

SPECIFICITE DE L'ECOUTE SISMIQUE PASSIVE EN CONTEXTE DE PRESQU'ILE POUR L'ETUDE DU RISQUE ROCHEUX

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

Clara LEVY¹, E. Diego MERCERAT², Mickaël DELATRE¹, Marie MALASCRABES³, Baptiste VIGNEROT⁴, Etienne BERTRAND², Muriel GASC⁵

¹ BRGM, Orléans, France

² Equipe de Recherche MouvGS, CEREMA Méditerranée, Sophia-Antipolis, France

³ Service Risques Géologiques, CEREMA Méditerranée, Sophia-Antipolis, France

⁴ BRGM, Montpellier, France

⁵ Equipe de Recherche MouvGS, CEREMA Méditerranée, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – De l'écoute sismique a été réalisée à Bonifacio (Corse du Sud) sur deux sites proches. Pour chaque site, un 1^{er} pic en fréquence est observé et correspond à un grand mouvement d'ensemble dans la direction nord-sud, avec une amplitude des vibrations verticales plus importante pour les zones de surplomb en bord de falaise. L'origine et la répartition géographique des pics en fréquence supérieurs est discutée.

ABSTRACT – Seismic noise monitoring was carried out on the Bonifacio peninsula (south of Corsica) at two nearby sites. For each site, a 1st peak in frequency is observed and corresponds to a large overall movement in the north-south direction, with a greater amplitude of vertical vibrations for overhanging areas at the edge of the cliff. The origin and geographic distribution of the higher frequency peaks is discussed.

1. Introduction

Il existe depuis une dizaine d'années une méthode géophysique basée sur l'écoute de bruit de fond sismique qui permet de mettre en évidence la présence de compartiments rocheux instables. Cette méthode a été validée pour des volumes instables de quelques milliers à quelques centaines de milliers de mètres cubes et pour différents contextes (roches volcaniques, sédimentaires, métamorphiques, géométries différentes, etc. ; Lévy, 2011; Burjānek et al., 2012; Bottelin, 2014; Burjānek et al., 2017; Colombero et al., 2018 ; Valentin, 2018). Tous les compartiments instables ainsi étudiés ont montré une réponse fréquentielle avec des pics en fréquence persistant dans temps, contrairement au massif stable adjacent. Ces pics en fréquence sont interprétés comme les fréquences de résonance des compartiments. Pour le 1^{er} pic en fréquence F0, l'amplification relative entre les stations de référence situées sur le massif stable et les stations situées sur les structures instables présente toujours une direction préférentielle, avec un maximum d'amplification généralement observé dans une direction perpendiculaire aux fissures retrouvées en surface (Burjanek et al., 2012). Dans un article de review, Kleinbord et al. (2019) souligne qu'il n'existe pas de relation universelle entre la valeur du 1^{er} pic en fréquence F0 et le volume du compartiment instable. En effet, la valeur de F0 est aussi influencée par d'autres caractéristiques du compartiment rocheux, dont sa géométrie, ses propriétés mécaniques et son degré d'attachement au massif (Lévy, 2011).

Le contraste de réponse fréquentielle observable entre les zones stables et instables d'un massif rocheux a été exploité par Iannucci et al. (2018) afin de cartographier systématiquement la présence de compartiments instables pour une île de l'archipel de

Malte. Ces auteurs ont mesuré la réponse fréquentielle sur l'île selon un maillage dense représentant 116 points de mesures. Un 1^{er} pic en fréquence entre 1,5 et 1,8 Hz est observé sur tous les capteurs. Ce pic est interprété comme le 1^{er} mode de résonance du plateau sédimentaire constituant le corps de l'île. A plus haute fréquence, d'autres pics sont observés entre 3,3 et 20 Hz pour des capteurs situés en périphérie de l'île et au bord du plateau, c.à.d. en bord de falaise. Les observations de fissures en tête du plateau montrent que les zones situées sous ces capteurs sont potentiellement des blocs instables. Cette hypothèse semble confirmée par des valeurs de pics en fréquences compatibles avec les dimensions assumées pour chacun des blocs, ainsi que par une orientation préférentielle des vibrations sismiques perpendiculairement aux fissures principales (qui sont parallèles aux bords du plateau).

Ci-après, nous présentons les résultats d'une étude similaire dont l'objectif est la cartographie de compartiments rocheux potentiellement instables sur la presqu'île de Bonifacio (Corse). Des mesures d'écoute sismique ont été réalisées par le BRGM et le CEREMA sur deux sites de la presqu'île. Pour chaque site, les observations montrent que tous les capteurs présentent un 1^{er} pic en fréquence identique, correspondant à un grand mouvement d'ensemble de la presqu'île dans la direction nord-sud, avec une amplitude des mouvements verticaux plus importante sur les zones de surplomb en bord de falaise.

La mise en évidence de zones potentiellement instables est plus complexe que dans l'exemple de Iannucci et al. (2018), puisque des pics à plus haute fréquence sont observés sur l'ensemble des secteurs instrumentés. La désignation de stations sismiques pouvant être utilisées comme références s'avère délicate. Nous testons plusieurs méthodes de traitement du signal dans l'objectif de préciser l'interprétation des pics en fréquences observés au-delà du 1^{er} pic en fréquence. Nous discutons la possibilité de l'existence de sous-blocs composants la presqu'île et de l'utilité des différentes méthodes de traitement du signal pour interpréter les résultats.

2. Présentation des sites d'études à la presqu'île de Bonifacio, Corse

La presqu'île de Bonifacio est un site hautement touristique de Corse, dont certaines zones sont actuellement classées en aléa fort pour le risque d'éboulement. Elle est composée de formations sédimentaires hétérogènes du Miocène de pendages subhorizontaux, principalement des calcarénites et grès (Figure 1b). Cette formation est composée d'un empilement de couches sédimentaires de sables, calcarénites/grès, plus ou moins indurées. Les couches mesurent entre 10 et 30/50 cm d'épaisseur. Cet empilement traduit le remplissage d'un bassin sédimentaire, avec une tendance de la base au sommet à la diminution des couches de sables au profit des couches de calcarénites très indurées. Au niveau de la Citadelle et du surplomb de Sutta-Rocca (Figure 1a), ces couches peuvent être regroupées en 5 sous-ensembles homogènes. D'un point de vue mécanique, cette formation, se traduit par une couche basale moins compétente et plus fragile de 6 m d'épaisseur au niveau de la Citadelle (L5 en Figure 1b), et de 10/15 m au niveau du surplomb de Sutta Rocca, surmontée d'une couche plus compétente regroupant les faciès les plus indurés (L1 à L4 en Figure 1b). Ceci a été mis évidence par les d'essais réalisés sur des carottes prélevées en forage et se retrouve également dans les études antérieures notamment celles de André et Al, 2011 et Reynauld et Al, 2012.

Les secteurs étudiés présentent des falaises de 45 à 65 m de haut, dont l'érosion en pied par la mer Méditerranée a permis la création de surplombs de plus de 20 m (Figure 1c). En plus des mécanismes de mise en surplomb, le risque d'éboulement est conditionné par la fracturation interne du massif rocheux, avec des familles de fractures sub-verticales N20° et N110°. Des fractures N110° semblent se désolidariser de la face

Sud (plan de falaise) des compartiments rocheux en surplomb pour les deux sites (Figure 1a).

3. Présentation des dispositifs expérimentaux

Les deux sites instrumentés pour de l'écoute sismique à Bonifacio sont la Citadelle et Sutta-Rocca (Figure 1a). Ces sites sont très proches avec des caractéristiques morphologiques et géologiques similaires. Le déploiement des capteurs sismiques a été réalisé selon des géométries distinctes : 1) une instrumentation composée de sismomètres large-bande le long d'un profil en travers de la presqu'île (10 capteurs installés sur un profil de 100 m de longueur, Figure 2a) et 2) une instrumentation composée de sismomètres large-bande répartis selon un maillage dense (70 capteurs sur 16580 m², Figure 2b).

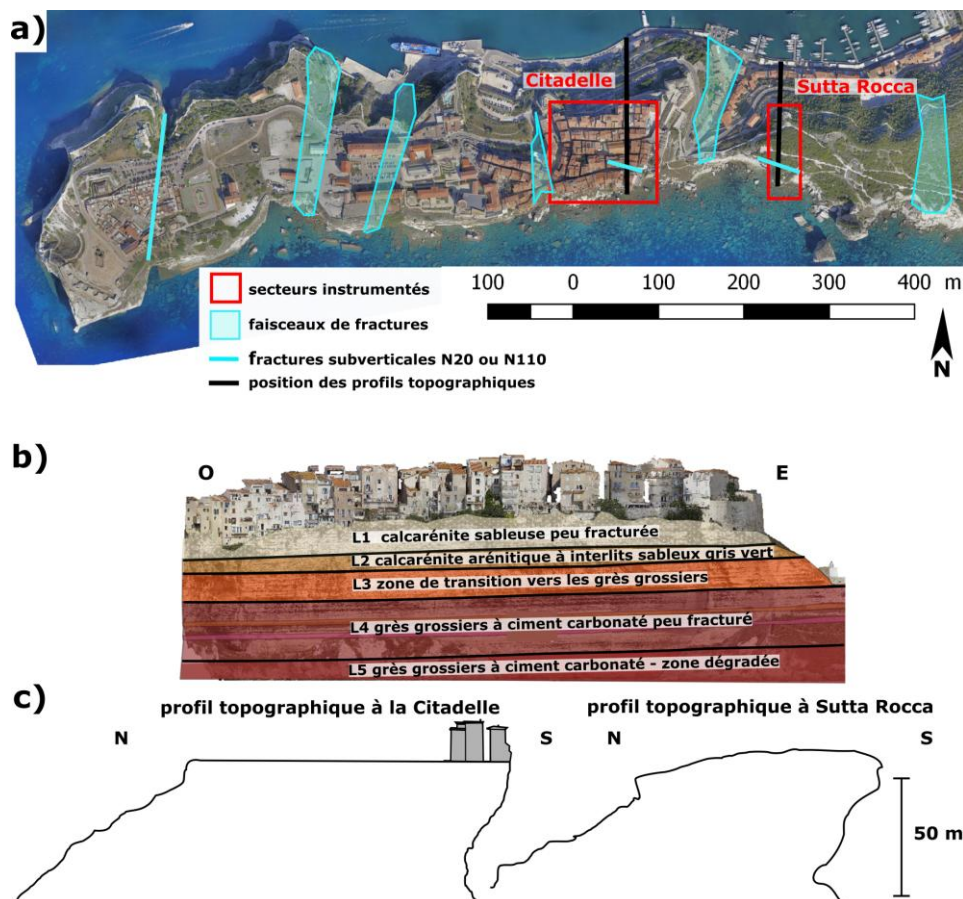


Figure 1. a) Orthophotographie de la presqu'île de Bonifacio. b) Description de la séquence stratigraphique de la Citadelle de Bonifacio. c) Profils topographiques de la presqu'île de Bonifacio au niveau de la Citadelle et de Sutta Rocca.

La campagne de Sutta Rocca a eu lieu en octobre 2016. Les enregistrements réalisés avec des sismomètres Lennartz 3D-5 s ont une durée de 4 h pour le réseau rouge et 3 h pour le réseau jaune (Figure 2a) à une fréquence de 150 Hz. L'analyse des deux réseaux au moyen des capteurs 5 et 6 communs permet de dresser un profil complet N-S de la Presqu'île. Les capteurs 1 et 2 sont situés à l'aplomb du surplomb Sud (écaille de Sutta Rocca), les capteurs 3 et 4 sont situés au niveau probable de la fracture N110°. Les capteurs 5 et 6 sont supposés être loin de la zone d'influence de l'écaille, au niveau du massif intact et servent de référence. Les capteurs 7 et 8 sont réputés dans une zone

stable, tandis que les capteurs 9 et 10 sont disposés sur le surplomb Nord de moindre volume comparé à l'écaïlle de Sutta Rocca.

Le BRGM a réalisé des mesures d'écoute sismique sur la Citadelle de Bonifacio en janvier 2019 avec des sismomètres CM6 TD dont la réponse est plate entre 0,03 et 50 Hz à une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz. 70 points de mesure ont été réalisés de nuit afin d'éviter au maximum les bruits sismiques d'origine anthropique. Pour chaque point de mesure, la durée de l'enregistrement est comprise entre 1h30 et 2h. Les mesures ont été réalisées par groupes de capteurs (Figure 2b), 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 5a).

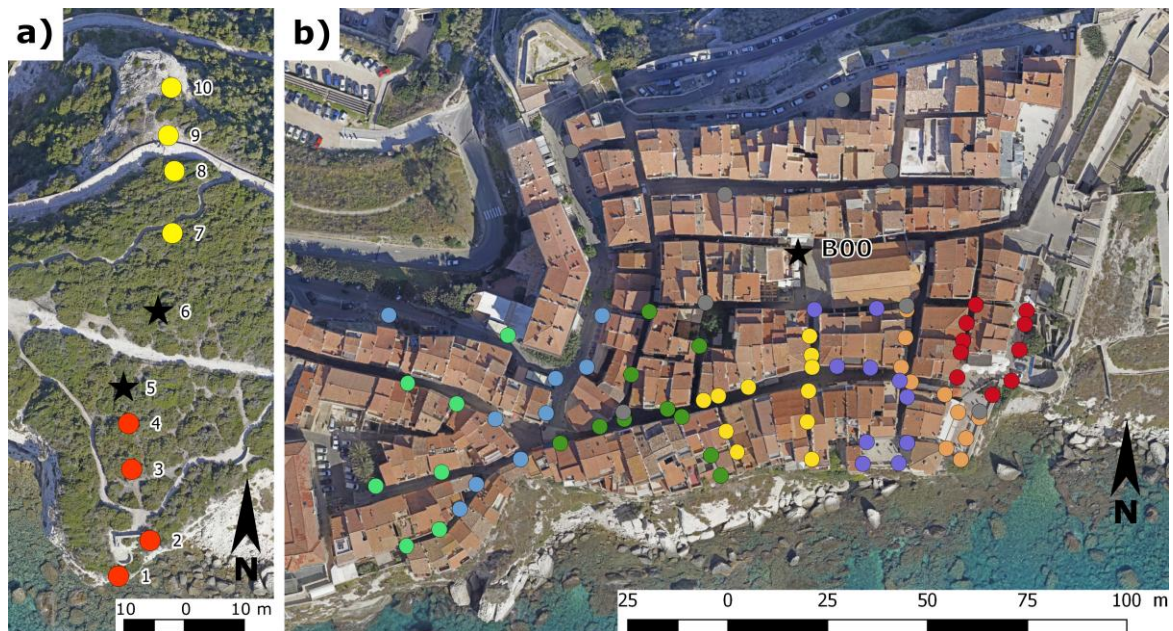


Figure 2 : a) Position des mesures en écoute sismique en octobre 2016 à Sutta Rocca (Bonifacio) et b) en janvier 2019 à la Citadelle (Bonifacio). Chaque groupe de mesures simultanées est signalé par une couleur différente. Les stations de référence, communes à tous les groupes de mesures pour un site sont signalées par des étoiles noires.

4. Résultats

4.1. Le site de Sutta Roca

À partir des densités de puissance spectrale (PSD) calculées sur 3 h de données pour chaque réseau, plusieurs caractéristiques peuvent être observées : a) 4 pics sont présents dans presque toutes les stations autour de 1,7 Hz, 3,1 Hz, 4,3 Hz et 6,6 Hz; b) outre la nette différence de puissance de bruit entre les deux configurations, les deux premiers pics spectraux sont mieux exprimés dans les stations les plus au Sud (capteurs 1 à 5) et les deux derniers dans les stations nord (capteurs 6 à 10); et c) à l'exception du premier pic à 1,7 Hz, tous les autres pics sont mieux exprimés dans les composantes verticale et est-ouest, au lieu de la direction nord-sud (Figure 3a). Ceci est en quelque sorte contre-intuitif par rapport à l'orientation de la fracture N110° située en arrière du surplomb Sud, ce qui peut indiquer que cette fracture n'est pas exprimée dans les unités géologiques supérieures. La Figure 3d montre les PSD des composantes horizontales et leur distribution le long du profil. Les pics mis en évidence peuvent être suivis tout au long

du profil avec de légères différences d'amplitude et d'azimut, mais montrent le même comportement général. L'analyse de la Figure 3a met en avant l'amplitude de puissance spectrale dans le sens vertical par rapport aux directions horizontales.

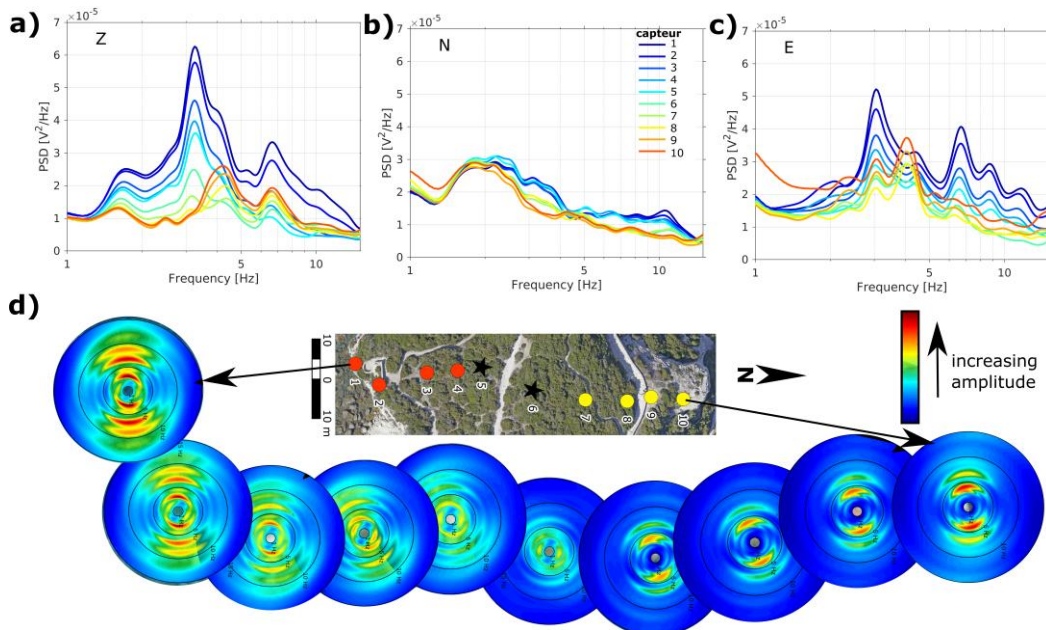


Figure 3 : a) à c) Moyennes de la densité de puissance spectrale (PSD) sur 3 h de vibrations ambiantes pour les 3 composantes des capteurs 1 à 10, localisés du Sud vers le Nord. b) PSD des composantes horizontales du profil de mesure à Sutta Rocca

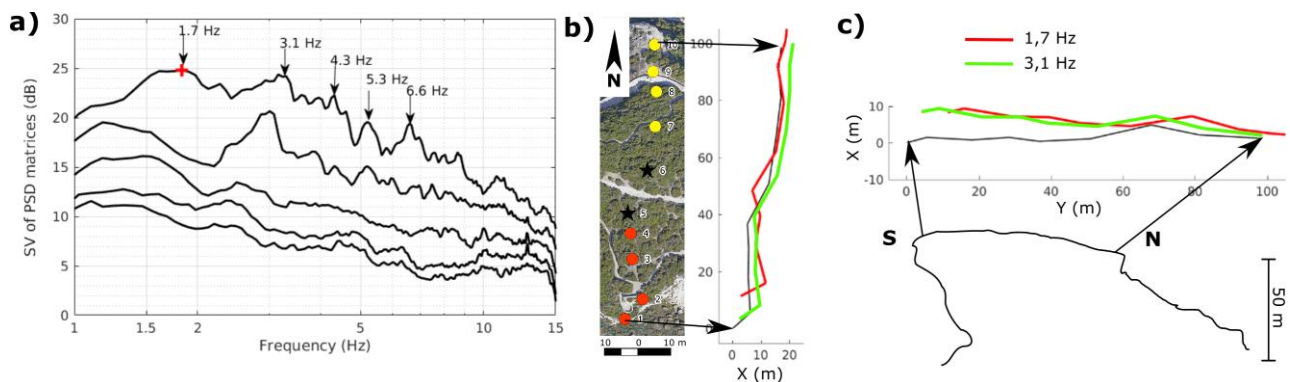


Figure 4 : a) Cinq premières valeurs propres de la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice d'intercorrélation. Les fréquences modales identifiées sont marquées de flèches verticales. b) et c) Vues en plan et en profil N-S des 1^{er} et 2nd modes identifiés à partir de l'analyse FDD. Les lignes rouges/vertes et noires représentent respectivement la forme déformée et la forme statique. La valeur absolue des déplacements de la déformée modale est exagérée uniquement à des fins de visualisation.

Afin d'analyser les données continues acquises le long du profil, une technique multi-capteur d'Analyse Modale Opérationnelle (OMA par ses sigles en anglais) est appliquée aux enregistrements de vibrations ambiantes. Ce faisant, nous nous attendons à mieux capturer le comportement dynamique de la zone de surplomb. Cette technique a été largement utilisée en ingénierie mécanique et structurale pour identifier les paramètres modaux (fréquences, amortissement et déformées modales) de systèmes linéaires à partir de mesures de vibrations. Parmi les différentes méthodologies OMA, la plupart des applications sont basées sur la technique nommée Frequency Domain Decomposition (FDD). La FDD s'appuie essentiellement sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice de densité spectrale de puissance des signaux pour récupérer les fonctions propres du système mécanique. Pour plus de détails sur la technique, le lecteur peut se

référer aux études approfondies de Zhang and Brincker (2005) et Brincker (2014). Trois heures de vibrations ambiantes ont été analysées par des fenêtres de 10 s avec une superposition de 50 %. Les résultats sont résumés dans la Figure 4a où les cinq premières valeurs singulières sont affichées. Le premier mode autour de 1,7 Hz exprime une composante N-S claire ainsi qu'un mouvement vertical important, spécialement au niveau du surplomb Sud. À partir de l'analyse de déformé modale, nous interprétons ce mode comme le mouvement de tout le promontoire dans la direction perpendiculaire à la ligne de côte. Le 2nd mode identifié autour de 3,1 Hz montre un mouvement E-W relativement important également associé à un fort mouvement vertical. Ces deux premiers modes correspondent aux principaux pics déjà observés dans l'analyse de station unique illustrée en Figure 3.

4.2. Le site de la Citadelle

Les données sismiques acquises sur la Citadelle de Bonifacio ont été filtrées entre 0,5 et 20 Hz avec un filtre butterworth d'ordre 4. Des fenêtres de bruit sismiques ($l=60$ s) ont été sélectionnées dans le signal à l'aide d'un seuil sur le rapport signal sur bruit de 3 ($STA/LTA < 3$). Le spectre de chaque fenêtre de bruit est calculé, puis lissé avec la fonction de Konno-Ohmachi ($b=40$). L'ellipticité du signal est estimée en fonction de la fréquence en utilisant la formule présentée dans Pinnegar (2006). Les spectres sont moyennés pour chaque point de mesure et l'amplitude est comparée avec celle de la station de référence (Figure 5b). 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 5c). Par la suite, notre analyse se concentre sur les pics en fréquence observés sur au moins 4 capteurs parmi les 70 points initiaux.

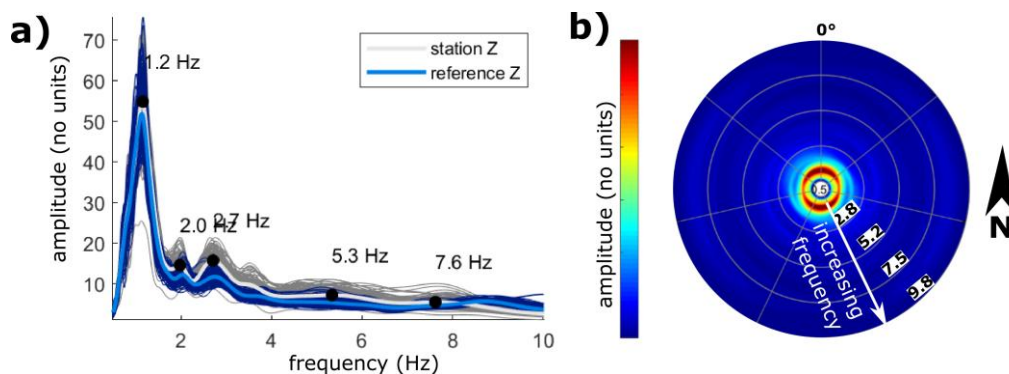


Figure 5 a) Spectres obtenus pour 187 fenêtres de bruit pour le capteur B01 (en gris) à proximité du capteur de référence B00 et la moyenne des spectres (en blanc) et spectres obtenus simultanément pour le capteur de référence B00 (en bleu) et la moyenne des spectres (en bleu clair). b) Spectre du capteur B01 dans le plan horizontal selon l'azimut par rapport au Nord. Du centre du cercle vers le bord du cercle, la fréquence varie de 0,5 Hz à 10 Hz. L'amplitude du spectre est représentée avec l'échelle de couleurs.

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 6a), 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 (Figure 6b). Comme pour le site de Sutta Rocca, ces observations sont compatibles avec l'hypothèse d'un mode de résonance de la Citadelle dans son entièreté. Une confirmation pourrait être obtenue en appliquant la FDD afin d'obtenir la déformée modale associée à ce pic en fréquence. La

largeur du pic est compatible avec un amortissement de plus de quelques pourcents (4-5 %), ce qui est attendu pour la vibration d'un objet naturel.

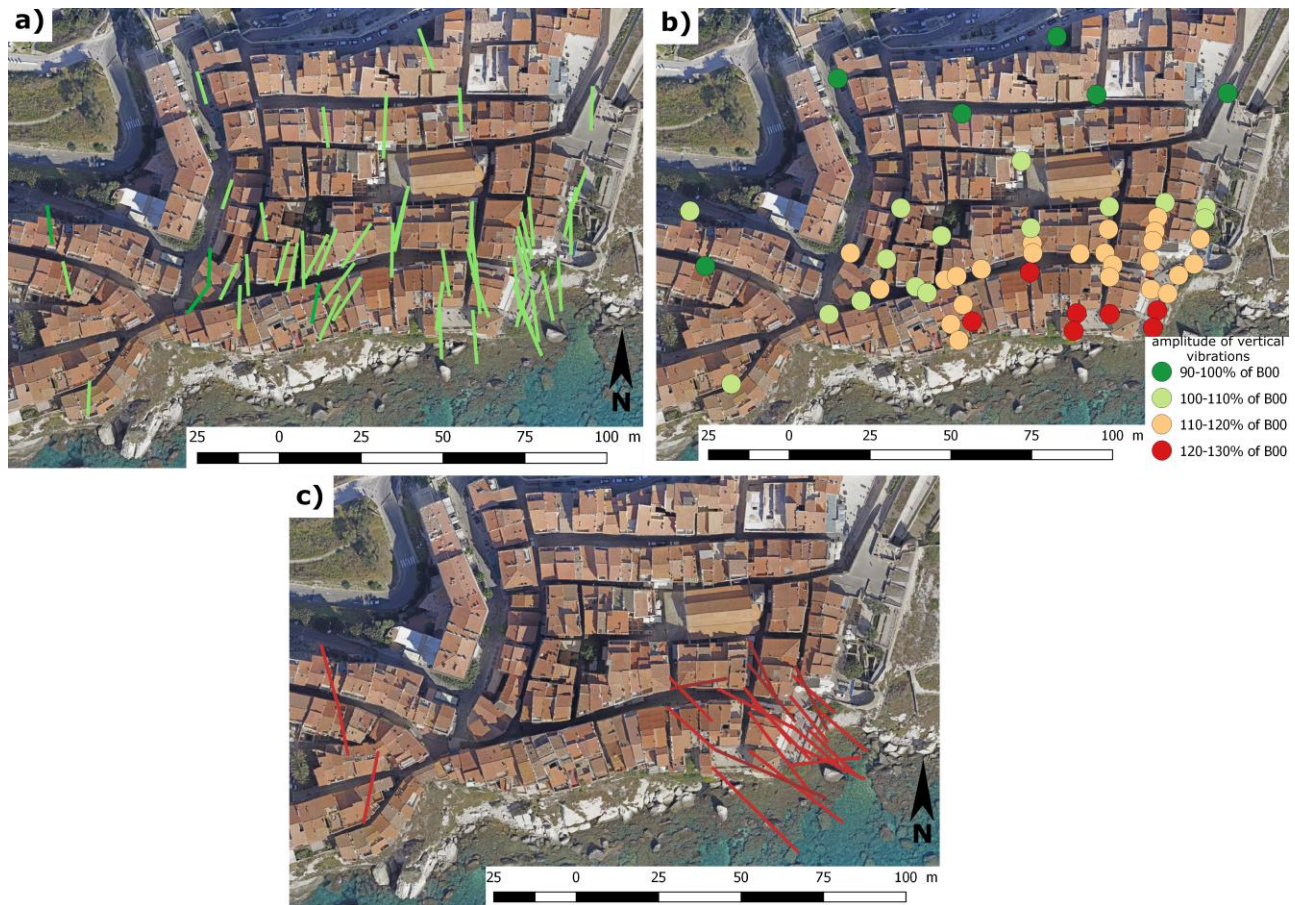


Figure 6 : a) Pics en fréquence observés à 1,1 -1,2 Hz à Bonifacio selon l'azimut de vibration préférentiel. La longueur des traits est proportionnelle à l'amplitude de vibration, normalisée avec celle du capteur de référence B00. b) Amplitudes de vibration dans la direction verticale observées à 1,1- 1,2 Hz à Bonifacio et normalisées par rapport à la station B00. c) Idem que la figure 7a) pour les pics à 3,1- 3,2 Hz.

Entre 1,8 et 8,8 Hz, de nombreux pics en fréquence sont observés sur des secteurs localisés. La Figure 6c montre l'exemple d'un pic observé à 3,2 Hz qui s'exprime sur 2 secteurs de la Citadelle, avec pour chaque secteur des azimuts et des amplitudes de vibration homogènes. Comme pour cet exemple, on observe systématiquement pour ces pics en fréquence: 1) une constance des directions et des amplitudes de vibration pour différents pics en fréquence; 2) les limites de changement de comportement sont localisées au même endroits pour les différents pics en fréquences.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer la présence de ces unités de vibrations est qu'elles correspondent à quatre grand blocs, probablement séparés par des fractures d'orientation N20°: 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 (voir aussi JNGG2020-294413 pour plus de détails).

5. Conclusions

L'analyse fréquentielle a permis d'identifier des similitudes entre les sites de la Citadelle et de Sutta-Rocca à Bonifacio: le 1er pic en fréquence observé dans les vibrations ambiantes correspond à un mouvement d'ensemble des sites selon la direction N-S avec une composante verticale plus importante au Sud où se trouvent les zones en surplomb.

Ce pic est d'environ 1,2 Hz à la Citadelle et de 1,7 Hz à Sutta Rocca. On peut imaginer que ces pics correspondent à des mouvements d'ensemble de grands compartiments constituant la presqu'île, délimités par une famille régionale de failles N20 qui traversent la presqu'île de part en part à intervalles réguliers. La légère différence de fréquence pour le 1^{er} pic entre sites est sûrement liée au fait que la presqu'île est plus large au niveau de la Citadelle qu'à Sutta Rocca, le volume mis en vibration à la Citadelle est donc probablement plus important (Figure 1c). A partir de ce 1^{er} mode, les résonances suivantes présentent aussi des mouvements verticaux importants et un azimuth préférentiel de vibration E-W à Sutta-Rocca (e.g., parallèle à la falaise) tandis que la répartition géographique des pics en fréquence à la Citadelle semble s'organiser selon différentes zones de vibrations homogènes et ont été interprétées comme des sous-blocs. Une analyse modale multi-capteurs sera réalisée pour vérifier cette hypothèse au niveau du site de la Citadelle.

6. 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.
- Brincker, Rune (2014). Some Elements of Operational Modal Analysis. *Shock and Vibration* 2014, e325839, doi.org/10.1155/2014/325839.
- 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.
- 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.
- 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.
- Iannucci, R., Martino, S., Paciello, A., D'Amico, S., & Galea, P. (2020). Investigation of cliff instability at Ġħajn 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. *Engineering Geology*, 249, 198-217.
- Lévy, C., Baillet, L., Jongmans, D., Mouro, P., & Hantz, D. (2010). Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
- Pinnegar, C. R. (2006). Polarization analysis and polarization filtering of three-component signals with the time-frequency S transform. *Geophys. J. Int.*, 165(2), 596-606.
- 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.
- Zhang, L., & Brincker, R. (2005). An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues. In R. Brincker, & N. Møller (Eds.), *Proc. 1st Int. Operational Modal Analysis Conference*, April 26-27, 2005, Copenhagen, Denmark, pp. 179-190.