HAL
open science

Études croisées de l'aléa d'éboulement en grande masse en contexte urbain (citadelle de Bonifacio) : apports des techniques d'écoute sismique passive, interférométrie radar au sol et interférométrie satellitaire

Clara Lévy, Daniel Raucoules, Mickaël Delatre, Mickaël Foumelis

To cite this version:

Clara Lévy, Daniel Raucoules, Mickaël Delatre, Mickaël Foumelis. Études croisées de l'aléa d'éboulement en grande masse en contexte urbain (citadelle de Bonifacio) : apports des techniques d'écoute sismique passive, interférométrie radar au sol et interférométrie satellitaire. JNGG 2020 - 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nov 2020, Lyon, France. hal-03181783

HAL Id: hal-03181783

https://brgm.hal.science/hal-03181783

Submitted on 25 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDES CROISEES DE L'ALEA D'EBOULEMENT EN GRANDE MASSE EN CONTEXTE URBAIN (CITADELLE DE BONIFACIO) : APPORTS DES TECHNIQUES D'ECOUTE SISMIQUE PASSIVE, D'INTERFEROMETRIE RADAR AU SOL ET D'INTERFEROMETRIE SATELLITAIRE

SPECIFICITY OF PASSIVE SEISMIC MONITORING IN PENINSULA FOR THE STUDY OF ROCKFALL HAZARD

Clara LEVY[1], Daniel RAUCOULES[1], Mickaël DELATRE[1], Mickaël Foumelis[1]
[1] *BRGM, Orléans, France*

RÉSUMÉ – Quatre méthodes géophysiques ont été utilisées pour améliorer la caractérisation de l'aléa éboulement à la Citadelle de Bonifacio : de l'écoute sismique passive complétée par des mesures de vibration par interférométrie GBRAR (Ground Based Real Aperture Radar), de la télédétection par interférométrie SAR satellitaire et GBSAR (Ground Based Synthetic Aperture Radar).

ABSTRACT – Four complementary geophysical methods were used to improve the characterization of rockfall hazard at the Citadel of Bonifacio: passive seismic monitoring supplemented by GBRAR (Ground Based Real Aperture Radar) interferometry, remote sensing methods such as satellite SAR and GBSAR (Ground Based Synthetic Aperture Radar) interferometry.

1. Introduction

La presqu'ile de Bonifacio est composée de formations sédimentaires hétérogènes du Miocène de pendages subhorizontaux, principalement des calcaires et grès. Au niveau de la Citadelle, cet empilement sédimentaire peut être décrit d'un point de vue mécanique comme la superposition d'une couche de 6 m d'épaisseur (L5 en Figure 1) surmontées de couches beaucoup plus indurées de 52 m d'épaisseur (L1 à L4 en Figure 1).

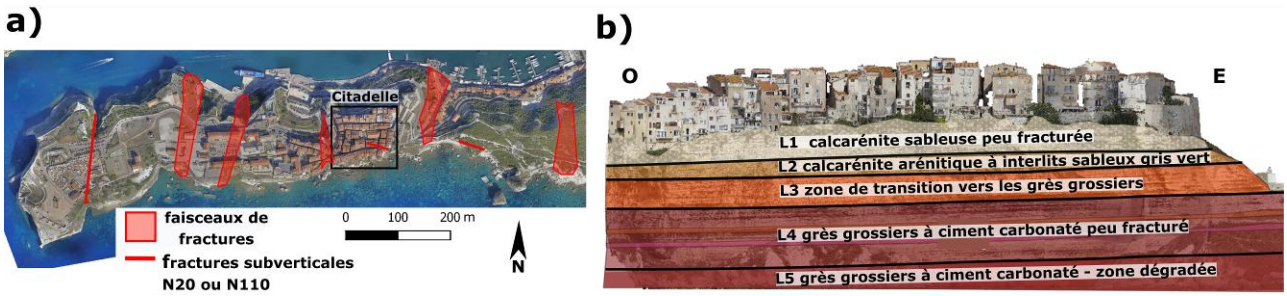

Figure 1: a) Orthophotographie de la presqu'île de Bonifacio. b) Description de la séquence stratigraphique de la Citadelle de Bonifacio.

Ce secteur présente des falaises de 45 à 65 m de haut dont l'érosion en pied par la méditerranée a permis la création de surplombs de plus de 20 m. En plus des mécanismes de mise en surplomb, le risque d'éboulement est conditionné par la fracturation interne du massif rocheux selon des fractures subverticales N20 et N110, avec un niveau d'aléa fort à très fort pour l'éboulement en grande masse à la Citadelle.

En particulier, une fracture N110 semble désolidariser un compartiment rocheux en surplomb au Sud-Est de la Citadelle. Les méthodes géophysiques présentées ci-après ont été utilisée dans l'objectif de préciser l'aléa, notamment au niveau de ce compartiment. Il s'agit d'écoute sismique passive, complétées par des mesures de vibration par interférométrie GBRAR (radar à ouverture réelle au sol), et associés à des méthodes de télédétection donnant le déplacement suivant la ligne de visée du radar dont de l'interférométrie SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) satellitaire et GBSAR (SAR au sol). Cette étude fait partie d'un plus vaste programme destiné à préciser l'aléa éboulement, incluant par exemple des essais in situ et en laboratoire, des forages, etc.

1.1. Principe de l'écoute sismique

L'objectif de l'écoute sismique passive appliquée au cas de Bonifacio est de mettre en évidence l'existence de blocs instables. Depuis une dizaine d'année, cette méthode a été validée pour des volumes instables de quelques milliers à centaines de milliers de mètres cubes et dans différents contextes (roches volcaniques, sédimentaires, géométries différentes, etc. ; Lévy, 2011; Burjànek et al., 2012; Bottelin, 2014; Burjànek et al., 2017; Colombero et al., 2018 ; Valentin, 2018). Le principe est le suivant : les blocs rocheux instables vibrent préférentiellement à certaines fréquences qui sont caractéristiques de leur géométrie, de leur masse, de la rigidité de la roche, mais aussi du degré d'attachement au massif stable. Grâce à des sismomètres, il est possible d'enregistrer ces fréquences, et même de suivre leur évolution dans le temps. A Bonifacio, l'objectif est de pouvoir délimiter les zones de comportement homogène en fréquence, et de s'assurer qu'elles correspondent à des limites de blocs potentiellement instables (pour la méthodologie, voir Iannucci et al. 2018). Kleinbord et al. (2019) souligne qu'il n'existe pas de relation directe entre la valeur du 1er pic en fréquence et le volume du compartiment instable. Cependant, nous analyserons autant que possible les caractéristiques des pics en fréquences (amplitude, direction, amortissement, etc.) afin d'en déduire des informations qualitatives sur les limites des blocs et leur degré de désolidarisation.

1.2. Principe de l'interférométrie GBRAR

Le principe de l'interférométrie radar consiste à utiliser le lien entre la variation de la phase du signal radar entre deux temps d'acquisition et la variation de distance entre la surface ciblée et le capteur au cours de la même période. Dans le cas de l'interférométrie GBRAR (Negulescu et al., 2013), il s'agit de mesurer des oscillations de faibles amplitudes de cibles « naturelles » mais également de cornets réflecteurs (dispositifs métalliques d'une 20^{aine} de cm rétrodiffusant le signal radar) que nous fixons sur des roches/murs à surveiller. De même que pour l'écoute sismique, l'objectif est de mettre en évidence des différences de mode de vibration entre différentes parties des éléments à suivre, voire même une variation de fréquence propre entre campagnes de mesures pouvant suggérer une faiblesse structurelle. Cette méthode permet uniquement la mesure des vibrations dans la direction de visée du radar, elle est donc moins complète que de l'écoute sismique avec des sismomètres 3 composantes. La méthode est cependant complémentaire car elle permet de faire des mesures de vibration sur falaise par télédétection, ce qui est beaucoup plus aisé que de déployer des sismomètres en paroi.

1.3. Principe de l'interférométrie SAR satellitaire et GBSAR

Les méthodes d'interférométrie SAR satellitaire (Hanssen, 2001 ; Massonnet et al., 1998) et GBSAR ont pour objectif de produire des interférogrames (images de différence de

phase) donnant le déplacement suivant la ligne de visée du radar. En interférométrie SAR, la technique est plutôt adaptée à la mesure de la composante verticale du mouvement (le satellite image une zone depuis le haut), tandis qu'en interférométrie GBSAR, la technique est plutôt adaptée à la mesure de la composante horizontale du mouvement (le radar est souvent installé face à la zone instable). Ces méthodes sont notamment limitées par la résolution spatiale du capteur (e.g. un pixel fait environ 20 m pour les données Sentinel-1) pour la détection de déplacements peu étendus (quelques pixels) et par la répétitivité des mesures (durée entre acquisitions). E.g., si le mouvement est important entre 2 acquisitions (relativement au quart de longueur d'onde du signal radar), il est alors difficile, voire impossible, de reconstituer correctement le mouvement.

2. Dispositifs expérimentaux et résultats

2.1. Mesures d'écoute sismique

Pour cette étude, nous avons réalisé les mesures d'écoute sismique avec des sismomètres CMG6TD 30 s à une fréquence de 200 Hz. 70 points de mesure ont été réalisés de nuit afin d'éviter au maximum les bruits sismiques d'origine anthropique avec une durée d'enregistrement de 1h30 à 2h. Les mesures ont été réalisées par groupes de capteurs (Figure 2), avec systématiquement le capteur B00 à une position fixe. Cette station de référence permet de prendre en compte la variation temporelle des sollicitations sismiques (vent, grêle, etc.), ce qui permet de comparer des mesures réalisées à différents instants. Des bruits d'origine anthropique ont été enregistrés sur l'ensemble des capteurs, principalement pour la gamme de fréquence au-delà de 10 Hz.

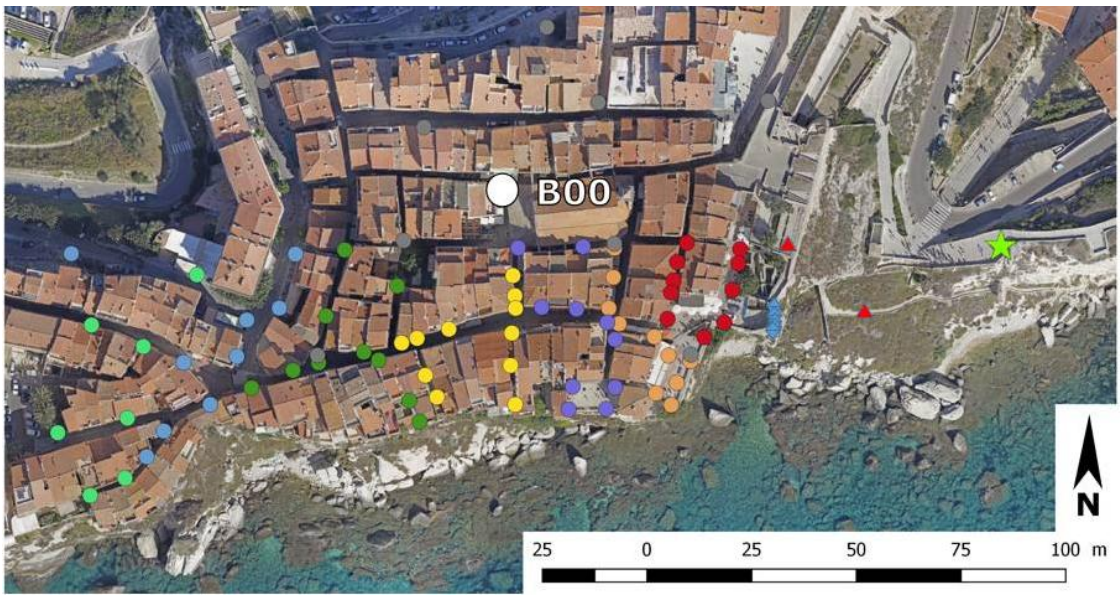

Figure 2: Localisation de l'instrumentation déployée en janvier 2019 à Bonifacio. Les mesures en écoute sismique sont symbolisées par des cercles et chaque groupe de mesures simultanées est signalé par une couleur différente, tandis que la station de référence B00 est symbolisée par un cercle blanc. Les positions des mesures GBSAR et GBRAR et des cornets réflecteurs sont symbolisées par une étoile verte, des triangles rouges et des losanges bleus, respectivement.

Les données ont été filtrées entre 0,5 et 20 Hz, puis des fenêtres de bruit ont été sélectionnées à l'aide d'un seuil sur le rapport signal-sur-bruit. Le spectre de chaque fenêtre de bruit est calculé, puis lissé. Les spectres sont moyennés pour chaque point de mesure et l'amplitude est comparée avec celle de la station de référence. L'analyse des résultats est effectuée dès que le nombre de spectre dépasse 50 pour un point de

mesure. Les pics en fréquence observés sont reportés 1) selon la direction verticale, 2) selon la direction horizontale avec l'azimut de vibration préférentiel (Figure 3). Par la suite, notre analyse se concentre sur les pics en fréquence observés sur au moins 4 capteurs.

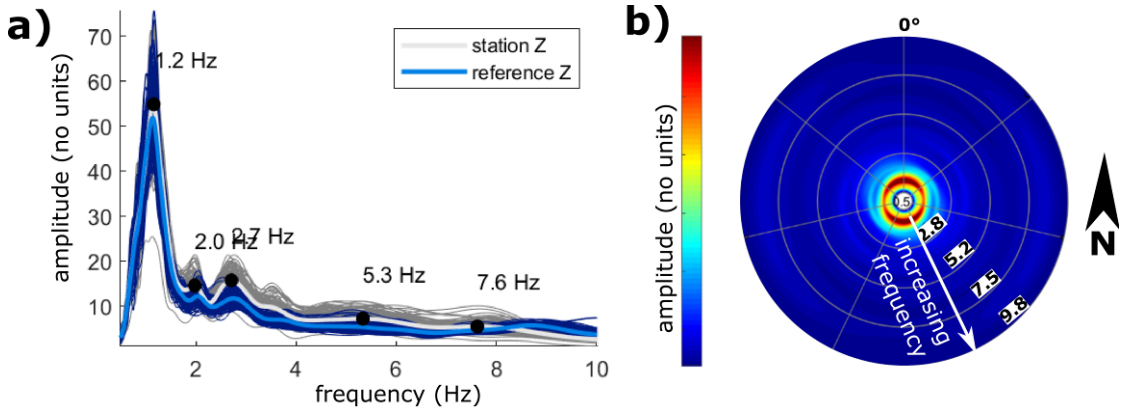

Figure 3 : a) Spectres obtenus pour 187 fenêtres de bruit pour le capteur B01 (en gris) à et la moyenne des spectres (en blanc) comparés au résultats obtenus simultanément pour le capteur de référence B00 (spectres en bleu et moyenne des spectres en bleu clair). b) Spectre du capteur B01 dans le plan horizontal selon l'azimut par rapport au Nord.

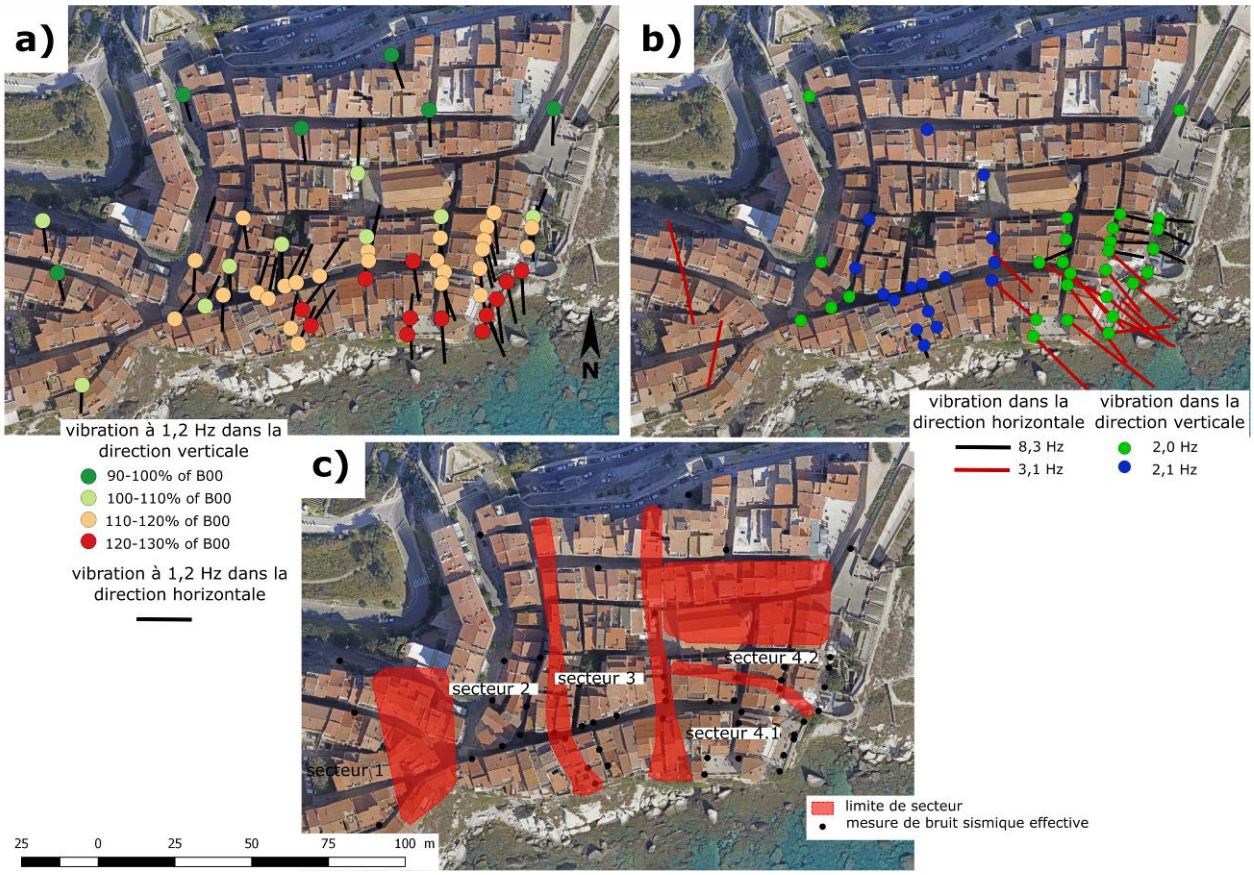

Figure 4 : a) Pics en fréquence observés à 1,1 -1,2 Hz à Bonifacio selon l'azimut de vibration préférentiel (traits) ou dans la direction verticale (ronds). Les amplitudes de vibrations sont normalisées avec celles du capteur de référence B00. b) Idem que la figure 4a pour les pics à 2,0, 2,1, 3,1 et 8,3 Hz. c) Interprétation de la répartition géographie des pics en fréquence en quatre blocs distincts, avec une sous-division du secteur 4.

Un pic en fréquence à 1,2 Hz est observé sur tous les capteurs à la fois dans la direction horizontale et la direction verticale. L'azimut de vibration préférentiel pour ce pic est assez homogène sur l'ensemble de la Citadelle suivant la direction N-S (Figure 4a), et on

observe l'augmentation des amplitudes de vibration dans la direction verticale plus on se rapproche des zones de surplomb dans la partie Sud-Est. Ces éléments laissent supposer qu'on observe ici un mode de résonance de la Citadelle dans son entièreté (voir aussi JNGG2020-297079 pour plus d'information à ce sujet).

Un pic à 0,8 Hz a également été observé sur de nombreux capteurs avec une direction de vibration E-O dans la partie Sud-Est de la Citadelle. La détection de ce pic semble perturbée par le traitement du signal appliqué, avec un filtre passe haut de 0,5 Hz qui a tendance à diminuer les amplitudes spectrales à proximité de cette fréquence. Il n'est donc pas encore possible de conclure s'il s'agit d'un mode de vibration local ou de l'ensemble de la Citadelle : des calculs sont en cours pour étudier ces hypothèses.

Entre 1,8 et 8,8 Hz, de nombreux pics en fréquence sont observés. La Figure 4b montre l'exemple de pics observés à 2,0, 2,1, 3,1 et 8,3 Hz. Chacun de ces pics s'exprime sur des secteurs géographiques délimités avec: 1) une constance des directions et des amplitudes de vibration pour chaque pic; 2) des limites de changement de comportement localisées au même endroits pour plusieurs pics. L'hypothèse la plus probable pour expliquer la présence de ces unités de vibrations est qu'elles correspondent à quatre grands blocs, probablement séparés par des fractures d'orientation N20 et N110 (Figure 4c) : 1) la largeur des pics est compatible avec des amortissements d'objets naturels, 2) ces zones ne correspondent pas à des ensembles de bâtiments jointifs.

Malgré le contexte urbain avec beaucoup de bruit sismique d'origine anthropique pouvant perturber les mesures, les enregistrements sismiques réalisés à la Citadelle montrent que cette méthode est à priori adaptée pour cartographier des limites de blocs. Ces données seront utilisées pour préciser la géométrie d'un modèle géomécanique de la falaise afin d'évaluer sa stabilité.

2.2. Mesures vibrométriques par GBRAR

Pour cette étude nous avons utilisé le radar IBIS qui fonctionne à une fréquence d'environ 17 GHz (bande Ku) en mode interférométrique afin de mesurer des variations de distance. En configuration IBIS-S (sur trépied) il est capable de mesurer des vibrations (avec des précisions sur leur amplitude meilleure que 0,1 mm) avec une fréquence d'acquisition de 200 Hz. Les mesures sont des séries temporelles de déplacements de points identifiés par leur distance au capteur (ce qui ne permet qu'une localisation partielle des points) à partir desquels on peut produire des spectres en fréquence. La portée maximum du radar est d'environ 1 km. Un accéléromètre peut être installé sur le capteur afin corriger les mesures des vibrations propres de l'instrument.

Deux emplacements ont été choisis pour le capteur IBIS-S ; ils offrent une vue sur la Place du Marché ou sur la falaise sous la Place du Marché (Figures 5a et b) et sont situés dans le jardin des Vestiges et sur le chemin d'accès à la mer près de la Chapelle Saint Roch en bas de la falaise (Figure 2). Le site du Jardin des Vestiges devrait être plus sensible aux mouvements horizontaux Nord-Sud (du fait d'un faible dénivelé par rapport aux bâtiments de la place de Marché et sa situation au Nord) alors que le site en bas de la falaise devrait être plus sensible aux mouvements verticaux et Est-Ouest. Les mesures se sont étalées sur environ deux jours par emplacement.

Afin d'améliorer le signal pour la mesure depuis le jardin des Vestiges, nous avons mis en place un jeu de 5 cornets réflecteurs sur le mur de la Place du Marché (Figure 5c).

Les données ont été traitées à l'aide de l'outil IBIS data viewer qui permet d'extraire un spectre en fréquence pour chaque série temporelle de déplacements (Figure 6).

Les observations à partir du Jardin des Vestiges montrent pour l'ensemble des Cornets Réflecteurs et un point à 67 m du capteur (correspondant à l'angle entre le mur de la place et la dernière maison) deux pics en fréquence clairement identifiables: 1) un 1er pic à 0,8-0,9 Hz, 2) un 2nd pic à 1,3-1,4 Hz. Les fréquences 8,5 Hz – 10 Hz semblent

affectées par les vibrations propres du capteur et/ou du site où il est placé (Jardin des Vestiges). Les autres gammes de fréquences semblent peu affectées.

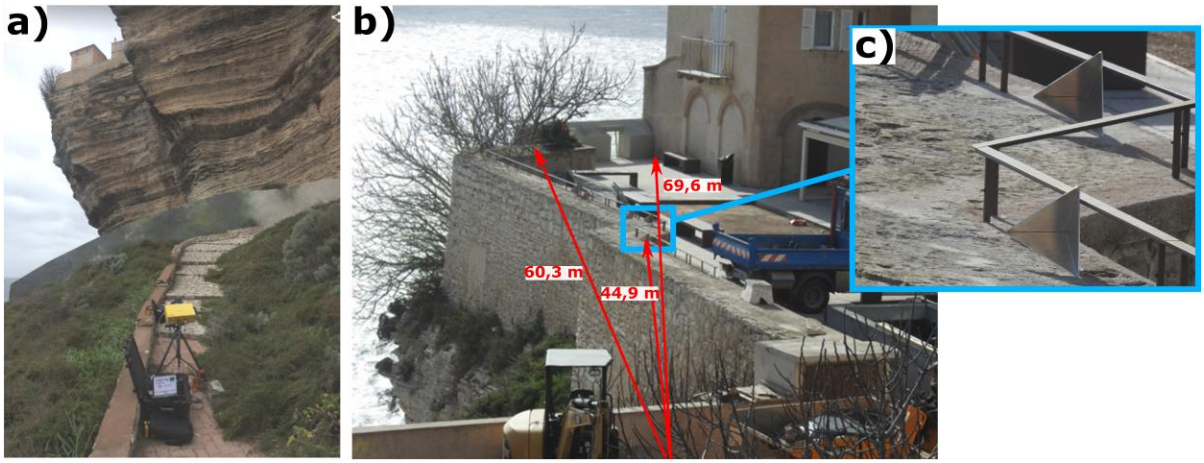

Figure 5 : a) position du capteur IBIS-S en bas de falaise, près de la Chapelle Saint Roch. b) position du capteur IBIS-S dans le jardin des Vestiges et distances entre le capteur et certains cornets réflecteurs ainsi que l'angle Sud-Ouest de la place du Marché. c) cornets réflecteurs (trièdres) fixés sur le mur de la place du Marché.

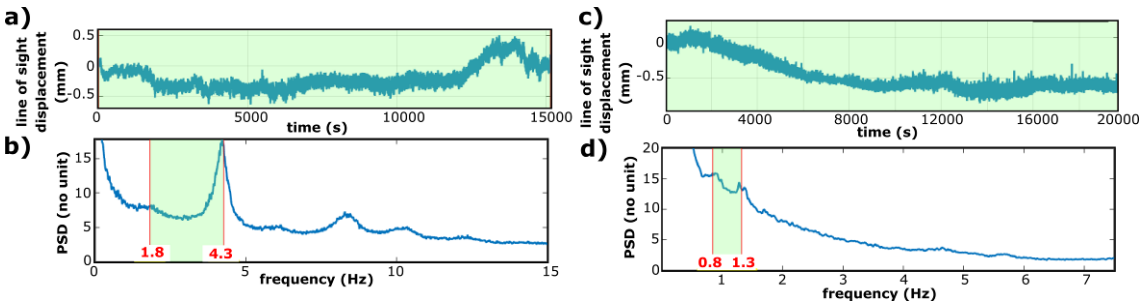

Figure 6 : a) déplacements enregistrés dans la direction de visée depuis le bas de la falaise vers un bâtiment situé place du marché et b) le spectre en fréquence correspondant. On notera les pics de fréquences à 1,8 Hz et 4,3 Hz. Bien que mesuré depuis une distance de 92 m ce spectre est le meilleur que nous ayons obtenu au cours de cette étude. c) déplacements enregistrés dans la direction de visée depuis le jardin des Vestiges vers un cornet réflecteur et d) le spectre en fréquence correspondant.

Les observations à partir à partir du bas de la Chapelle Saint Roch montrent des pics en fréquence à : 1) 1,7-1,8 Hz sur la falaise sous la place du Marché mais aussi sur la falaise sous le Jardin des Vestiges, 2) 2,3-2,5 Hz sur deux profils sous la place du Marché, 3) 1,8 Hz, 4,3 Hz mais également 6,1 Hz 8,3 et 10,4 Hz pour un profil sur le bâtiment situé Place du Marché. Ce profil est particulièrement peu bruité et correspond (facilement localisable vue la distance de 92 m) à un bâtiment. La fréquence de 1,8 Hz semble ne pas être spécifique à ce bâtiment (car clairement identifiée sur plusieurs points situés à différentes distances du capteurs) mais au sous-sol. En revanche les fréquences à 4,3 et 6,1 Hz ne sont identifiées que pour ce point. Les fréquences à 8,3 et 10,4 Hz peuvent être liées à des vibrations propres du capteur ou affectant le haut et le bas de la falaise car en partie atténuées dans le spectre lorsqu'on prend en compte l'information fournie par l'accéléromètre installé sur le capteur.

Ces mesures permettent de confirmer que les pics en fréquence observés par écoute sismique en tête de falaise à 0,8, 1,7-1,8 et 8,3 Hz sont aussi observés par télédétection sur la paroi de la Citadelle. Elles confirment l'hypothèse qu'il s'agit d'observations liées aux modes de résonance de compartiments rocheux.

Par ailleurs, ces mesures permettent de mettre en évidence les fréquences de résonance d'un bâtiment typique de la Citadelle (2 à 3 étages en maçonnerie).

2.3. Mesures de déformation par interférométrie SAR satellitaire

Un traitement de type « stacking » a été choisi pour réaliser l'interférométrie SAR satellitaire. Ce choix s'appuie sur l'hypothèse que les mouvements de déformation sont a priori de faibles amplitude (< 2-3 mm/an) et très locaux (quelques centaines de mètres). Une estimation de la vitesse moyenne semble donc un indicateur suffisant pour identifier un éventuel mouvement. Dans le cas où un mouvement plus significatif serait observé, une méthode plus élaborée pourra être utilisée pour traiter les données à posteriori. 77 images Sentinel 1 A et B couvrant la période 2015-2018 ont été utilisée (les satellites de la constellation Sentinel 1 A et B ont une répétitivité de 12 j). Le pas d'échantillonnage a été fixé à 15 m (la résolution spatiale des données Sentinel-1 étant de l'ordre de 20 m) afin d'avoir un niveau de détail suffisant.

Le traitement interférométrique a permis (Figure 7) pour la période 2015-2018: 1) de détecter une faible subsidence entre le port et la rue Paul Boyer (<1,5 mm/an), 2) de montrer que la zone d'intérêt (le secteur de la Place du Marché) ne semble pas montrer de subsidence supérieure à 0,8 mm/an, ce qui est de l'ordre de l'erreur de mesure. Dans les limites des capacités de la méthode (notamment en raison de la résolution de 20 m des capteurs Sentinel-1), nous pouvons dire que le secteur de la Place du Marché n'a pas subi de mouvement significatif sur la période 2015-2018.

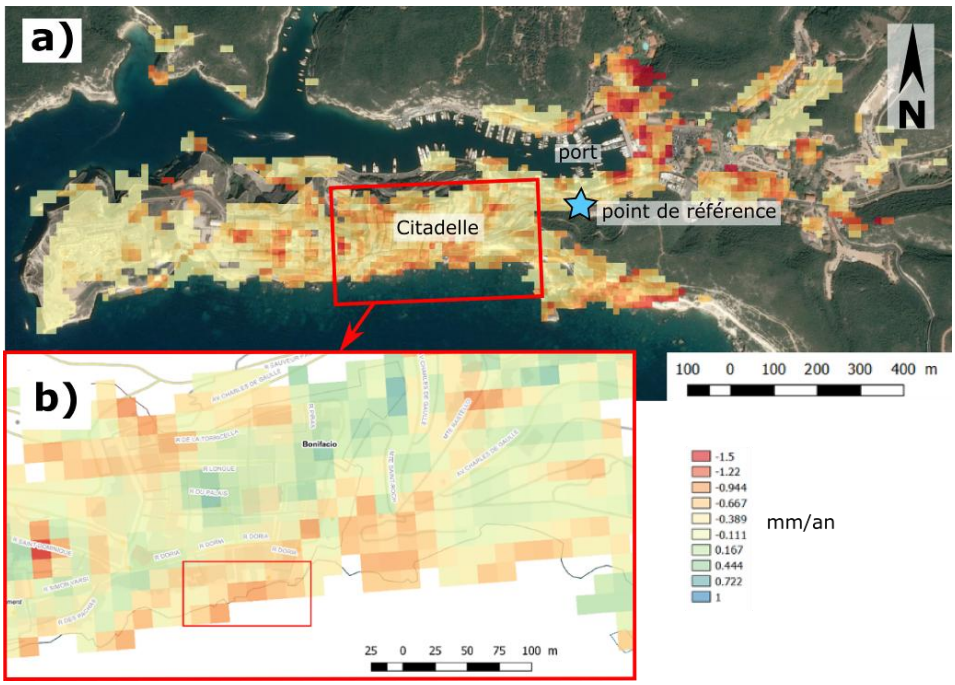

Figure 7: a) Carte de déplacements en ligne de visée du satellite superposé à une image optique de la Presqu'île de Bonifacio. Les zones non couvertes correspondent à des secteurs à faibles cohérence interférométrique (notamment en raison de présence de végétation). L'étoile bleue indique le point choisi comme référence (les mouvements sont mesurés relativement à ce point). b) zoom sur le secteur d'intérêt, la Place du Marché de la Citadelle de Bonifacio.

2.4. Mesures de déformation par GBSAR

Le radar IBIS mentionné en section 2.2 peut être déployé en configuration IBIS-L, c'est-à-dire positionné sur un rail de 2,5 m sur lequel il se déplace afin de permettre un traitement de synthèse d'ouverture. Une 1ère campagne de mesure de 3 j a été réalisée en janvier 2019 en vue de mettre en évidence d'éventuels déplacements lents dans la direction de visée par comparaisons avec de futurs acquisitions. La position du capteur est choisie en

fonction de la facilité d'accès, du positionnement face à la falaise et de l'accès à l'électricité (Figure 2, remerciements: Mairie de Bonifacio). Outre un relevé photographique, la position du rail a été matérialisée par l'implantation de clous.

3. Conclusion

Nous présentons ici 4 méthodes géophysiques complémentaires qui ont permis d'améliorer la caractérisation de l'aléa « éboulement » à la Citadelle de Bonifacio :

1) des mesures d'écoute sismiques et de vibrations à distance par interférométrie GBRAR qui ont permis d'estimer certaines 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 permis d'identifier un mode de résonnance de la Citadelle ainsi que différentes zones de vibrations homogènes, interprétées comme des blocs distincts. En particulier, un bloc en surplomb est observé dans la partie Sud-Est de la Citadelle;
2) de l'interféromérie SAR satellitaire a permis de confirmer la stabilité (en terme de subsidence) du secteur de la place du Marché sur la période 2015-2018 et mis en évidence une légère subsidence sur le secteur du Port;
3) une 1ère campagne GBSAR a été effectuée en vue de mettre en évidence d'éventuels déplacements lents de la falaise par comparaisons avec de futurs mesures.

4. Références bibliographiques

Bottelin, P., Jongmans, D., Baillet, L., Lebourg, T., Hantz, D., Lévy, C., ... & Turpin, J. (2013). Spectral analysis of prone-to-fall rock compartments using ambient vibrations. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 18(4), 205-217.

Burjánek, J., Gischig, V., Moore, J. and Fäh, D. (2017). Ambient vibration characterization and monitoring of a rock slope close to collapse. Geophys. J. Int., 212(1), 297-310.

Burjánek, J., Moore, J., Yugsi Molina, F. and Fäh, D. (2012). Instrumental evidence of normal mode rock slope vibration. Geophys. J. Int., 188(2), 559-569.

Colombero, C., Baillet, L., Comina, C., Jongmans, D., Larose, E., Valentin, J., & Vinciguerra, S. (2018). Integration of ambient seismic noise monitoring, displacement and meteorological measurements to infer the temperature-controlled long-term evolution of a complex prone-to-fall cliff. Geophys. J. Int., 213(3), 1876-1897.

Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: Data interpretation and error analysis, Springer Verlag edition.

Iannucci, R., Martino, S., Paciello, A., D'Amico, S., & Galea, P. (2020). Investigation of cliff instability at Għajn Ħadid Tower (Selmun Promontory, Malta) by integrated passive seismic techniques. Journal of Seismology, 1-20.

Kleinbrod, U., Burjánek, J. and Fäh, D. (2019). Ambient vibration classification of unstable rock slopes: A systematic approach. Eng. Geol., 249, 198-217.

Lévy, C., Baillet, L., Jongmans, D., Mourot, P., & Hantz, D. (2010). Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France). J. Geohys. Res., 115(F4).

Massonnet D., Feigl K. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Rev. Geophys., 36, n°4, p. 441

Negulescu C., Luzi G., Crosetto M., Raucoules D., Roullé A., Monfort D., Dewez T., Pujades L., Colas B. (2013). Comparison of seismometer and radar measurements for the modal identification of civil engineering structures, Eng. Struct., vol 51, p. 10-22

Valentin, J., Capron, A., Jongmans, D., Baillet, L., Bottelin, P., Donze, F., Larose E. and A. Mangeney (2017). The dynamic response of prone-to-fall columns to ambient vibrations: comparison between measurements and numerical modelling. Geophys. J. Int., 208(2), 1058-1076.