

APPORTS DE L'OBSERVATION ET DE LA MODELISATION A L'EVALUATION DE L'ALEA DE LA FALAISE DE BONIFACIO, CORSE

CONTRIBUTIONS OF OBSERVATION AND MODELING TO THE ASSESSMENT OF THE CLIFF ROCKFALL PHENOMENON IN BONIFACIO, CORSICA

Christian FRANCK¹, Alain THORAVAL¹, Stella COCCIA¹, Baptiste VIGNEROT², Marie MALASCRABES³

¹ Ineris, Verneuil-en-Halatte, Nancy, France

² BRGM, Montpellier, France

³ Cerema, Nice Sophia-Antipolis, France

RÉSUMÉ – L'évaluation de l'aléa éboulement de la falaise de Bonifacio a bénéficié de diverses techniques d'observation de la falaise sur une durée de dix-huit mois. Par ailleurs les investigations ont permis de construire des modèles géomécaniques en deux et trois dimensions constituant une aide indéniable à l'évaluation du phénomène. Le présent article restitue les apports de ces deux actions sur l'analyse de l'aléa et du risque.

ABSTRACT – The assessment of the cliff rockfall phenomenon in Bonifacio, Corsica, benefited from various techniques of observation over a period of eighteen months. In addition, the investigations made it possible to build two and three dimensional geomechanical models which contribute to the evaluation of the phenomenon. This article introduces the contributions of these two actions on the analysis of hazard and risk.

1. Introduction et contexte

Un secteur de la Citadelle de Bonifacio est affecté par un aléa de type « effondrement en grande masse » de niveau très élevé, d'après l'étude d'aléa établie par le Cerema en 2013 et 2014. Ce secteur correspond à une partie de la falaise présentant un surplomb d'environ 20 m, la zone de la Citadelle concernée regroupant plus de trente bâtiments concernés par l'aléa.



Figure 1. Vue photographique et modèle 3D de la zone de surplomb de la Citadelle de Bonifacio (BRGM)

Une étude a été engagée en 2018, dont l'objectif est de préciser le niveau de l'aléa au moyen d'investigations spécifiques. Cette étude, portant sur une période de dix-huit mois, a regroupé le BRGM, pilote du projet, le Cerema et l'Ineris (Vignerot et al., 2020).

Les investigations ont consisté en la réalisation de trois forages carottés F1 à F3, dont deux inclinés (F1 et F2), afin de recouper le cas échéant des discontinuités préjudiciables à la stabilité. Par ailleurs, il a été mis en place diverses techniques d'observation et d'auscultation, visant à caractériser l'état et l'activité, en termes de mouvements de terrain, de ce secteur de la falaise. Un modèle global de la Citadelle en trois dimensions a pu être établi grâce à l'ensemble des investigations réalisées. Enfin des modèles géomécaniques en deux et trois dimensions ont été établis afin de constituer une aide à l'évaluation de l'aléa ; ces modèles ont bénéficié de résultats d'essais en laboratoire pratiqués par le Cerema sur les carottes des forages.

La presqu'île de Bonifacio, située à l'extrémité sud de la Corse, fait partie du bassin sédimentaire miocène qui s'est développé, entre la Corse et la Sardaigne, en discordance sur un substratum granitique.

Les falaises sur lesquelles est construite la citadelle de Bonifacio sont constituées de calcarénite et de sables fins plus ou moins consolidés appelées formation de Bonifacio. S'y distinguent deux niveaux de bas en haut, le membre de Pertusato, à dominante sablo-gréseuse, et le membre de Bonifacio constitué d'une alternance de grés et de calcarénite. Deux principales familles de discontinuités géologiques subverticales affectent ces formations, de direction N 0° à N 20°E d'une part, et N 110°E d'autre part. Une fracture de cette dernière famille, aisément observable (Figure 1) délimite à l'est la zone de surplomb.

2. Présentation et résultats des dispositifs d'observation

Un panel de techniques d'observation a été entrepris dans le cadre de l'étude de Bonifacio, chacune ayant un objectif distinct, opérationnel ou d'ordre exploratoire.

Tableau 1. Investigations menées dans le cadre de l'observation de la falaise de Bonifacio

Technique	Opérateur	Objectifs	Champ d'investigation
Photogrammétrie et Lidar aéroportés	BRGM	Modèle géométrique 3D maillé texturé de l'ensemble des falaises et de la citadelle de Bonifacio	L'ensemble de la Citadelle et des falaises
Scanner laser 3D	Ineris	Modèle géométrique 3D précis de la falaise. Evaluation de l'évolutivité de la falaise en termes de mouvements de terrain sur la période d'étude et ultérieurement	Falaises méridionales dont les zones Sutta Rocca et Citadelle
Radar géologique	BRGM	Détecter des fractures et/ou des vides sous la Citadelle, à proximité de la paroi de falaise et en forage	Citadelle, falaise en surplomb et forages inclinés
Etude des fréquences de vibration du massif	BRGM	Apprécier la compartimentation du massif rocheux au sein de la Citadelle	Citadelle, falaise en surplomb
Interférométrie radar	BRGM	Mise en évidence d'éventuels mouvements lents, mesures vibrométriques complémentaires à l'écoute microsismique passive.	Citadelle, falaise en surplomb
Observation multi-paramètres	Ineris	Observation sur la période d'étude du comportement des fractures et de la falaise en surplomb. Détection d'éventuels mouvements significatifs en relation avec une instabilité potentielle	Citadelle, falaise en surplomb

L'interférométrie radar n'est pas commentée ici. On se référera à la communication de Levy et al, 2020, citée en bibliographie.

2.1. Photogrammétrie et Lidar aéroportés

Un levé couplé lidar et photogrammétrique à résolution centimétrique aéroporté a été réalisé, compte tenu de l'accessibilité restreinte en sommet et en pied de falaise. Il a

permis l'établissement d'un Modèle Numérique de Terrain, un nuage de points et un modèle 3D texturé. Pour les falaises, des nuages de points ont été également établis, ainsi qu'un modèle 3D et des orthographies haute résolution permettant une coupe géologique fine de la falaise. L'ensemble de ces éléments a permis de servir de base à un Système d'Information Géographique en 3D, orthoréférencé, incluant les investigations entreprises avant ou durant la présente étude (lithologie, plans de fracturation, sondages, instrumentations dans le cadre du présent volet observations, ...).

L'existence de ce SIG est par ailleurs importante pour bâtir le modèle géologique, et en extraire des blocs ou des profils permettant de réaliser les modèles géomécaniques. Enfin ce SIG constitue un outil de communication aux différents acteurs de l'étude.

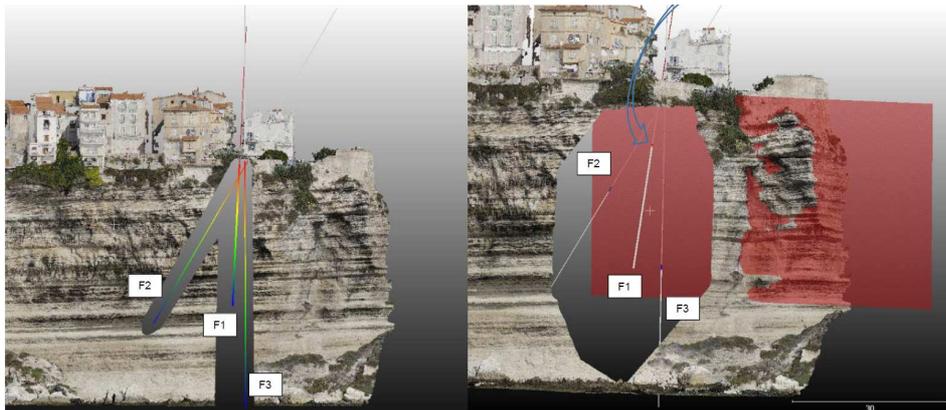


Figure 2. Orthophotographie de la falaise et position des trois forages réalisés et des deux principaux plans de discontinuité (BRGM)

2.2. Scanner laser 3D

A Bonifacio, cette technologie a été employée pour connaître l'activité et l'évolutivité de la falaise en termes de mouvements de terrain (déplacements, chutes de blocs ou de masses rocheuses, non forcément décelables à l'œil nu) par rapport à un état de référence dit zéro. Un autre objectif assigné était d'en définir la précision pour confirmer la pertinence d'une surveillance ponctuelle de la falaise par cette technique.

Trois campagnes ont été réalisées, entre septembre 2018 (état 0) et mai 2019. Ne bénéficiant pas d'une vision frontale et englobante de la falaise côté mer, il s'est agi de combiner un scanner laser à longue portée, pour les stations latérales, et d'un scanner de moindre portée pour les stations de pied de falaise.

La comparaison entre les deux campagnes et l'état 0 n'a montré aucune évolution significative liée à des mouvements de la falaise. Les principales zones évolutives sont liées à l'évolution de la végétation, l'ajout de nouveaux ouvrages ou la présence de stalactites générées par des ruissellements. La précision sur la mesure est de l'ordre de 2 cm dans la zone de la Citadelle, valeur essentiellement liée au post-traitement des données, et à la combinaison, nécessaire ici, de deux nuages de points. Elle est tout à fait acceptable pour l'objectif recherché. La recherche de mouvements infracentimétriques est difficile voire impossible par cette méthode.

2.3. Radar géologique

Dans le milieu calcaire et gréseux de Bonifacio, à faible teneur en eau supposée, cette technologie avait été jugée prometteuse pour détecter des discontinuités ou cavités en surface, au sein de la falaise et dans l'encaissant rocheux.

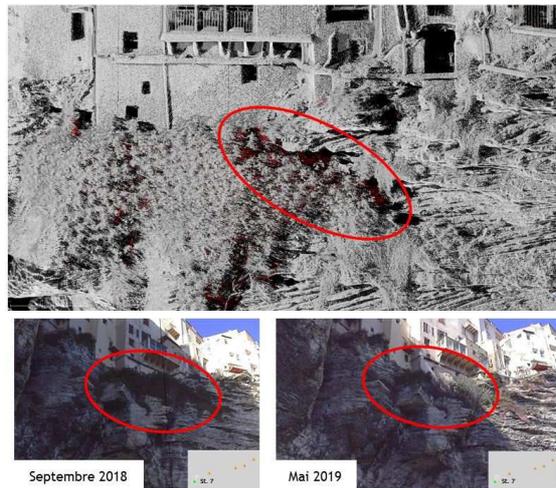


Figure 3. Scanner laser 3D : exemple de secteurs d'écart supérieur à 0,20 m entre campagnes de relevés (ici liés à la végétation) (Ineris)

Rappelons que cette technique consiste à enregistrer des échos d'une onde électromagnétique sur des interfaces du sous-sol, telles que des couches géologiques, des vides, des objets enterrés. La profondeur d'investigation dépend, d'une part de la résistivité du milieu, et d'autre part de la fréquence des antennes utilisées.

Le radar géologique a été utilisé en surface (dans les rues de la Citadelle de Bonifacio, avec une antenne de 250MHz) en paroi de falaise (quatre profils au moyen de l'antenne de 100 MHz) et en forage (antenne de 100 MHz). La prospection de surface, malgré la faible profondeur d'investigation (2 m), a permis de localiser la partie sommitale d'une fracture aux abords de la zone de surplomb, correspondant à la fracture N110°E observée en falaise et recoupée au forage F1. En paroi de falaise, la pénétration des ondes électromagnétiques n'a pas dépassé 4 mètres, mais aucune anomalie marquante n'a été constatée sur cette épaisseur.

2.4. Etude des fréquences de vibration du massif

L'objectif de cette méthode est de mettre en évidence au sein de la Citadelle l'existence de blocs de falaise distincts par leur fréquence de vibration, et ainsi les blocs potentiellement instables. L'analyse de ces fréquences permet de distinguer trois familles de pics en fréquence : 1,2 Hz, 1,8 à 2,7 Hz, 3,0 à 8,8 Hz. La première famille est assez homogène sur l'ensemble de la Citadelle, de direction de la composante horizontale N-S. Les deux autres familles permettent de distinguer quatre grands secteurs (figure 4).

Le dernier d'entre eux (secteur 4) est subdivisé en deux entités 4.1 et 4.2 probablement séparées par la fracture N110°E observée et reconnue, sans qu'il ait été observé l'indépendance de comportement du bloc 4.2 correspondant à la zone environnant le surplomb. L'analyse des données en réseau montre une vitesse de phase à peu près constante, entre 4 et 10 Hz à environ 1000 m/s, valeur élevée indiquant que le matériau constitutif de la Citadelle est très compétent.

2.5. Dispositif d'observation multi-paramètre

Un dispositif d'observation multi-paramètre a été mis en place en 2018, ayant pour objectif de détecter d'éventuels mouvements pouvant être rapportés à une évolution topographique de la falaise, et les distinguer d'autres mouvements naturels (effets de la température, notamment) ou liés à l'activité anthropique.

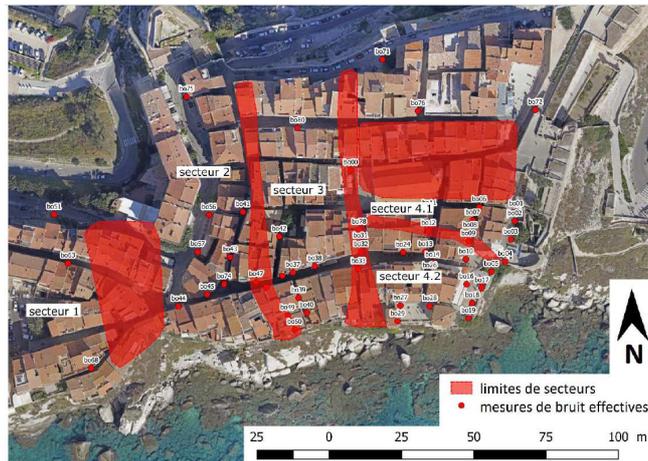


Figure 4. Fréquences de vibration : répartition géographique des pics en quatre secteurs de la Citadelle (BRGM)

Le dispositif comprend deux extensomètres multipoints mis en place au sein des deux forages inclinés F1 et F2 (précision 0,2 mm), deux fissuromètres disposés au droit de la fracture N 110° observée en paroi de falaise (précision 0,025 mm), trois clinomètres de haute précision (inférieure au centième de degré) en zone supposée fixe et en zones mobilisables, dont la Citadelle, et des balises GPS différentiel haute résolution (précision centimétrique) disposées également en zones fixe et mobilisables. Les mesures sont enregistrées et transmises à l'Ineris, et les données sont mises à disposition de l'ensemble des partenaires du projet en quasi-temps réel sur la plateforme [e-cenaris](https://www.e-cenaris.com).



Figure 5. Tête de mesure extensométrique à 4 points, installée en tête de forage F2 (Ineris)

Les mesures ne présentent pas à ce jour de variation significative en lien avec un mouvement irréversible de la falaise. Il est prévu de poursuivre cette observation pendant deux cycles saisonniers. Il s'agira à terme de procéder à une analyse fréquentielle des données à l'échelle journalière et de la corrélation avec les chroniques de température synchrones, d'analyser les comportements cycliques d'échelle mensuelle en corrélant avec les données météorologiques, et d'analyser le cas échéant les comportements non cycliques, qu'ils soient d'origine météorologique ou géomécanique.

3. Modélisation géomécanique

3.1. Le concept

La modélisation géomécanique entreprise a eu pour objectif d'évaluer la stabilité de la falaise dans la zone de surplomb de la Citadelle de Bonifacio. Ces modèles se basent sur un certain nombre de données d'entrée géométriques ou géomécaniques, dont les incertitudes ont conduit à la réalisation d'étude de sensibilité.

La géométrie en éperon et en surplomb de la falaise a imposé de réaliser à la fois des modèles simples en 2D, et des modèles en 3D représentant la spécificité géométrique ainsi que les deux familles de fractures N110°E et N20°E pouvant concourir à l'instabilité.

Le mécanisme pressenti et partagé est la rupture d'une couche de base très altérée, puis la rupture par cisaillement/traction-basculement de la colonne de roche sus-jacente. Il a été convenu de considérer des fractures avec des très faibles résistances mécaniques, qui ne concourent donc pas à la résistance du volume rocheux potentiellement mobilisable. Il a par ailleurs été jugé utile, en complément des modèles sur la Citadelle, d'apprécier la stabilité du surplomb dénommé « Sutta Rocca » proche. Ce surplomb, plus marqué que celui de la Citadelle, n'est en revanche pas affecté par une fracturation. Il a donc été considéré que des simulations sur cette entité permettraient de préciser la borne inférieure des paramètres de résistance compatible avec sa stabilité actuelle.

Les codes utilisés pour la modélisation sont UDEC et 3DEC développés par la société Itasca. Le code RHINO permet de construire, en amont, la géométrie du front de falaise à partir des mesures scanner 3D.

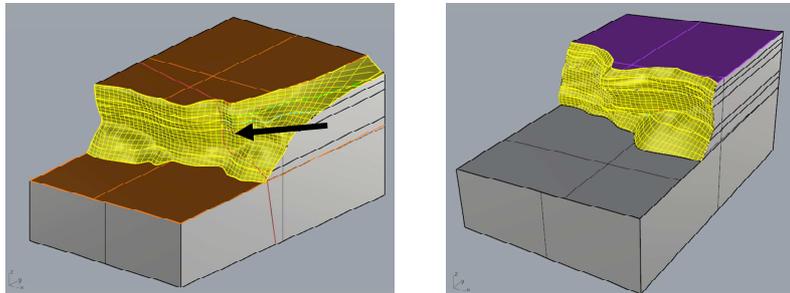


Figure 6. Géométrie 3D de la Citadelle (à gauche) et de Sutta Rocca (à droite). La flèche noire indique la trace de la fracture N110°E observée en paroi, délimitant le surplomb (Ineris)

3.2. Les paramètres et variables retenus

La géométrie des modèles a pu bénéficier de la précision apportée par les campagnes Lidar, Scan 3D et photogrammétrique. On peut donc considérer que les géométries 3D correspondent à la réalité du terrain.

La lithologie de la falaise a été convenue entre le BRGM, le Cerema et l'Ineris en fonction de la connaissance du site et des résultats des forages carottés. Quatre unités lithologiques L1 à L4 ont été ainsi distinguées de haut en bas (tableau 2). Pour ces quatre entités, les valeurs de référence retenues sont la moyenne moins l'écart-type, au vu du relatif faible nombre d'essais et de la disparité des résultats. La couche L4, constituée de grès à ciment carbonaté, contient en son sein un faciès d'environ six mètres d'épaisseur de grès très arénisé et de sable (L4deg). Ce faciès est situé en partie basse de la falaise et sa base s'observe à quelques décimètres au-dessus du niveau de la mer. Les caractéristiques géomécaniques de cette couche n'ont pu être déterminées que sur des échantillons peu désagrégés. Les valeurs moyennes du tableau 2 sont donc surestimées, et il a été choisi les valeurs suivantes pour le modèle de référence : $R_c = 5 \text{ MPa}$; $E = 10 \text{ GPa}$; $R_t = 0,1 \text{ MPa}$.

La démarche de modélisation a consisté à réduire progressivement les caractéristiques de l'ensemble des couches L1 à L4 par 2, 3, 5, puis 10, jusqu'à la rupture, l'objectif étant d'évaluer la marge de sécurité vis-à-vis d'une instabilité. Il a été supposé que, compte tenu de la faible fracturation du massif, les caractéristiques in situ ne puissent raisonnablement être plus de 3 fois inférieures aux caractéristiques de référence. La marge minimale a donc été définie de la façon suivante : *Marge_min = Réduction_max pour laquelle le modèle reste stable (valeurs possibles : 1,2,3,5,10) / 3*

Tableau 2. Nature et caractérisation géomécanique des couches, valeurs de référence retenues

	Résistance à la compression Rc (MPa)					Module d'Young E (GPa)					Résistance à la traction Rt (MPa)				
	nb val	m	σ	m- σ	retenu	nb val	m	σ	m- σ	retenu	nb val	m	σ	m- σ	retenu
L1 : calcarénite sableuse compacte	7	20,9	4,1	16,8	16,8	6	18,6	4,0	14,6	14,6	3	2,2	0,6	1,6	1,6
L2 : calcaire blanc à interlits sableux	4	27,6	2,2	25,4	25,4	4	26,3	9,2	17,1	17,1	2	3,8			3,5
L3 : calcarénite et grès à ciment calcaire	4	27,8	9,2	18,6	18,6	3	33,6	2,6	31,0	31,0	4	2,8	1,2	1,6	1,6
L4 : grès grossier à ciment carbonaté	4	31,3	11,0	20,3	20,3	2	34,4	9,5	24,9	24,9	3	2,4	1,1	1,3	1,3
L4deg : grès très arénisé, sables	3	15,3	12,7	2,6	5	2	14,1			10	0				0,1

Le surplomb de la Citadelle est délimité par la présence d'une discontinuité N110°E, observable en falaise et recoupée par le forage incliné F1. La fracture N20°E n'a été en revanche observée qu'en un endroit de la paroi de la falaise. Compte tenu des incertitudes sur la présence, la localisation et l'extension de la N20°E, plusieurs variantes géométriques du modèle 3D ont été réalisées. La fracture a été positionnée telle qu'observée, proche du rebord de la falaise (N20min), et par ailleurs deux positions hypothétiques ont été étudiées, à la limite de la zone de surplomb (N20max), et dans une situation intermédiaire (N20int). Par ailleurs, trois modalités d'extension verticale au sein des unités géologiques ont été étudiées (L2 et L3, L1 à L3, toutes les unités).

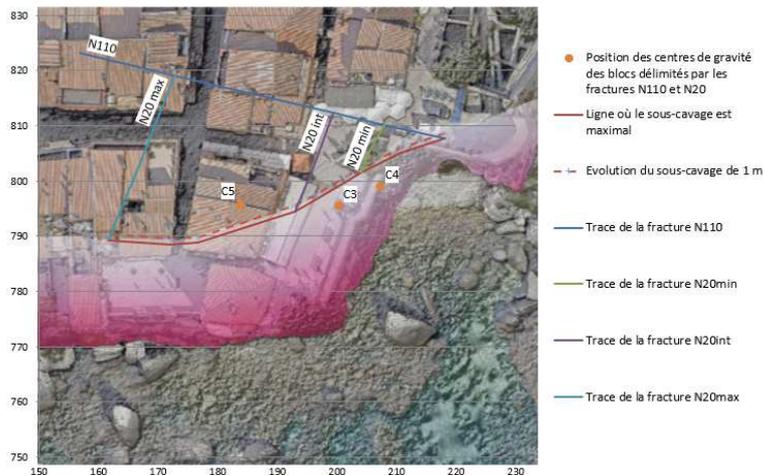


Figure 6. Vue en plan de la zone de surplomb, de la fracture N110°E et des trois emplacements étudiés de la fracture N20°E

Il a été également évalué, en 2D, l'impact de l'extension du surplomb, soit la progression de l'érosion dans le faciès altéré en pied de falaise. A partir du profil 2D actuel de la falaise, le sous-cavage a été augmenté progressivement par tranche de 1 m et cela jusqu'à 5 m.

3.3. Synthèse des résultats

Pour les modèles 3D, le surplomb de Sutta-Rocca apparaît stable quelles que soient les conditions de dégradation des caractéristiques mécaniques. Le déplacement maximal dépasse 5 cm en considérant des caractéristiques des couches divisées par 10 au regard des valeurs de référence. Le surplomb de la Citadelle apparaît également stable si l'on ne considère que la seule fracture N110°E. En cas de combinaison des deux fractures N110°E et N20°E, les scénarios N20min et N20int montrent que le bloc découpé par les deux fractures pourrait devenir instable dans le cas d'une extension verticale de la fracture N20 au-delà de l'unité L3. La marge de sécurité disponible est faible si on suppose une extension de la fracture N20 jusqu'à la surface, elle est plus élevée si

l'extension de la fracture N20 est limitée aux unités L2 et L3, ce qui est plus probable. Les calculs du scénario N20max indiquent que le bloc découpé par les deux fractures est stable quelle que soit l'extension considérée pour la fracture N20°E. La marge de sécurité est en effet élevée dans tous les cas.

L'étude de l'évolution du surplomb montre, dans le cas de Sutta-Rocca qu'en considérant une progression de 5 m du surplomb, la falaise reste stable avec une bonne marge de sécurité. L'analyse de cet impact est un peu plus délicate à réaliser dans le cas de la Citadelle du fait de la difficulté de prendre en compte convenablement les fractures dans le modèle 2D. Une modélisation 3D apparaît donc indispensable.

4. Conclusions

Les investigations d'observation permettent d'apporter les premiers éclairages en termes d'évolutivité et d'opérabilité. En termes d'évolutivité, aucune des investigations menées n'a permis d'identifier un caractère d'activité de mouvement de terrain marquée de la masse rocheuse en surplomb. Toutefois, la période d'observation courte impose de compléter ce bilan en poursuivant l'auscultation durant deux cycles saisonniers.

En termes d'opérabilité, le scan laser 3D et le Lidar sont des outils fiables pour détecter de manière récurrente un recul de falaise lié à d'éventuelles chutes de blocs ou de masses, ou des mouvements d'érosion centimétriques. L'observation multi-paramètre est opérationnelle mais pâtit actuellement de l'absence d'évaluation de seuils de déplacement ou d'inclinaison qui pourraient signifier un mouvement non réversible de la falaise dans la zone de surplomb.

Les travaux de modélisation indiquent des situations de stabilité lorsque les caractéristiques des matériaux ne sont pas dégradées. Au niveau de la Citadelle, la combinaison des deux familles de discontinuités présentes sur le site peut engendrer des conditions d'instabilité. Il faut noter toutefois que l'une des familles considérées (N20°E) n'est observable que localement en falaise, et n'a pas été recoupée par les forages réalisés dans le cadre de cette étude. Des compléments sont à prévoir (en 3D) pour mieux évaluer l'impact de l'extension du surplomb sur la stabilité de la zone de la Citadelle. Ces travaux de modélisation ont permis de faciliter l'évaluation de l'aléa rocheux en termes de scénarios de rupture, de volumes mobilisés et de prédisposition (Vignerot et al., 2020).

5. Références bibliographiques

- Cerema (2013). Réalisation de la carte multi-aléas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio. N° d'affaire 10R000046.
- Cundall P. A. (1980). UDEC – A Generalized Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock,” Report PCAR-1-80, Peter Cundall Associates Report, European Research Office, U.S. Army, Contract DAJA37-79-C-0548.
- Cundall, P. A. (1988). Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part I: A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks,” *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, 107-116.
- Hart, R., Cundall P. A., Lemos J. (1988). Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part II: Mechanical Calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks,” *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, 117-126.
- Ineris (2019). Rapport d'installation du dispositif d'observation multi-paramètre et présentation des mesures initiales. Rapport Ineris-175501-641674. Document non public.

Levy C., Raucoules D., Delatre M., Fournelis M. (2020). Etudes croisées de l'aléa éboulement en grande masse en contexte urbain (citadelle de Bonifacio) : apports des techniques d'écoute sismique passive, d'interférométrie radar au sol et d'interférométrie satellitaire. JNGG, Lyon, 2020.

Vignerot B., Franck C., Malascrabes M. (2020). Evaluation de l'aléa rocheux de la falaise de Bonifacio : scénario de rupture et gestion du risque. JNGG, Lyon, 2020.