

# EVALUATION DE L'ALEA ROCHEUX DE LA FALAISE DE BONIFACIO : SCENARIO DE RUPTURE ET GESTION DU RISQUE

## STUDY OF ROCKFALL HAZARD ON THE BONIFACIO CLIFF : FAILURE SCENARIOS AND RISK MANAGEMENT

Baptiste VIGNEROT<sup>1</sup>, Christian FRANCK<sup>2</sup>, Marie MALASCRABES<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BRGM, Montpellier, France

<sup>2</sup> INERIS, Verneuil en Halatte, France

<sup>3</sup> CEREMA, Nice, France

**RÉSUMÉ** – L'État a lancé début juillet 2018 une étude dont l'objectif est l'amélioration de la connaissance de l'aléa rocheux sur le secteur de la Citadelle, avec pour objectif d'établir les scénarios de gestion du risque à mettre en place. Le programme d'étude mené a permis de valider la lithologie et la fracturation du massif et d'appréhender les forçages hydrogéologique et marin. Cette connaissance était nécessaire pour affiner le niveau d'alea et proposer une gestion du risque à travers trois scénarios.

**ABSTRACT** – Government services ordered in July 2018 a study dedicated to the rockfall hazard knowledge improvement on the Citadel of Bonifacio. The study allowed us to validate the lithology and facturing of the rock beds and to define the hydrological and marine forcings. This knowledge rise was mandatory to refine the hazard level and the mitigations to be implements though three cliff collapse scenarios.

### 1. Introduction

La presqu'île de Bonifacio est un site hautement touristique de Corse, en partie classée en aléa fort pour le risque d'éboulement. Les falaises de la haute ville sont concernées par un risque fort en particulier sur les secteurs de Sutta Rocca et de la Citadelle, risque renforcé par l'érosion du pied de falaise soumis à l'action de la houle. Le secteur de la Citadelle présente une falaise de 60 m de haut, dont l'érosion a permis la création d'un surplomb de vingt mètres (figure 1). En plus de l'érosion régressive, le risque d'éboulement est conditionné par la fracturation interne du massif rocheux, selon les familles de fractures subverticales N20° et N110°. Une fracture N110° bien visible sur le pilier de la Citadelle semble désolidariser de la face Sud du compartiment rocheux en surplomb, et avec lui les habitations de la vieille ville situées en surplomb.



Figure 1 – Photos du secteur d'étude du pilier de la Citadelle et de la fracture N110°

### **1.1. Etude d'amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement**

Les services de l'État, avec le concours du CEREMA, conduisent depuis 2012 des études afin d'estimer les différents risques naturels, dont les « mouvements de terrain ».

L'État a lancé début juillet 2018, une étude dont l'objectif est l'amélioration de la connaissance de l'aléa rocheux sur le secteur de la Citadelle. Elle est conduite par un groupement de 3 opérateurs scientifiques de l'État : le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA), et l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS).

### **1.2. Programme d'étude**

Un premier volet de synthèse de la donnée existante ayant pour objectif de bâtir une base de connaissance à partir des études antérieures, l'historicité des événements, la géologie et l'hydrogéologie a permis de poser les bases pour un programme complet d'amélioration de la connaissance.

Les études d'amélioration consistent en la réalisation d'observations et de mesures sur le terrain :

- mesure de la topographie de la falaise, par levé laser terrestre et photographies aériennes par drone et autogyre, dont la précision est centimétrique ;
- mise en place d'instruments de mesure sur la paroi de la falaise (fissuromètre) mesurant en continu pour toute la durée de l'étude les déplacements relatifs des compartiments rocheux (installés début février 2019) (Franck et al. 2020);
- imagerie du massif par radar géologique pour rechercher les réseaux en surface, les cavités et le prolongement de la fracturation observée en paroi et écoute des modes de vibration naturelle du massif (Levy et al. 2020);
- mise en place de marqueurs en pied de falaise pour mesurer l'érosion à moyen et long termes liée à l'action de la houle.

Dans un troisième temps, les études consistent en la réalisation de trois forages depuis la haute ville recoupant la fracturation observée en paroi. Des observations en forage sont réalisées avant la mise en place d'instruments mesurant les déplacements relatifs des compartiments rocheux. Une campagne d'essais en laboratoire sur les échantillons de roches a permis de mieux caractériser les paramètres géomécaniques des différents matériaux.

Un modèle global reprend l'ensemble de ces mesures et est complété par une étude sur l'infiltration des eaux dans le massif et sur l'action de la houle en pied de paroi. Après une phase de calculs géomécaniques, les différents scénarios de rupture sont élaborés pour préciser le degré d'aléa et améliorer la gestion du risque rocheux.

## **2. Programme d'étude**

### **2.1. Lithologie**

Le plateau calcaire de Bonifacio s'étend sur une surface d'environ 29 km<sup>2</sup> pour une altitude moyenne de 80 m NGF. Les dépôts sédimentaires du plateau de Bonifacio sont en discordance sur un substratum granitique et l'épaisseur des sédiments est fonction de la morphologie de celui-ci.

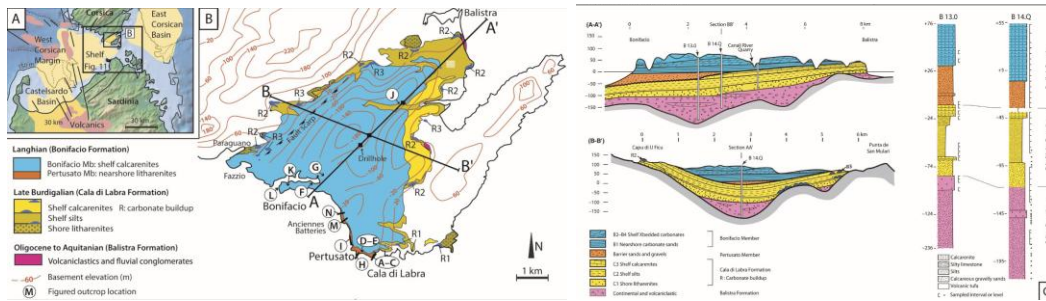


Figure 2 – Coupes du cause miocène de Bonifacio (Figures A B et C dans Reynaud et al.,2012)

Les falaises sur lesquelles sont construites la Citadelle de Bonifacio sont constituées de calcarénites et de sables fins plus ou moins consolidés, appelés formation de Bonifacio.

Le programme d'étude inclue un forage vertical au niveau du pilier de la Citadelle sur 60 m qui nous a permis de mieux caractériser cette formation. S'y distinguent deux niveaux appelés membres, le membre de Pertusato (situé à la base) plus sableux rencontré sur le forage F3 à partir de 26.90 m de profondeur et le membre de Bonifacio surmontant le précédent qui est constitué d'une alternance de grés et de calcaires arénitiques. Ce faciès, également tendre, est sensible aux érosions météoriques (vents, pluies) érodant particulièrement le niveau gréseux et mettant en surplomb les bancs plus calcaires (faciès 1 et 2 de 0 à 18,3 m de profondeur). La base de ce membre est de plus en plus sableuse, se rapprochant de nature du membre de Pertusato : c'est le faciès 3 de 18,3 à 26,9 m de profondeur.

Les faciès identifiés en forage sont recalés en paroi (figure 3) suivant les bancs carbonatés et montrent un pendage de 5° vers le sud-ouest.

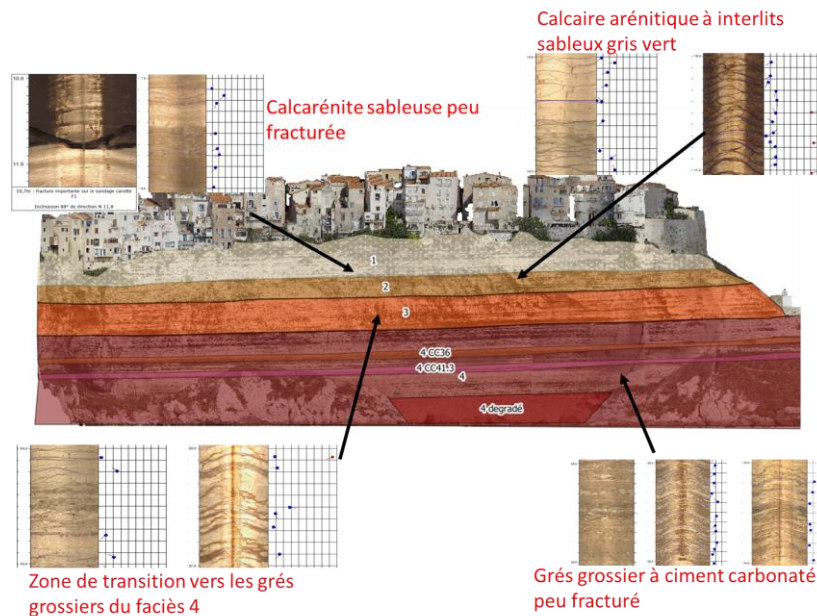


Figure 3 – Faciès de la formation de Bonifacio (faciès 1 à 3 : lithologies du membre de Bonifacio, faciès 4 : lithologie du membre de Pertusato)

## 2.2. Fracturation

A l'échelle régionale, des linéaments sont présents à la fois dans le plateau carbonaté mais aussi dans le substratum sous-jacent, ce sont des zones de fractures d'orientation est-ouest plus jeunes et postérieures aux formations sédimentaires. Ces discontinuités tectoniques sont importantes et peuvent favoriser l'écoulement des eaux souterraines.

Les discontinuités géologiques délimitent des ensembles rocheux qui peuvent être, selon les configurations géométriques, prédisposés aux phénomènes gravitaires d'éboulement.

La falaise sous la Citadelle présente un modelé morphologique et un découpage qui sont liés à la présence de deux directions structurales majeures subverticales (N 0° à N 20°E et N 110°E). Deux forages inclinés à 30° par rapport à la verticale au niveau du pilier de la Citadelle sur 42 et 45 m nous ont permis de mieux caractériser la fracturation selon les deux directions principales dans les différents faciès identifiés.

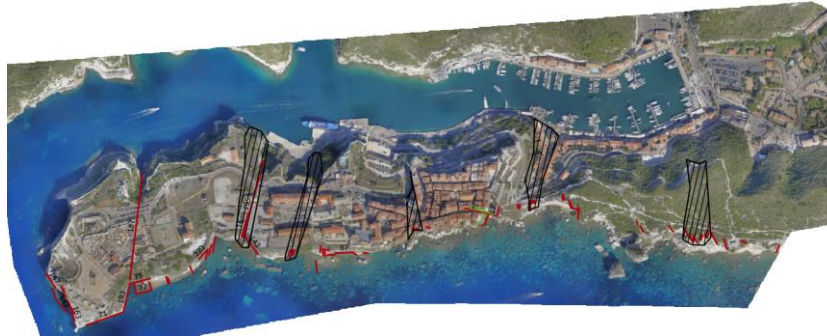


Figure 4 – Levé des deux familles de fractures N0-N20°E et N110°E au niveau de la Citadelle de Bonifacio (faisceaux de fractures en noir et fractures en rouge)

La famille de fractures dans la direction structurale majeure N0-N20°E s'exprime sur des zones de faisceau de fractures de l'ordre de 25 m de large et sur une fréquence de 150 à 350 m (cf. figure 4). Cette fracturation se conjugue à une fracturation à petite échelle d'extension et de fréquence centimétrique présente dans les bancs carbonatés qui s'exprime dans le faciès 2.

La famille de fractures dans la direction N110° s'exprime très peu mais ces fractures traversent l'ensemble des faciès du membre de Bonifacio (faciès 1 à 3). La fracture N110° observable en paroi et recoupée dans le forage F1 (N104°-88°N), se caractérise par une ouverture de 5 à 10 cm issue d'un lessivage important.

Le levé de fracture en paroi a été bâti sur une analyse de facettes sur le modèle numérique issu de la campagne de levé photogrammétrique de la falaise comme proposé par Dewez et al (2016). Ce levé a été validé sur le terrain (figure 4).

Les méthodes géophysiques complémentaires qui ont été déployées ont permis d'apporter des informations importantes :

- les mesures d'écoute sismiques et de vibrations à distance par interférométrie GBRAR ont permis d'identifier les fréquences propres de compartiments rocheux à la fois en tête de falaise et en paroi. L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a montré une cohésion d'ensemble ainsi que différentes zones de vibrations homogènes, interprétées comme des blocs distincts. En particulier, un bloc en surplomb est observé dans la partie Sud-Est de la Citadelle (secteur 4.2 figure 5);

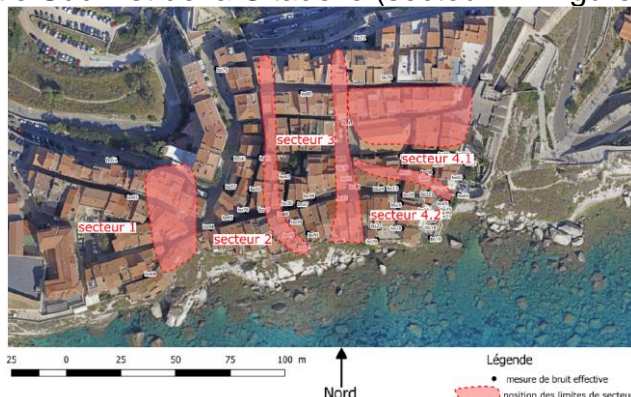


Figure 5 – Interprétation de la répartition géographique des pics en fréquence en quatre blocs distincts, avec une sous-division du secteur 4 (Levy et al. 2020).

- l'interférométrie SAR satellitaire n'a pas levé de déplacements sur le secteur de la place du Marché sur la période 2015-2018;
- la première campagne GBSAR a été effectuée en vue de mettre en évidence d'éventuels déplacements lents de la falaise par comparaison avec de futures mesures.

Le suivi des déplacements mis en place (Franck et al. 2020) n'a pas montré à ce jour de déplacements significatifs sur la période d'enregistrement, malgré les épisodes climatiques intenses couverts (tempête Adrian 2018, tempête Fabien 2019, tempête Ciara 2020). Les mesures d'extensométrie en forage, de clinométrie, de fissurométrie et GPS ne présentent à ce jour pas de variation significative en lien avec un mouvement de la falaise.

### **2.3. Forçage hydrogéologique**

Le massif carbonaté est karstifié, bien que peu développé, en témoignent :

- la morphologie du Causse qui est marquée par des vallées sèches d'orientation est-ouest qui correspondent à d'anciens axes de drainage ;
- la présence de cavités le long de la côte (grottes du Capo Pertusato, de Saint-Antoine, et du Sdragonato, cavité du puit Saint Barthélémy) et développée le long de plan de fracturation ;
- la présence de résurgences, dont 2 au niveau du littoral (sources de Cala di Labra et de Capello) et une sous-marine (phare de la Madonetta à la sortie du port).

Localement, de très nombreuses sorties de galerie de « karst » ont été observées en paroi. La taille des boyaux ainsi mise en évidence peut varier de quelques à une vingtaine de centimètres de diamètre. Ce diamètre correspond parfois à l'épaisseur du banc dans lequel il se développe.

L'essai de tarissement réalisé dans le forage vertical F3 a montré une porosité de massif importante essentiellement liée à la fracturation. Aucune mise en charge ne semble se faire dans les fractures, et le niveau de nappe est proche du niveau de la mer.

De nombreuses infiltrations liées aux activités anthropiques ont été notées sur le secteur d'étude et son bassin versant, aussi bien sur les réseaux (ouvrages génois / fonte / PVC), que sur l'utilisation d'anciennes cuves génoises creusées au rocher. Une importante campagne de réfection des réseaux a été menée en 2019 et 2020, impliquant une ouverture de fouille sur les réseaux existants et mettant à jour les problèmes d'infiltration des eaux dans le massif. L'ouverture et le lessivage de la fracture N110° identifiée en paroi est très certainement à mettre en lien avec les infiltrations d'eaux naturelles avant la construction de la haute ville, puis à la concentration des flux jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle (eaux pluviales et usées) directement par les génois (ouvrages hydrauliques souterrains) vers la fracture.

### **2.4. Forçage hydromécanique**

L'effet de la houle et des vagues sur l'érosion du pied de la falaise a été pointé comme prépondérant dans le mécanisme de rupture. En effet, la sape du pied et la mise en surplomb des bancs supérieurs de falaise semble être accélérées par l'érosion liée aux vagues. Les processus d'érosion sont plus actifs sur les falaises au niveau de Pertusato.

L'étude de caractérisation des régimes de houle a permis de définir que la direction de la houle ouest – sud-ouest est associée aux paramètres Hs et Tp de la combinaison centennale. Ce type de houle (bien visible lors des tempêtes Adrian et Ciara) n'impacte cependant pas le pied de falaise au niveau de la Citadelle, protégé par les éboulis et blocs en mer. Une étude plus fine de houle impactant le pied de falaise doit encore être menée, pour définir les énergies maximales libérées sur la falaise et les lier à l'érosion à moyen terme du faciès 4. Un suivi plus fin par lidar d'une portion de falaise du faciès 4 est d'ores et déjà envisagé pour un suivi à moyen terme.

## 2.5. Modèle géométrique et géomécanique

A partir des investigations menées dans le cadre du programme, un modèle global a pu être défini selon les principes suivants :

- Lithologie à 4 faciès ayant des paramètres géomécaniques issus d'une campagne d'essais en laboratoire (Franck et al. 2020) ;
- Fracturation arrière N110° mise en évidence en paroi dans les faciès 1 à 3 et en forage, mais non visible en surface, hypothèses conservatives sur son prolongement et son état d'ouverture ;
- Fracturation conjuguée N20° non clairement identifiée en paroi, famille peu exprimée dans le secteur. Des hypothèses défavorables de présence et d'ouverture de fractures sont ajoutées aux scénarios d'éboulement ;
- Le comportement mécanique du faciès 4 (molasse sableuse peu carbonatée) peut déterminer le mode de rupture (tension et basculement du pilier ou cisaillement et poinçonnement du faciès 4) ;
- Pas de mise en charge de la fracture N110° ni des potentielles fractures N20° dans les 3 premiers faciès ;
- Recul du pied de falaise à caractériser pour évaluer le recul nécessaire pour déstabiliser le système.

Trois hypothèses de position de fracture N20° sont utilisées pour bâtir un modèle de stabilité géométrique des blocs, considérant une rupture au niveau du rentrant maximal de la falaise :

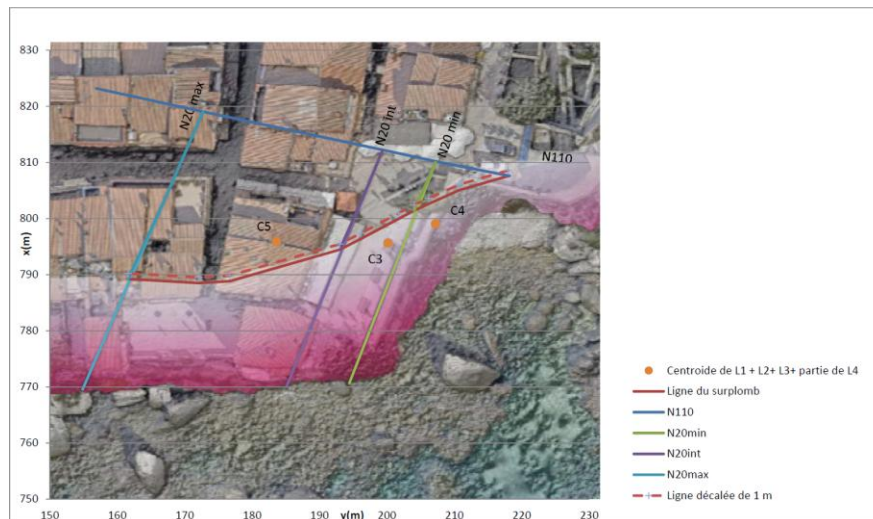


Figure 6 – modélisation des blocs prise en compte dans les scénarios de rupture, selon 3 positions de fractures N20° et équilibre géométrique de chaque bloc

Les différents modèles géomécaniques basés sur ces hypothèses géométriques ont également servis d'analyse de sensibilité aux paramètres géomécaniques (Franck et al. 2020). Une série de paramètres a été figée (géométrie, lithologie, conditions limites du modèle) alors que les autres ont fait l'objet de dégradations jusqu'à obtenir la rupture mécanique.

## 3. Aléa rocheux et scénarios de gestion du risque

Le niveau d'aléa est basé sur l'ensemble des investigations réalisées dans le cadre de ce programme, sur la synthèse des informations sous la forme d'un modèle global et sur les calculs géomécaniques.

Le surplomb de la Citadelle apparaît stable si l'on ne considère que la seule fracture N110°E. Sa combinaison avec la N20°E engendre des situations d'instabilité dans la seule position où elle a été observée (N20min) et si elle est continue dans tout le massif.

L'aléa d'éboulement rocheux est considéré à partir des trois scénarios de rupture envisagés, apportant chacun un niveau de risque et des scénarios de gestion.

### **3.1. Ecaille selon une fracture N20° proche de la paroi (N20min)**

La rupture d'une écaille selon une position de fracture N20° proche de la paroi est un scénario qualifié de probable, certaines fractures étant bien visibles en sommet de paroi bien que fermées. L'incertitude principale pour ce scénario réside dans la présence et la persistance de cette fracture N20. L'écaille estimée à 3 000 m<sup>3</sup> est en surplomb total, le centre de gravité étant au-delà de la ligne de surplomb. De plus, le calcul montre une marge très faible sur les paramètres géomécaniques et une instabilité si la fracture est continue. L'aléa devrait donc être considéré comme élevé, l'échéance d'une telle rupture étant considérée comme probable dans les 100 ans.

Les enjeux identifiés en cas d'éboulement sont le mur de la place du marché et une partie de la place du marché en remblai. Aucun enjeu permanent n'est engagé dans les scénarios de gestion, mais la présence d'enjeux humains au sommet de l'écaille est à éliminer tant que la temporalité d'un tel scénario n'est pas clarifiée.

### **3.2. Eboulement selon une fracture N20° sous la place du marché (N20int)**

La rupture d'un volume rocheux plus important selon une position de fracture N20° intermédiaire est un scénario qualifié de peu probable, une fracture étant identifiée uniquement dans le faciès 2 en paroi sur une faible surface. Néanmoins le volume de 12 600 m<sup>3</sup> est en surplomb partiel, le centre de gravité est en limite de la ligne de surplomb. De plus, le calcul montre que la combinaison N110°/N20° contient des situations d'instabilité pour les simulations N20int dès lors que les caractéristiques des couches sont divisées par 10 au regard des valeurs de référence. Les incertitudes pour ce scénario résident dans la présence d'une telle fracture N20 sur trente mètres et son ouverture, sur le prolongement de la N110 dans le massif au-delà de la zone lessivée investiguée proche de la paroi et sur la résistance géomécanique du faciès 4. L'aléa peut donc être considéré comme moyen au regard du volume et de sa probabilité de départ.

Les enjeux identifiés en cas d'éboulement sont l'ensemble de la place du marché et potentiellement les façades des 3 immeubles d'habitations.

### **3.2. Eboulement selon une fracture N20° sous la place Manichella (N20max)**

La rupture d'un volume rocheux maximal estimé selon une position de fracture N20° est un scénario envisagé comme extrême, aucune fracture étant identifiée en paroi. Le volume estimé à 53 000 m<sup>3</sup> est stable géométriquement. De plus, le calcul montre que la combinaison N110°/N20° contient une situation d'instabilité pour les simulations N20max entièrement ouvertes et dès lors que les caractéristiques des couches sont divisées par 10 au regard des valeurs de référence, menant au poinçonnement du faciès 4. Les incertitudes pour ce scénario résident dans la présence d'une telle fracture N20 et son état sur une longueur de quarante mètres, sur le prolongement de la N110 dans le massif au-delà de la zone lessivée proche de la paroi et sur la résistance géomécanique du faciès 4. L'aléa est donc considéré comme faible.

Les enjeux identifiés en cas d'éboulement sont les 7 immeubles d'habitations pour un cumul de 95 habitants.

## **2.6. Limites de l'étude et amélioration du programme**

La réalisation des forages avait pour objectif de recouper la fracture N110° mais aussi de caractériser la fracturation complémentaire N20°. Le positionnement des forages a été principalement dicté par l'encombrement de la machine de forage et par les possibilités d'implantation de forage en période de rénovation des réseaux. On pourra ainsi regretter

de ne pas avoir pu implanter les forages sur le bloc supposé instable, ne pouvant donc qu'extrapoler les données de fracturation du massif d'un bloc à l'autre de part et d'autre de la fracture N110°.

Il est apparu lors de la définition des paramètres géomécaniques à partir des essais en laboratoire qu'un calage avec des mesures de vitesse sonique in situ aurait permis de réduire les incertitudes quant à la représentativité des échantillons considérés. De plus, la réalisation des essais en laboratoire sur échantillon saturé en eau aurait pu donner la sensibilité des matériaux à leurs teneurs en eau.

Les mesures d'érosion du pied de la paroi ne sont que pour le moment des données qualitatives et ponctuelles, une analyse plus fine par lidar sur une portion du faciès 4 aurait pu permettre d'estimer l'érosion sur la période du programme. Cette solution est envisagée dans la gestion du risque.

Enfin, pour préciser le degrés désolidarisation de l'écaille dans le scénario 1, les mesures d'écoute sismiques au sommet et le long de l'écaille restent à mener.

#### **4. Conclusions**

Le programme d'amélioration de la connaissance développé dans le cadre de cette étude aura permis de débiter une phase d'observation et de permettre la caractérisation de la falaise et de ses forçages environnementaux et anthropiques.

Il aura permis de définir les principaux paramètres du modèle global et les hypothèses retenues pour la modélisation géomécanique et les scénarios possibles de rupture.

Le péril imminent a été levé, l'aléa a été requalifié sur l'ensemble de la zone d'étude et des recommandations en terme de gestion du risque ont été formulées, visant la réduction des enjeux humains, qu'ils soient temporaires ou permanents, la réduction de l'aléa par des mesures de protections vis-à-vis des forçages, et par la mise en place d'un protocole de vigilance pour la collectivité directement intégré dans le plan de gestion du risque de la ville.

#### **5. Références bibliographiques**

- BRGM (1970) Étude géotechnique des falaises de Bonifacio (Corse), rapport BRGM 70-SGN-225-BGA,
- BRGM (1981) Étude de faisabilité de travaux de confortement (lutte contre l'altération et l'érosion), BRGM 81-SGN-164-CSC
- BRGM (2002) Caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio (Corse), BRGM/RP-51860-FR,
- 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.
- Cerema (2014). Bonifacio – secteur de la Citadelle – Détermination de l'aléa éboulement. N° d'affaire C14MN0073.
- Dewez T.[et al.] (2016). Cliff collapse hazard from repeated multicopter uav acquisitions: return on experience
- Dewez, T.[et al.] (2009). Quantification de l'évolution des côtes sableuses et rocheuses par photogrammétrie et lasergrammétrie. La Houille Blanche 32–37
- Franck C.[et al.] (2020) Apports de l'observation et de la modélisation à l'évaluation de l'aléa de la falaise de Bonifacio, Corse.
- Levy C.[et al.] (2020) Etudes croisées de l'aléa d'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.
- Levy C.[et al.] (2020) Spécificité de l'écoute sismique passive en contexte de presqu'île pour l'étude du risque rocheux