Elevée	modéré	élevé	très élevé	très élevé

Figure 2. Matrice de l'aléa de départ

2.2. Niveau d'atteinte : aléa de départ * probabilité de propagation

2.2.1. Probabilité de propagation

Etant donné le nombre important d'instabilités rocheuses, il aurait été chronophage de lancer des simulations trajectographiques sur un logiciel de modélisation pour chaque bloc recensé. Il a donc été décidé d'utiliser une méthode empirique développée dans le cadre de la réflexion sur MEZAP puis du projet « Rock the Alps ».

Ces réflexions ont permis d'établir une relation entre les valeurs d'angle de la ligne d'énergie et un indicateur de forme de versant en se basant sur l'analyse statistique de plus de 2700 chutes de blocs dans les Alpes (Colas, 2017, 2019). L'angle de la ligne d'énergie correspond à l'angle entre l'horizontale et une ligne imaginaire reliant la zone de départ et la zone d'arrêt. L'indicateur de forme de versant choisi est l'aire normalisée A_n , correspondant à l'aire située sous le profil topographique normalisé par la hauteur totale H de la trajectoire.

Un abaque d'aide à la décision (figure 3) ainsi qu'une feuille de calcul (macro Excel) automatisant le traitement ont été créés. Trois courbes sont tracées correspondant respectivement à des probabilités de propagation de 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} .

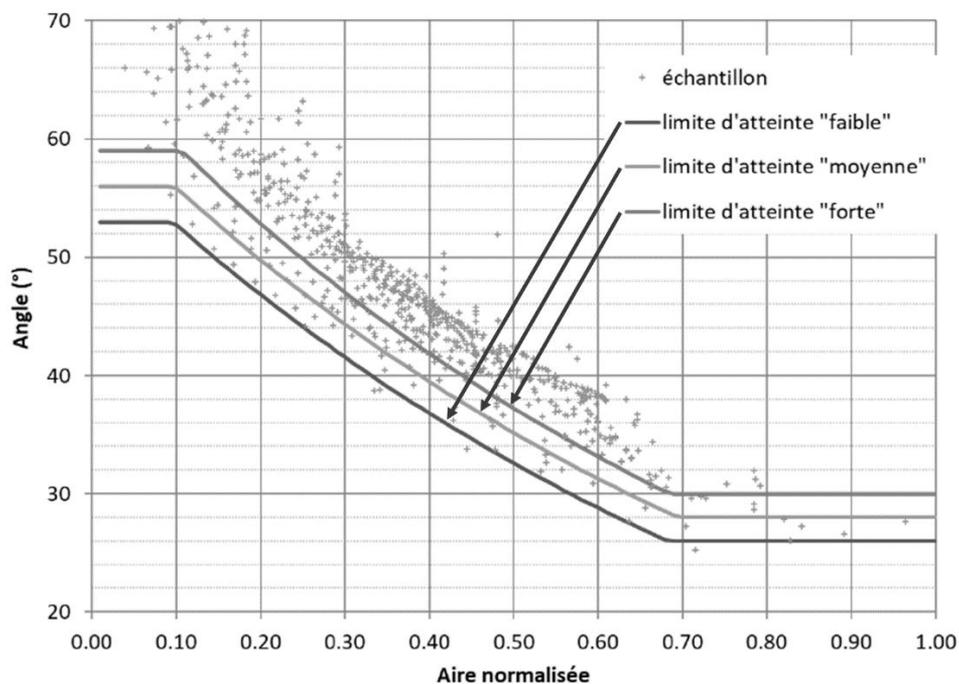


Figure 3. Distribution A_n /angle d'énergie selon les limites d'atteinte (Colas, 2017, 2019)

Une probabilité de propagation est ainsi déterminée pour chaque compartiment selon cette routine :

- 1) Extraction du profil topographique de plus grande pente d'après le MNT au pas de 1 m ;
- 2) Normalisation du profil et insertion de celui-ci dans l'abaque d'aide à la décision (figure 4, courbe noire) ;
- 3) Relevé des 3 angles de limite de propagation « faible », « moyenne » et « forte ». Ces angles correspondent à la projection des valeurs d'angles avec l'intersection de la courbe du profil normalisé avec les 3 courbes « limite d'atteinte ». Si la courbe du profil topographique normalisé recoupe plusieurs fois une courbe « limite d'atteinte », la valeur d'angle retenue est celle correspondant à la première intersection **en remontant vers l'amont depuis la valeur en abscisse de l'aire normalisée au droit de l'enjeu** (figure 4, flèches) ;
- 4) Report des 3 angles déterminés sur le profil topographique non normalisé étudié et représentation cartographique via Conefall sous forme de cônes de propagation.

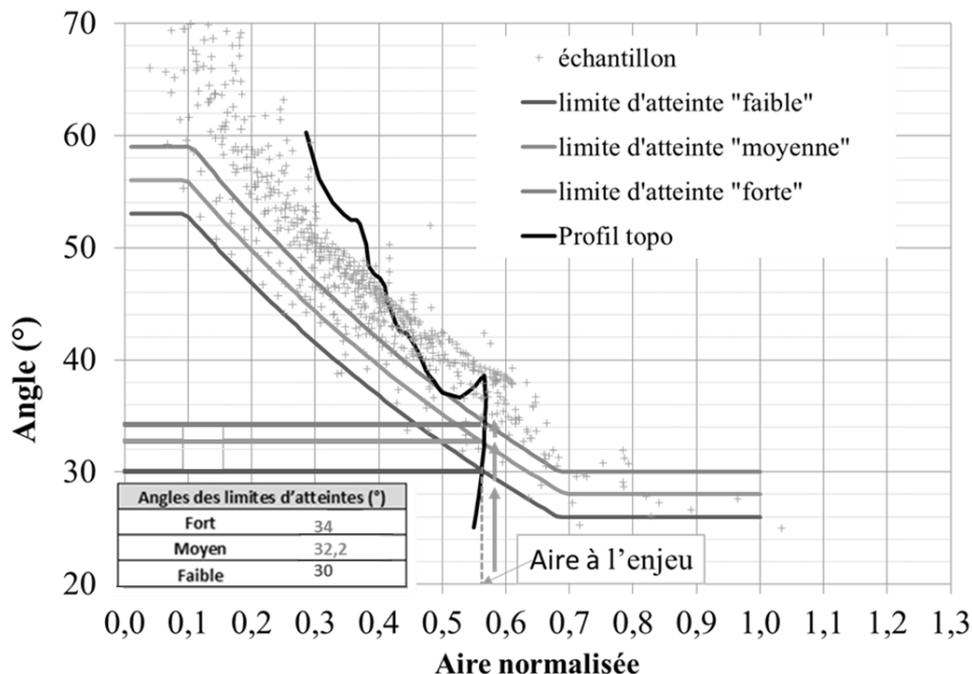


Figure 4. Exemple d'utilisation de l'abaque

Une comparaison statistique sur les 73 premières instabilités du Rove a été effectuée entre cette méthode empirique et un logiciel de modélisation trajectographique afin de justifier l'utilisation de l'abaque Rock The Alps. Les valeurs des angles de la ligne d'énergie obtenues avec la modélisation et avec l'abaque Rock The Alps sont comparées et représentées dans l'histogramme suivant (figure 5, A).

La dispersion des données s'étend de -4° à 5° avec une moyenne à $0,2^\circ$. Les valeurs sont centrées sur 0° et présentent deux pics à 1° et -2° . L'écart d'angles obtenu entre les deux méthodes peut s'expliquer par :

- la longueur du profil (figure 5, B) : plus le profil est court plus l'écart est élevé ;
- les angles de propagation inférieurs à 26° qui ne sont pas pris en compte par l'abaque ;
- la nature du substrat de rebond qui n'est pas considérée par la méthode empirique utilisée (ligne d'énergie).

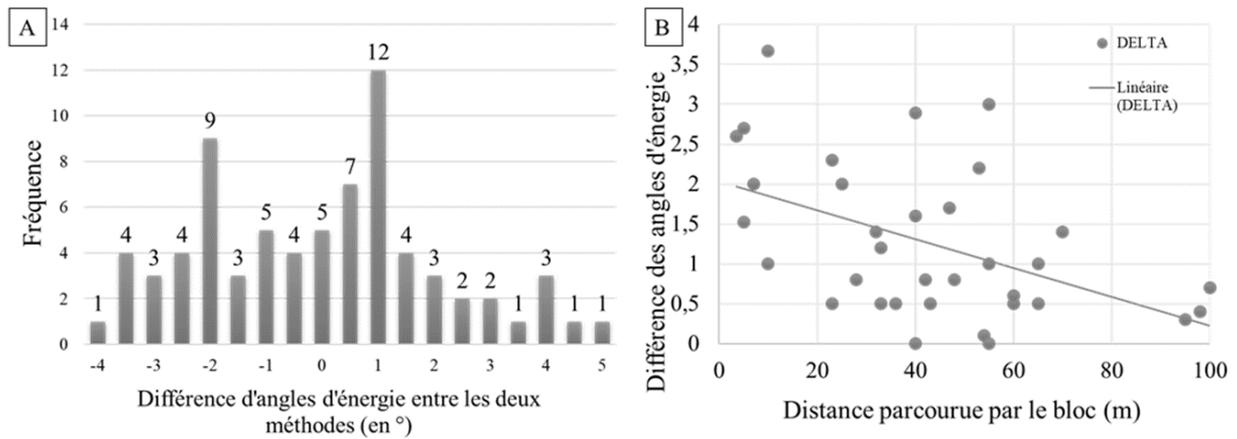


Figure 5. Comparaison statistique des angles obtenus entre la méthode empirique et Propag

Excepté certains cas exceptionnels, les résultats entre les deux méthodes concordent assez bien. Pour cette étude, l'utilisation de la méthode d'évaluation rapide des enveloppes de propagation en fonction de la morphologie globale du versant élaborée par le groupe de travail Rock The Alps apparaît donc pertinente. Cependant, l'abaque Rock The Alps n'est qu'un outil d'aide à la décision et l'expert doit donc toujours apporter son regard critique sur les résultats obtenus.

2.2.2. Niveau d'atteinte

Pour l'enjeu bâti, une matrice similaire à celle préconisée par la MEZAP est utilisée afin d'évaluer le niveau d'atteinte (figure 6). Elle comporte :

- en ligne : l'évaluation qualitative de l'aléa de départ (non quantifiée en termes probabilistes) ;
- en colonne : une probabilité de propagation associée à des fréquences 10^{-6} , 10^{-4} , 10^{-2} et correspondant à un angle de la ligne d'énergie évalué de façon statistique d'après un indicateur morphologique (aire normalisée).

NIVEAU D'ATTEINTE BÂTI		Probabilité de propagation			
		Très faible	faible	modérée	élevée
Aléa de départ	faible	faible	faible	faible	modéré
	modéré	faible	modéré	modéré	élevé
	élevé	faible	modéré	élevé	très élevé
	très élevé	modéré	élevé	très élevé	très élevé

Figure 6. Matrice de qualification du niveau d'atteinte bâti

Il est procédé de manière différente pour la qualification du niveau d'atteinte piéton puisque la MEZAP ne prend pas en compte l'enjeu humain. Deux aspects supplémentaires entrent en jeu : l'aspect spatial et l'aspect temporel, qui peuvent être grossièrement décrits ainsi :

- Aspect spatial : un bâtiment occupe un « linéaire » (perpendiculaire à la trajectoire) de 10 mètres environ (maison d'habitation standard) alors qu'un piéton occupe un « linéaire » d'environ 1 mètre. Ceci peut se traduire par le fait qu'un bloc avec une trajectoire donnée a une probabilité 10 fois moins importante d'atteindre un piéton que de toucher un bâtiment ;

- Aspect temporel : un piéton n'est pas présent en permanence sur les parcelles alors que les bâtiments sont fixes. Pour estimer le temps d'occupation des jardins en arrière des maisons, on fait l'hypothèse que le temps moyen de présence ne dépasse pas 2,5 h par jour en moyenne sur l'année (24 h/10 \cong 2,5 h). Ainsi, un bloc qui passe à un instant t a une probabilité 10 fois moins importante d'atteindre un piéton que de toucher un bâtiment.

La combinaison des facteurs spatial et temporel suppose qu'un piéton a donc une probabilité 100 fois moindre d'être atteint par un bloc comparativement à un bâtiment. Ces approximations permettent de construire une nouvelle matrice de niveau d'atteinte piéton à partir de celle du bâti. Ainsi, la qualification du niveau d'atteinte d'un piéton peut être évaluée par un décalage d'une colonne de la matrice établie pour les bâtiments, les colonnes étant séparées d'un facteur 100 entre elles. On obtient la matrice suivante :

NIVEAU D'ATTEINTE PIÉTON		Probabilité de propagation			
		très faible	faible	modérée	élevée
Aléa de départ	faible		faible	faible	modéré
	modéré		faible	modéré	modéré
	élevé	faible	faible	modéré	élevé
	très élevé	faible	modéré	élevé	très élevé

Figure 7. Matrice de qualification du niveau d'atteinte piéton

2.3. Aléa résultant : niveau d'atteinte * intensité

L'aléa résultant s'obtient en croisant le niveau d'atteinte avec l'intensité du phénomène considéré. L'intensité du phénomène est représentée ici par le volume de bloc unitaire susceptible de se propager et de causer des dommages à l'enjeu bâti. On obtient la matrice suivante :

ALÉA RÉSULTANT BÂTI		Intensité			
		faible $\leq 0,25 \text{ m}^3$	modérée $0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	élevée $1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	très élevée $> 10 \text{ m}^3$
Niveau d'atteinte	faible	faible	faible	modéré	modéré
	modéré	modéré	modéré	élevé	élevé
	élevé	modéré	élevé	élevé	très élevé
	très élevé	élevé	élevé	très élevé	très élevé

Figure 8. Matrice de qualification de l'aléa résultant bâti

Pour la qualification de l'aléa résultant piéton, il n'est pas cohérent d'utiliser la hiérarchisation de classes d'intensité bâti puisque les dommages humains sont irréversibles à partir d'un volume très faible. Ainsi, seules deux classes d'intensités piéton sont considérées : les volumes unitaires $< 0,05 \text{ m}^3$ et les volumes unitaires $> 0,05 \text{ m}^3$.

Etant donné qu'il serait extrêmement chronophage de recenser tous les compartiments $< 0,05 \text{ m}^3$ susceptibles de rompre, il a été fait le choix de les classer dans une catégorie « aléa diffus » qui sera cartographiée uniquement sur la base d'observations de terrain et de l'étude du MNT. Les volumes $> 0,05 \text{ m}^3$ constituent donc la seule classe d'intensité

pour les instabilités isolées identifiées et ainsi la matrice de l'aléa résultant piéton est la même que celle du niveau d'atteinte piéton.

2.4. Cartographie

Les compartiments sont représentés cartographiquement par une pastille de la couleur de leur aléa de départ (jaune=faible, orange=modéré, rouge=élevé, violet=très élevé).

L'aléa résultant bâti est représenté sur l'enjeu lui-même, selon le même code couleur que l'aléa de départ. Si plusieurs cônes de propagation intersectent le même bâtiment, c'est le compartiment engendrant l'aléa résultant le plus fort qui est pris en compte.

Puisque l'enjeu piéton n'est pas fixe, son aléa résultant est représenté par des aplats de couleurs correspondant aux cônes de propagations. La couleur des cônes est conforme à la valeur de l'aléa résultant. Il n'a pas été généré de cône de propagation pour des zones de départ pourvues d'un niveau d'atteinte nul. Les versants et les falaises identifiés sur le terrain comme zones d'aléa diffus sont représentés par des polygones hachurés.

3. Gestion du risque

Le site de la Côte Bleue est un site classé et protégé soumis à de nombreuses réglementations à considérer lors de la recommandation des ouvrages de protection. L'insertion paysagère est un critère majeur à prendre en compte pour le choix du dispositif de protection à mettre en place. De plus, pour des raisons financières, le Conservatoire du Littoral ne sera pas en mesure de traiter toutes les instabilités en une seule fois.

Une stratégie de gestion du risque chute de blocs a donc été élaborée après concertation avec la DREAL PACA et le Conservatoire du Littoral afin de répondre à toutes ces contraintes. Elle consiste à :

- Traiter les aléas résultant bâti \geq modéré et piéton très élevé, en procédant aux travaux de protection de manière progressive : traitement des aléas résultants très élevés puis échelonnement du traitement des aléas plus faibles ;
- Privilégier les purges et les ancrages de confortement, limiter au maximum les filets, grillages plaqués et butons, exclure les écrans pare-blocs et barrières grillagées ;
- Faire une analyse des impacts paysagers des ouvrages et proposer des solutions d'intégration paysagère. Ce travail a été mené à partir de notre expérience des chantiers de protection contre les risques rocheux et fait référence au guide « Prise en compte du paysage dans les protections contre les chutes de matériaux rocheux » (IFSTTAR, 2016) ;
- Réaliser les travaux de protection en-dehors des périodes de nidification des espèces protégées.

Selon cette stratégie, près de la moitié des instabilités rocheuses sur le Rove nécessitent un traitement et plus de deux tiers sur la Vesse. Une cartographie des parades préconisées et des ouvrages déjà existants a été établie.

4. Perspectives

La méthodologie développée et validée par les trois parties de la convention va être appliquée sur quatre autres sites à enjeux surfaciques identifiés sur la Côte Bleue dès 2023. Elle est en cours d'adaptation avec le BRGM pour une application sur des enjeux de type linéaire, notamment des sentiers pédestres sur le littoral. La configuration de ces sites nécessite des investigations spécifiques : il ne sera pas possible de quadriller tous les secteurs en pédestre étant donné le linéaire de sentiers et la surface d'étude qu'il engendre.

Ainsi, une méthodologie est proposée, selon ces étapes :

- Acquisition d'un nuage de point pour produire un modèle 3D par photogrammétrie (drone) sur l'ensemble des secteurs linéaires à étudier ;
- Identification de zones homogènes en termes de morphologie de surface, de typologie de rupture dominante et de volumes des compartiments rocheux instables ;
- Observation sur le terrain de l'état de surface des affleurements (altération, fracturation, etc.) sur quelques points accessibles et représentatifs par zone homogène ;
- Extrapolation des observations faites à dire d'expert à l'ensemble de la zone homogène ;
- Identification de manière exhaustive sur le nuage de points (assorti d'une orthophotographie) : (i) des zones d'aléa diffus et (ii) des compartiments rocheux instables avec calcul des volumes ;
- Pour les talus de sentier : reconnaissance pédestre sur tous les linéaires ;
- Récupération de données de fréquentation des sentiers pour l'évaluation du risque ;
- Stratégie de gestion du risque priorisant l'information aux usagers à des ouvrages de protection ponctuels, qui ne pourront toutefois être totalement exclus si le risque s'avère élevé.

5. Conclusions

La méthodologie développée pour l'étude détaillée du risque rocheux menée sur la Côte Bleue a permis de caractériser 207 instabilités rocheuses sur le village du Rove et 67 sur la calanque de la Vesse en termes d'aléa de départ, de probabilité de propagation, de niveau d'atteinte et d'aléa résultant. L'aléa résultant n'est pas qualifié de la même manière selon l'enjeu identifié, à savoir les piétons et le bâti.

La méthodologie développée est répliquable sur les autres sites à risque présentant des enjeux surfaciques et est en cours d'adaptation pour des enjeux de type linéaire (sentiers pédestres littoraux notamment).

6. Références bibliographiques

- BRGM (2017). Valorisation des travaux réalisés dans le cadre du GT MEZAP (année 1). Rapport intermédiaire BRGM/RP-66589-FR, juillet 2017.
- BRGM (2020). Cartographie de l'aléa chute de blocs et du risque rocheux sur le site du Conservatoire du littoral de la Côte bleue (Bouches-du-Rhône – 13) – Phase 1 et 2. Rapport final BRGM/RP – 70090-FR. Septembre 2020.
- CETE (2013). Etude d'aléa de chutes de blocs – Solutions de mise en sécurité. Commune du Rove, la Vesse – Falaise du port. Rapport H13-323, décembre 2013.
- Colas B., (2019). Séminaire Rock the Alps, BRGMco.
- IFSTTAR (2016). Prise en compte du paysage dans les protections contre les chutes de matériaux rocheux. Collection techniques et méthodes de l'Ifsttar – guide technique, mai 2016.
- LCPC (2004). Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. Guide technique, juin 2004.
- MEZAP (2020). Proposition d'une note technique, Méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux. Rédaction du groupe de travail MEZAP du ministère de l'Écologie, du