

**Document
final**

Bloc 4 : Evaluation de l'aléa et proposition de mesures de gestion du risque

Amélioration de la connaissance de l'aléa « effondrement en
grande masse »

Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio

**Cerema ASA20_068
Ineris-175501-2397775
BRGM/RP-70230-FR**

V3, Mars 2021

**Document
final**

Bloc 4 : Evaluation de l'aléa et proposition de mesures de gestion du risque

Amélioration de la connaissance de l'aléa « effondrement en
grande masse »

Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio

**Cerema ASA20_068
Ineris-175501-2397775
BRGM/RP-70230-FR**

V3, Mars 2021

B. Vignerot, C. Franck, M. Malascrabes

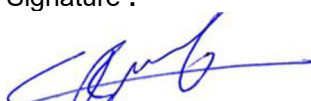
CEREMA

Vérificateur :
Nom : Pierre AZEMARD
Fonction : Référent technique Risques Naturels
Date : 27/11/2020
Signature : 

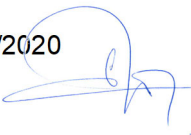
Approbateur :
Nom : Raymond BOURG
Fonction : Chef de l'agence Sophia Antipolis
Date : 04/03/2021
Signature : 

INERIS

Vérificateur :
Nom : Alain THORAVAL
Fonction : Ingénieur Expert en géomécanique
Date : 27/11/2020
Signature : 

Approbateur :
Nom : Hafid BAROUDI
Fonction : Directeur de la Direction Sites et territoires
Date : 08/03/2021
Signature : 

BRGM

Vérificateur :
Nom : BERNARDIE/COLAS
Fonction : Experts risques Naturels
Date : 16/11/2020
Signature : 

Approbateur :
Nom : Anthony REY
Fonction : Directeur régional
Date : 05/03/2021
Signature : 

Ce rapport synthétise une partie du programme d'étude (Bloc 4) et a été rédigé par les trois opérateurs. Conformément au système de gestion de qualité, ce rapport a donc été vérifié et approuvé par l'ensemble des opérateurs. Il a par ailleurs été soumis à l'avis du comité d'experts nommé par la DGPR. Cette version V3 intègre les commentaires et apporte les clarifications attendues pour les objectifs de l'étude.

Mots-clés : CARTOGRAPHIE, ALEA, EBOULEMENT, GESTION DU RISQUE, BONIFACIO, CORSE DU SUD

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

B. Vignerot, C. Franck, M. Malascrabes (2021) – Bloc 4 : Evaluation de l'aléa et proposition de mesures de gestion du risque - Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio, 79 p., 51 fig., 1 ann. Rapport Cerema ASA20_068 Ineris-175501-2397775 BRGM/RP-70230-FR

SYNTHESE

L'État a lancé, début juillet 2018, une étude dont l'objectif est l'amélioration de la connaissance de l'aléa éboulement rocheux (effondrement en grande masse) sur le secteur de la Citadelle. Elle est conduite par un groupement de trois 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).

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 (Bloc 0) a permis de poser les bases pour un programme complet d'amélioration de la connaissance. Ces études complémentaires consistent en la réalisation d'observations et de mesures sur le terrain (Bloc 2A), d'un complément d'étude sur l'hydrogéologie du secteur (Bloc 2B) et d'un complément sur l'effet hydromécanique de la houle sur la falaise (Bloc 2C). En parallèle, les études ont intégré la réalisation de trois forages depuis la haute ville recoupant la fracturation observée en paroi (Bloc 1). 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.

Après une phase de calculs géomécaniques (Bloc 3B), différents scénarios de rupture ont été élaborés pour évaluer l'aléa et proposer des mesures de gestion du risque sur le secteur étudié.

Le présent rapport synthétise l'ensemble des actions des différents blocs de l'étude.

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

1. la lithologie de la falaise comporte quatre faciès dont les paramètres géomécaniques ont été déterminés par une campagne d'essais en laboratoire;
2. le comportement mécanique du faciès 4 (grès grossier à ciment carbonaté), notamment son horizon dégradé L4deg observable en pied de falaise, a été considéré comme prépondérant dans le mode de rupture (tension et basculement du pilier ou cisaillement et poinçonnement du faciès 4);
3. deux familles de fracturation guident les phénomènes potentiels d'éboulement en masse :
 - la fracture N110° est observable en paroi de falaise délimitant la zone de surplomb, au sein des faciès 1 à 3, et a été recoupée en forage F1, mais elle est non visible en surface. Des hypothèses conservatives sur son prolongement et son état d'ouverture ont été prises lors de la définition des caractéristiques mécaniques de la fracture dans la modélisation;
 - un ensemble de discontinuités N20° n'est pas clairement identifié en paroi sauf au niveau du parapet, et n'a pas été recoupé par les forages réalisés. Toutefois, au vu de sa fréquence locale, il n'a pas été exclu qu'elle puisse exister au sein de la zone de surplomb. Trois hypothèses de position de fracture N20°E ont été utilisées pour définir les compartiments d'un modèle géométrique et géomécanique, considérant une rupture au niveau du rentrant maximal de la falaise ;
4. les conclusions hydrogéologiques indiquent que la mise en charge de la fracture N110°E, et des potentielles fractures N20°E dans les trois premiers faciès est très peu probable.

Le recul du pied de falaise, notamment au sein de la couche dégradée L4deg, est inéluctable à moyen et long termes, mais la vitesse d'érosion, bien que non évaluée à ce jour, si l'on considère la faible évolution du trait de côte sous la Citadelle durant la période historique, semble limitée. Il reste à améliorer la connaissance de l'effet mécanique et érosif d'épisodes climatiques intenses (tempêtes) sur un possible recul brutal de la falaise dans ce secteur.

Les différents modèles géomécaniques en deux et trois dimensions, basés sur ces hypothèses géométriques, ont permis d'établir une analyse de sensibilité en faisant baisser certains paramètres géomécaniques, par rapport aux valeurs de référence convenues entre opérateurs, jusqu'à obtenir la rupture mécanique. Ceci a permis d'évaluer un facteur de sécurité en fonction de la configuration étudiée

Ainsi le diagnostic de 2017 réalisé par le CEREMA présentant un ensemble de facteurs aboutissant à la rupture (Figure 5) a pu être validé et complété.

Aléa et scénarios de gestion du risque

Les niveaux d'aléa considérés sont basés sur l'ensemble des investigations réalisées et résultats obtenus dans le cadre de ce programme.

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'effondrement en grande masse est évalué à partir de trois scénarios de rupture envisagés, traduisant chacun un niveau de risque selon les enjeux présents considérés, avec des mesures de gestion du risque proposées.

L'ensemble des investigations menées, les scénarios et évaluations des aléas qui en ont découlé, exposés ci-après, permettent de considérer qu'il n'y a pas de péril imminent. Des risques de niveau faible et fort ont été établis (cf. Figure 1) et un certain nombre de recommandations sont proposées, visant soit la réduction des enjeux, soit, quand cela apparaît possible la réduction de l'aléa.



Figure 1 : Vue des places et rues principales sur fond orthophotographie 2018

Recommandations générales

Pour tout le secteur, **y compris les zones de risque faible**, un protocole de vigilance, relatif aux désordres, venues d'eau et activités de chutes de blocs observés, est recommandé.

Un élément important dans la gestion des risques est d'établir un protocole de vigilance permettant de détecter, anticiper ou encore atténuer tout événement de type chute de blocs ou éboulement.

Le rapport de bloc 2B relatif au volet hydrogéologique a pu mettre en évidence, au sein de la Citadelle, le rôle potentiellement déstabilisateur de fuites d'eau qui peuvent alimenter le massif, les fractures et les discontinuités le traversant.

Outre les travaux d'imperméabilisation et de rénovation des réseaux d'eaux, qui sont engagés, il est primordial d'assurer à la fois des actions de vigilance et de traitement rapide de ces fuites. On peut proposer ainsi les actions suivantes :

- équiper les réseaux d'eau de la haute ville de compteurs permettant de quantifier leur rendement (AEP) et de systèmes d'écoute pour identifier les fuites (réseaux pluvial et eaux usées), si cela n'a pas déjà été fait. Il est recommandé de mesurer le rendement du réseau AEP tous les ans ;
- mettre en place avec les riverains de la Citadelle un système de signalement simple de toute anomalie de type fuite, inondation ;

- consigner au fur et à mesure la localisation des éventuelles fuites recensées, les volumes d'eau de fuite, et la façon dont l'eau s'est évacuée pendant l'épisode (via les réseaux d'eau pluviale, les citernes enterrées, par infiltration diffuse vers le massif, etc...);
- surveiller l'état des suintements de la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois de manière récurrente et au sortir d'événements pluviométriques importants, pour observer, photographier et consigner si une évolution est constatée (augmentation manifeste des suintements, maintien, ou diminution). Une fiche électronique support sera proposée par les opérateurs ;
- établir un protocole de traitement avec les gestionnaires de réseaux et riverains pour que toute fuite puisse être traitée dans les 24 h (réseaux) à 48 h (riverains) après qu'elle ait été constatée ;
- évaluer la faisabilité technique et l'impact environnemental d'une protection du pied de falaise par des solutions de type enrochement afin de limiter l'érosion dû à l'action des vagues.

Par ailleurs, il est de la même importance de pouvoir détecter et consigner les désordres se produisant sur la falaise et au sein du bâti de la haute ville. On peut proposer ainsi les actions suivantes :

- mettre en place avec les riverains de la Citadelle un système de signalement simple de toute anomalie de type fissure, tassement anormal, basculement, désolidarisation d'éléments de bâti. Ceci est bien entendu également valable pour les propriétaires/concessionnaires des voiries et édifices publics ;
- inspecter régulièrement la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois de manière récurrente et au sortir d'événements météorologiques importants (pluviométrie, vent, houle) pour observer, photographier et consigner si une évolution est constatée (chute de pierres, blocs ou volumes plus importants, érosion manifeste en pied. Une fiche électronique support sera proposée par les opérateurs ;
- mettre en place, si ce n'est déjà fait, une procédure rapide (par exemple un marché pluri-annuel à bons de commande) afin que les travaux de traitement/confortement puissent être réalisés dans des délais brefs après constat d'instabilités imminentes, ou encore de désordres évolutifs pouvant affecter les enjeux à très court terme, après avis du géotechnicien.
- un diagnostic structurel est recommandé pour les bâtiments à proximité des zones rouges pour évaluer la vulnérabilité du bâti à proximité des zones à risque (parcelles AC268, AC269, AC0270, AC272 et AC273).

Dans le cas où les opérateurs poursuivent l'observation du site pour une période de deux années, si des évolutions anormales de la topographie de la falaise sont mises en évidence par les campagnes complémentaires de scanner laser 3D, elles seront signalées à la DDTM de Corse-du-Sud et à la Ville de Bonifacio. Cette technologie semble prometteuse pour être poursuivie. Ainsi, la fréquence de relevés sera définie au terme des quatre années d'observation. Cette fréquence pourra être adaptée en fonction de l'évolutivité des secteurs.

Des risques de niveau fort sur enjeux permanents et non permanents sont par ailleurs qualifiés, imposant que soient prises des mesures de gestion du risque. Un certain nombre d'entre elles sont proposées, visant soit la réduction des enjeux, soit, quand cela apparaît possible la réduction de l'aléa. Le détail pour chaque mesure de gestion du risque proposée est précisé dans le présent rapport et synthétisé ci-dessous.

Proposition de mesure de gestion du risque en zone « Rc-Fort caractérisé »

- réduction des enjeux humains :

- recul stratégique en repositionnant le parapet en zone d'aléa moyen, la faisabilité est bonne (zone de risque fort-diffus ou risque faible).
- réduction de l'aléa :
 - Etanchéification du sommet de la falaise avec une forme de pente afin d'évacuer les eaux et éviter tout risque d'infiltration dans les terrains en place en tête de falaise.
 - Des mesures de confortement de l'écaille peuvent être envisagées, avec la réalisation d'environ 200 boulons d'ancrage. Toutefois, le risque de déstabilisation lors de la mise en place est important et cette solution n'est pas conseillée à ce stade. Une note de pré-dimensionnement est toutefois fournie en annexe pour plus de précisions. De même, la solution de purge de l'écaille a été écartée par les opérateurs du fait des risques pour les terrains avoisinants (incertitude sur la possible fragilisation du massif rocheux au contact de l'écaille en cas de déroçtage volontaire ; massif qui présente des enjeux permanents en partie sommitale).

Proposition de mesure de gestion du risque en zone « Rd-Fort diffus »

- réduction des enjeux humains :
 - mise en place d'un protocole de gestion des flux touristiques avec fermeture anticipée du secteur en cas de conditions météorologiques défavorables (Alerte Orange et Rouge Météofrance).

Proposition de mesure de gestion du risque en zone « R-Fort-non bâti »

- réduction des enjeux humains :
 - mise en place d'un périmètre d'interdiction de navigation de 30 m autour de la plus grande avancée de terres (trait de côte ou surplomb) ;
 - mise en place d'une interdiction de passage pour les piétons en pied de falaise.

Proposition de mesure de gestion du risque en zone « Rb-Fort bâti » (parcelles AC0267 et AC0274)

- réduction des enjeux humains :
 - dans l'optique de l'acquisition des biens par la collectivité, il est conseillé d'améliorer la précision sur la temporalité de l'aléa (vitesse de recul du pied, ouverture des fractures) ;
 - réaliser une étude structurelle des bâtiments concernés par un risque fort bâti pour connaître leur vulnérabilité à une perte partielle de terrain de fondation et définir les mesures de confortement pouvant s'avérer nécessaires le cas échéant (chaînage et contreventement notamment) ;
 - Interdire l'augmentation des enjeux humains (pas d'extension autorisée type chambre sur ces bâtiments au niveau de ces façades par exemple) ;
 - Il est proposé d'interdire tout nouveau projet de construction type maison d'habitation ou commerces afin de limiter l'occupation humaine.
- réduction de l'aléa :
 - Etanchéification du sommet de la falaise et gestion durable des eaux (AEP, EU, EP) afin d'éviter toute infiltration dans les terrains en place. Les eaux de toitures et de ruelles, les eaux usées devront être évacuées en dehors de la zone ;
 - Campagne annuelle de purge de la falaise et d'inventaire des instabilités résiduelles afin d'adapter les mesures de sécurisation et de gestion des enjeux présents sur les terrains en recul de la tête de falaise.

Sommaire

1	INTRODUCTION	17
2	RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE	19
3	CONTEXTE GEOLOGIQUE	23
3.1	Le causse de Bonifacio	23
3.2	La formation de Bonifacio (unités P1, P2, B1, B2, B3 et B4)	24
3.3	Fracturation du massif	26
3.4	Hydrogéologie du causse	27
3.4.1	Niveaux hydrologiques	28
3.4.2	Karstification	28
4	SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACQUISES ISSUES DES INVESTIGATIONS MENEES	31
4.1	Lithologie et caractéristiques géomécaniques	31
4.2	Stratification	33
4.3	Fracturation	33
4.3.1	Fracturation observable en paroi	33
4.3.2	Apport des méthodes géophysiques	37
4.3.3	Apport des forages	37
4.4	Hydrogéologie	40
4.4.1	La fonction d'entrée du système : l'eau infiltrée	40
4.4.2	La porosité et la perméabilité du massif : où et comment circule l'eau	40
4.4.3	La fonction de sortie du système : les exutoires	41
4.5	Forage marin	41
4.6	Observation de la falaise et évolution sur la période d'étude	44
4.6.1	Synthèse de l'apport des techniques déployées	44
4.6.2	Contribution à l'évaluation de l'aléa	48
4.6.3	Opérabilité et contribution des techniques à la poursuite de l'observation	48
4.7	comportement et modélisation géomécaniques	49
4.7.1	Géométrie et paramètres géomécaniques	49
4.7.2	Résultats pour la zone de la Citadelle sans prise en compte de la fracture N20 : ...	51
4.7.3	Résultats pour la zone de la Citadelle avec la fracture N20 - impact de l'extension verticale :	52
4.7.4	Résultats pour la zone de la Citadelle avec la fracture N20 - impact de la localisation :	52
4.7.5	Proposition de mécanisme et synthèse sur la stabilité	53

5	SCENARIOS DE RUPTURE, EVALUATION DE L'ALEA ET PROPOSITION DE MESURES DE GESTION DU RISQUE	55
5.1	Principaux parametres a retenir	55
5.2	Incertitudes residuelles	56
5.2.1	Géométrie de la falaise	56
5.2.2	Géologie et hydrogéologie	56
5.2.3	Caractérisation géomécanique des terrains et fractures	57
5.2.4	Modélisation	57
5.2.5	Conclusion sur les incertitudes	57
5.3	Evaluation de d'alea	57
5.3.1	Méthodologie	57
5.3.2	Période de référence centennale	58
5.3.3	Critères d'évaluation de l'aléa	59
5.3.4	Critères d'intensité pour l'évaluation de l'aléa.....	61
5.4	Niveau d'aléa – analyse des scenarios	62
5.4.1	Scénario 1 : Ecaille selon une fracture N20°E proche de la paroi (N20_min)	62
5.4.2	Scénario 2 : Eboulement selon un fracture N20°E passant sous la Place du Marché (N20_int).....	63
5.4.3	Scénario 3 : Eboulement selon un fracture N20°E sous la place Manichella (N20_max).....	64
5.4.4	Scénario 4 : Décompression du massif et rupture d'éléments en surplomb	64
5.5	cartographie de l'aléa rocheux	65
5.6	Mesures de gestion du risque	66
5.6.1	Recommandations générales pour la gestion du risque	68
5.6.2	Proposition de gestion du risque en zone « Rc-Fort caractérisé »	70
5.6.3	Proposition de gestion du risque en zone « Rd-Fort diffus »	70
5.6.4	Proposition de gestion du risque en zone « R-Fort-non bâti »	70
5.6.5	Proposition de gestion du risque en zone « Rb-Fort bâti », parcelles AC0267 et AC0274.....	71
5.7	Proposition d'étude complémentaire	71
5.7.1	Suivi de l'observation du site	73
5.7.2	Erosion du pied de falaise.....	73
6	BIBLIOGRAPHIE DU PROJET	75

Liste des figures

Figure 1 : Vue des places et rues principales sur fond orthophotographie 2018.....	9
Figure 2 : Bloc diagramme de synthèse de l'étude	17
Figure 3 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018)	20
Figure 4 : Détail des 5 blocs d'études. Le bloc 4 est l'objet de ce rapport.....	21
Figure 5 : Facteurs déterminant l'aléa (Cerema, 2017)	22
Figure 6 : Coupes du causse miocène de Bonifacio (étoile rouge) (Reynaud et al 2012).....	23
Figure 7 : Logs stratigraphiques proposés dans Orsini et al (2010) et Reynaud et al (2012)	24
Figure 8 – Faciès de la formation de Bonifacio (B lithologies du membre de Bonifacio, P lithologies du membre de Pertusato) (Reynaud et al 2012 [10])	26
Figure 9 – Fracturation à l'échelle du causse et du massif granitique	27
Figure 10 – Grottes Saint-Antoine et Sdragonato à la sortie du port de Bonifacio	29
Figure 11 – Tableau de synthèse des forages réalisés	31
Figure 12 – Identification des faciès sur les logs simplifiés de SC1-F3 vertical (gauche), SC2-F2 incliné (milieu) et SC3-F1 incliné (droite).....	31
Figure 13 – Illustration des quatre faciès en imagerie de paroi (2 forages inclinés et 1 vertical)	32
Figure 14 – Représentation stéréoscopique de la stratification (densité de poles sur hémisphère inférieur) sur F1 (263 pointés), F2 (278 pointés) et F3 (337 pointés).....	33
Figure 15 – Visualisation des grandes fractures N110° (en bleu) sur photographie satellite Pléiades	34
Figure 16 – Visualisation de la fracture N110° identifiée en paroi sur le site d'étude.....	34
Figure 17 – Analyse des directions de pendage(dip dir) du nuage de point de la falaise (azimuts équivalents : bleu : N20 : vert N110° / rose N70°)	35
Figure 18 – 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 respectivement) (fond : orthophoto 2018).....	36
Figure 19 – Fracturation N0° et érosion en touches de piano dans les faciès 1 et 2 et fractures N20°E ouvertes au niveau de la descente de Sutta Rocca	36
Figure 20 – Interprétation de la répartition géographique des pics en fréquence en quatre blocs distincts, avec une sous-division du secteur 4 (Levy et al. 2020) (fond : orthophoto 2018)	37
Figure 21 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inférieur) et Dip/DipDir de la fracturation sur F3 en fonction de la profondeur	38
Figure 22 – Tableau de synthèse des diagaphies en forage (veleurs en azimuth, pendage)	38
Figure 23 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inferieur) et Dip/DipDir (pendage et direction de pendage) de la fracturation sur F1 en fonction de la profondeur	39
Figure 24 – Imagerie de la fracture majeure dans le forage F1	39
Figure 25 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inférieur) et pendage / direction de pendage de la fracturation sur F2 en fonction de la profondeur	40
Figure 26 – Conditions des forçages et pentes des falaises pour les différents profils.	42
Figure 27 – MNT de 0,10 m de résolution généré à partir de la fusion du Litto3D et du lever drone (emprise signalée par le polygone pourpre. Les traits rouges correspondent au profils de calcul. Coordonnées CC42 (m) et altitude exprimée en m par rapport à l'IGN.....	43
Figure 28 : Investigations menées dans le cadre du bloc « Observation »	45
Figure 29 : Orthophotographie haute résolution de la falaise au niveau de la zone d'étude.....	45
Figure 30 : Comparaison des nuages de points LiDAR entre l'état 0 (première campagne de septembre 2018) et l'état 1 (deuxième campagne de décembre 2018).....	46
Figure 31 : Ecoute microsismique passive . Interprétation de la répartition géographique des pics en faveur d'une subdivision de la Citadelle en 4 secteurs (fond : orthophoto 2018)	47
Figure 32 - Implantation des équipements du réseau d'observation multi-paramètres (fond : cadastre.gouv.fr).....	48
Figure 33 – Visualisation des joints de stratification, de la fractures N110, ainsi que les deux positions extrêmes de la N20 (zone de la Citadelle) sur le modèle 3DEC.....	50
Figure 34 – Lithologie utilisée sur le modèle 3DEC.	50
Figure 35 – Paramètres géomécaniques de base utilisés pour le modèle 3DEC.....	51
Figure 36 – Tableau de synthèse des résultats de modélisation en termes de stabilité de falaise.	53
Figure 37 – Visualisation des blocs pris en compte dans les scenarios de rupture, selon 3 positions de fractures N20°et équilibre géométrique de chaque bloc (fond : orthophoto 2018)	56

Figure 38 – Modélisation des blocs dans les scenarios de rupture, selon 3 positions de fractures N20° .	58
Figure 39 – Arbre de qualification des scenarios de rupture selon la présence et l'ouverture des fractures dans le massif rocheux	60
Figure 40 – Tableau des critères d'occurrence considérés dans l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse »	60
Figure 41 – Tableau des critères d'intensité considérés dans l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse »	61
Figure 42 – Caractérisation de l'aléa « effondrement en grande masse » - Matrice de croisement d'occurrence et d'intensité	62
Figure 43 – Notation du scénario 1 sur les critères d'évaluation de l'aléa	62
Figure 44 – Notation du scénario 2 sur les critères d'évaluation de l'aléa	63
Figure 45 – Notation du scénario 3 sur les critères d'évaluation de l'aléa	64
Figure 46 – Repérage des masses instables et principaux plan de fracture pour le scenario 4 sur modèle facets (nuage de point colorisé)	65
Figure 47 – Cartographie de l'aléa effondrement en grande masse sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018)	66
Figure 48 – Cartographie des enjeux sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018).....	67
Figure 49 – Caractérisation du risque rocheux d'effondrement en grande masse - Matrice de croisement aléa et enjeux (R : Rouge, Rb : Rouge bâti, Rd : Rouge diffus, Rc : Rouge caractérisé).....	67
Figure 50 – Cartographie du risque d'effondrement en grande masse sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018)	68
Figure 51 – Extension à l'ouest du périmètre d'étude, en lien avec la problématique d'éboulement de falaise (fond : orthophoto 2018).....	72

Liste des annexes

Annexe 1 : Etude de coût potentiel du confortement de l'écaille- Scenario 1

1 Introduction

Ce rapport établit une synthèse des investigations et modélisations menées dans le cadre du programme d'amélioration de la connaissance de l'aléa « effondrement en grande masse » sur le surplomb de la Citadelle de Bonifacio.

Le rapport évalue l'aléa en considérant des scénarios de rupture pertinents, propose des mesures de gestion du risque à mettre en place pour assurer la sécurité des biens et des personnes, et indique les verrous et incertitudes résiduels à lever pour parfaire la connaissance de l'aléa et les mesures de mitigation à réaliser.

Le corps du rapport aborde les principaux éléments issus de la valorisation des informations acquises dans le cadre des blocs de l'étude représentés dans l'organigramme suivant.

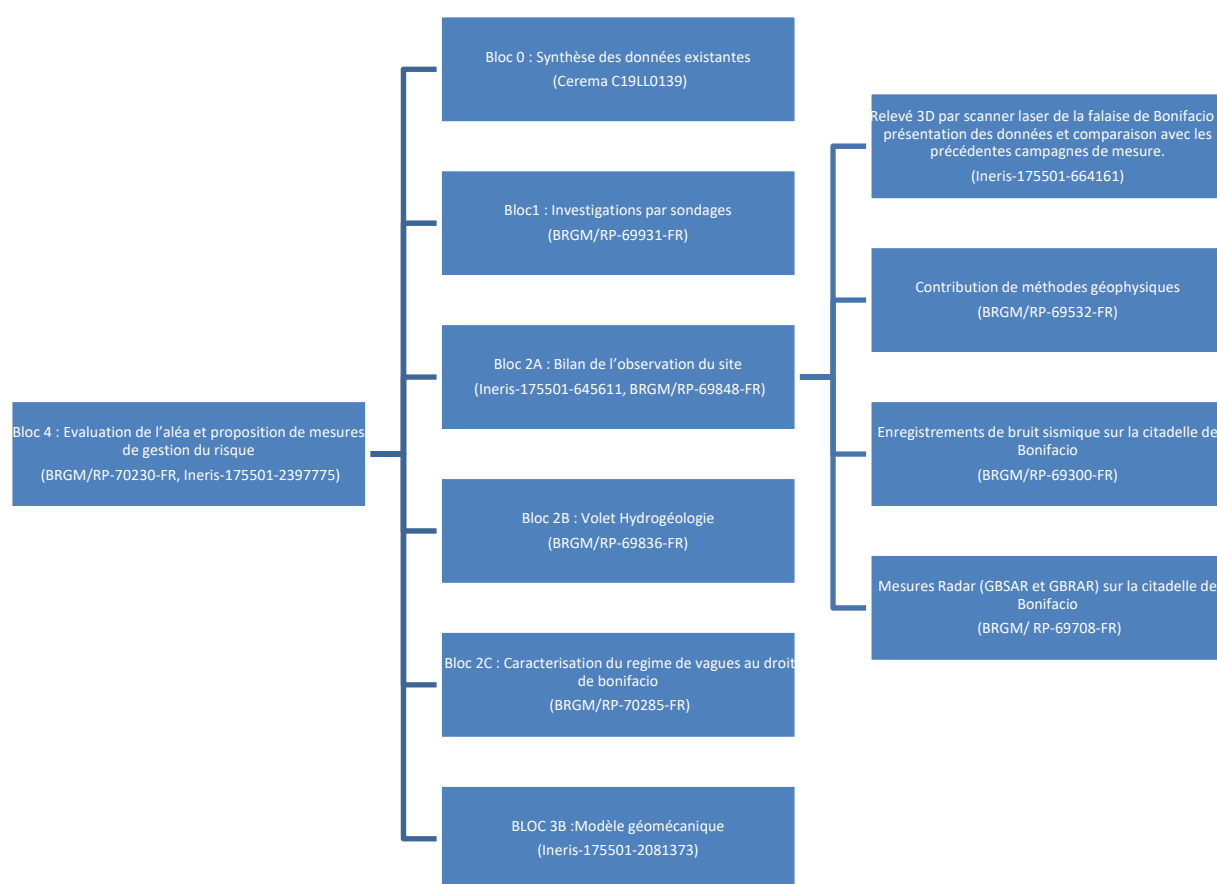


Figure 2 : Bloc diagramme de synthèse de l'étude

Le lecteur pourra se référer aux rapports des différents blocs exposés ci-avant s'il souhaite disposer de davantage d'éléments et de détails relatifs aux prestations réalisées et équipements mis en œuvre.

Le présent rapport (V2, décembre 2020) intègre la prise en compte de l'avis des experts n°9 du 30/11/2020 sur sa version provisoire (V1, novembre 2020).

2 Rappel succinct du contexte

La DGPR a produit une note rappelant le contexte global, dont un extrait est présenté ci-après :

« En 2012-2013 le Cerema a réalisé à la demande de la DDTM de la Corse du Sud une carte multialéas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio. Les résultats de cette étude ont été portés à la connaissance de la commune. Elle identifie deux secteurs particulièrement exposés à l'aléa mouvement de terrain : le secteur de la plage de Sutta Rocca et celui de la citadelle dans la vieille ville. Ils ont fait chacun l'objet d'une étude complémentaire en 2014 afin d'affiner l'aléa et pour la plage de Sutta Rocca déterminer des protections envisageables, pour la citadelle examiner la faisabilité d'une instrumentation.

Le secteur de la citadelle, où l'aléa est qualifié de très élevé, s'avère particulièrement problématique. Il est concerné par 2 types de phénomènes : « chute de petits blocs » ($< 1 \text{ m}^3$), posant essentiellement problème pour les éventuels promeneurs en pied de falaise et « effondrement en grande masse » (environ 1000 m^3). Le mécanisme de rupture identifié est une érosion par sape du pied de falaise qui conduit à la mise en surplomb de la partie supérieure. La rupture se produit sous l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique à l'intérieur des fractures sub-verticales du massif (Figure 5). Son extension spatiale est conditionnée par le réseau de fractures.

Environ 33 bâtiments (332 habitants à l'année) sont menacés par un effondrement soudain et brutal en grande masse. Le Cerema préconise dans son rapport de 2014, la surveillance de la fracturation pour évaluer le fonctionnement réel du massif, tout en précisant que l'instrumentation mise en place ne pourra pas dans un premier temps servir de système d'alerte. Plusieurs années d'analyse des données seront nécessaires... »

Il a été convenu entre la DDTM de Corse du Sud et les opérateurs BRGM, Cerema et Ineris (sous le pilotage du BRGM) de produire une étude visant à améliorer la connaissance et l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse » sous la Citadelle de Bonifacio, et plus particulièrement la zone de surplomb (encorbellement d'environ 20 m) figurant en aléa de niveau très élevé (Figure 3).

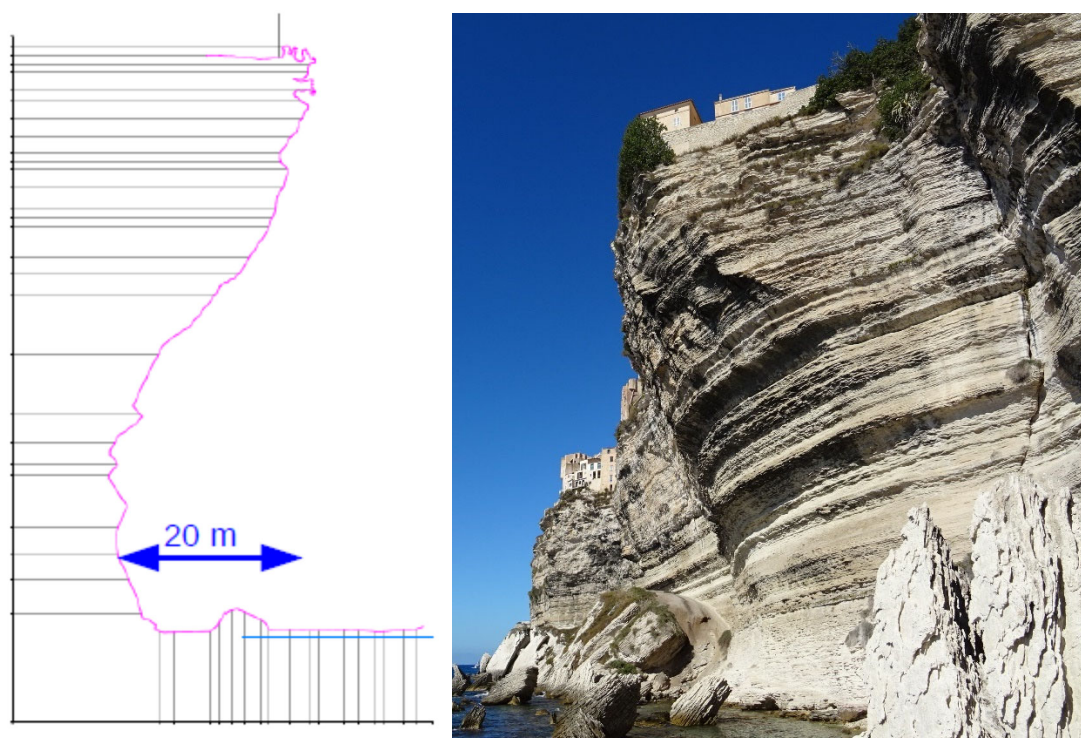


Figure 3 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018)

Il s'est agi notamment (Figure 4):

- de produire une analyse géologique et structurale détaillée de la Citadelle et de la zone d'étude, avec l'appui de trois forages de reconnaissance et d'essais en laboratoire (Bloc d'étude 1) ;
- de progresser dans la connaissance du fonctionnement hydrogéologique (Bloc d'étude 2B) du système et de ses conséquences potentielles en matière de fragilisation ou de facilitation des mécanismes de rupture préférentielles pressenties ;
- de progresser également dans la connaissance du comportement du pied de falaise au regard du contexte hydrodynamique maritime (altération hydromécanique de la falaise et action de la houle sur la sape de pied, Bloc d'étude 2C) ;
- de mettre en place un système d'observation du comportement du massif, au sein des forages entrepris mais également au droit de la Citadelle et des falaises la délimitant (Bloc d'étude 2A)
- d'évaluer l'aléa en s'appuyant sur l'ensemble des éléments informatifs acquis (Blocs 1 et 2) et sur une modélisation géomécanique des mécanismes de mouvement de terrain jugés comme étant les plus pertinents (Blocs 3A et 3B).

L'évaluation finale de l'aléa « effondrement en grande masse », et la proposition de mesures de mitigation en fonction du niveau retenu (Bloc d'étude 4), est l'objectif final de l'étude et l'objet du présent rapport.

Bloc	Tâche	Sous tâche	Description	Pilote	Perimètre
0			Synthèse sur les données existantes	CEREMA	Du Port au Cap Petusato
		0,1	Synthèse des analyses faites depuis 2013	CEREMA	
		0,2	Données Disponibles anciennes (BRGM, CETE, CEREMA...)	CEREMA	
		0,3	Partage des données et métadonnées du groupement sur plate-forme e-cenaris, suivi dispositifs d'observation	INERIS	
1			Forages Inclins	CEREMA	Citadelle
		1,1	Redaction CdC	CEREMA	
		1,2	phase AO / autorisation / etude d'impact	BRGM	
		1,3	Suivi forage	BRGM	
		1,4	Géophysique en forage BHTV + radar	BRGM	
		1,5	Instrumentation extensométrie en forage incliné - benchmark, faisabilité et conception	INERIS	
		1,6	Suivi Instrumentation	INERIS	
2			Etudes complémentaires	BRGM	Citadelle/Peninsule
	2A		Observation du site	INERIS	Citadelle/Peninsule
		2,1	Aquisition et traitement LIDAR terrestre	INERIS	
		2,2	Aquisition et traitement LIDAR aéroporté	BRGM	
		2,3	Complement photogrammetrie	BRGM	
		2,4	Instrumentation de paroi et observation : installation et maintenance	INERIS	
		2,5	Radar Geologique	BRGM	
		2,6	Modelisation Facets	BRGM	
	2B		Complément Hydrogéologique	BRGM	Citadelle/Peninsule
		2,9	Terrain / recueil informations AEP/ EU / Pluvial	BRGM	
		2,10	Valorisation / Analyse exutoires	BRGM	
	2C		Complément Erosion en pied de falaise	BRGM	Citadelle/Peninsule
		2,11	Photo-interpretation falaise	BRGM	
		2,12	Analyse comparative du trait de cote (Litto 3D/Lidar .).	BRGM	
		2,13	Etude historicité + événements extremes	BRGM	
		2,14	Caractérisation régime de Houle	BRGM	
		2,15	Valorisation, scenarii d'érosion	BRGM	
3			Construction d'un modèle partagé	BRGM	Citadelle
	3A		Modèle global	BRGM	
		3,1	Réunions d'échanges	BRGM	
		3,2	Modèle et definition des masses potentiellement instables	BRGM	
	3B		Modèle Geomécanique	INERIS	Citadelle
		3,4	Biblio paramètres géomecaniques et calcul géométrique simple	INERIS	
		3,5	Essais en laboratoire + forage(s) verticaux pour prélèvements	CEREMA	
		3,6	Calcul de stabilité Geomécanique (volume rocheux defini, REX sur dièdre éboulé)	INERIS	
		3,7	Calcul de stabilité Geomécanique (volume identifié par sondages, paramétrage continuité, taux de ponts rocheux, ...)	INERIS	
4			Scenario de rupture	BRGM	Citadelle
		4,1	Definition Scenario rupture, Evaluation détaillée de l'aléa	BRGM	
		4,2	Proposition de reponse aux scenario (Mesures de mitigation - volet surveillance)	BRGM	
		4,3	Accompagnement communication	BRGM	

Figure 4 : Détail des 5 blocs d'études. Le bloc 4 est l'objet de ce rapport

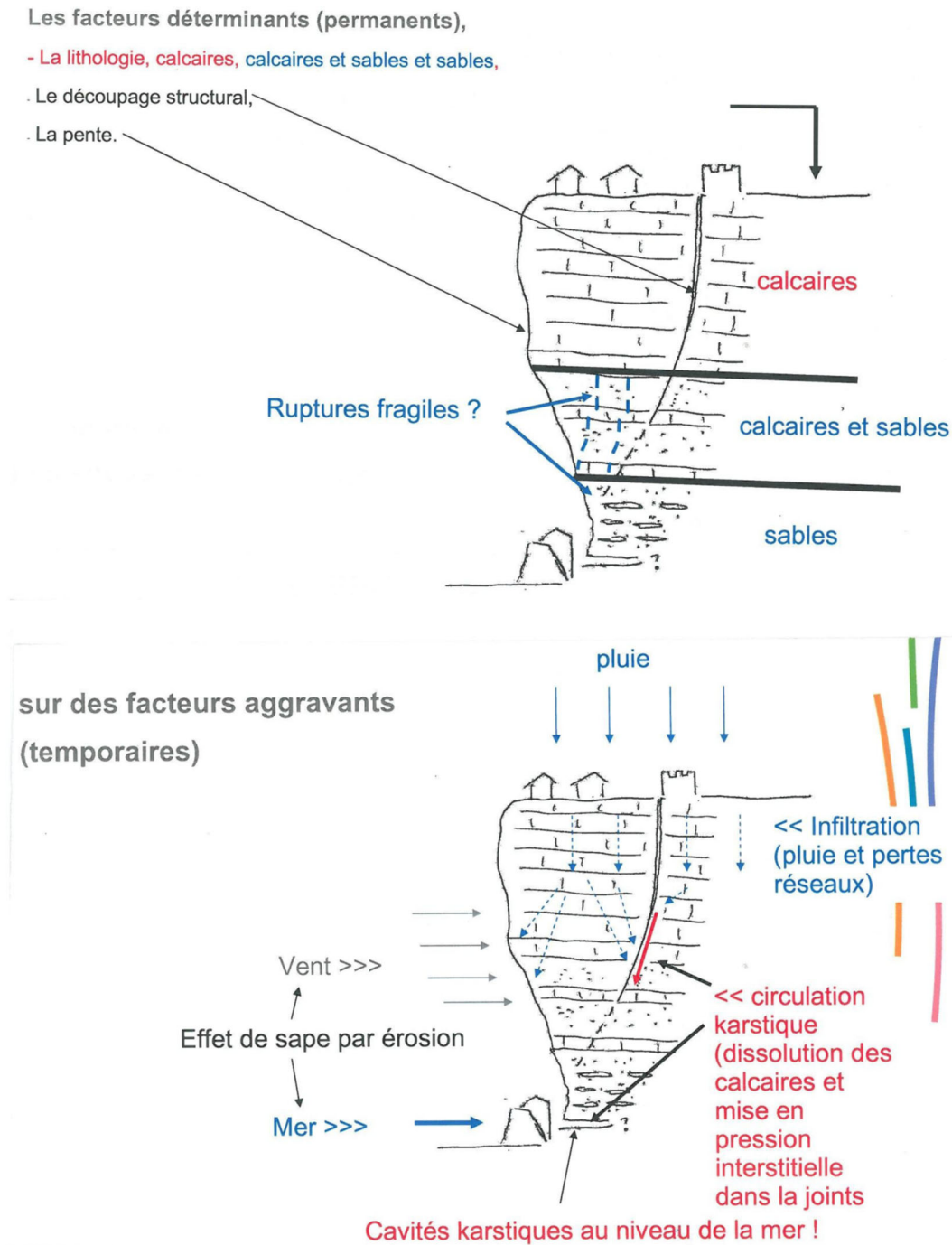


Figure 5 : Facteurs déterminant l'aléa (Cerema, 2017)

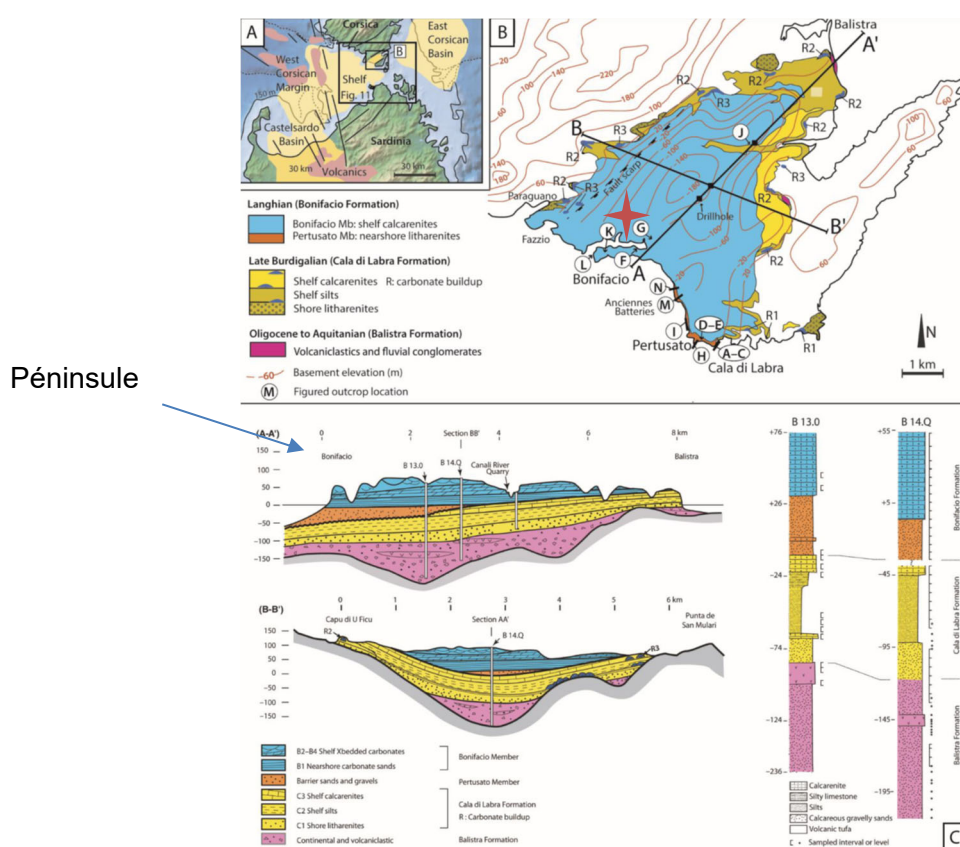
3 Contexte géologique

3.1 LE CAUSSE DE BONIFACIO

Le plateau carbonaté de Bonifacio est situé à l'extrême sud de la Corse. Il est délimité au nord-est par la plage de Balistra et au sud-ouest par la plage de Cala di Paraguano (Figure 6). Au nord-ouest et au sud-est, la limite se fait par un contact avec des massifs granitiques de plus haute altitude, jusqu'à 251 m à la Punta di Curugnola et 113 m à la Punta di San Mulari respectivement.

De forme triangulaire, ce plateau carbonaté s'étend sur une surface d'environ 29 km² pour une altitude moyenne de 80 m NGF. La carte topographique laisse apparaître 2 systèmes hydrographiques fossiles : une paléo-vallée terminée par un paléo-méandre au départ de la route territoriale T40 deux vallées sèches, la vallée Saint Jean et la vallée Saint Julien et des petites dépressions de surface au niveau de Cartarana.

Le plateau carbonaté de Bonifacio est en continuité avec le grand bassin sédimentaire miocène qui se développe en mer au cœur des Bouches de Bonifacio, entre Corse et Sardaigne. Les dépôts sédimentaires du plateau de Bonifacio sont en discordance sur un substratum granitique et l'épaisseur des sédiments est fonction de la paléo-morphologie de celui-ci.



Le causse de Bonifacio admet un léger pendage d'ensemble vers le SE comme le montre le drainage actuel. Dans le détail, le Miocène présente des ondulations à grand rayon de courbure, d'axe probable NNE-SSW, visible en observant la côte depuis la mer. On distingue un antiforme entre le cap Pertusato et la pointe de Spérone, puis un synforme entre le cap Pertusato et la calanque de Paraguanu. L'axe de ce synforme passe par la sortie du port de Bonifacio.

La Corse est intégralement située en zone 1. Le risque sismique y est classé comme « négligeable mais non nul », comme en témoigne le tremblement de terre de juillet 2011 qui s'est produit à une centaine de kilomètres à l'ouest d'Ajaccio. Des failles nord-est et sud-ouest sont localisées au large du détroit de Bonifacio, du côté de la Maddalena, en Sardaigne. Elles se sont notamment manifesté le 6 février 2009, provoquant un séisme de magnitude de 4,1 sur l'échelle de Richter à une cinquantaine de kilomètres au large de Bonifacio.

3.2 LA FORMATION DE BONIFACIO (UNITES P1, P2, B1, B2, B3 ET B4)

Les falaises sur lesquelles sont construites la citadelle de Bonifacio sont constituées de calcarénite et de sables fins plus ou moins consolidés d'âge Miocène, appelées formation de Bonifacio (Figure 7). Plusieurs logs stratigraphiques ont été proposés mais dans ce manuscrit nous nous référons aux récents travaux de Reynaud et al. (2012).

Orsini et al. (2010)				Reynaud et al. (2012)							
Formations		Units	Map labels	Age	Lithology	Onshore	Offshore	Sequences	Systems tracts		
				Serravallian to Tortonian			SU7				
Bonifacio Fm	Bonifacio Mb	2-7	m2-3B	Langhian (starting ca 16 Ma)	Coralline-rich calcarenites	B4	SU6	2	FRST2		
		2-6				B3	SU5		HST2		
		2-5				B2	SU4		TST2		
	Pertusato Mb	2-4	m2-3P		P2	SU3	LST2				
		2-3			P1		FRST1				
		2-2									
	2-1										
Cala di Labra Fm		1-6	m2a2	Burdigalian (starting ca 19 Ma)	Coralline-rich calc	C3	SU2	1	HST1		
		1-5			m2a2RC3	R3			Sandy silts	C2	
		1-4			m2a2RC2	R2			Shelly litharenites	C1	TST1
		1-3									
		1-2									
		1-1			m2a2RC1	R1					
Balistra Fm		m1 a1 Tf (volcanic tuffs)		Aquitainian (21 Ma)	Litharenites Conglomerates Volcaniclastics	Ba	SU1				
		m1a1		Oligo-Aquitainian							

Figure 7 : Logs stratigraphiques proposés dans Orsini et al (2010) et Reynaud et al (2012)

S'y distinguent deux niveaux appelés membres, le membre de Pertusato (situé à la base) plus sableux et le membre de Bonifacio surmontant le précédent qui est constitué d'une alternance de grés et de calcarénite.

Le membre de « Pertusato », situé à la base, épais d'une trentaine de mètres, est constitué de sables fins, peu consolidés, correspondant à des dépôts de plage grandement influencé par

l'action de la houle et des vagues de tempêtes (de 0 à +10m de profondeur). Très tendre, ce niveau est très sensible à l'érosion marine.

Le membre de « Bonifacio », qui surmonte le précédent, est composé d'une alternance de grès et de calcarénites, d'au moins cinquante mètres d'épaisseur. Ce type de roche témoigne d'un milieu de dépôt légèrement plus profond (0 à -10m) que la formation de Pertusato. Ce faciès, également tendre, est sensible aux érosions météoriques (vents, pluies) érodant particulièrement le niveau gréseux et mettant en surplomb les bancs plus calcaires. La base de ce membre est de plus en plus sableuse, se rapprochant en nature du membre de Pertusato.(Figure 8).

Le membre de Pertusato surmonte la formation de Cala di Labra. Il comprend les unités P1 et P2. L'unité P1, d'une épaisseur pluri-décamétrique, est à la base une litharénite riche en graviers puis au sommet une calcarenite sableuse. L'unité P2 est organisée en litages obliques de pendage 4 – 7° SSW sur une dizaine de mètres puis en stratifications obliques opposées sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Elle est principalement composée de litharénite à grains grossiers à fins.

Le membre de Bonifacio, transgressif et discordant sur le membre de Pertusato, comprend les unités B1, B2, B3 et B4 sur une épaisseur maximale de 80 m. L'unité B1 est une litharénite calcaire peu cimentée à feldspaths quartziques.. L'unité B2 est une calcarenite à algues coralliennes encroûtantes, dont la fraction silicatée demeure proche de celle de l'unité B1. Enfin, l'unité B3 correspond à des calcarenites dominées par la présence d'algues coralliennes. La fraction silicatée y est inférieure à 10%.

L'unité B4 du membre de Bonifacio, complète l'ensemble des dépôts sédimentaires du plateau de Bonifacio (Figure 7 et Figure 8). Cette unité est constituée par des rudites dominées par des algues coralliennes. Dans les falaises, cette unité laisse apparaître quelques spéléothèmes pendants. Elle constitue l'actuelle surface d'érosion avec différentes vallées et, par endroits, des affleurements de roche altérée.

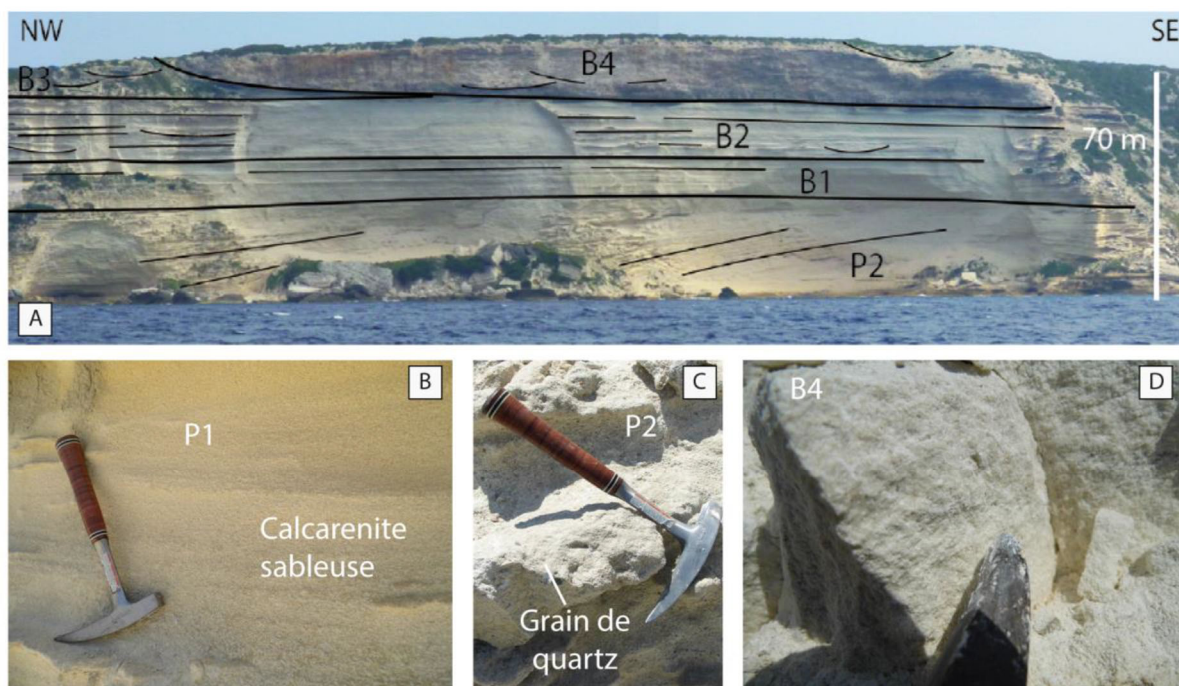


Figure 8 – Faciès de la formation de Bonifacio (B lithologies du membre de Bonifacio, P lithologies du membre de Pertusato) (Reynaud et al 2012 [10])

La formation de Bonifacio marque donc une transition entre une sédimentation d'éléments silicatés et une sédimentation carbonatée, liée à une remontée du niveau de la mer au Langhien et à l'apparition de courants marins. D'une façon générale, la taille des grains des produits d'altération continentaux décroît de la base vers le sommet (André et al., 2011).

3.3 FRACTURATION DU MASSIF

Depuis sa mise en place, la chaîne hercynienne a subi de nombreuses phases tectoniques et d'érosion dont la surrection de la chaîne Pyrénéo-Provençale à l'Oligocène (-34 à -23 Ma). À partir de l'Oligo-Aquitainien, (marquant aussi le début du remplissage sédimentaire du bassin de Bonifacio) débute l'Orogénèse alpine et l'ouverture de la mer Ligure qui sépare la Corse du continent (Gattacceca et al., 2007), suivie par l'ouverture de la mer Tyrrhénienne au Tortonien (-10 Ma). La Figure 9 montre l'orientation des linéaments sur l'ensemble de la région ainsi que les filons mis en place dans la partie granitique

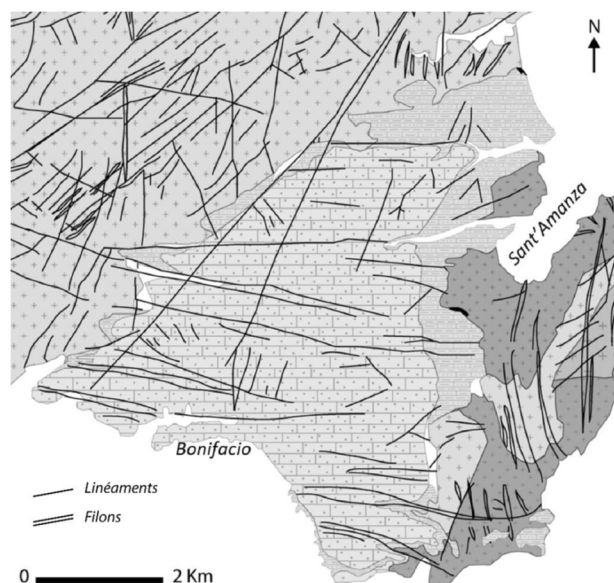


Figure 9 – Fracturation à l'échelle du causse et du massif granitique

Des failles de direction NNE-SSW à N-S qui accompagnent principalement la mise en place de complexes filoniens dans les granites. Cette fracturation est majoritairement due à la rotation antihoraire du bloc corso-sarde entre 20,5 et 15 Ma (Gattacceca et al, 2007).

Des linéaments qui recoupent ce premier type sont présents à la fois dans le plateau carbonaté mais aussi dans les granitoïdes sous-jacents. Ce sont des zones de fractures d'orientation E-W plus jeunes et postérieures aux formations sédimentaires.

Ces discontinuités tectoniques sont importantes car elles peuvent favoriser l'écoulement des eaux souterraines.

3.4 HYDROGEOLOGIE DU CAUSSE

Etant physiquement peu connectée au reste du bassin, il est attendu que la presqu'île de la haute ville soit hydrogéologiquement peu connectée également au causse. Ainsi, elle est susceptible de ne pas bénéficier d'apports en eau latéraux. La nappe régionale présente dans le causse du bassin ne s'étend donc probablement pas jusqu'à ce massif.

Il est néanmoins proposé d'identifier les comportements hydrogéologiques des différentes formations au travers d'une synthèse hydrogéologique réalisée à l'échelle du bassin miocène pour tenter de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la presqu'île.

Une première étude menée par le BRGM en 2002 avait permis d'établir une première caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse, principalement à partir de la synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques existantes.

Plus récemment, une thèse intitulée « Contributions du multi-traçage isotopique et géochimique à la compréhension des aquifères côtiers : mise en place d'un modèle de fonctionnement de l'aquifère de Bonifacio (Corse-du-Sud) » a été publiée (Santoni, 2016a). Ces travaux ont notamment porté sur l'évaluation des temps de résidence et la caractérisation de l'origine des eaux infiltrées (Santoni et al., 2016c). Ils se sont ensuite poursuivis par des travaux sur les processus de recharge des aquifères du bassin (Santoni et al., 2018) et sur la détection et la quantification des exutoires sous-marins.

Une synthèse de ces différents travaux est proposée ci-après afin de faire l'état des connaissances hydrogéologiques sur le bassin dans son ensemble.

3.4.1 Niveaux hydrologiques

Deux aquifères sont distingués dans le bassin de Bonifacio.

L'aquifère inférieur correspond à la formation de Balistra (Figure 7), dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres, et à la partie inférieure de la formation de Cala-di-Labra sus-jacente. Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère, estimées par géophysique (Dorfliger et al., 2002), sont : une teneur en eau inférieure à 2 % et **une perméabilité inférieure à 3.10^{-7} m/s**. La nappe est rendue captive par la présence, au toit de cet horizon aquifère, d'un horizon argileux de 5 à 6 m d'épaisseur. Ce niveau sépare l'horizon aquifère inférieur du supérieur.

L'horizon aquifère supérieur correspond au sommet de la formation de Cala-di-Labra et à la formation de Bonifacio, principalement constituée de calcarénites blanches. Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère, estimées par géophysique, sont moyennes : une porosité efficace d'environ 7% (Dorfliger et al., 2002, Chenaux et al., 2018) et **une perméabilité comprise entre 1.10^{-7} et 3.10^{-5} m/s**.

3.4.2 Karstification

L'ensemble du causse est recouvert d'une végétation caractéristique de type maquis qui ne facilite pas les observations de la morphologie de surface. Néanmoins, un modelé karstique est présent, mais peu développé, en raison de la nature grésocalcaire des dépôts miocènes.

De manière générale, les indices de karstification se trouvent préférentiellement dans la formation de Bonifacio :

- La morphologie du causse est marquée par des vallées sèches d'orientation W-E à E-SE
- W-NW qui correspondent à d'anciens axes de drainage, possiblement en lien avec la fracturation régionale.
- Le long du littoral, la karstification de la formation de Bonifacio est soulignée par la présence de cavités (grottes du Capo Pertusato, de Saint-Antoine, et du Sdragonato) développée le long de plan de fracturation. La grotte la plus importante est celle de Sdragonato à proximité du phare de la Madonetta, signalant l'entrée du port de Bonifacio. Cette grotte est une vaste cavité pénétrable en bateau, elle comprend une salle de quelques 50 m de long se poursuivant par une galerie d'une trentaine de mètres (Gilly E., 2001).

La présence de grottes au niveau littoral (Figure 10) pourrait correspondre à l'amplification de cavités initiées dans la masse des calcarénites et amenées au niveau de la mer par le phénomène de recul de falaise.

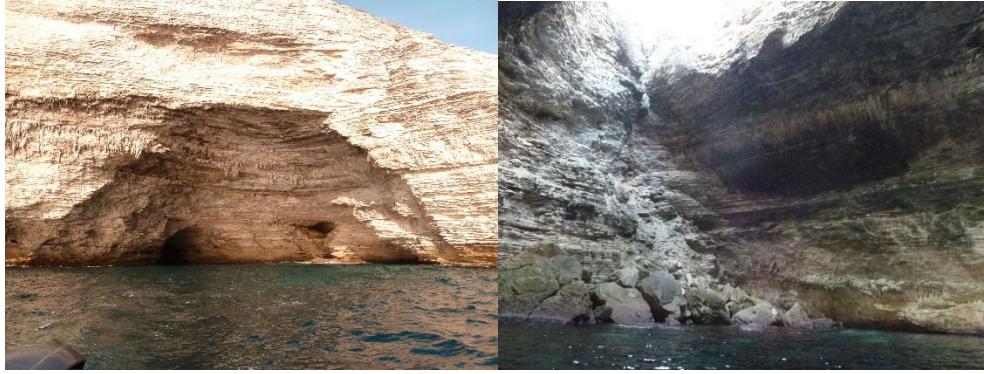


Figure 10 – Grottes Saint-Antoine et Sdragonato à la sortie du port de Bonifacio

Au niveau du causse de Bonifacio, on dénombre moins de 10 sources, 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), toutes hors de la zone d'intérêt de l'étude.

Dans ce contexte géologique et hydrogéologique du causse de Bonifacio, un complément d'étude sur le secteur de la citadelle a été mené pour améliorer la connaissance du massif (caractéristiques géologiques, géotechniques et hydrogéologiques) et les phénomènes d'éboulement en masse qui pourraient s'y produire.

4 Synthèse des connaissances acquises issues des investigations menées

4.1 LITHOLOGIE ET CARACTERISTIQUES GEOMECHANIQUES

La lithologie précise du secteur d'étude a été élaborée à partir de trois forages carottés réalisés dans le cadre de cette étude, dénommés SC1-F3, SC2-F2 et SC3-F1 (Figure 11).

forage	direction	inclinaison/V	longueur	EPSG 2154 Lambert93	
	[°]	[°]	[m]	E[m]	N[m]
F3	-	0	60	1216195,80	6051813,55
F2	N270	30	45	1216196,02	6051813,30
F1	N194	30	40,5	1216194,81	6051814,78

Figure 11 – Tableau de synthèse des forages réalisés

Le forage vertical SC1-F3 a fait l'objet d'une description géologique de l'ensemble des carottes de manière à obtenir un log stratigraphique de référence pour l'étude. Les autres forages inclinés ont permis de valider le log établi et d'apporter des informations supplémentaires sur la variabilité locale du massif (très faible) et sur la fracturation (Figure 12).

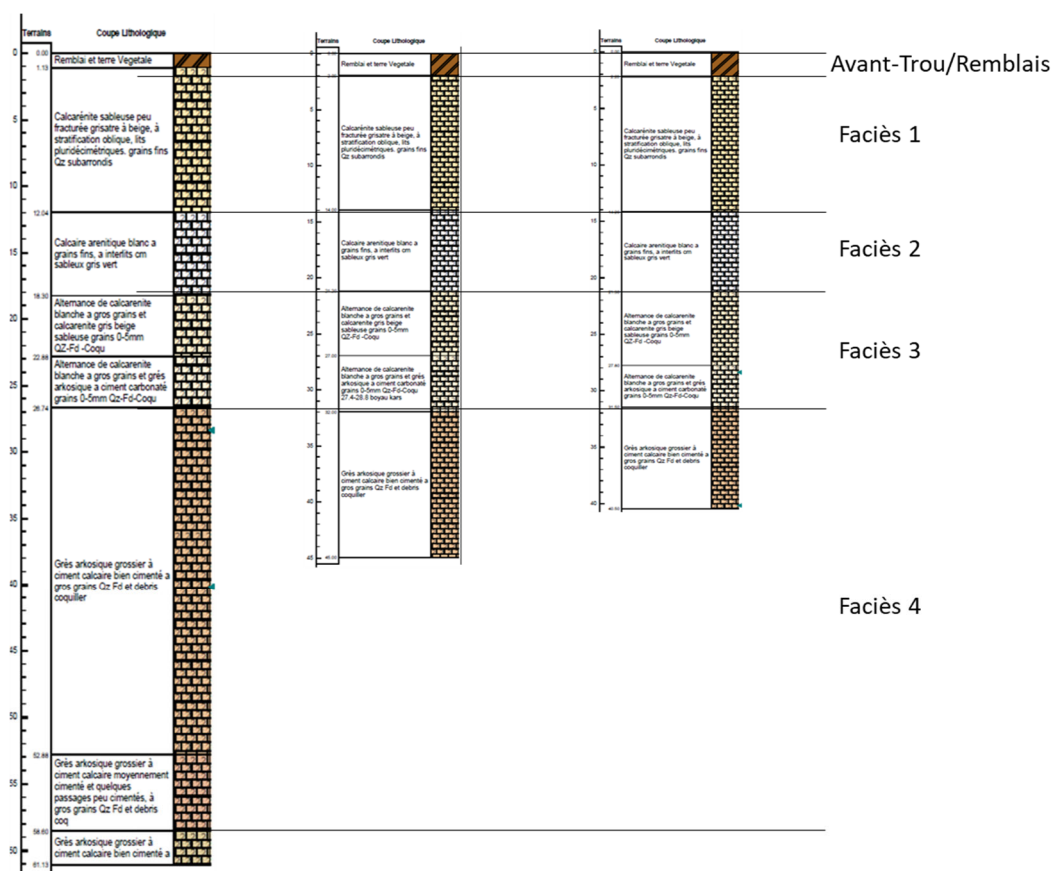


Figure 12 – Identification des faciès sur les logs simplifiés de SC1-F3 vertical (gauche), SC2-F2 incliné (milieu) et SC3-F1 incliné (droite)

Quatre faciès ont été identifiés et leur dénomination convenue entre opérateurs.

- Remblais / Avant tube : 0 - 1,13 à 1,90 m ; l'avant trou a été réalisé dans les remblais anthropique de la place ;
- Faciès 1 : 1,13 à 1,9 -> 12,04 à 12,3 m, Calcarénite sableuse peu fracturée grisâtre à beige. Ce faciès correspond à la formation B3 du membre de Bonifacio ;
- Faciès 2 : 12,04 à 12,3 m -> 18,3 à 18,44 m, Calcaire arénitique blanc à grains fins, et interlits centimétriques sableux gris vert. Ce faciès correspond à la formation B3 du membre de Bonifacio ;
- Faciès 3 : 18,3 à 18,44 m -> 26,74 à 27,7m, alternance de calcarénite blanche peu sableuse, beige plus sableuse, et de grès à ciment carbonaté. Ce faciès correspond à la formation B1 et/ou B2 du membre de Bonifacio ;
- Faciès 4 : 26,74 à 27, 7 m -> 61,13 m, grès grossier à ciment carbonaté, deux faciès carbonatés (noté 4CC36 et 4CC41.3 sur la Figure 13) ont permis de recalibrer en profondeur le forage et les observations en paroi. Ce faciès correspond à la formation P2 du membre de Pertusato.

La Figure 13 reporte l'organisation spatiale de ces différents faciès à l'échelle des falaises de la vieille ville.

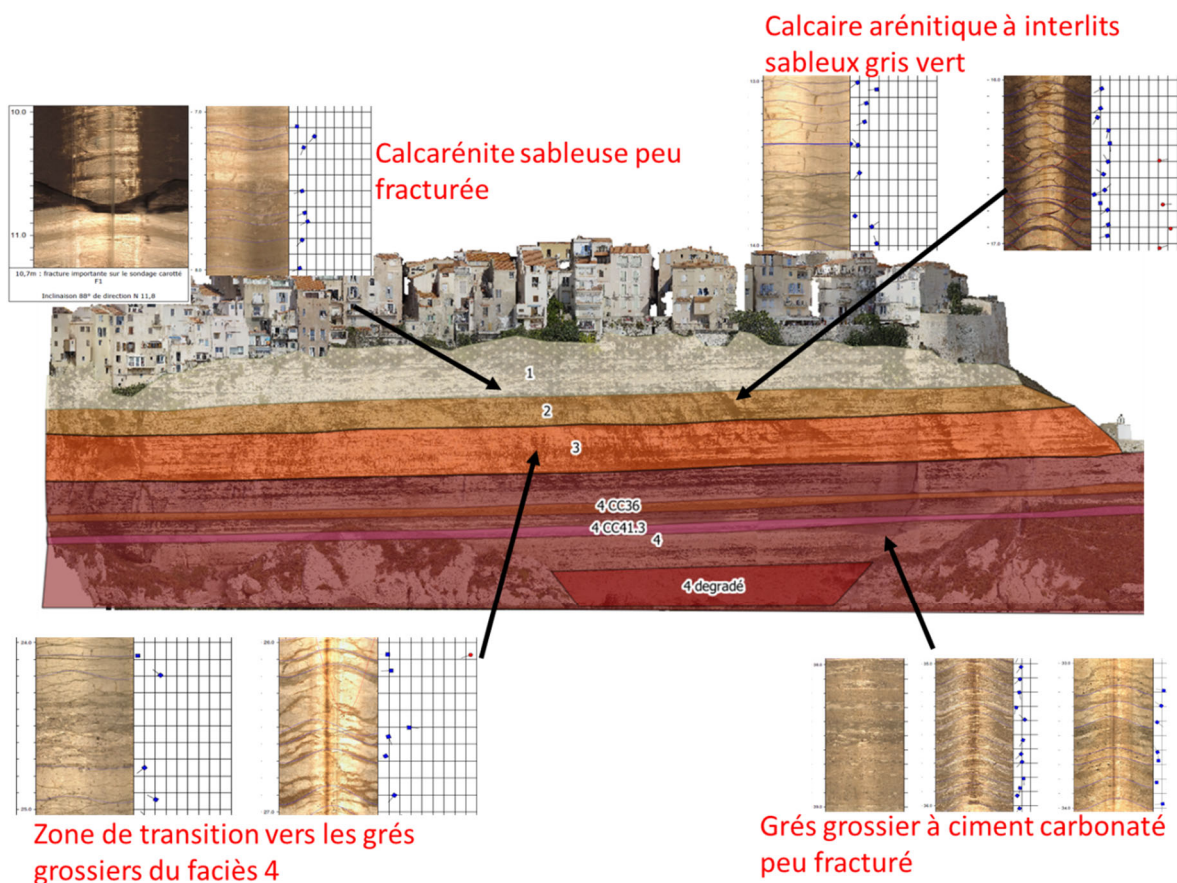


Figure 13 – Illustration des quatre faciès en imagerie de paroi (2 forages inclinés et 1 vertical)

4.2 STRATIFICATION

Le levé en forage de la stratification montre un pendage majoritairement vers le sud-ouest (direction N 235°E), de 12 degrés environ. La stratification est très marquée, les strates étant d'une épaisseur de 2 à 15 cm maximum sur l'ensemble des faciès L1 à L3 notamment. La stratification induit une fréquence de discontinuité (FD)¹ forte (classe FD =4, FD=10) homogène sur les faciès 2 et 3 (Figure 14).

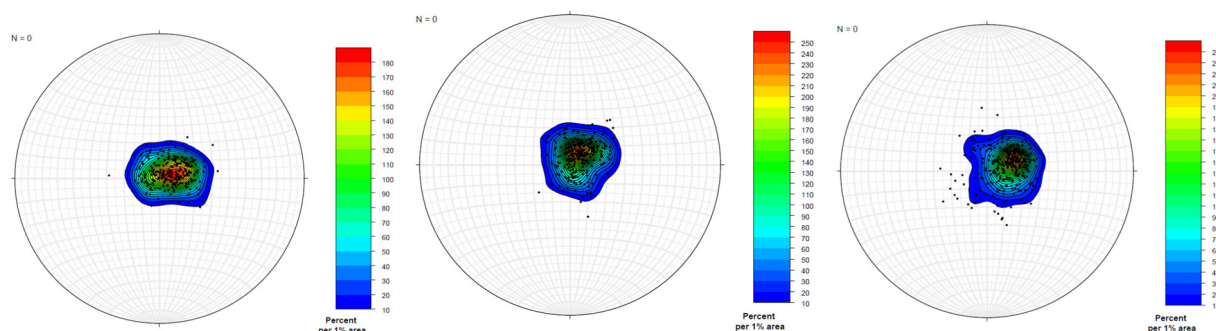


Figure 14 – Représentation stéréoscopique de la stratification (densité de poles sur hémisphère inférieur) sur F1 (263 pointés), F2 (278 pointés) et F3 (337 pointés)

Les représentations stéréoscopiques montrent une forte homogénéité de la stratification, avec une variabilité légèrement plus marquée sur les faciès 2 et 3 avec une stratification entrecroisée.

4.3 FRACTURATION

4.3.1 Fracturation observable en paroi

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.

¹ RQD : Rock Quality Designation, indice de qualité globale du massif rocheux, ID indice d'intervalle entre discontinuités, FD indice de fréquence des discontinuités, ES indice d'espacement des discontinuités de chaque famille, selon les recommandations de l'AFTES « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains », Tunnels et Ouvrages Souterrains N° 177, mai/juin 2003



Figure 15 – Visualisation des grandes fractures N110° (en bleu) sur photographie satellite Pléiades

La famille de fractures dans la direction N110° s'exprime localement très peu mais ces fractures traversent l'ensemble des faciès du membre de Bonifacio (faciès 1 à 3), et sont bien visibles à plus grande échelle (Figure 15). Une de ces fractures N110° recoupe la presqu'île de Bonifacio, elle est observable en paroi et a été recoupée dans le forage F1 (N104°-88°N), où son ouverture est de 5 à 10 cm, issue d'un lessivage important. On ne peut cependant pas la noter au débouché en paroi côté nord de la péninsule à cause de l'urbanisation.



Figure 16 – Visualisation de la fracture N110° identifiée en paroi sur le site d'étude

La falaise de 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 en bleu foncé et N 110°E en vert sur la Figure 17).

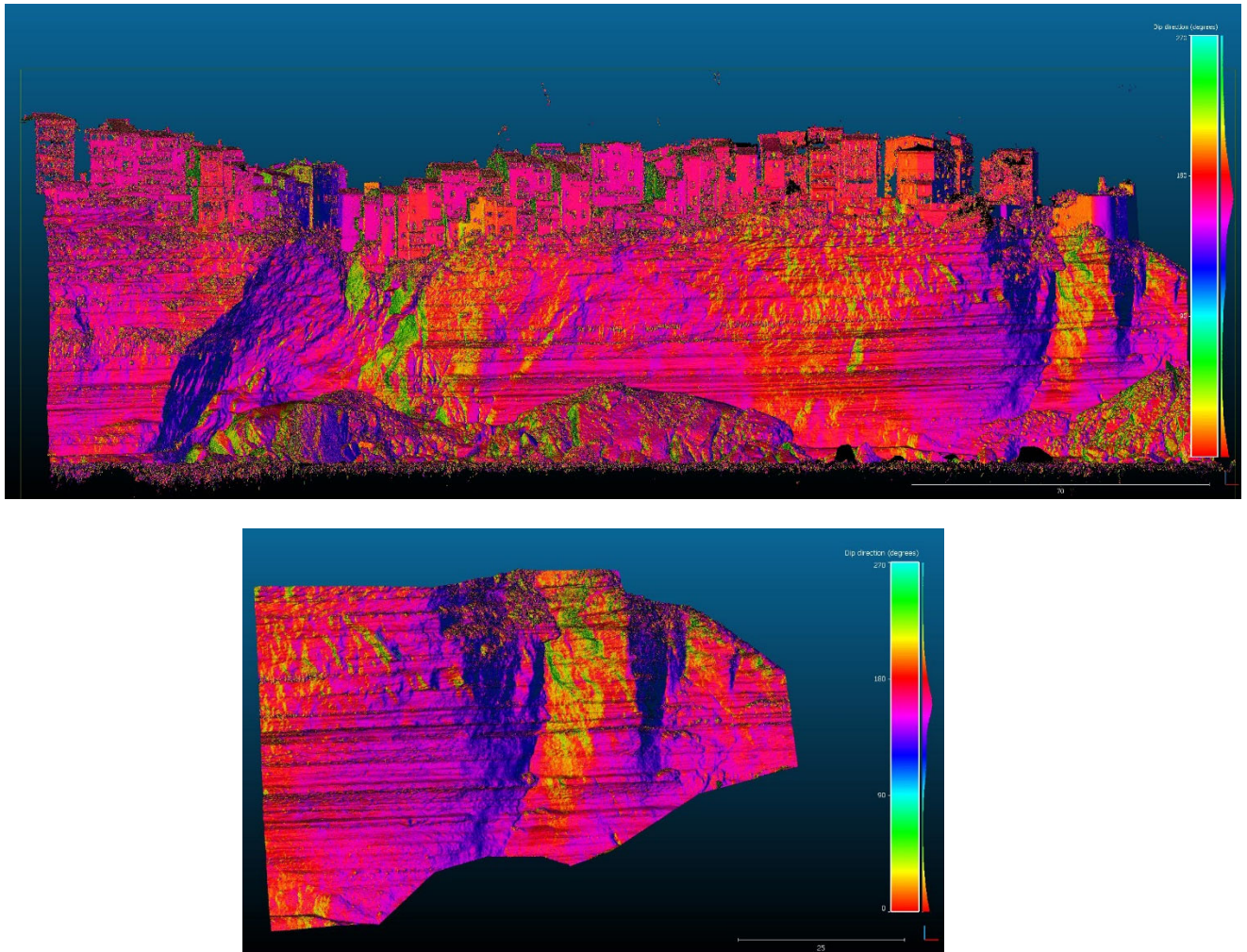


Figure 17 – Analyse des directions de pendage(dip dir) du nuage de point de la falaise (azimuts équivalents : bleu : N20 : vert N110° / rose N70°)

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 21). 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.

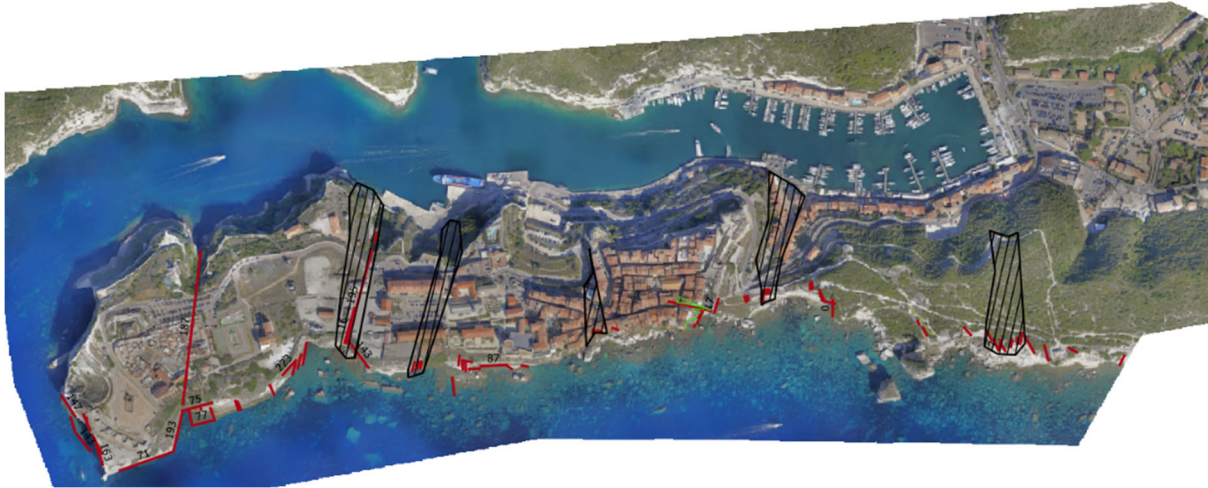


Figure 18 – Levé des deux familles de fractures N0-N20°E et N110°E au niveau de la Citadelle de Bonifacio (faisceaux de fractures en noir et fractures en rouge respectivement) (fond : orthophoto 2018)

A l'échelle plus fine, on note dans les faciès les plus carbonatés une fracturation repérée dans les faciès 2 et 3 principalement. Ces fractures subverticales orientées N0° sont présentes sur un seul banc et sont interrompues par les interlits sableux. Elles découpent ainsi intensément (espacement 2-5 cm) les faciès les plus carbonatés en « touches de piano »



Figure 19 – Fracturation N0° et érosion en touches de piano dans les faciès 1 et 2 et fractures N20°E ouvertes au niveau de la descente de Sutta Rocca

4.3.2 Apport des méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques complémentaires qui ont été déployées (Bloc 2A) 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 cohérence d'ensemble ainsi que différentes zones de vibrations homogènes, interprétées comme des compartiments distincts. L'organisation générale de ces compartiments cadre avec l'organisation structurale du massif rocheux avec des limites s'inscrivant globalement suivant les faisceaux de discontinuités Nord-Sud et Est-Ouest décrits à l'échelle de la presqu'île. En particulier, un bloc en partie en surplomb est observé dans la partie Sud-Est de la Citadelle (secteur 4.2, Figure 20);

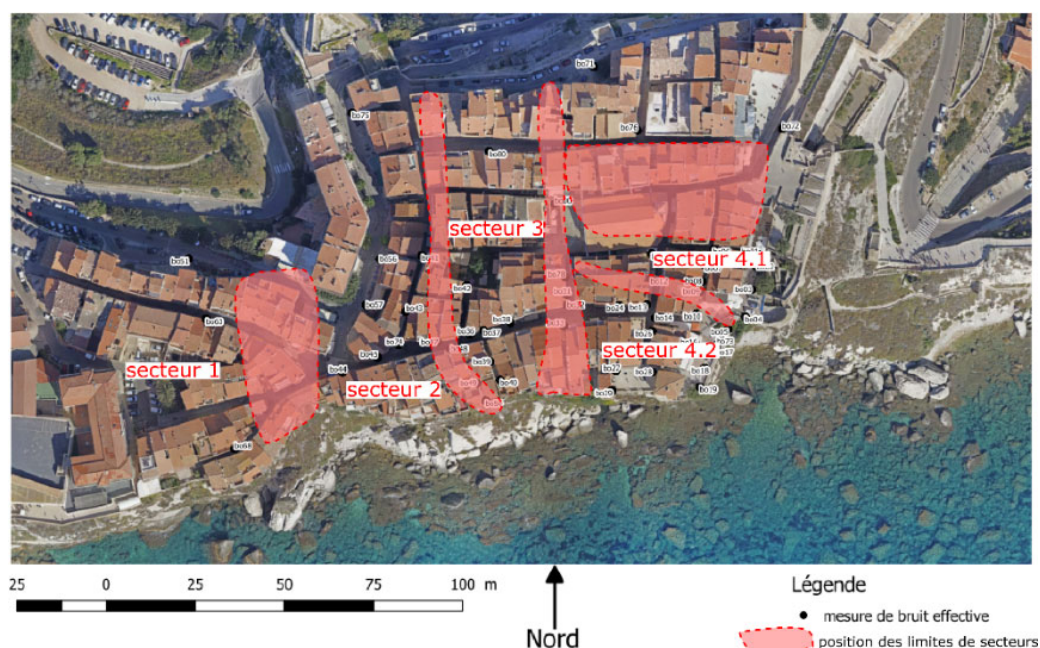


Figure 20 – Interprétation de la répartition géographique des pics en fréquence en quatre blocs distincts, avec une sous-division du secteur 4 (Levy et al. 2020) (fond : orthophoto 2018)

4.3.3 Apport des forages

Outre les leviers de fracturation réalisés en paroi sur le secteur d'étude, les trois forages ont des orientations différentes afin de bien caractériser la fracturation interne du massif. Le forage F1 a pour but de caractériser la fracturation est-ouest, notamment la fracture N 110° visible sur le pilier de la Citadelle, le forage F2 a pour objectif de caractériser la fracturation nord-sud bien visible en paroi sur certains secteurs.

Dans le forage SC1-F3, peu de fractures sont levées sur ce forage, en tout cas difficilement interprétable à l'imagerie optique. Les familles de fractures étant subverticales, elles sont peu recoupées par un forage ayant la même direction. Sur les fractures observées, la direction de pendage est majoritairement de direction est, avec un azimuth de N170°. Le pendage est sub-vertical (80° est).

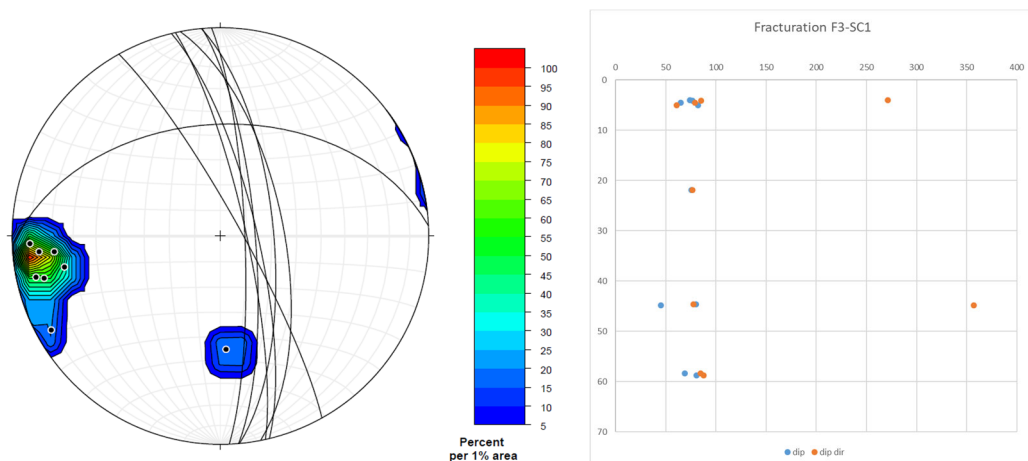


Figure 21 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inférieur) et Dip/DipDir de la fracturation sur F3 en fonction de la profondeur

La caractérisation de la fracturation et de la stratification est interprétée pour chacun des faciès selon les critères d'intégrité de roche (indice RQD : Rock Quality Designation), Intervalle de discontinuité (indice ID), fréquence et espacement des discontinuités (indices FD et ES). Cette analyse montre l'homogénéité du massif, dans l'ensemble peu fracturé mais aussi une stratification importante, notamment dans les faciès 2 et 3. La fracturation est dominée par la famille N175° de pendage subvertical vers l'est nommée F0 et la famille N110° de pendage subvertical vers le nord nommée F1.

Le tableau suivant résume l'analyse de massif réalisée lors de l'imagerie de paroi selon le RQD, et les classes de discontinuité ID, FD et ES:

	F1 (station Rue)	F2 (Station Terrasse)	F3 (vertical)
Fracturation	Nombre pointé :21 F0 = N170° (+/-20°) 80° (+/-10°)E F1 = N104° (+/-5°) 80° (+/-5°)N Fracture importante à 10,7m	Nombre pointé :76 F0 = N170° (+/-20°) 80° (+/-10°)E	Nombre pointé :10 F0 = N170° (+/-20°) 80° (+/-10°)E F1 = N85° (+/-5°) 45° (+/-5°)N
Stratification	Nombre pointé :262 N155° (+/-30°) 8° (+/-10°)SO	Nombre pointé :274 N110° (+/-30°) 7° (+/-10°)SO	Nombre pointé :337 N130° (+/-30°) 7° (+/-10°)SO
RQD [%]	>90	>90	>90
Classe ID	4	4	4
Classe FD	Fracture : 1 Stratification : 4	Fracture : 2 Stratification : 3	Fracture : 1 Stratification : 3
Classe ES	Fracture : 2 Stratification : 4	Fracture : 3 Stratification : 4	Fracture : 1 Stratification : 4

Figure 22 – Tableau de synthèse des diagraphies en forage (veleurs en azimuth, pendage)

Le forage SC3-F1 est dans l'ensemble peu fracturé. Les fractures sont sub-verticales. Les fractures sont orientées globalement Nord (Azimut N 160° et N 340°). La fracturation nord-sud

est bien présente sur les faciès 2 et 3, on dénombre un cumul de 2,15 m de discontinuités pour les 15,5 m de carotte.

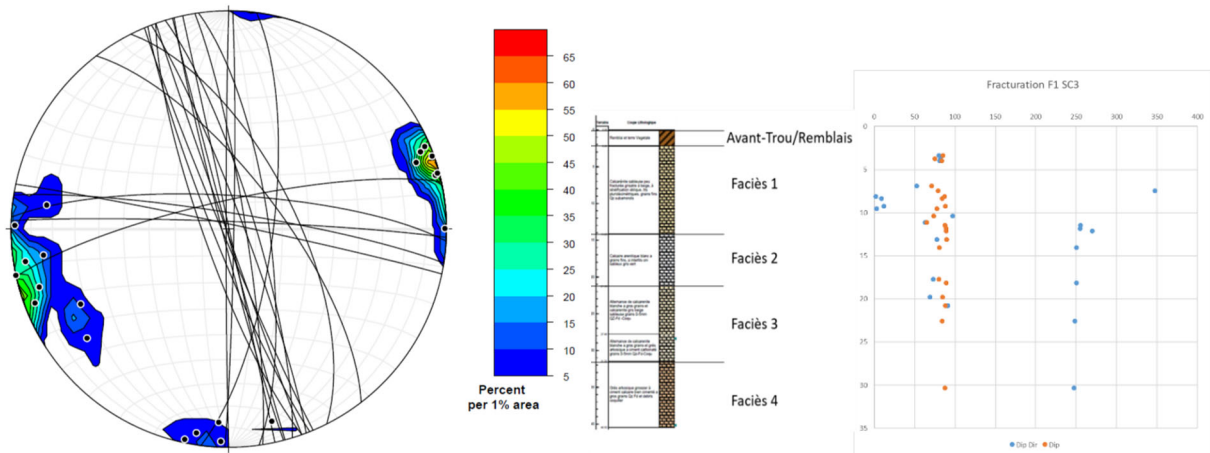


Figure 23 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inférieur) et Dip/DipDir (pendage et direction de pendage) de la fracturation sur F1 en fonction de la profondeur

Une fracture principale interceptée à 10,70 m correspondant vraisemblablement à celle repérée en falaise est bien ouverte (10 à 15 cm), montrant un azimuth local N104°. Effectivement des dépôts noirs sont présents sur la paroi du forage de la surface jusqu'à cette discontinuité mais pas au-delà montrant des pertes au niveau de la fracture. Si on observe trois fractures de la même orientation mais fermées dans le mètre au-dessus, cette famille ne s'exprime pas ailleurs. Elles présentent un pendage de 88° vers le nord.

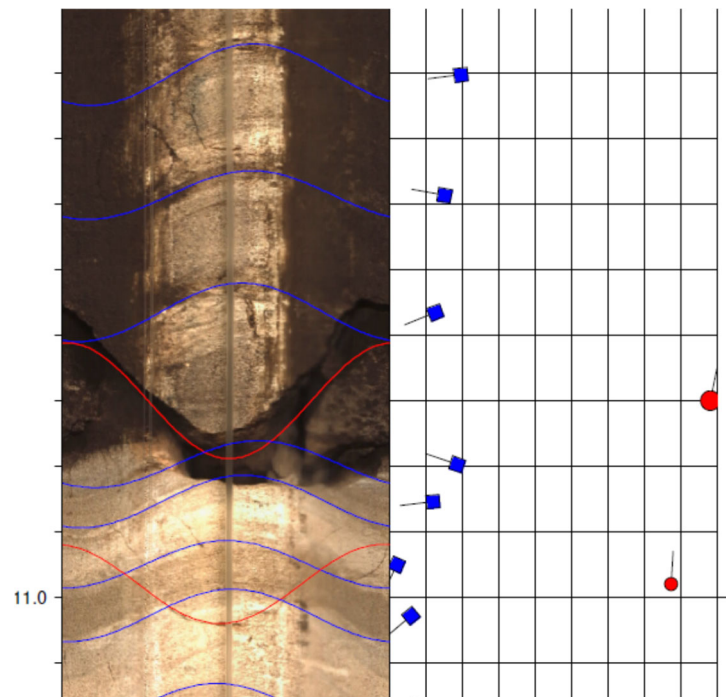


Figure 24 – Imagerie de la fracture majeure dans le forage F1

Dans le forage SC2- F2 les fractures sont quant à elles sub-verticales de direction de pendage principalement est, d'un azimuth N175° (à pendage vers l'Est 80°). Une zone plus altérée est visible vers 27,70 m présentant un remplissage karstique. A noter également l'apparition d'un dépôt couleur ocre au niveau de la fracture située à 13,4 m ainsi que au niveau de la zone altérée à 28,50 m (fracture bien ouverte, écoulement d'eau possible). Globalement les fractures repérées dans les faciès 2 et 3 sont présentes sur un seul banc et sont interrompues par les interlits sableux comme visible en paroi (Figure 19). Le cumul de la fracturation pour ces faciès est de 4,80 m pour 15,5 m de carotte. Les fractures visibles sur les carottes sont fermées et présentent un remplissage partiel de calcite.

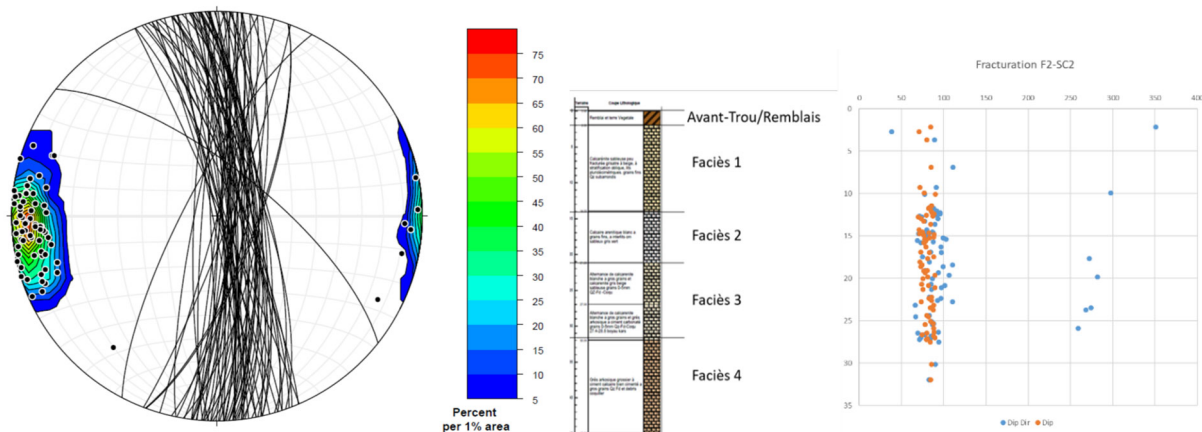


Figure 25 – Représentation stéréoscopique (densité de poles et plans sur hémisphère inférieur) et pendage / direction de pendage de la fracturation sur F2 en fonction de la profondeur

4.4 HYDROGEOLOGIE

Les éléments ci-dessous sont extraits du rapport du bloc 2B.

La compilation des différentes observations de terrain et mesures réalisées permet de décrire le fonctionnement hydrogéologique du massif de la presqu'île de Bonifacio.

4.4.1 La fonction d'entrée du système : l'eau infiltrée

Compte-tenu de la présence quasi généralisée d'un revêtement, l'eau infiltrée au droit de la haute ville correspond principalement à des apports indirects par les fuites des réseaux d'eaux. Le volume potentiel des fuites n'a pas pu être calculé de par le manque de mesures précises, mais d'importants travaux d'étanchéification et de séparation des réseaux ont depuis été menés.

L'infiltration de l'eau de pluie n'est pas à exclure, mais elle apparaît mineure du fait de l'urbanisation de la haute ville.

4.4.2 La porosité et la perméabilité du massif : où et comment circule l'eau

Après s'être infiltrée (fuite des réseaux en tout genre (général, AEP, eau pluviale, eaux usées, citernes), infiltration via les espaces verts et zones non imperméabilisées de la haute ville), l'eau circule majoritairement au contact des fractures affectant le massif et des petits conduits karstiques agrandis par la dissolution des carbonates. Les écoulements sont concentrés dans les niveaux de calcarénites correspondant aux faciès les plus carbonatés 1, 2 et 3. Ils correspondent aux trente-cinq premiers mètres de la falaise par rapport au sol de la haute ville. Ces écoulements

sont guidés par la fracturation mais également par la stratification qui les intercepte et les oriente vers la falaise (exutoire générant les suintements visibles).

Un essai d'infiltration a été mené dans le forage vertical. La perméabilité des faciès carbonatés constituant la partie supérieure du massif est de l'ordre de 10^{-5} m/s tandis que celle des faciès gréseux inférieurs est d'environ 10^{-7} m/s, correspondant à une gamme de valeurs qualifiées de moyennes à faibles. On notera que ces perméabilités sont mesurées dans le forage vertical, qui n'a pas rencontré de cavité karstique ou fracturation majeure

Le massif de la presqu'île ne renferme pas de nappe à proprement parler, hormis la lentille d'eau douce repérée dans le puit St Barthélémy.

4.4.3 La fonction de sortie du système : les exutoires

Les exutoires du massif sous la haute ville correspondent principalement aux niveaux carbonatés des faciès 1, 2 et 3, matérialisés par les suintements observés. Le dernier niveau carbonaté en surplomb (noté 4CC36) situé à 36 m de profondeur par rapport au sol de la haute ville semble constituer le collecteur de la majorité des eaux infiltrées au droit de la haute ville qui ne serait pas collectée par la fracturation subverticale (N20° ou N110°). Ceci est dû à la présence de fractures N/S dans ces bancs et une plus grande perméabilité horizontale par rapport aux autres faciès.

Il se produit des circulations d'eau souterraine jusque dans le faciès gréseux inférieur, mais elles sont très limitées et ne concernent que les secteurs affectés par une fracturation verticale intense. Il s'agit de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni et la zone située à proximité du puits Saint Barthélémy.

En résumé, la mise en charge du massif, majoritairement localisée dans les faciès carbonatés supérieurs, est très limitée du fait de la forte imperméabilisation de surface limitant l'infiltration des précipitations et d'une perméabilité non négligeable dans les faciès carbonatés, guidée par la fracturation et la stratification favorisant un fonctionnement « d'évacuation / lessivage » plutôt que de mise en charge. Les circulations d'eau dans le massif, même réduites, constituent cependant un facteur aggravant à la stabilité du massif (lessivage des fractures ouvertes existantes, fragilisation progressive des ponts rocheux qui subsistent, mise en charge des fractures fermées, développement progressif de conduits karstiques dans les faciès carbonatés et par conséquent fragilisation progressive du massif).

4.5 FORCAGE MARIN

Les éléments ci-dessous sont extraits du rapport du bloc 2C.

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 qu'au niveau de la Citadelle.

L'étude de caractérisation des régimes de houle a permis de définir que la direction de la houle ouest – sud-ouest est dominante et a permis de déterminer les paramètres H_s^2 et T_p^3 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.

Le tableau ci-dessous (Figure 26) indique des conditions assez homogènes au large des vagues (H_s , période et incidence) et des niveaux d'eau à cette profondeur. La modélisation des vagues selon des profils (Figure 27) implique une incidence nulle entre ceux-ci et la direction de propagation des vagues. Ce n'est pas le cas ici car l'incidence des vagues (provenant de $\sim N45^\circ$) est plus ou moins oblique en fonction du profil considéré. Il faut donc appliquer une correction tenant compte de la réfraction et du gonflement (shoaling) des vagues pour ramener cette incidence à des valeurs proches de zéro. Cela a pour conséquence de diminuer les H_s en entrée des profils (cf. Figure 26).

Nom Profil	Hs au large (m)	Hs corrigé (m)	Tp(s)	NM-large(m/IGN)	Pente falaise (deg)
Profil_E_2	7.05	6.89	13	0.82	61
Profil_E_1	7.13	4.52	13	0.82	67
Profil_central	7.2	6.31	13	0.82	74
Profil_O_1	7.2	5.66	13	0.82	63
Profil_O_2	7.1	5.49	13	0.82	26.5
Profil_O_3	7.77	7.69	13	0.82	88

Figure 26 – Conditions des forçages et pentes des falaises pour les différents profils.

Les profils étudiés sont présentés sur la Figure 27. D'est en ouest on retrouve les profils suivants :

- Profil_E_2 : avec une plate-forme régulière et le pied de la falaise à fleur d'eau zone de l'éboulement de décembre 2019 ;
- Profil_E_1 : avec une plate-forme d'accumulation plus haute (~ 0 m/IGN) caractérisée par la présence d'un bloc de plusieurs mètres de hauteur et que se prolonge jusqu'au pied de falaise au niveau de la zone d'étude ;
- Profil_central : cette-fois ci la plate-forme d'accumulation est plus large. On retrouve on bordure de celle-ci un bloc dépassant à peine les 0 m/IGN ainsi qu'éboulis relativement de faible taille en pied de falaise ;
- Profil_O_1 : il se caractérise du précédent profil par la présence d'un éboulis très massif en pied de falaise ;
- Profil_O_2 : là encore il y a la présence de d'un éboulis en pied de falaise au niveau du rentrant de la falaise, rue Scamaroni. Cette-fois ci sa forme est plus irrégulière ;
- Profil_O_3 : il se distingue de tous les autres par la présence d'une plate-forme vers ~ 15 m/IGN de profondeur si bien que le pied de falaise se situe vers 10-11 m/IGN de profondeur à proximité de la grotte St Antoine.

² H_s (m): hauteur significative est une quantité statistique utilisée pour caractériser l'état de la mer. Elle représente la moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues.

³ T_p (s): T_p (s) : Période pic des vagues, correspondant à la durée en secondes entre deux crêtes de vagues dominantes c'est-à-dire pour laquelle la densité spectrale est maximale.

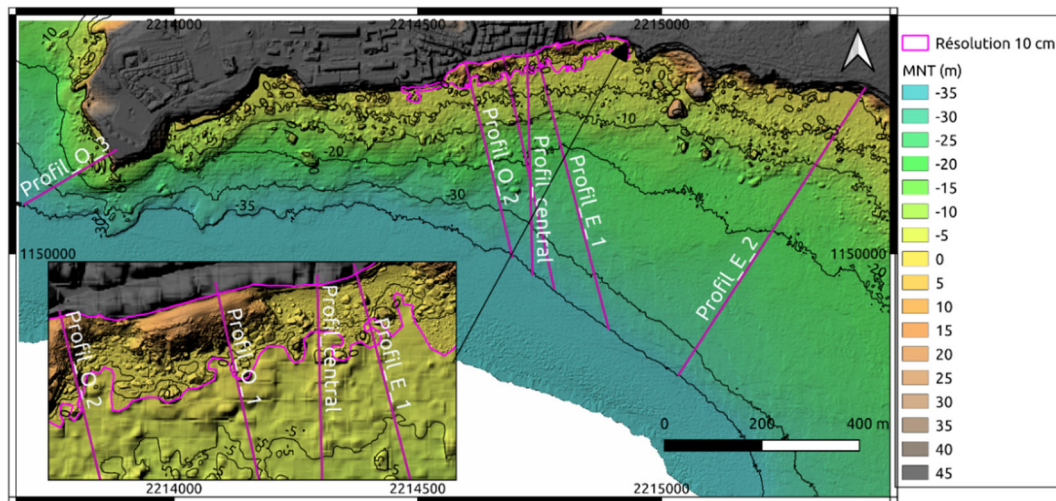


Figure 27 – MNT de 0,10 m de résolution généré à partir de la fusion du Litto3D et du lever drone (emprise signalée par le polygone pourpre. Les traits rouges correspondent aux profils de calcul. Coordonnées CC42 (m) et altitude exprimée en m par rapport à l'IGN.

Une partie des informations issues de la modélisation a été synthétisée par profil et sont présentées ci-dessous. On peut remarquer que :

- La distribution des pressions sur la verticale est complexe avec des valeurs maximales (dépassant souvent 1 MPa) à proximité du niveau moyen d'eau mais également sur des portions de la falaise plus hautes caractérisées par des ruptures de pente importantes ;
- C'est dans le Profil_O_3 que l'on retrouve les pressions les plus importantes, les maximales dépassant régulièrement 4 MPa. Les niveaux maximaux d'eau (runup) peuvent ici dépasser les 20 m/IGN; ce qui a pu être confirmé lors de la tempête Adrien
- Comme on pouvait le penser les pressions du Profil_E_1 sont anormalement faibles (limite de la modélisation selon des profils) ;
- Sur les profils caractérisés par la présence d'éboulis massifs (Profil_O_1 et Profil_O_2), la totalité de l'énergie des vagues est dissipée par ceux-ci. La falaise s'en trouve ainsi protégée ;
- Sur le Profil_central, l'éboulis de moindre taille ne suffit pas à absorber toute l'énergie des vagues. Des impacts sont possibles sur le point de contact entre l'éboulis et la falaise générant des pressions très importantes ;
- Sur le Profil_E_2, les vagues sont bien dissipées au niveau de la plate-forme si bien que la distribution des pressions maximales comme moyennes est plus ou moins homogène sur la falaise.

Les résultats obtenus sont très encourageants car ils fournissent des informations jusqu'alors inconnues telles que la distribution verticale de la pression, le nombre d'impacts des vagues et leur durée en fonction de la hauteur de la falaise, etc...

Les résultats des simulations montrent également que les vagues sollicitent de manière importante le pied des falaises de Bonifacio. Pour les tempêtes extrêmes (période de retour centennale), elles pourraient exercer des pressions maximales de plusieurs MPa lors des impacts et cela jusqu'à plusieurs mètres de hauteur par rapport au pied de falaise. Si la relation entre érosion et pression des vagues est encore à définir, les ordres de grandeurs de pression se rapprochent fortement des ordres de grandeur de résistance de la roche et du ciment carbonaté liant les grains.

D'un autre côté le modèle employé n'a pu être validé que qualitativement, faute de données sur site. D'autre part, on a pu mettre en évidence les limites des modélisations sur des profils sur des environnements aussi hétérogènes spatialement que ceux rencontrés à Bonifacio (présence de nombreux blocs sur la plate-forme, éboulis en pied de falaise, ...).

C'est pourquoi il serait souhaitable pour poursuivre l'amélioration de la connaissance dans les études à venir :

- d'implanter dans la zone des capteurs afin de valider quantitativement la modélisation : un capteur de pression en bordure de plate-forme pour valider la propagation des vagues ; une webcam tournée vers la falaise afin de valider l'action des vagues sur ce secteur ; 1 capteur de pression à proximité du pied de falaise mesurant les pressions maximales générées par l'impact des vagues ;
- d'utiliser un modèle 2DH (équivalent 3D) sur le secteur afin de tenir compte des variations morphologiques de cet environnement. Cela passe par l'utilisation d'un modèle à maillage non-structuré (raffinement du maillage uniquement où c'est nécessaire comme à proximité des falaises) et offrant des capacités HPC (Hautes Performance de Calcul). C'est ce que proposera le code UHAINA (Filippini et al. 2018) auquel le BRGM participe activement à son développement depuis 2019 ;
- d'explorer l'impact de vagues moins fortes : annuelles et saisonnières par exemple via le modèle 2DH ;
- d'explorer l'influence du « transport solide » des vagues, liés aux « stock » de sable ou galets en pied de falaise susceptibles d'avoir un effet érosif intense lorsqu'ils sont projetés sur la falaise ;
- de faire un suivi plus fin par lidar terrestre d'une portion de falaise du faciès 4 pour un suivi à court et moyen terme de l'érosion, en lien avec le suivi des tempêtes annuelles.

4.6 OBSERVATION DE LA FALAISE ET EVOLUTION SUR LA PERIODE D'ETUDE

4.6.1 Synthèse de l'apport des techniques déployées

Les investigations menées dans le cadre du bloc « observation » sont résumées dans le tableau suivant.

Technique	Opérateur	Objectifs	Période(s) d'investigation	Champ d'investigation
Photogrammétrie et Lidar aéroportés	BRGM	Modèle géométrique 3D maillé texturé de l'ensemble des falaises et de la citadelle de Bonifacio	Décembre 2018	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	Septembre 2018, décembre 2018, mai 2019	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	Janvier 2019, mars 2019	Citadelle, falaise en surplomb et forages inclinés

Ecoute microsismique passive	BRGM	Apprécier la compartimentation du massif rocheux au sein de la Citadelle	Janvier 2019	Citadelle, falaise en surplomb
Interférométrie radar	BRGM	Mise en évidence d'éventuels mouvements lents, mesures vibrométriques complémentaires à l'écoute microsismique passive.	Janvier 2019	Citadelle, falaise en surplomb
Observation multi-paramètres	Ineris	Observation sur une période de 11 à 16 mois (selon les capteurs) du comportement des fractures et de la falaise en surplomb. Détection d'éventuels mouvements significatifs en relation avec une instabilité potentielle	A partir de février 2019	Citadelle, falaise en surplomb

Figure 28 : Investigations menées dans le cadre du bloc « Observation ».

La **photogrammétrie et le Lidar aéroportés** ont permis de bâtir un Système d'Information Géographique (SIG) orthoréférencé, en trois dimensions, incluant les analyses et investigations entreprises, avant ou durant la présente étude (lithologie, plans de fracturation, sondages, instrumentations, ...). La haute résolution photographique a permis d'établir une coupe géologique très fine de la falaise, notamment au niveau de la zone de surplomb étudiée.

Ce SIG a constitué la base pour établir le modèle géologique de la falaise, puis les modèles géomécaniques. Ce système évolutif pourra être mis à jour en fonction des acquis futurs, et il pourra en être extrait des volumes et profils permettant de réaliser des analyses ou modèles complémentaires.

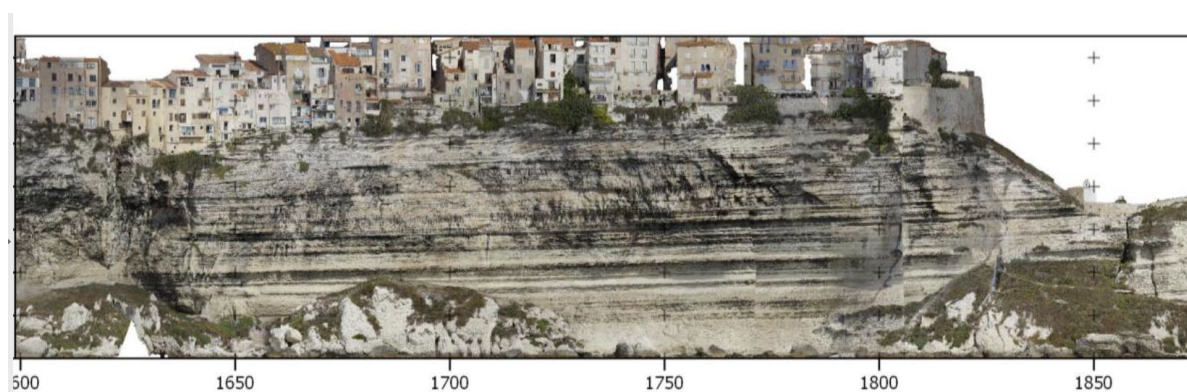


Figure 29 : Orthophotographie haute résolution de la falaise au niveau de la zone d'étude.

Le **scanner laser 3D** s'inscrit dans l'analyse de l'évolutivité de la falaise sud dans le secteur du surplomb, cœur de l'étude, mais également de la Citadelle, jusqu'aux environs du Torrión et de l'escalier du Roi d'Aragon. Cette évolutivité est à comparer à un état 0 établi entre le 24 et le 27 septembre 2018. Deux états, 1, en septembre 2018, et 2, en mai 2019, ont été opérés dans le cadre de l'étude, sans qu'aucune évolution significative liée à des mouvements pluricentimétriques de la falaise n'ait été constatée ([7] à [9]). L'emploi de deux appareils longue et courte portées, pour des raisons d'opérationnalité, permet de détecter des mouvements

supérieurs à 2 cm environ dans le secteur de la Citadelle, précision tout à fait acceptable pour évaluer l'évolution à la fois en grand et localement de la falaise, en termes d'activité de mouvement de terrain (chutes de pierres isolées par exemple).

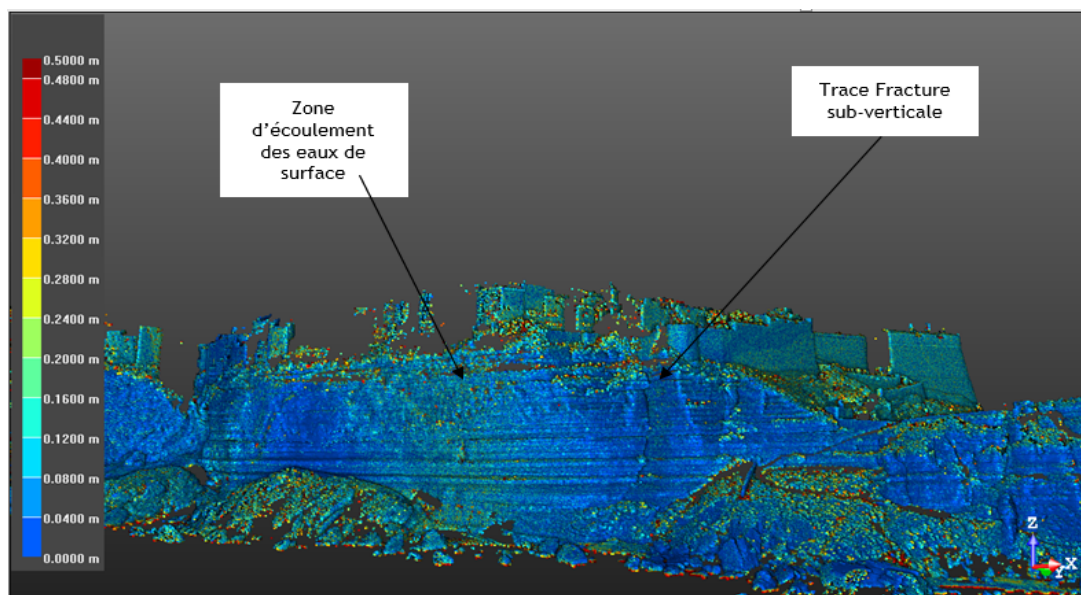


Figure 30 : Comparaison des nuages de points LiDAR entre l'état 0 (première campagne de septembre 2018) et l'état 1 (deuxième campagne de décembre 2018).

Le but du **radar géologique** était de détecter la fracturation de proximité sous la surface et en arrière de la paroi de falaise, et d'en établir la géométrie. La prospection de surface a permis de préciser la localisation de la partie sommitale d'une fracture aux abords de la Place du marché, pouvant être interprétée comme la fracture N110°E observable en falaise et dans le forage F1. Sa trace « géophysique » se perd toutefois en amont vers le massif. Au niveau de la falaise, les profils de paroi ont révélé une pénétration horizontale limitée des ondes électromagnétiques dans le massif, évaluée à 4 mètres. Il n'a donc pas été permis d'investiguer plus loin dans le massif, mais il n'existe aucune anomalie marquante sur cette épaisseur de falaise.

L'**écoute microsismique passive** s'est avérée être une technique intéressante. L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a permis d'identifier la fréquence de résonance de la Citadelle ainsi que différentes zones de résonance homogènes qui ont été interprétées comme des blocs distincts. Notamment, un bloc est observé dans la partie sud-est de la Citadelle qui comporte le surplomb. Ces résultats montrent globalement que la roche à Bonifacio est très compétente au moins en surface, et que les amplitudes et les largeurs de pics en fréquence obtenus pour le bloc de la partie sud-est de la Citadelle indiquent que ce bloc n'est pas totalement indépendant du reste du massif.

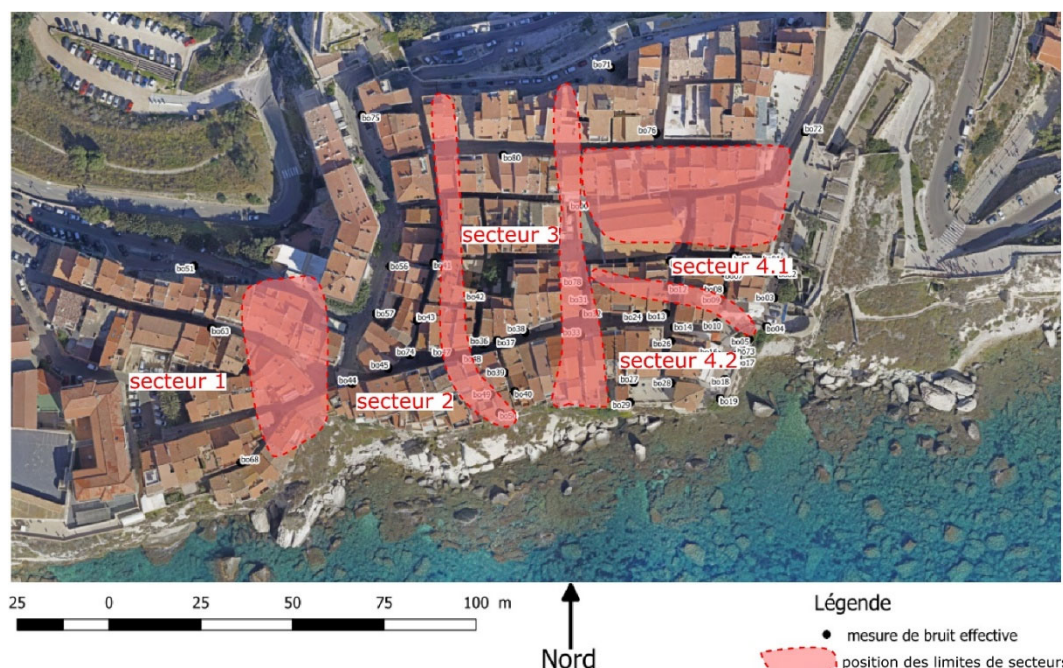


Figure 31 : Ecoute micro-sismique passive. Interprétation de la répartition géographique des pics en faveur d'une subdivision de la Citadelle en 4 secteurs (fond : orthophoto 2018)

L'**interférométrie radar** a été déployée à titre exploratoire, en employant trois méthodes, au sol et satellitaire. Ces investigations ont permis de confirmer la stabilité (en termes de mouvements potentiels supérieurs au centimètre) du secteur de la Place du Marché sur la période 2015-2018 à partir de données satellitaires issues des levés Sentinel 1. Elle a par ailleurs permis de confronter certaines fréquences propres, sur la falaise et la Place du Marché, avec les informations obtenues par l'écoute micro-sismique passive, conduisant à une certaine cohérence.

Le **dispositif d'observation multi-paramètres** est composé de 2 extensomètres en forages, 2 fissuromètres au droit de la fracture N°110E, de 3 clinomètres biaxiaux et de 2 balises GPS de mesure [10]. Il a été déployé pour acquérir des données de base sur une période de 18 à 24 mois en vue de détecter d'éventuels mouvements liés à l'évolution de la falaise, corrigés des effets saisonniers.

A ce stade, les mesures d'extensométrie en forage, les mesures de clinométrie et les données GPS ne présentent pas de variation significative en lien avec un mouvement de la falaise. Les mesures restent peu ou prou dans la limite de précision des capteurs. Il en est de même pour les fissuromètres en paroi, même si des évolutions brutales, mais de faibles amplitudes et limitées dans le temps ont été observées dans la deuxième quinzaine de mars 2020. La comparaison avec les données météorologiques (pluviométrie, tempêtes) de cette période a été faite, mais ne montre pas de lien probant.

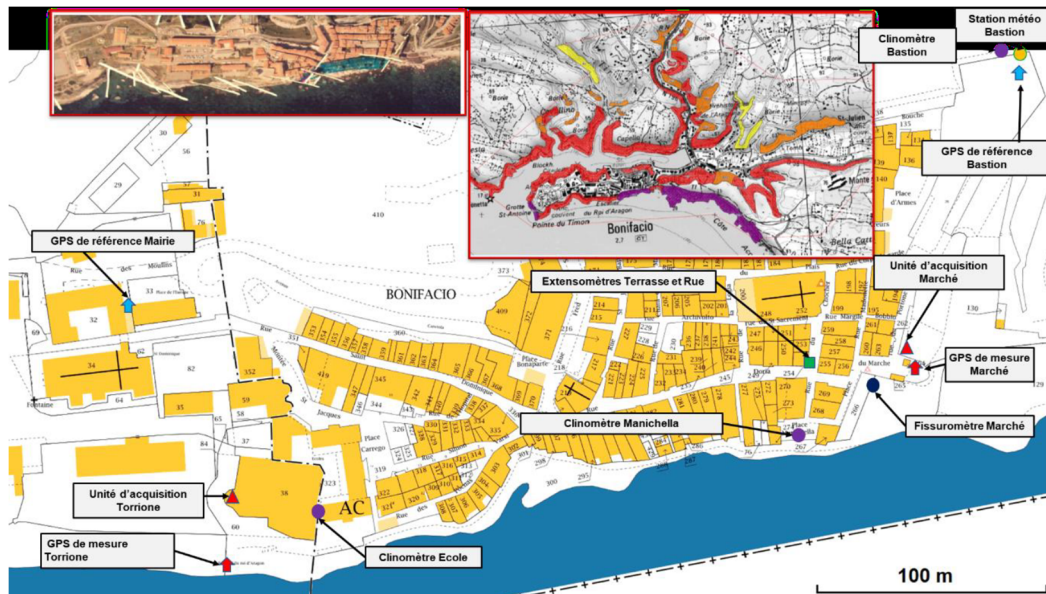


Figure 32 - Implantation des équipements du réseau d'observation multi-paramètres (fond : cadastre.gouv.fr)

4.6.2 Contribution à l'évaluation de l'aléa

En termes de comportement, notamment au regard de la fracturation du massif, les couches calcaires et gréseuses constitutives de la Citadelle semblent se comporter selon différents blocs délimités par les réseaux de fractures verticales. L'écoute microsismique a permis d'identifier la fréquence de résonance de la Citadelle ainsi que différentes zones de résonance homogènes, qui ont été interprétées comme des blocs distincts., dans un massif est très compétent, au moins en surface.

En termes d'évolutivité, aucune des investigations et observations n'a permis d'identifier une activité marquée de la masse rocheuse en surplomb en termes de mouvements, tant au niveau d'un mouvement vertical de subsidence, de mouvements d'écartement des fissures identifiées en forage ou en paroi, que de basculement de la zone en surplomb.

4.6.3 Opérabilité et contribution des techniques à la poursuite de l'observation

En termes de techniques d'observation, le scan laser 3D terrestre et le Lidar aéroporté sont des outils fiables et complémentaires pour détecter de manière récurrente, par comparaison des scans avec les états initial et précédent, une activité voire un recul de falaise lié à d'éventuels chutes de blocs, éboulements, ou mouvements d'amplitude centimétrique. La fréquence d'investigation serait à définir en fonction du niveau d'aléa retenu in fine dans la zone de surplomb et le périmètre pourrait étendu à d'autres zones de falaise de la Citadelle qui montreraient des signes d'évolution plus marqués. Il est notamment recommandé de se focaliser sur une zone localisée en pied de falaise, soumise à l'érosion marine, sous ou à proximité de la zone de surplomb, pour mieux apprécier sa vitesse de recul.

L'observation multi-paramètres est opérationnelle, les mesures sont enregistrées et transmises en quasi temps réel sur un site dédié administré par l'Ineris, qualifiées et validées périodiquement, et mises à disposition sur une page dédiée de la plateforme de web-monitoring de l'Ineris : e.cenaris (<https://cenaris.ineris.fr/>) ouverte à tous les participants à l'étude.

A ce stade les mesures ne montrent pas d'évolution particulière, et font l'objet d'une mise en base pour de l'analyse de signal, en vue de discerner et quantifier des effets saisonniers et facteurs de correction. Par ailleurs, si la période d'observation est suffisante pour fiabiliser techniquement le dispositif et la qualité des données, elle doit être enrichie pour l'analyse statistique de chroniques. L'objectif est aussi que le dispositif bénéficie à terme de seuils de vigilance, de type déplacement ou inclinaison, qui pourraient signifier un mouvement non réversible de la falaise dans la zone de surplomb. La mise à disposition de chroniques de données robustes plus longues, leur analyse croisée avec les scénarios identifiés, et des modélisations géomécaniques complémentaires pourraient contribuer à la mise en place de valeurs seuils et de critères de vigilance automatique multi-paramètres aussi fiables que possible.

Des techniques complémentaires, telles que l'écoute microsismique passive pourraient être réutilisées en complément, si les autres techniques montrent des évolutions marquées de la falaise, pour voir si le massif – et la zone de surplomb - se comportent différemment par comparaison avec l'état zéro réalisé.

4.7 COMPOREMENT ET MODELISATION GEOMECHANICS

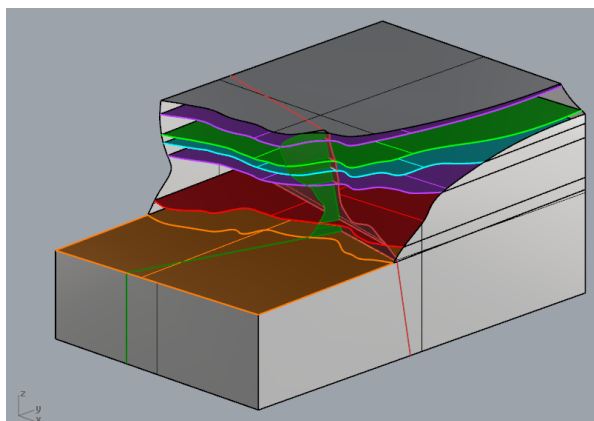
Ce chapitre vise à rendre compte des travaux réalisés dans le bloc 3B « Modèle géomécanique » de l'étude.

La modélisation vise à estimer le champ de contraintes dans la falaise compte tenu de la géométrie 3D de l'objet étudié, des caractéristiques géomécaniques choisies pour les matrices rocheuses et les fractures aussi bien à l'état actuel, par creusement du massif, que son évolution future par l'évolution de certains paramètres. En fonction de la géométrie du modèle (importance du sous-cavage, présence et localisation des fractures) et des caractéristiques géomécaniques choisies (notamment pour les résistances des unités géologiques), le modèle fait apparaître des réajustements plus ou moins importants (bascullements vers le vide ; mouvements relatifs de part et d'autre des fractures) et des zones en rupture (en compression ou en traction) plus ou moins étendues.

4.7.1 Géométrie et paramètres géomécaniques

Le modèle 3D est construit avec le logiciel Rhino (<https://www.itascacg.com/software/rhino>) dont le module Griddle (<https://www.itascacg.com/software/griddle>) permet de générer, à partir des données précédentes, la géométrie et le maillage du modèle géomécanique 3DEC (<https://www.itascacg.com/software/3dec>) que l'on a choisi d'utiliser pour les calculs 3D.

a) avec N20_min



b) avec N20_max

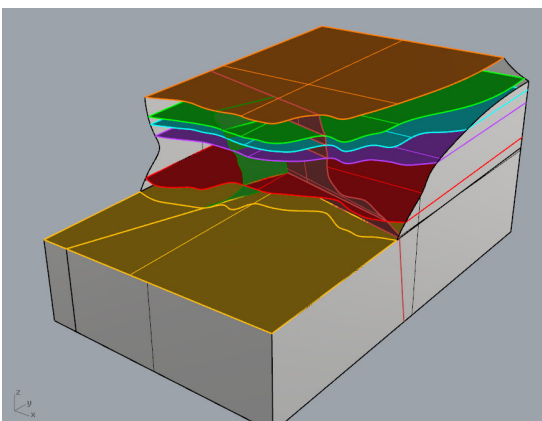


Figure 33 – Visualisation des joints de stratification, de la fractures N110, ainsi que les deux positions extrêmes de la N20 (zone de la Citadelle) sur le modèle 3DEC.

La lithologie utilisée pour le modèle est la suivante :

Unité	Lithologie simplifiée validée	Profondeur (distance à la tête de puits F3)	Cote (m, NGF)
L1	Calcarénite sableuse grise à beige	0 – 12 m	47,4 m – 59,4 m
L2	Calcaire arénitique blanc	12 m – 18,3 m	41,1 m – 47,4 m
L3	Alternance de calcarénite blanche et de grès à ciment carbonaté	18,3 m – 26,9 m	32,5 m – 41,1 m
L4	Grès grossier à ciment carbonaté	26,9 m – 51,2 m	8,2 m – 32,5 m
L4_deg	Grès grossier à ciment carbonaté, faciès altéré/fragmenté	51,2 m – 58,6 m	0,8 m – 8,2 m
L5 (= L4)	Grès grossier à ciment carbonaté	58,6 m – 61,1 m	-1,7 m – 0,8 m

Figure 34 – Lithologie utilisée sur le modèle 3DEC.

On dispose des résultats des essais de laboratoire réalisés sur des échantillons provenant du sondage vertical F3 par le CEREMA. Le programme expérimental comprenait notamment la réalisation d'essais de compression simple et de traction indirecte. Les essais triaxiaux prévus initialement n'ont pu être réalisés. L'ensemble des caractéristiques géomécaniques de matrices, de fractures, de joints ainsi que les conditions aux limites du modèle sont détaillées dans le rapport du Bloc 3B. Les principales caractéristiques élastoplastiques sont rappelées dans le tableau ci-dessous pour les 5 unités définies dans la Figure 34.

	Rc (MPa)				E (GPa)				Rt (MPa)			
	m	σ	m- σ	retenu	m	σ	m- σ	retenu	m	σ	m- σ	Retenu
L1	20,9	4,1	16,8	16,8	18,6	4	14,6	14,6	2,2	0,6	1,6	1,6
L2	27,6	2,2	25,4	25,4	26,3	9,2	17,1	17,1	3,8	0,3	3,5	3,5
L3	27,8	9,2	18,6	18,6	33,6	2,6	31	31	2,8	1,2	1,6	1,6
L4	31,3	11	20,3	20,3	34,4	9,5	24,9	24,9	2,4	1,1	1,3	1,3
L4deg	15,3	12,7	2,6	5	14,1			10				0,1

Figure 35 – Paramètres géomécaniques de base utilisés pour le modèle 3DEC.

Les trois objectifs des calculs ont été :

- d'évaluer le facteur de sécurité. La démarche a consisté à réduire progressivement les caractéristiques de référence jusqu'à l'instabilité ;
- d'évaluer l'impact de la localisation et de l'extension de la fracture N20. On suppose que la géométrie de référence 3D pour la zone de la Citadelle considère la présence de la fracture N110, qui est observée et instrumentée, et d'une fracture N20. Cette fracture N20 n'a été observée qu'en front de falaise à proximité du parapet de la Place du Marché, et l'analyse de sa trace semble montrer qu'elle découpe uniquement les unités L2 et L3 ;
- d'évaluer l'impact de l'extension du sous cavage. Cet impact n'a été étudié qu'en 2D pour l'instant. On a choisi d'appliquer la méthodologie suivante : on part du profil 2D actuel de la falaise et on augmente progressivement le sous-cavage par tranche de 1 m et cela jusqu'à 5 m, à moins que la rupture complète du front de falaise ne survienne préalablement.

4.7.2 Résultats pour la zone de la Citadelle sans prise en compte de la fracture N20 :

- Limite des modèles 2D : dans les modèles 2D prenant en compte la fracture N110, on note des résultats différents selon le plan de coupe considéré : facteur de sécurité supérieur à 5/3 (= 1,6) ou inférieur à 1. Ces différences sont liées à la variation de la distance entre la trace de cette fracture dans le plan de coupe et le front de falaise. On constate, par ailleurs, des écarts entre les résultats des modèles 2D et 3D lorsque l'on prend en compte la fracture N110. Ils s'expliquent par le fait qu'en 3D la N110 ne débouche que sur une seule surface libre (le front de falaise) alors qu'en 2D, la trace de la fracture découpe complètement le modèle, ce qui le rend plus instable. Il apparaît donc que les modèles 2D ne peuvent être utilisés pour quantifier le facteur de sécurité en présence de la fracture N110 ;
- Impact de la fracture N110 dans les modèles 3D : les résultats montrent que des ruptures (en traction) apparaissent dans tous les cas dans l'unité L4deg à proximité du front de falaise jusqu'à une profondeur de 3 m environ. Lorsqu'on introduit la fracture N110, des ruptures complémentaires apparaissent dans l'unité L4 à proximité de la fracture (après une réduction par 5 des caractéristiques uniquement). Le facteur de sécurité reste supérieur à 10/3 (= 3,3) que l'on prenne en compte la fracture N110 ou pas (l'analyse des ruptures et des déplacements calculés montre logiquement toutefois qu'elle est un peu plus faible avec la fracture N110) ;
- Evaluation de l'impact de l'extension du sous cavage en 2D en prenant en compte la N110 : compte tenu des remarques précédentes, cette évaluation ne sera que qualitative. On constate à nouveau que selon le choix du plan de coupe, l'impact est très important (le modèle devient instable si on augmente le sous cavage de 1 m) ou assez faible (facteur de sécurité supérieur à 5/3 jusqu'à 3 m d'extension, puis facteur de sécurité supérieur à 1 pour 4 et 5 m d'extension). Des compléments sont nécessaires pour étudier l'impact de

l'extension du sous-cavage en 3D, la présence des fractures (N110 et N20) ne permettant pas de restituer correctement cet impact en 2D.

4.7.3 Résultats pour la zone de la Citadelle avec la fracture N20 - impact de l'extension verticale :

- Si l'on considère que la fracture N20 découpe toutes les formations, le modèle est géométriquement instable si la fracture a une position minimale (N20_min) ou intermédiaire (N20_int) car, dans ce cas, le centre de gravité du bloc découpé par les fractures N110 et N20 se positionne au-delà de la ligne du plus grand sous-cavage. Les modèles 3D confirment ces résultats puisque la variante N20_min est instable avec les caractéristiques géomécaniques de référence et la variante N20_int le devient dès que l'on réduit les caractéristiques par 2. Cela confirme que cette hypothèse n'est pas réaliste ;
- Dans l'hypothèse d'une fracture N20 dans la position maximale (N20_max), on montre que le modèle apparaît géométriquement stable. Cela explique que, dans ce cas, les modèles 3D montrent que l'instabilité n'est obtenue que pour une réduction des propriétés de référence par 10 (ou par 5 si on suppose une réduction des caractéristiques de L4deg, partie dégradée de l'unité L4, par 2) et cela quelle que soit l'extension de la fracture N20. Dans ce cas, le facteur de sécurité est donc supérieur à 5/3 (= 1,67) ;
- Si on considère une extension de la fracture N20 limitée aux unités géologiques L2 et L3, Il apparaît que la fracture N20 ne joue qu'un faible rôle dans le développement de l'instabilité. Les modèles restent stables pour une réduction des propriétés par 5 (que l'on réduise ou non par 2 les caractéristiques de L4deg) d'où un facteur de sécurité supérieur à 5/3 (= 1,67). Les modèles sont toutefois légèrement plus instables qu'avec la N110 seule (qui restaient stables pour une réduction des propriétés par 10) ;
- Si on considère une extension de la fracture N20 à travers les unités L1, L2 et L3, l'instabilité des modèles est augmentée puisque dans le cas où la fracture N20 est localisée dans la position minimale (N20_min) ou intermédiaire (N20_int), l'instabilité apparaît déjà pour une réduction des propriétés par 5.

4.7.4 Résultats pour la zone de la Citadelle avec la fracture N20 - impact de la localisation :

Les conclusions en regard de la localisation de la fracture N20 sont les suivantes (Figure 36):

- Cas N20_min ("Ecaille") ou N20_int ("Marché") : le bloc découpé par les fractures N110 et N20 pourrait devenir géométriquement instable dans le cas d'une extension de la fracture N20 au-delà de l'unité L3 (qui n'est pas attestée aujourd'hui). Le facteur de sécurité est faible (compris entre 1 et 5/3) si on suppose une extension de la fracture N20 jusqu'à la surface à travers l'unité L1. L'analyse détaillée montre logiquement que le bloc découpé est un peu plus instable lorsque la fracture N20 est localisée près du parapet. Le facteur de sécurité devient plus élevé (supérieur à 5/3) si l'extension de la fracture N20 est limitée aux unités L2 et L3 (ce qui semble être le cas aujourd'hui) ;
- Cas N20_max ("Manichella") : le bloc découpé par les fractures N110 et N20 est géométriquement stable quelle que soit l'extension considérée pour la fracture N20. Le facteur de sécurité est élevé (supérieur à 5/3) dans tous les cas ;
- On rappellera que la fracture N20 n'a été observée en paroi de falaise que pour la seule position minimale N20_min « Ecaille ». Pour les scénarios N20_int « Marché » et N20_max « Manichella », la présence de la fracture est possible mais non avérée.

Citadelle - avec N110 ouverte et variantes N20			
Modalité	N20_L1+L2	N20_L1+L2+L3	N20_L1 à L5
N20_min	Stable $F_s > 5/3$	Stable $F_s > 1$	Instable $F_s < 1$
N20_int	Stable $F_s > 5/3$	Stable $F_s > 1$	Stable $F_s \approx 1$
N20_max	Stable $F_s > 5/3$	Stable $F_s > 5/3$	Stable $F_s > 5/3$

Figure 36 – Tableau de synthèse des résultats de modélisation en termes de stabilité de falaise.

4.7.5 Proposition de mécanisme et synthèse sur la stabilité

Le mécanisme de rupture pressenti ne s'éloigne pas du schéma conceptuel établi par le Cerema en 2017, reproduit à la Figure 5. Il s'agit d'une rupture par simple basculement (dans les cas où le centre de gravité se trouve en dehors du polygone de sustentation) de la colonne de roche en surplomb, et/ou de son glissement par rupture (en cisaillement, en poinçonnement) de la couche de base très altérée L4deg.

Les caractéristiques des matrices rocheuses des couches supérieures L1 à L3 étant globalement bonnes, le mouvement suppose que la mobilisation du volume rocheux n'intervienne que si les fractures la délimitant sont ouvertes voire de très faibles résistances mécaniques. L'hypothèse forte prise dans le cas présent, corroborée par l'observation d'une fracture ouverte N110 au forage F1, est que ces discontinuités ne concourent pas, ou de manière très limitée, à la résistance du volume rocheux potentiellement mobilisable.

Dans le cas du scénario « Ecaille » (ou N20_min), la délimitation du volume rocheux est guidée essentiellement par la présence d'une fracture N20 observée en paroi qui, si elle est ouverte, peut engendrer une mobilisation selon le développement de la fracture sur tout ou partie de la colonne rocheuse. Ainsi, selon ce dernier paramètre, on obtient des coefficients de sécurité traduisant l'instabilité, l'équilibre limite ou la stabilité de la masse rocheuse.

Les deux autres scenarios, visant à une mobilisation d'un volume plus important, supposent la présence combinée de deux familles de fractures, à savoir la N110 – observée en paroi, reconnue en forage et positionnable avec une très faible incertitude – et la N20 – connue et observée localement mais non interceptée par les forages. La fracture N110, s'enfonçant dans le massif à cet endroit de la péninsule, ne peut contribuer seule à l'instabilité.

Ici encore des hypothèses ont été prises quant à la position de la N20, la première positionnant la fracture en limite ouest de la place et délimitant ainsi un volume rocheux en surplomb total (scénario « Marché » ou N20_int), la deuxième en la faisant traverser la place Manichella et délimitant un volume en surplomb partiel (scénario « Manichella » ou N20_max).

Dans le cas du scénario « Marché », il est montré par les modèles que le bloc découpé par les fractures N110 et N20 pourrait devenir géométriquement instable dans le cas d'une extension de la fracture N20 dans le massif au-delà de l'unité L3, ce qui n'est pas attesté aujourd'hui.

En revanche le bloc découpé par les fractures N110 et N20 dans le scénario « Manichella » est géométriquement stable quelle que soit l'extension considérée pour la fracture N20, avec un facteur de sécurité élevé.

Les conclusions du volet hydrogéologique indiquent que la mise en charge du massif est attendue comme étant très limitée, du fait de la forte imperméabilisation de surface limitant l'infiltration, d'une part (outre une arrivée accidentelle d'eau), et d'une perméabilité liée aux discontinuités (stratification, fractures) favorisant un fonctionnement « d'évacuation / lessivage » plutôt que de mise

en charge, d'autre part. C'est pourquoi ce facteur n'est pas considéré comme étant prégnant dans la mobilisation des masses rocheuses. Les circulations d'eau sur le long terme n'en constituent pas moins un facteur de fragilisation du massif, du fait notamment du lessivage des fractures ouvertes existantes, et de l'altération progressive des ponts rocheux qui y subsistent.

Il va de soi que la progression du sous-cavage dans le temps induira une augmentation du déséquilibre géométrique de la zone en surplomb, l'altération plus profonde de la couche L4deg par l'action de la mer et des paramètres climatiques, la rupture progressive en traction et la perte de résistance des fractures par des prémices de mouvement de la colonne rocheuse.

Des premières modélisations de l'impact de l'extension du sous-cavage, ont été initiées en deux dimensions dans le cadre de cette étude. Sans fracture arrière, tel le cas du surplomb de Sutta-Rocca proche de la Citadelle, il apparaît que jusqu'à 5 m d'extension du sous-cavage l'impact est considéré comme faible. Avec des fractures de délimitation comme sur la Citadelle, les résultats 2D ne sont plus fiables compte tenu des écarts constatés selon le choix du plan de coupe. Une approche 3D complémentaire sera nécessaire pour étudier l'impact de l'extension du sous-cavage sous la Citadelle, pour les scénarios retenus.

L'évolution temporelle du sous-cavage est donc un facteur clé pour juger de la temporalité d'évolution de l'aléa.

5 Scénarios de rupture, évaluation de l'aléa et proposition de mesures de gestion du risque

5.1 PRINCIPAUX PARAMETRES A RETENIR

A partir de l'ensemble des investigations et calculs menés dans le cadre du programme, nous pouvons établir les éléments suivants permettant l'évaluation de l'aléa :

- la lithologie de la falaise comporte quatre faciès dont les paramètres géomécaniques sont issus d'une campagne d'essais en laboratoire;
- le comportement mécanique du faciès 4 (grès grossier a ciment carbonaté), notamment de son horizon dégradé L4deg observable en pied de falaise, a été considéré comme prépondérant dans le mode de rupture (traction en tête et basculement du pilier ou cisaillement et poinçonnement du faciès 4) comme cela a pu être mis en évidence sur les modèle géomécanique et observé sur les éboulements des abattoirs (2014) et du Campo Romanell (2019);
- deux familles de fracturation guident les phénomènes d'éboulement en masse potentiels (Figure 37):
 - une fracturation arrière N110° est observable en paroi de falaise délimitant la zone de surplomb, au sein des faciès 1 à 3, et a été recoupée en forage F1, mais elle est non visible en surface. Des hypothèses conservatives sur son extension et son état d'ouverture ont été prises ;
 - une fracturation conjuguée N20° n'est pas identifiée en paroi sauf au niveau du parapet, et n'a pas été recoupée par les forages réalisés. Toutefois, au vu de sa fréquence locale, il n'a pas été exclu qu'elle puisse exister au sein de la zone de surplomb. Trois hypothèses de position de fracture N20°E ont été utilisées pour bâtir un modèle de stabilité géométrique des blocs, considérant une rupture au niveau du rentrant maximal de la falaise ;
- les conclusions hydrogéologiques indiquent que la mise en charge de la fracture N110°, et des potentielles fractures N20°E dans les trois premiers faciès est très peu probable ;
- le recul du pied de falaise, notamment au sein de la couche dégradée L4deg, est inéluctable à moyen et long termes, mais la vitesse d'érosion, bien que non évaluée à ce jour, si l'on considère la faible évolution du trait de côte sous la Citadelle durant la période historique, semble limitée. Il reste à améliorer la connaissance sur l'effet mécanique et érosif d'épisodes climatiques intenses (tempêtes) sur un possible recul brutal de la falaise et sur la stabilité du surplomb dans ce secteur.

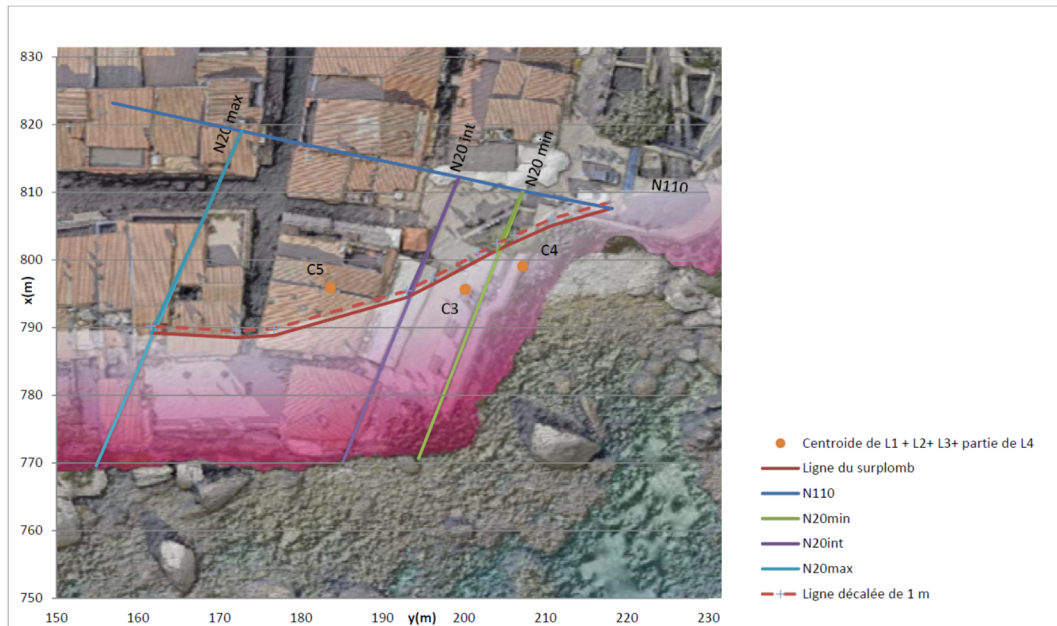


Figure 37 – Visualisation des blocs pris en compte dans les scenarios de rupture, selon 3 positions de fractures N20° et équilibre géométrique de chaque bloc (fond : orthophoto 2018)

5.2 INCERTITUDES RESIDUELLES

5.2.1 Géométrie de la falaise

Les mesures LIDAR effectuées permettent d'avoir un état zéro daté et fiable de la topographie et permettront de suivre l'évolution du site dans les années à venir. Une revoyure topographique de l'ensemble du site pourrait être programmée sur une période à définir (5 - 10 ans). Les deux évolutions attendues sont :

- l'érosion du pied de falaise : c'est le paramètre critique, puisque c'est bien l'érosion différentielle entre pied et tête de falaise qui génère l'aléa d'éboulement massif et brutal. 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 acquisition LIDAR sur une portion du faciès 4 devrait permettre d'estimer l'érosion sur une période pluri-annuelle. Cette solution est envisagée dans le protocole de suivi proposé et de gestion du risque.
- des chutes de blocs d'ampleur variable, même si elles n'entrent pas dans le programme de cette étude, peuvent constituer les étapes séquentielles du recul généralisé de la paroi.

Le paramètre de vitesse d'érosion de la falaise (aussi bien actuel que futur) n'a pas pu être quantifié, tout comme la temporalité fine (année, décennie) des phénomènes envisagés.

5.2.2 Géologie et hydrogéologie

La nature et la géométrie des différents faciès est reconnue de manière fiable. Il en va de même pour l'hydrogéologie du site qui est suffisamment caractérisée pour les besoins de la présente étude. On pourra regretter une évaluation des pertes d'eaux anthropiques anciennes, qui n'a pas été possible à cause du manque d'indicateurs disponibles (compteurs) avant la rénovation.

La fracturation a fait l'objet d'hypothèses qui ont été testées dans les modèles définissant les différents scénarios. En effet, 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 des contraintes techniques incontournables (encombrement de la machine de forage, 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°.

5.2.3 Caractérisation géomécanique des terrains et fractures

Les essais mécaniques ont permis de caractériser les différents faciès, mais de manière hétérogène. En effet, la couche de base, de plus faibles caractéristiques, n'a pas pu faire l'objet de suffisamment d'essais, notamment dans sa partie la plus altérée du fait de l'impossibilité de réaliser des éprouvettes. 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 paramètres retenus sont basés sur un nombre parfois restreint d'essais, notamment pour le faciès 4 altéré.

Aucune mesure n'a pu être réalisée sur les fractures, de fait elles ont été considérées actives avec des caractéristiques géomécaniques faibles. Ainsi, les incertitudes sur le comportement actuel comme sur le comportement à long terme des fractures nous a mené à prendre des hypothèses volontairement conservatrices.

5.2.4 Modélisation

La modélisation a été réalisée à la fois sur la base d'éléments certains et d'hypothèses prises en fonction de la connaissance du site, des matériaux et de la fracturation. Ces hypothèses reposent sur l'expertise des opérateurs. On notera que les opérateurs du groupement ont eu à plusieurs reprises des échanges avec le comité d'experts nommé par la DGPR sur ce volet. L'étude paramétrique réalisée lors de la modélisation permet de compenser les incertitudes exprimées ci-avant, notamment celles visant le choix des caractéristiques géomécaniques.

5.2.5 Conclusion sur les incertitudes

Les résultats de la modélisation alimentée par des données issues de l'analyse naturaliste et des mesures géotechniques, permettent de répondre à la commande d'estimation de l'aléa au sens voulu dans le cadre d'un PPR. Les incertitudes n'ont pas la portée suffisante pour remettre en cause les conclusions qui répondent à la demande de la préfecture.

L'incertitude résiduelle principale concerne la temporalité du phénomène qui n'est pas accessible avec les données entrantes actuelles, ni avec les méthodes de modélisation actuelles de ce type de phénomène.

L'incertitude résiduelle concernant l'évolution de la falaise et de son pied, pourra être suivie par la réalisation de campagnes de mesures LIDAR en référence au point zéro que constitue l'étude actuelle.

5.3 EVALUATION DE D'ALEA

5.3.1 Méthodologie

Afin d'évaluer l'aléa « effondrement en grande masse » sur le secteur, c'est-à-dire d'évaluer la possibilité de survenance du phénomène sur le périmètre d'étude, nous avons basé notre

évaluation sur différentes hypothèses de configurations géométriques énoncées dans le modèle géotechnique et sur les calculs géomécaniques, Quatre scenarios de rupture sont considérés :

- Scénario 1 : « Ecaille » : mobilisation minimale d'un volume rocheux découpé selon la fracturation N110 et N20 selon le cas N20_min ;
- Scénario 2 : « Marché » : mobilisation d'un volume rocheux intermédiaire découpé selon la fracturation N110 et N20 selon le cas N20_int ;
- Scénario 3 : « Manichella » : mobilisation d'un volume rocheux maximale découpé selon la fracturation N110 et N20 selon le cas N20_max ;
- Scénario 4 : « Surplombs » : D'autres discontinuités dans le massif ont été levées en partie haute de la falaise (faciès 1 et 2 principalement) sans que leur état d'ouverture, leur prolongement ou leur combinaison ne laisse penser à un éboulement en masse. Leur évolutivité pourrait amener à un recul du haut de falaise.

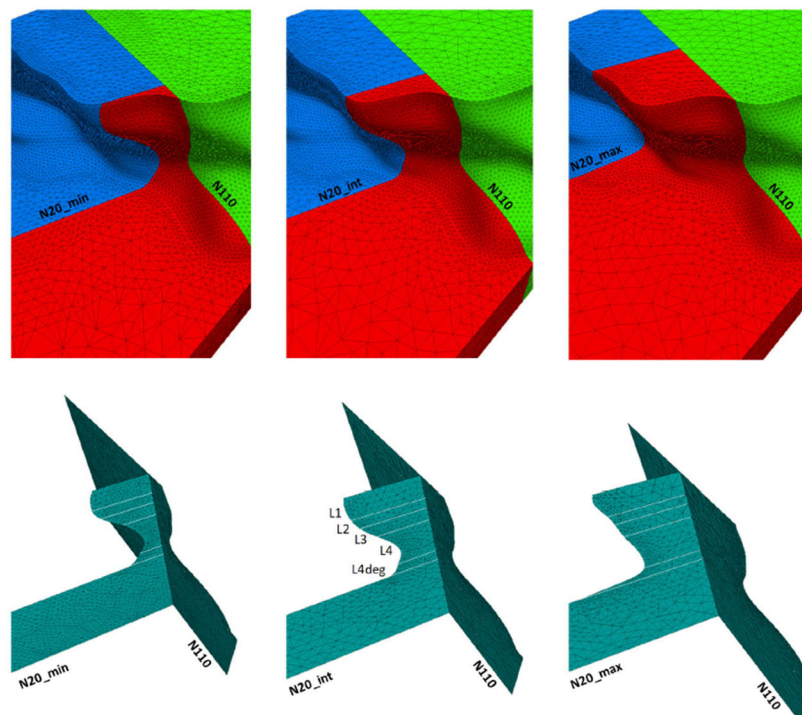


Figure 38 – Modélisation des blocs dans les scenarios de rupture, selon 3 positions de fractures N20°

Ces scénarios de rupture ont été analysés selon cinq critères d'évaluation. Ces critères sont analysés vis-à-vis de leur probabilité d'occurrence (ou d'expression) sur la période de référence choisie pour l'étude.

5.3.2 Période de référence centennale

C'est la composante temporelle de l'aléa qui définit la possibilité, plus ou moins grande, d'occurrence temporelle du phénomène redouté. Cette notion est très difficile à appréhender à l'échelle locale, liée au caractère brutal et discontinu des événements et au manque de retour d'expérience et de statistiques pour les phénomènes d'ampleur. Dans les démarches de cartographie de l'aléa mouvement de terrain, lorsque la notion de période de retour n'est pas qualifiable (notamment par manque de données événementielles historiques), il est usuellement retenu la notion de « probabilité d'occurrence dans un délai fixé », par exemple la centaine

d'années dans le cas d'une cartographie à visée PPR ou d'aménagement du territoire, qui constitue ainsi la période de référence considérée.

Dans le cadre de ce projet, la qualification de l'aléa répond globalement à cette définition (projection à horizon 100 ans), en évaluant l'existence de conditions favorables au déclenchement de l'éboulement au droit de la zone étudiée.

5.3.3 Critères d'évaluation de l'aléa

Les critères choisis pour qualifier la probabilité d'occurrence de l'aléa effondrement en grande masse sont les suivants :

- Présence et ouverture de la fracturation N110 : la fracture N110° est bien visible en paroi et en forage, mais son ouverture en profondeur dans le massif est une condition indispensable pour le découpage et la désolidarisation de dièdre rocheux. Même s'il n'a été identifié qu'une seule fracture N110°, l'hypothèse de la présence d'autre fracture plus au sud est aussi à considérer ;
- Présence et continuité de la fracturation N20 E : Cette fracturation permet le découpage de volume rocheux par intersection de la fracture N110 à l'arrière du massif. La fracture ou faisceau de fracture doit donc présenter une continuité suffisante pour amener un découpage et une désolidarisation du dièdre rocheux ;
- Equilibre géométrique : selon la position de la fracture N20°E considérée, le volume en surplomb repose sur un pied plus ou moins large au niveau du faciès 4. L'analyse géométrique des dièdres montre une position des centroïdes allant de la stabilité à l'instabilité ;
- Equilibre géomécanique : les compléments de calcul géomécaniques intégrant la résistance de chacun des faciès en compression, en tension et leur raideur a permis d'estimer pour chacun des cas facteur de sécurité que l'on pouvait attribuer ;
- Sensibilité à l'érosion du pied de falaise : l'équilibre géométrique et géomécanique se retrouve modifié si l'on considère un recul du pied de la falaise et ainsi une augmentation du surplomb. L'analyse géomécanique du recul du pied de la falaise a apporté également une idée de la sensibilité des scenarios au recul du pied de falaise.

Cette probabilité d'occurrence est exprimée de façon qualitative, en lien avec un « arbre de qualification » tenant compte de chacun des critères énoncés, considérant l'occurrence de chacun des critères dans les 100 ans selon trois niveaux :

- Oui : critère déjà rempli aujourd'hui ou très probable à l'horizon 100 ans
- Possible : critère non rempli actuellement qui pourrait être rempli à l'horizon 100 ans
- Non : critère non rempli actuellement qui semble peu probable à l'horizon 100 ans

Une première analyse par arbre de qualification est faite sur la géométrie, en tenant compte de la présence et de l'ouverture des fractures selon le diagramme suivant :

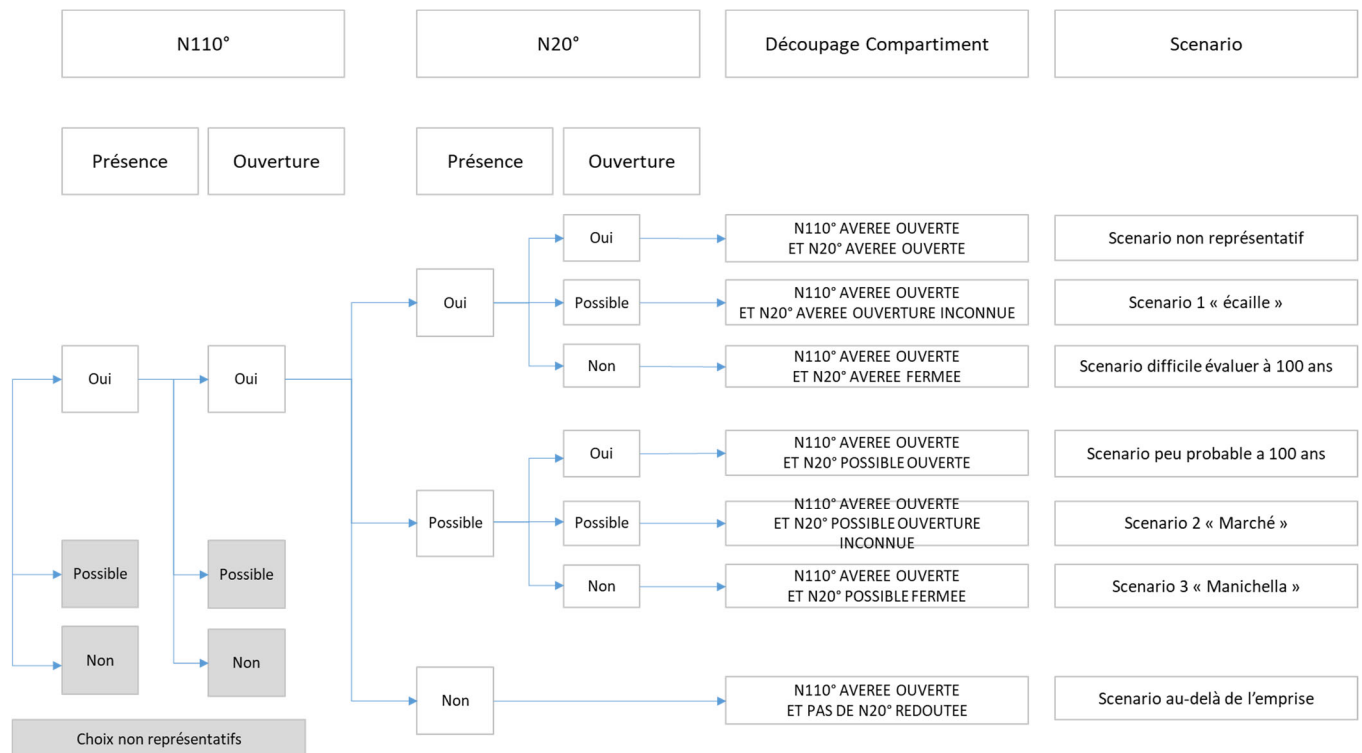


Figure 39 – Arbre de qualification des scenarios de rupture selon la présence et l'ouverture des fractures dans le massif rocheux

Une fois les scenarios de rupture définis (en l'occurrence les 3 scénarios tels que décrits précédemment : « écaillé », « Marché », « Manichella »), la probabilité d'occurrence est évaluée à partir des critères d'équilibre géométriques, géomécaniques et de sensibilité à l'érosion :

Probabilité d'occurrence	Critères
Faible / Très peu probable	- Stabilité géométrique ET - Stabilité géomécanique (modèle) à 100 ans probable : facteur de sécurité > 5 y compris avec une érosion en pied
Moyenne / Peu probable	- Déséquilibre géométrique à 100 ans peu probable ET - Déséquilibre géomécanique à 100 ans peu probable : nécessite érosion en pied > 1m et/ou baisse significative des caractéristiques géomécaniques
Forte / Probable	- Déséquilibre géométrique à 100 ans probable ET - Déséquilibre géomécanique à 100 ans probable : facteur de sécurité < 2 ; avec rupture si érosion en pied ou baisse caractéristiques géomécaniques

Figure 40 – Tableau des critères d'occurrence considérés dans l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse »

5.3.4 Critères d'intensité pour l'évaluation de l'aléa

Contrairement aux études d'aléa d'éboulement rocheux habituelles, les enjeux impactés par une rupture se situent dans la zone de départ et ne sont pas impactés par la propagation des phénomènes. Le paramètre intensité de l'aléa effondrement en grande masse est déterminé selon le type de phénomène et les volumes en jeu ainsi qu'en terme de recul de la crête de falaise. Les taux de recul de la falaise sont très faibles à Bonifacio, même si l'évènement de décembre 2019 le long du sentier de Campu Romanellu montre que l'effondrement peut se faire brutalement, et sur un recul important (de l'ordre de 3 m, cf. rapport BRGM RP-69576-FR).

L'intensité des phénomènes est donc analysée en lien avec la typologie des évènements et la sensibilité au recul des enjeux situés en tête de falaise. Un évènement d'intensité faible correspondrait ici à une chute d'un bloc isolé d'environ 1 m³ entraînant un recul très localisé avec peu d'impact sur le bâti. Tant que le recul de falaise reste limité sur le haut de paroi, que ce soit en latéral (10 m) ou en profondeur (2 m), l'intensité du phénomène est considérée comme modérée, l'intégrité du bâti est menacée mais pas de destruction majeure. Dès lors que la profondeur du recul dépasse les 2 m ou que la largeur de l'éboulement dépasse les 10 m, l'intensité du phénomène est considérée comme élevée et peut conduire à la ruine du bâti. Les trois classes d'intensité proposées sont rappelées dans le tableau Figure 41.

Intensité (recul)	Critères
Faible	Eboulement ou chute de bloc isolé ayant un impact très localisé sur le recul en crête de paroi (<1m)
Modérée	écaillage en paroi avec impact limité sur le recul en crête de paroi (< 2 m d'épaisseur ou <10m de largeur)
Elevée	volume mobilisé significatif, générant un recul de la falaise en cas d'effondrement (> 2 m d'épaisseur ou >10m de largeur)

Figure 41 – Tableau des critères d'intensité considérés dans l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse »

L'aléa « effondrement en grande masse » est ensuite défini par croisement entre la probabilité d'occurrence de l'aléa à 100 ans et son intensité s'il survient. Les notions de probabilités d'occurrence (suivant les 5 critères d'évaluation définis précédemment) sont prépondérantes dans la qualification de l'aléa étant donné les volumes significatifs en jeu dans les scénarios étudiés (intensité élevée pour les 3 premiers scénarios).

		Probabilité d'occurrence à 100 ans (PPR)		
		Faible Très peu probable	Moyenne Peu probable	Forte Probable
Intensité (recul)	Faible	Faible	Faible	Moyen
	modérée	Faible	Moyen	Elevé (Caractérisé et/ou Diffus)
	Elevée	Faible	Moyen	Elevé (Caractérisé et/ou Diffus)

Figure 42 – Caractérisation de l'aléa « effondrement en grande masse » - Matrice de croisement d'occurrence et d'intensité

5.4 NIVEAU D'ALEA – ANALYSE DES SCENARIOS

5.4.1 Scénario 1 : Ecaille selon une fracture N20°E proche de la paroi (N20_min)

La rupture d'une écaille selon une position de fracture N20°E proche de la paroi est un scenario étayé par certaines fractures, bien que fermées, étant visibles en sommet de paroi. L'incertitude principale pour ce scenario réside dans la présence et la continuité de cette fracture N20°E. L'écaille, de volume estimé 3 000 m³ est en surplomb total, le centre de gravité étant au-delà de la ligne de surplomb. De plus, les calculs de stabilité montrent une marge de sécurité très faible, et une instabilité si la fracture N20 est continue. Pour ce qui concerne l'érosion de pied, la délimitation de cette écaille en paroi montre un pied qui se situe à une altitude de 30 m donc qui n'est pas directement concernée, à court et moyen termes, par l'érosion marine.

La notation pour les critères d'évaluation de la probabilité d'occurrence de l'aléa est la suivante :

	A100 ans		
	oui	possible	non
Présence N20	x		
Ouverture N20		x	
Présence N110	x		
Ouverture N110	x		
Déséquilibre géométrique	x		
Déséquilibre geomécanique	x		
Erosion du pied			x

Figure 43 – Notation du scénario 1 sur les critères d'évaluation de l'aléa

Les notations aboutissent à considérer une **probabilité d'occurrence forte** à l'horizon de 100 ans.

En cas d'effondrement, l'écaille délimitée par les fractures N20 et N110, mobiliserait entre 0 et 4 m en crête de paroi ainsi que de probables remblais en recul de la fracturation qui seraient entraînés lors de la chute, soit environ 5 à 9 m. Une **intensité élevée est donc considérée**.

Conformément à la matrice de la Figure 42, l'aléa est considéré de niveau élevé caractérisé, l'échéance d'une telle rupture étant considérée comme probable dans les 100 ans.

L'incertitude qui persiste à ce stade, et qui ne permet pas de préciser la temporalité de la rupture, concerne l'ouverture de la fracture N20°E, et la densité de ponts rocheux reliant l'écaille considérée au massif. L'aléa est considéré comme caractérisé à cause de la présence de la fracture N20°E et des résultats de stabilités géométrique et géomécanique.

5.4.2 Scénario 2 : Eboulement selon un fracture N20°E passant sous la Place du Marché (N20_int)

La rupture d'un volume rocheux plus important selon une position de fracture N20°E intermédiaire est un **scenario qualifié de possible / peu probable** selon la matrice d'occurrence, la position de cette fracture étant hypothétique, mais sa présence ne pouvant être exclue au regard de la fréquence observée de cette famille de discontinuités. Le volume délimité de 12 600 m³ 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°E contient des situations d'instabilité pour les simulations N20_int dès lors que les caractéristiques des couches sont divisées par 10 au regard des valeurs de référence. Les incertitudes pour ce scenario résident dans la présence d'une telle fracture N20°E sur trente mètres et son ouverture, sur le prolongement de la N110°E dans le massif au-delà de la zone lessivée investiguée proche de la paroi et sur la résistance géomécanique du faciès 4.

	A100 ans		
	oui	possible	non
Présence N20		x	
Ouverture N20		x	
Présence N110	x		
Ouverture N110	x		
Déséquilibre géométrique		x	
Déséquilibre géomécanique		x	
Erosion du pied		x	

Figure 44 – Notation du scénario 2 sur les critères d'évaluation de l'aléa

Les notations aboutissent à considérer une **probabilité d'occurrence moyenne** à l'horizon de 100 ans.

En cas d'effondrement, l'écaille délimitée par les fractures N20°E et N110°E, mobiliserait un volume de 12600 m³ et un recul compris entre 11 et 16 m en tête de paroi ainsi que de probables remblais en recul de la fracturation qui seraient entraînés lors de la chute ; une **intensité élevée est considérée**.

Conformément à la matrice de la Figure 42, l'aléa est considéré de niveau moyen, l'échéance d'une telle rupture étant considérée comme peu probable dans les 100 ans.

5.4.3 Scénario 3 : Eboulement selon une fracture N20°E sous la place Manichella (N20_max)

La rupture d'un volume rocheux maximal estimé selon une position de fracture N20° est un scénario envisagé comme d'une emprise maximale, aucune fracture n'étant identifiée en paroi. Le volume estimé à 48 300 m³ 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.

	A100 ans		
	oui	possible	non
Présence N20		x	
Ouverture N20			x
Présence N110	x		
Ouverture N110	x		
Déséquilibre géométrique			x
Déséquilibre géomécanique			x
Erosion du pied			x

Figure 45 – Notation du scénario 3 sur les critères d'évaluation de l'aléa

Les notations aboutissent à considérer une **probabilité d'occurrence faible à l'horizon de 100 ans**.

En cas d'effondrement, l'écaille délimitée par les fractures N20 et N110, mobiliserait un volume de 48300m³ et un recul compris entre 38 et 43 m en crête de paroi ainsi que de probables remblais en recul de la fracturation qui seraient entraînés lors de la chute ; une **intensité élevée est considérée**.

Conformément à la matrice de la Figure 42, l'aléa est considéré comme faible, l'échéance d'une telle rupture étant considérée comme très peu probable dans les 100 ans.

5.4.4 Scénario 4 : Décompression du massif et rupture d'éléments en surplomb

D'autres discontinuités dans le massif ont été levées en partie haute de la falaise (faciès 1 et 2 principalement) sans que leur état d'ouverture, leur prolongement ou leur combinaison ne laisse penser à un éboulement en masse.

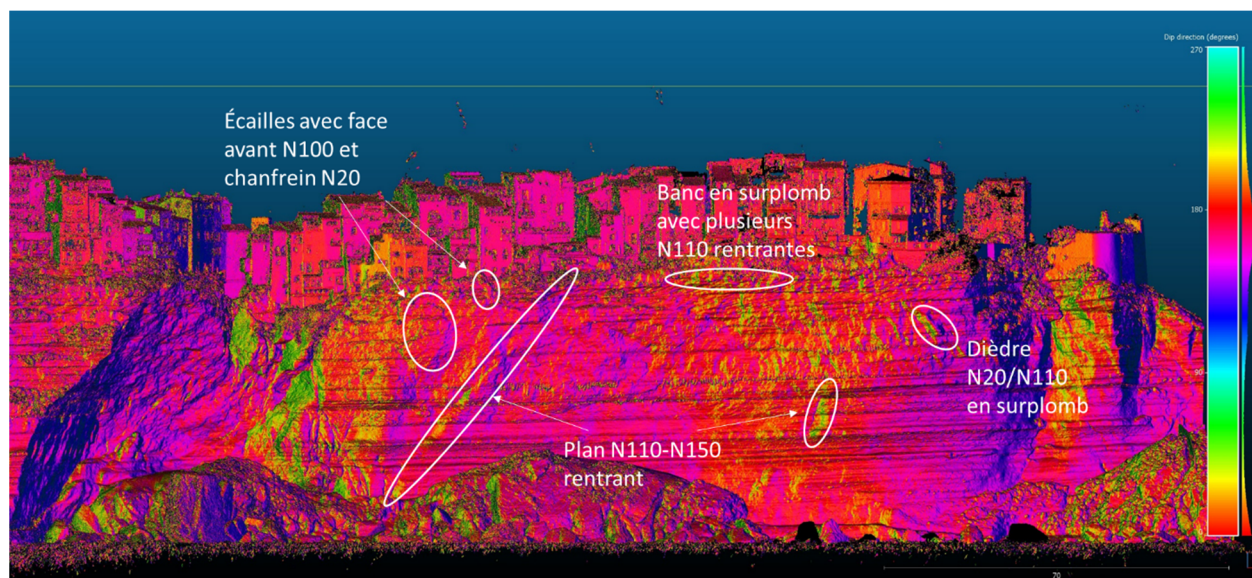


Figure 46 – Repérage des masses instables et principaux plan de fracture pour le scenario 4 sur modèle facets (nuage de point colorisé)

Néanmoins, les conditions favorables à la rupture d'une volume rocheux (m^3 à $10 m^3$) correspondant à un recul de la tête de falaise pouvant atteindre jusqu'à 5 m pourrait être rassemblée dans les 100 prochaines années (**probabilité d'occurrence forte et intensité moyenne à forte**) : ouverture et lessivage de fractures non identifiées, décompression du massif, forçage environnemental et anthropique. Si l'évolution de la falaise laisse à penser à une évolution lente (critères géologiques), les facteurs environnementaux et anthropiques peuvent être immédiats. **L'aléa est considéré comme élevé mais « diffus » étant donné la nature du phénomène (brutal) et l'incertitude du positionnement du phénomène.**

5.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA ROCHEUX

Les phénomènes de rupture des volumes rocheux mèneront nécessairement à purge de la zone décompressée du massif mais surtout des remblais situés en tête de falaise. Le zonage d'aléa proposé comprend donc pour chacun des scénarios une zone tampon de 5 m sur le compartiment stable, au nord de la N110°E mais aussi à l'ouest de chaque fracture N20°E, pour tenir compte de l'imprécision sur la remontée des surfaces de rupture potentielles à la surface et sur la purge des terrains décompressés après rupture. Concernant le scénario 4, une zone tampon de 5 m est ajoutée au 5 m de recul potentiel à l'échelle centennale pour tenir compte de la mise à l'équilibre des remblais (n'excédant pas 5 m d'épaisseur) et de la purge du massif décompressé.

La distance de propagation de tels éboulements depuis un surplomb est assez peu connue. Etant donné que le mécanisme de rupture induit un basculement vers le sud, une zone de 30 m depuis la tête de la falaise selon **une composante Nord-Sud** a été considérée en **alea élevé** pour tenir compte de la propagation des blocs en surplomb, ce qui correspond à un angle d'énergie de 63° . Une expansion possible vers l'est de l'éboulement **selon un même angle d'énergie de 60°** a été considérée pour estimer l'impact possible sur l'éboulis de la descente de Sutta Rocca.

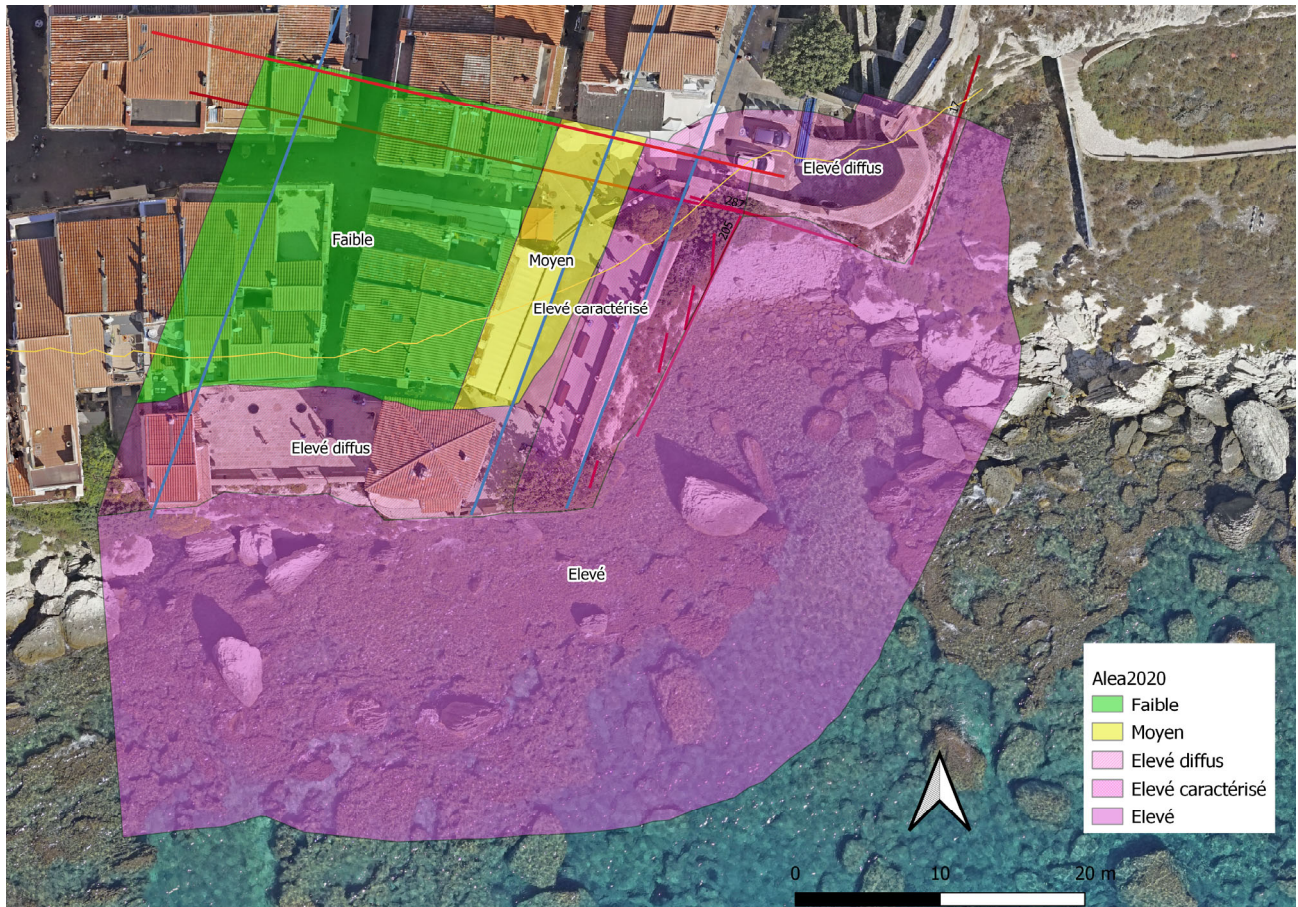


Figure 47 – Cartographie de l'aléa effondrement en grande masse sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018)

5.6 MESURES DE GESTION DU RISQUE

Sur une zone où existe cet aléa, des enjeux (humains, matériels, etc.) peuvent être présents. Ces enjeux présenteront une vulnérabilité plus ou moins grande vis-à-vis de l'aléa considéré. Les enjeux retenus dans le cadre de cette étude sont essentiellement des enjeux liés à la population fréquentant le site, à l'habitat présent et aux activités touristiques saisonnières se développant en tête de falaise comme en mer en pied de falaise.

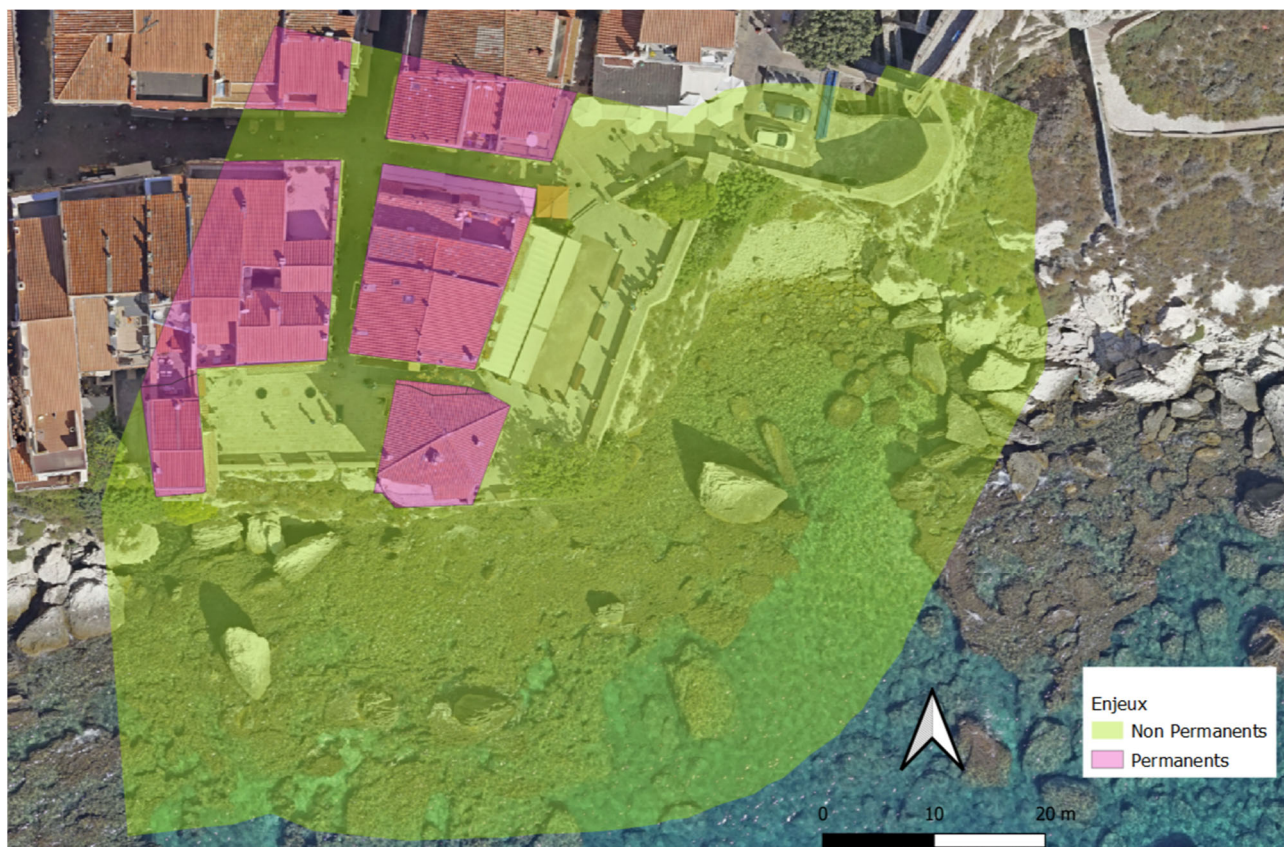


Figure 48 – Cartographie des enjeux sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018)

Le risque correspond au croisement de l'aléa « effondrement en grande masse » pouvant se développer en falaise et mobiliser des terrains en recul, et les enjeux présents dans le périmètre de l'aléa selon leurs vulnérabilités. Les niveaux de risques considérés dans la présente étude, associés à chacun des aléas définis au préalable, sont les suivants :

Aléa	Enjeux	
	permanents	non permanents
Faible	Faible	Faible
Moyen	Rb - Fort-bâti	Faible
Elevé diffus	Rb - Fort-bâti	Rd - Fort
Elevé caractérisé	Rb - Fort-bâti	Rc - Fort
Elevé	N/A	R - Fort-non bâti

Figure 49 – Caractérisation du risque rocheux d'effondrement en grande masse - Matrice de croisement aléa et enjeux (R : Rouge, Rb : Rouge bâti, Rd : Rouge diffus, Rc : Rouge caractérisé)

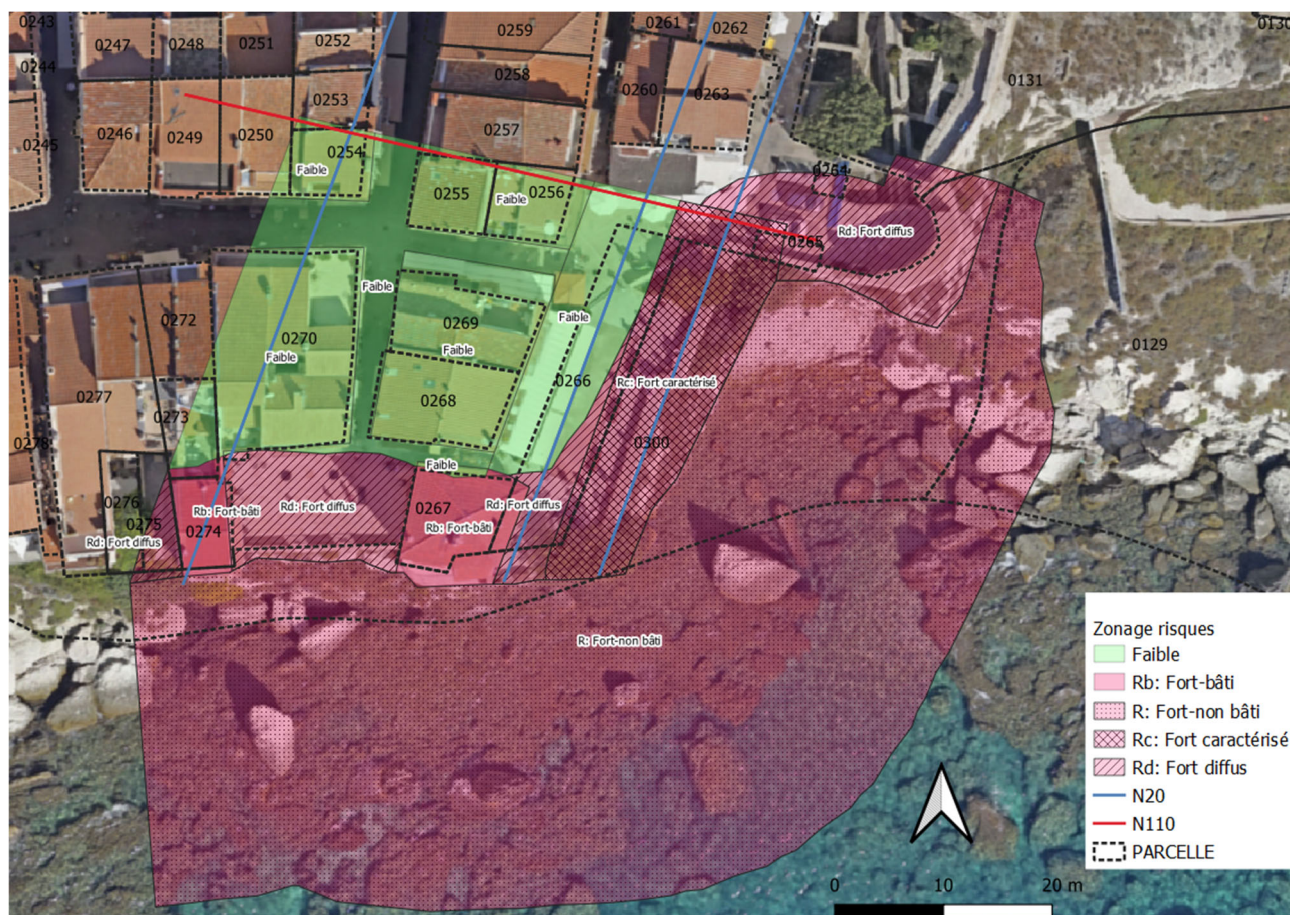


Figure 50 – Cartographie du risque d'effondrement en grande masse sur le secteur d'étude (fond : orthophoto 2018)

5.6.1 Recommandations générales pour la gestion du risque

L'ensemble des investigations menées, permet de considérer qu'il n'y a pas de péril imminent. Des risques de niveau faible et fort ont été établis (cf. Figure 50) et un certain nombre de recommandations sont proposées, visant soit la réduction des enjeux, soit, quand cela apparaît possible la réduction de l'aléa.

Pour tout le secteur, **y compris les zones de risque faible**, un protocole de vigilance, relatif aux désordres, venues d'eau et activités de chutes de blocs observés, est recommandé.

Un élément important dans la gestion des risques est d'établir un protocole de vigilance permettant de déceler, anticiper ou encore atténuer tout événement de type chute de blocs ou éboulement.

Le rapport de bloc 2B relatif au volet hydrogéologique a pu mettre en évidence, au sein de la Citadelle, le rôle potentiellement déstabilisateur de fuites d'eau qui peuvent alimenter le massif, les fractures et les discontinuités le traversant.

Outre les travaux d'imperméabilisation et de rénovation des réseaux d'eaux, qui sont engagés, il est primordial d'assurer à la fois des actions de vigilance et de traitement rapide de ces fuites. On peut proposer ainsi les actions suivantes :

- équiper les réseaux d'eau de la haute ville de compteurs permettant de quantifier leur rendement (AEP) et de systèmes d'écoute pour identifier les fuites (réseaux pluvial et

eaux usées), si cela n'a pas déjà été fait. Il est recommandé de mesurer le rendement du réseau AEP tous les ans ;

- mettre en place avec les riverains de la Citadelle un système de signalement simple de toute anomalie de type fuite, inondation ;
- consigner au fur et à mesure la localisation des éventuelles fuites recensées, les volumes d'eau de fuite, et la façon dont l'eau s'est évacuée pendant l'épisode (via les réseaux d'eau pluviale, les citernes enterrées, par infiltration diffuse vers le massif, etc...);
- surveiller l'état des suintements de la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois de manière récurrente et au sortir d'événements pluviométriques importants, pour observer, photographier et consigner si une évolution est constatée (augmentation manifeste des suintements, maintien, ou diminution). Une fiche électronique support sera proposée par les opérateurs ;
- établir un protocole de traitement avec les gestionnaires de réseaux et riverains pour que toute fuite puisse être traitée dans les 24 h (réseaux) à 48 h (riverains) après qu'elle ait été constatée ;
- évaluer la faisabilité technique et l'impact environnemental d'une protection du pied de falaise par des solutions de type enrochement afin de limiter l'érosion dû à l'action des vagues.

Par ailleurs, il est de la même importance de pouvoir détecter et consigner les désordres se produisant sur la falaise et au sein du bâti de la haute ville. On peut proposer ainsi les actions suivantes :

- mettre en place avec les riverains de la Citadelle un système de signalement simple de toute anomalie de type fissure, tassement anormal, basculement, désolidarisation d'éléments de bâti. Ceci est bien entendu également valable pour les propriétaires/concessionnaires des voiries et édifices publics ;
- inspecter régulièrement la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois de manière récurrente et au sortir d'événements météorologiques importants (pluviométrie, vent, houle) pour observer, photographier et consigner si une évolution est constatée (chute de pierres, blocs ou volumes plus importants, érosion manifeste en pied. Une fiche électronique support sera proposée par les opérateurs ;
- mettre en place, si ce n'est déjà fait, une procédure rapide (par exemple un marché pluri-annuel à bons de commande) afin que les travaux de traitement/confortement puissent être réalisés dans des délais brefs après constat d'instabilités imminentes, ou encore de désordres évolutifs pouvant affecter les enjeux à très court terme, après avis du géotechnicien ;
- considérant la vétusté des bâtiments de la haute ville, un diagnostic structurel est recommandé pour les bâtiments à proximité des zones rouges pour évaluer la vulnérabilité du bâti à proximité des zones à risque (parcelles AC268, AC269, AC0270, AC272 et AC273)

Ces mesures de gestion pourront être intégrées au PCS, par le biais par exemple du groupe de travail en charge du protocole « sécurité falaises » mené par le sous-préfet et la commune. Il paraît important d'instaurer auprès des services de la commune, voire de la collectivité, une vigilance routinière fréquente pour garantir son efficacité et sa pérennité. D'autre part déceler une augmentation de l'activité de mouvements de terrain nécessite une certaine fréquence de suivi. Un contrôle trimestriel nous paraît être un pas de temps maximal à ne pas dépasser

Dans le cas où les opérateurs poursuivent l'observation du site pour une période de deux années, si des évolutions anormales de la topographie de la falaise sont mises en évidence par les campagnes complémentaires de scanner laser 3D, elles seront signalées à la DDTM de Corse-du-Sud et à la Ville de Bonifacio. Cette technologie semble prometteuse pour être poursuivie,

Ainsi, la fréquence de relevés sera définie au terme des quatre années d'observation. Cette fréquence pourra être adaptée en fonction de l'évolutivité des secteurs.

5.6.2 Proposition de gestion du risque en zone « Rc-Fort caractérisé »

L'aléa d'éboulement a été considéré comme **élevé caractérisé**, l'échéance d'une telle rupture étant considérée comme probable dans les 100 ans. Cette zone ne présente pas d'enjeu bâti. Si aucun (ou un nombre très limité) d'enjeu humain permanent n'est présent en période hivernale, en période d'affluence touristique, on peut considérer l'enjeu comme permanent le long du parapet de la place du marché. **Le risque associé est donc un risque fort caractérisé.**

Les propositions de gestion du risque dans cette zone (**« Rc-Fort caractérisé »**) sont les suivantes :

- réduction des enjeux humains :
 - recul stratégique en repositionnant le parapet en zone d'alea moyen, la faisabilité est bonne (zone de risque fort-diffus ou risque faible).
- réduction de l'aléa :
 - Etanchéification du sommet de la falaise avec une forme de pente afin d'évacuer les eaux et éviter tout risque d'infiltration dans les terrains en place en tête de falaise.

Des mesures de confortement de l'écaille peuvent être envisagées, avec la réalisation d'environ 200 boulons d'ancrage. Toutefois, le risque de déstabilisation lors de la mise en place est important et cette solution n'est pas conseillée à ce stade. Une note de pré-dimensionnement est toutefois fournie en annexe pour plus de précisions. De même, la solution de purge de l'écaille a été écartée par les opérateurs du fait des risques pour les terrains avoisinants (incertitude sur la possible fragilisation du massif rocheux au contact de l'écaille en cas de déroctage volontaire ; massif qui présente des enjeux permanents en partie sommitale).

5.6.3 Proposition de gestion du risque en zone « Rd-Fort diffus »

Il s'agit des terrains en crête de falaise exposés à un **aléa élevé diffus**, et présentant des enjeux non permanents tels que les places et les rues de la Citadelle.

Les propositions de gestion du risque dans cette zone (**« Rd-Fort diffus »**) sont les suivantes :

- réduction des enjeux humains :
 - mise en place d'un protocole de gestion des flux touristiques avec fermeture anticipée du secteur en cas de conditions météorologiques défavorable (Alerte Orange et Rouge Météofrance).

5.6.4 Proposition de gestion du risque en zone « R-Fort-non bâti »

Il s'agit des terrains en pied de falaise exposés à un **aléa élevé** lié à la propagation de tout éboulement pouvant venir de la falaise. Ces zones, la plupart immergées, ne présentent pas d'enjeu permanent. Seuls des passages ponctuels de piétons en pied de falaise et d'embarcations sont possibles.

Les propositions de gestion du risque dans cette zone (**« R-Fort-non bâti »**) sont les suivantes :

- réduction des enjeux humains :

- mise en place d'un périmètre d'interdiction de navigation de 30m autour de la plus grande avancée de terres (trait de côte ou surplomb)
- mise en place d'une interdiction de passage pour les piétons en pied de falaise

5.6.5 Proposition de gestion du risque en zone « Rb-Fort bâti », parcelles AC0267 et AC0274

Les propositions de gestion du risque dans cette zone (« **Rb-Fort** ») sont les suivantes :

- réduction des enjeux humains :
 - dans l'optique de l'acquisition des biens par la collectivité, Il est conseillé d'améliorer la précision sur la temporalité de l'aléa (vitesse de recul du pied, ouverture des fractures) ;
 - réaliser une étude structurelle des bâtiments concernés par un risque fort bâti pour connaître leur vulnérabilité à une perte partielle de terrain de fondation et définir les mesures de confortement pouvant s'avérer nécessaires le cas échéant (chaînage et contreventement notamment);
 - Interdire l'augmentation des enjeux humains (pas d'extension autorisée type chambre sur ces bâtiments au niveau de ces façades par exemple) ;
 - Il est proposé d'interdire tout nouveau projet de construction type maison d'habitation ou commerces afin de limiter l'occupation humaine.
- réduction de l'aléa :
 - Etanchéification du sommet de la falaise et gestion durable des eaux (AEP, EU, EP) afin d'éviter toute infiltration dans les terrains en place. Les eaux de toitures et de ruelles, les eaux usées devront être évacuées en dehors de la zone ;
 - Campagne annuelle de purge de la falaise et d'inventaire des instabilités résiduelles afin d'adapter les mesures de sécurisation et de gestion des enjeux présents sur les terrains en recul de la tête de falaise.

Si l'évolution de la falaise laisse à penser à une évolution lente (critères géologiques), les facteurs environnementaux et anthropiques peuvent avoir un impact à très court terme (échéance de quelques années), et l'aléa peut tout de même être considéré comme fort sur les terrains en recul immédiat de la tête de falaise sur tout le périmètre d'étude. Il est rappelé que ces terrains sont en surplomb marqué.

Les enjeux identifiés sont les façades maritimes des habitations bordant la falaise. On notera ici que le bâti présente une vulnérabilité très forte, dû à son ancienneté et au type de fondations non chaînées. Si une partie de la façade est emportée par un éboulement, une ruine totale des ouvrages est à anticiper.

5.7 PROPOSITION D'ETUDE COMPLEMENTAIRE

Cette étude a permis d'écarter l'imminence d'un péril pour le bâti. A partir de la modélisation locale du massif rocheux, 4 scénarios de rupture ont été considérés permettant de préciser les niveaux d'aléa et les mesures de gestion du risque du site. Le premier scénario, délimité par une fracture N20°E la plus proche de la paroi, menace en cas de chute une partie de la place du marché. Ce scénario est qualifié d'un risque fort « caractérisé » avec la mise en œuvre de

contraintes pour les enjeux concernés. 2 autres scenarios découpent des volumes plus importants de falaise avec des probabilités d'occurrence qualifiées de moyenne à faible.

Enfin, un aléa fort « diffus » a été défini sur la frange littorale en lien avec la rupture de surplombs, même s'ils ne sont pas clairement identifiables ou identifiés.

Toutefois, les limites de cette étude – bien que répondant à la question posée par la préfecture en 2018 – résident dans le fait qu'elle n'a pas permis ni de préciser la temporalité du phénomène d'effondrement de l'écaïlle (scénario 1), ni de quantifier l'érosion en pied de falaise et son incidence sur sa stabilité (tous scénarios confondus).

Dans la perspective d'une cartographie de l'aléa à échelle communale (à vocation PPR), ce complément d'acquisition de connaissance permettra d'apporter des éléments techniques et scientifiques concernant :

- le suivi sur le long terme de la falaise (poursuite de l'instrumentation mise en œuvre dans la première phase d'étude depuis 2018 – « observatoire ») – ce suivi permettra notamment de suivre l'évolution dans le temps du comportement de la falaise et des compartiments instables identifiés (aspect temporalité de la rupture).
- l'incidence de l'érosion en pied de falaise sur le comportement de la falaise

Le programme proposé est découpé selon 2 volets complémentaires : suivi de l'observatoire et amélioration de la connaissance de l'érosion du pied de falaise, afin de préciser le risque d'effondrement et déterminer les enjeux bâtis/humains exposés afin de définir les mesures de mitigation appropriées. Le périmètre d'étude pourrait être étendu vers l'ouest jusqu'au mur d'enceinte du Torione, ce qui correspond aux enjeux permanents (habitation + école) en proximité immédiate de la falaise (Figure 51).



Figure 51 – Extension à l'ouest du périmètre d'étude, en lien avec la problématique d'éboulement de falaise (fond : orthophoto 2018)

On peut déjà anticiper les contextes suivants :

- Secteur 1 : école/escalier du Roy d'Aragon: surplomb faible en tête, fracturation à étudier, pas de protection de pied, fort recul depuis les dernières décennies enjeu école, risque a priori moindre ;
- Secteur 2 : rue des Pachas : fort surplomb >20m, peu de fracturation, protection de pied, risque a priori élevé diffus ;
- Secteur 3 : rue Scamaroni : faible surplomb, fracturation intense N/S, protection de pied, risque a priori très élevé ;
- Secteur 4 : rue Doria : surplomb >10m, peu de fracturation, protection de pied, risque a priori élevé diffus.

5.7.1 Suivi de l'observation du site

Dans la suite du Bloc 2A, l'observatoire sera maintenu jusqu'à la fin 2022. Les opérateurs de cette étude apporteront leurs compétences en aléa gravitaire dans le cadre du suivi de l'observation du site en participant aux divers échanges et à la rédaction du livrable associé.

Par ailleurs, et bien qu'il soit difficile à ce jour d'établir des seuils ou valeurs de mouvement pouvant être associés à un déplacement irréversible de la zone d'étude, les évolutions très anormales - non attribuables à des évolutions cycliques, dysfonctionnements ou artefacts - des capteurs mis en place dans le cadre de l'observation multi-paramètres, seront également signalées à la DDTM de Corse-du-Sud et à la Ville de Bonifacio.

Dans ce cadre une écoute micro sismique de l'écaille (scénario 1 et de la zone à enjeu en recul) est conseillée. Cette écoute complémentaire à celle réalisée en 2018 permettra d'identifier l'évolution potentielle dans le temps du comportement de l'écaille rocheuse identifiée dans le présent programme mais aussi d'étudier le comportement d'autres écaillles potentiellement instables localisées dans les secteurs à l'ouest (Figure 51). L'objectif est de connaître la différence de comportement de l'écaille par rapport au reste de la péninsule, et de connaître son évolutivité dans le temps, sans garantie de résultat sur ce dernier point. Une réflexion sur la surveillance de l'écaille sera menée par les opérateurs de cette étude.

5.7.2 Erosion du pied de falaise

Plusieurs sous actions sont proposées pour lever les incertitudes qui restent aujourd'hui.

- L'acquisition et traitement d'un levé LIDAR Terrestre (échelle falaise + échelle de quelques 10m²) pour le suivi dans le temps des vitesses et des zones soumises à l'érosion à l'échelle de la falaise – Action Ineris dans le suivi de l'observatoire.
- Acquisition photogrammétrie haute définition (résolution millimétrique) pour caractériser et quantifier l'érosion du pied de falaise en 5 secteurs de faciès différents: vitesse et périodicité de l'érosion : comportement interlits, sensibilité au vent/houle ;
- Modèle de l'impact géomécanique de la houle en 3D sur le golfe de Bonifacio. En complément du bloc 2C il s'agit de préciser l'impact des houles pour l'utilisation d'un modèle en 3D à plus grande échelle. Une instrumentation en mer et en falaise sera déployée pour le calage du modèle ;
- Calcul de stabilité géomécanique 3D intégrant les résultats sur l'érosion.

Chaque tâche fera l'objet d'un livrable et l'ensemble de l'étude d'un rapport de synthèse ayant pour objectif de préciser dans le temps le risque d'effondrement de la falaise et les mesures de gestion du risque associées. Le livrable intégrera une cartographie détaillée de l'aléa « effondrement/recul de falaise » des secteurs 1 à 4 dans la continuité de la méthode mise en œuvre entre 2018-2020, qui sera valorisée dans la cartographie communale dans l'optique du PPR.

6 Bibliographie du projet

- [1] CEREMA, 2020. Falaise de Bonifacio Caractérisation mécanique des terrains Rapport d'étude, mars 2020. Rapport final Affaire C19MN0007
- [2] BRGM, Deparis J. (2019) – Contribution de méthodes géophysiques pour la reconnaissance de la fracturation sur la falaise de Bonifacio. Rapport final. BRGM/RP-69532-FR, 50 p., 16 ill., 2 ann
- [3] BRGM, Levy C., Delatre M. (2019) – Enregistrements de bruit sismique sur la citadelle de Bonifacio (01/2019) - tâche 2AO-3. Rapport final. BRGM/RP-69300-FR, p.47, 22 ill., 1 ann.
- [4] BRGM, Raucoules D., Fournel M. avec la collaboration de Marchese A. (2020) – Mesures Radar (GBSAR et GBRAR) sur la citadelle de Bonifacio (janvier 2019), tâche 2AO. Rapport BRGM/RP-69708-FR, 20 p., 12 fig.
- [5] BRGM 2020 -. BLOC 2B : Complément Hydrogéologie Amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement du secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio BRGM/RP-69836-FR, 48 p., 26 ill., 1 ann.
- [6] 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
- [7] Ineris, 2018. Première campagne de relevé 3D de la falaise de Bonifacio. Note DRS-18-175501-10520A
- [8] Ineris, 2019. Deuxième campagne de relevé 3D par scanner laser de la falaise de Bonifacio. Présentation des données et comparaison avec la précédente campagne de mesure. Note Ineris-175501-562520
- [9] Ineris, 2019. Troisième campagne de relevé 3D par scanner laser de la falaise de Bonifacio – présentation des données et comparaison avec les précédentes campagnes de mesure. Note Ineris-175501-664161
- [10] Ineris, 2019. Rapport d'installation du dispositif d'observation multi-paramètre et présentation des mesures initiales. Rapport Ineris-175501-641674
- [11] Cerema Ineris BRGM 2020. Bloc 2A : Bilan de l'observation du site Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio Ineris-175501-645611, BRGM/RP-69848-FR
- [12] BRGM, Vignerot B., (2020) – Diagnostic de risque ponctuel sur le Campo Romanello - commune de Bonifacio (Corse du Sud). Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-69576-FR. 15 p., 12 fig
- [13] BRGM, Pedreros R., Mugica J. et Vignerot B. (2020) – Etude exploratoire de l'impact des vagues sur les falaises pour un événement météo-marin centennal : Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio. BRGM/RP-70285-FR, 57 p., 28 fig.

Annexe 1

Etude du coût potentiel du confortement de l'écaille- Scenario 1

Confortement de l'écaille – hypothèses :

Le scénario 1 tel qu'évoqué, prend en compte la chute d'une masse rocheuse d'environ 3000 m³, masse rocheuse située au niveau de la place du marché.

Trois hypothèses de traitement sont envisageables :

- La première hypothèse consiste en une réduction de la vulnérabilité du site avec le recul du parapet au-delà de la position de la fracture arrière de l'écaille.
- La seconde hypothèse est le minage de l'écaille,
- La troisième hypothèse est le confortement par mise en œuvre de boulons d'ancrages en paroi.

La première hypothèse est la plus simple à mettre en œuvre cependant elle a pour conséquence une réduction significative de l'espace de la place.

La deuxième hypothèse, pourrait être envisagée, cependant les contraintes de mises en œuvre et le changement de la configuration du site au niveau paysager, en font une hypothèse difficilement réalisable.

La troisième hypothèse, dont la réalisation technique est aussi contraignante que la seconde, présente l'avantage de maintenir le site dans son état, tant au niveau paysager qu'au niveau de l'espace de la place du marché.

Cependant, la mise en œuvre technique de cette solution risque d'être compliqué et couteux. Les premiers éléments de chiffrage présenté ci-après en atteste.

Mais avant toute opération, il conviendra de s'assurer de la configuration de l'écaille (état de la fracture arrière, présence de végétation (actuelle ou ancienne), venue d'eaux...) et ce, par des reconnaissances physiques assortis de compléments de mesures géophysiques.

Confortement de l'écaille – éléments de dimensionnement et coûts :

Sans prévaloir sur la possibilité de réaliser cette opération, le rapide calcul suivant permet d'identifier les grandes lignes de l'ouvrage à réaliser.

Les hypothèses prises en compte sont : masse de 3000 m³, pendage de la fracture arrière de 80°, angle de frottement sur la discontinuité de 20°. Les calcarénites étant très hétérogènes, le Qs de la roche pourrait avoir un impact non négligeable sur le dimensionnement, aussi les résultats obtenus sont présentés avec une borne min et une borne max.

Dans le cadre de cette évaluation, nous avons pris des ancrages en diamètre 50 mm, seule une étude de dimensionnement aboutie permettra potentiellement d'optimiser ce diamètre.

En diamètre 500 mm, il serait nécessaire environ 200 boulons d'ancrages, avec des longueurs comprises entre 9 et 12 m (dépend du Qs), soit environ **2100 mètre linéaire de barres**.

La pose (fourniture et pose classique) de ce linéaire de barres sur site revient à environ **525 000 €**, auquel il convient d'ajouter les frais d'installation de chantier, l'héliportage des barres pour leur mise en œuvre, le surcoût de pose liée à l'orientation des boulons (vers le haut), l'engrèvement des têtes pour leur insertion paysagère, le coût de la maîtrise d'œuvre, les études environnementales...

Le montant total de l'opération pourrait être comprise entre **700 000 € et 1 000 000 €, voire peut-être plus en raison de l'insularité de la zone du chantier.**

La possibilité de réaliser d'un point de vue technique cette opération doit être **confirmé par une étude, le présent calcul, ne peut en aucun cas suffire.** Il permet d'approcher le coût financier d'une telle opération.



Direction territoriale Méditerranée

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76

Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr



*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Parc Technologique Alata BP 2 F-60550 Verneuil-en-Halatte

tél +33(0)3 44 55 66 77 fax +33(0)3 44 55 66 99 internet www.ineris.fr

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Etablissement public à caractère industriel et commercial – RCS Compiègne B 381 984 921 – Siret 381 984 921 00019 – APE 7120B – TVA Intracom FR 73 381 984 921



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale du BRGM en Corse

Immeuble Agostini
Zone industrielle de Furiani
20600 – Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33