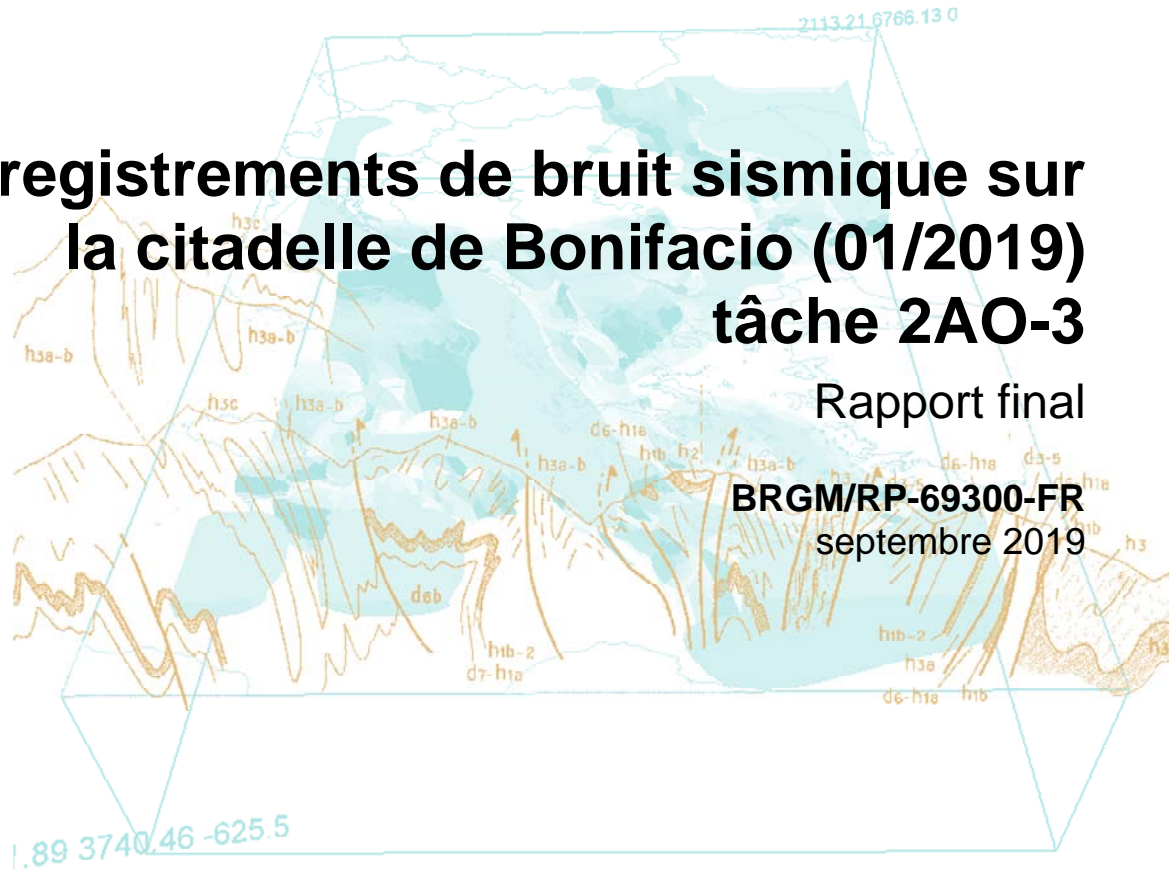




Enregistrements de bruit sismique sur la citadelle de Bonifacio (01/2019) tâche 2AO-3

Rapport final

BRGM/RP-69300-FR
septembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Enregistrements de bruit sismique sur la citadelle de Bonifacio (01/2019) tâche 2AO-3

Rapport final

BRGM/RP-69300-FR
septembre 2019

AP18BAS017

C. Levy
Avec la collaboration de
M. Delatre

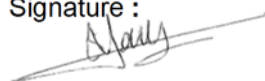
Vérificateur :

Nom : Agathe Roullé

Fonction : Chef de projet

Date : 06/12/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Jaffrot Sébastien

Fonction : Adjoint à la Direction
Risque et Prévention

Date : 16/03/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : écoute sismique, fréquence de résonance, aléa éboulement, Bonifacio, Corse-du-Sud, Corse

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

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.

Synthèse

Le secteur de la Citadelle de Bonifacio (Corse du Sud) 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 (Cerema 2013, Cerema 2014). En particulier, une fracture N110 semble désolidariser un compartiment rocheux en surplomb au Sud-Est de la Citadelle. La méthode géophysique présentée ci-après, de l'écoute sismique passive, a été utilisée dans l'objectif de préciser l'aléa, notamment au niveau de ce compartiment.

L'objectif de cette méthode géophysique est de mettre en évidence l'existence de blocs instables. Le principe est le suivant : tel un instrument de musique, chaque objet possède ses propres fréquences de vibrations. Les blocs rocheux instables vibrent donc préférentiellement à certaines fréquences, qui sont caractéristiques de leur géométrie, de leur poids, 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 (Lévy et al., 2010 ; Bottelin et al., 2013 ; Valentin et al., 2017 ; Colombero et al., 2018). Dans le cas de la Citadelle de Bonifacio, l'objectif premier est de pouvoir délimiter les zones de comportement homogène en fréquence, et de délimiter des blocs potentiellement instables.

Les mesures d'écoute sismique ont été réalisées du 29/01 au 31/01/2019 sur la Citadelle de Bonifacio. Autant que possible, les caractéristiques des pics en fréquences (amplitude, direction, amortissement, etc.) ont été analysées dans l'objectif d'en déduire des informations qualitatives sur la taille relative des blocs et leur degré de désolidarisation.

L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a pu permettre d'identifier la fréquence de résonance de la Citadelle ainsi que quatre zones au comportement homogène en fréquence (constance des directions et des amplitudes pour différents pics en fréquence du spectre de Fourier, limites de changement de comportement localisées aux mêmes endroits pour les différents pics en fréquences). L'hypothèse la plus probable pour expliquer la présence de ces quatre unités de vibrations est qu'elles correspondent à quatre grands blocs, probablement séparés par des fractures d'orientation N-S. Une origine anthropique de ces comportements en fréquence est jugée peu probable par les auteurs. En effet, les amortissements observés sont comparables à ceux d'objets naturels (et non pas de moteurs), et ces zones ne correspondent pas à des ensembles de bâtiments jointifs et ces pics ne correspondent donc pas à des modes de vibration de bâtiments. **La géométrie du compartiment rocheux en surplomb au Sud-Est de la Citadelle a pu être précisée avec la détection de ses limites probables à l'Ouest et au Nord (qui correspondent probablement à des structures de type fissures ou failles). Les amplitudes et les largeurs des pics en fréquence obtenus pour ce compartiment rocheux peuvent être interprétées de deux manières différentes : 1) le bloc n'est pas encore très indépendant du reste du massif, 2) l'endommagement intrinsèque du bloc est important. L'hypothèse que nous favoriserons est l'hypothèse n°1, car nous observons sur cette zone à la fois le comportement global de la Citadelle et le comportement du bloc.** A l'échelle de la Citadelle, les résultats montrent que la roche est très compétente avec peu d'endommagement interne (un pic en fréquence ayant une valeur supérieure à 1 Hz pour un objet aussi volumineux indique que son matériau constitutif est rigide), ce qui a pu être confirmé par les essais triaxiaux en laboratoire sur des carottes rocheuses prélevées par forages au Sud-Est de la Citadelle.

Cette étude fait partie d'un plus vaste programme destiné à préciser l'aléa éboulement à la Citadelle de Bonifacio, incluant des essais in situ et en laboratoire, des forages, d'autres méthodes géophysiques dont des mesures de vibration par interférométrie GBRAR (radar à ouverture réelle au sol), des méthodes de télédétection donnant le déplacement suivant la ligne de visée du radar comme de l'interférométrie SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) satellitaire, etc. L'ensemble des informations collectées servira notamment à préciser un modèle global de stabilité pour la Citadelle de Bonifacio.

Sommaire

1. Contexte	9
2. Contexte géologique à la Citadelle de Bonifacio (Corse du Sud)	9
3. Présentation de la méthode d'écoute de bruit sismique	10
3.1. QU'EST-CE QUE LE BRUIT SISMIQUE ?	10
3.2. PRINCIPE DE L'ECOUTE SISMIQUE PASSIVE POUR LA DETECTION ET LA SURVEILLANCE DES COMPARTIMENTS ROCHEUX INSTABLES.....	11
4. Descriptif de la campagne d'acquisition	13
4.1. CAPTEURS UTILISES	13
4.2. DESCRIPTION DES MESURES DE BRUIT SISMIQUE.....	15
5. Déroulement des mesures – problèmes expérimentaux	19
5.1. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS	19
5.2. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION TEMPORELLE	21
5.3. PROBLEME DE BRUIT SISMIQUE D'ORIGINE ANTHROPIQUE.....	21
5.4. PROBLEME INSTRUMENTAL.....	22
6. Le traitement du signal réalisé	23
7. Répartition géographique des pics en fréquence	27
7.1. COMPORTEMENT A 1,1 ET 1,2 HZ	28
7.2. COMPORTEMENT ENTRE 1,8 ET 2,1 HZ, A 2,7 HZ	29
7.3. COMPORTEMENT A 3,0, 3,1 ET 3,2 HZ, A 3,6 ET 3,7 HZ, ET ENTRE 8,3 ET 8,8 HZ	
31	
8. Interprétation des résultats	35
8.1. VIBRATION GLOBALE DE LA CITADELLE DE BONIFACIO	35
8.2. SUBDIVISION EN 4 GRANDES UNITES.....	35
8.3. SUBDIVISION DU SECTEUR SUD-EST (SECTEUR 4) EN DEUX BLOCS.....	36
8.4. BILAN	38
9. Conclusions et perspectives	39

10. Bibliographie 41

Liste des figures

Illustration 1 : a) Orthophotographie de la presqu'île de Bonifacio. b) Description de la séquence stratigraphique de la Citadelle de Bonifacio. c) Profil topographique N-S de la presqu'île de Bonifacio au niveau de la Citadelle. 10

Illustration 2 : Déploiement des sismomètres CMG-6TD le 29/01/2019 dans la Citadelle de Bonifacio 13

Illustration 3 : Aperçu de l'affiche d'information pour expliquer les mesures en cours aux riverains 14

Illustration 4 : Positions des point de mesure en écoute sismique pour l'expérimentation des 29, 30 et 31 janvier 2019 à la Citadelle de Bonifacio. La station de référence BO-00, commune à tous les groupes de mesures est signalée par un cercle blanc, tandis que chaque groupe de mesures simultanées est signalé par une couleur différente. 17

Illustration 5 : En haut : les signaux sismiques du capteur BO-79 pour une heure d'enregistrement et selon ses 3 composantes (N,E,Z). En bas : les spectres de Fourier de ces enregistrements. 22

Illustration 6 : a), b) et c) : Spectres obtenus pour 187 fenêtres de bruit pour le capteur BO-01 selon les directions Z, E, N (en gris), et la moyenne des spectres (en blanc). Spectres obtenus pour des fenêtres de bruit du capteur de référence BO-00 (en bleu) et la moyenne des spectres (en bleu clair). d), e) et f) amplification relative du spectre à BO-01 par rapport à la référence BO-00 selon les trois directions Z, E, N. g), h), i) ellipticité du signal sismique en fonction de la fréquence pour le capteur BO-01 selon les trois directions Z, E, N. 24

Illustration 7 : Spectre du capteur BO-01 dans le plan horizontal selon l'azimut par rapport au Nord magnétique. Du centre du cercle vers le bord du cercle, la fréquence varie de 0,5 Hz à 10 Hz. L'amplitude du spectre de Fourier est représentée avec l'échelle de couleurs. Sur ce capteur, on observe une principale direction de vibration horizontale N-S à 1,2 Hz, puis une deuxième direction principale de vibration NO-SE à 2,0 Hz. 25

Illustration 8 : Nombre de fois pour lequel un pic en fréquence est observé selon la direction horizontale (en haut) et selon la direction verticale (en bas). 27

Illustration 9 : Représentation des pics en fréquence observés à 1,1 et 1,2 Hz à Bonifacio dans les directions verticale et horizontale. Les traits représentent les amplitudes et les azimuts de vibration dans la direction horizontale. 28

Illustration 10 : Exemple de spectres de bruit sismique pour le capteur BO-38, avec une position centrale sur la Citadelle de Bonifacio. Le pic en fréquence à 1,2 Hz est le plus énergétique de tous et son amplitude est légèrement plus importante sur les voies horizontales. 29

Illustration 11 : Représentation des amplitudes de vibration observées à 1,1 et 1,2 Hz à Bonifacio dans la direction verticale. Les amplitudes sont normalisées par rapport à la station BO-00. 29

Illustration 12 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 1,9, 2,0 ou 2,1 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale. 4 secteurs avec des pics homogènes en fréquence sont distingués, voir l'illustration 19 pour visualiser les limites géographiques de ces secteurs. 30

Illustration 13 : Représentation des pics en fréquence observés à 2,7 Hz à Bonifacio dans les directions verticale et horizontale. Les traits représentent les amplitudes et les azimuts de vibration dans la direction horizontale..... 31

Illustration 14 : Exemple de spectres de bruit sismique pour le capteur BO-16, sur le secteur 4.31

Illustration 15 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 3,0, 3,1 et 3,2 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale 32

Illustration 16 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 3,6, et 3,7 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale 33

Illustration 17 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 8,3 et 8,5 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale 33

Illustration 18 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 8,7 et 8,9 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale 34

Illustration 19 : Interprétation de la répartition géographique des pics en fréquence en quatre blocs distincts. 36

Illustration 20 : Interprétation de la répartition géographique des pics en en faveur d'une subdivision du secteur 4 en deux sous-secteurs..... 37

Illustration 21 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 4,4 et 4,8 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction horizontale 45

Illustration 22 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 5,1 et 5,2 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction 45

Liste des annexes

Annexe 1 comportements sectorisés aux fréquences 4,1, 4,8 et 5,1-5,2 Hz..... 43

1. Contexte

Le secteur de la Citadelle de Bonifacio (Corse du Sud) 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 (Illustration 1c). 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 (Illustration 1a), avec un niveau d'aléa fort à très fort pour l'éboulement en grande masse à la Citadelle (Cerema 2013, Cerema 2014). En particulier, une fracture N110 semble désolidariser un compartiment rocheux en surplomb au Sud-Est de la Citadelle. La méthode géophysique présentée ci-après, de l'écoute sismique passive, a été utilisée dans l'objectif de préciser l'aléa, notamment au niveau de ce compartiment (dimensions et stabilité du compartiment).

Ci-après, nous présentons successivement, le contexte géologique de la Citadelle, le principe des mesures d'écoute sismiques passives appliquées à l'étude des instabilités rocheuses, la description de la campagne d'acquisition des données ainsi que le traitement du signal appliqué aux données, les résultats de l'étude et leur interprétation possible.

Cette étude fait partie d'un plus vaste programme destiné à préciser l'aléa éboulement à la Citadelle de Bonifacio, incluant des essais in situ et en laboratoire, des forages, d'autres méthodes géophysiques dont des mesures de vibration par interférométrie GBRAR (radar à ouverture réelle au sol), etc.

2. Contexte géologique à la Citadelle de Bonifacio (Corse du Sud)

La presqu'île de Bonifacio est composée de formations sédimentaires hétérogènes du Miocène de pendages subhorizontaux, principalement des calcarénites et grès (Illustration 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 (Illustration 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 Illustration 1b), surmontée d'une couche plus compétente regroupant les faciès les plus indurés (L1 à L4 en Illustration 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 (André et al., 2011 et Reynauld et al., 2012).

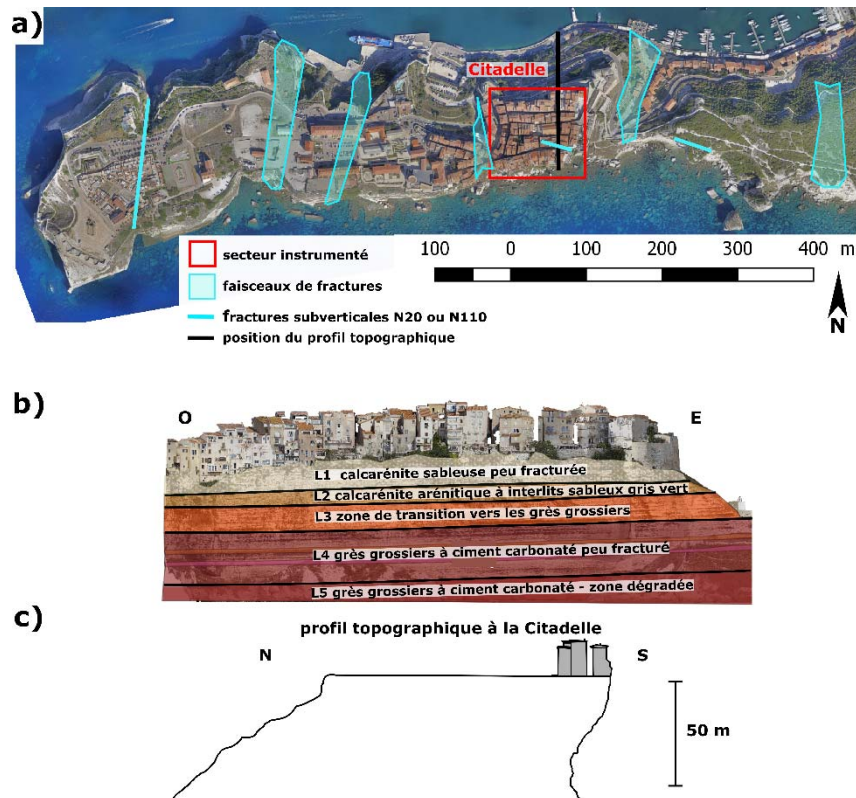


Illustration 1 : a) Orthophotographie de la presqu'île de Bonifacio. b) Description de la séquence stratigraphique de la Citadelle de Bonifacio. c) Profil topographique N-S de la presqu'île de Bonifacio au niveau de la Citadelle.

3. Présentation de la méthode d'écoute de bruit sismique

3.1. QU'EST-CE QUE LE BRUIT SISMIQUE ?

Le bruit sismique (ou vibrations ambiantes) est un ensemble de vibrations permanentes du sol, dues à une multitude de causes, d'origines naturelles (vents et autres phénomènes atmosphériques, vagues océaniques, etc.) ou anthropiques (circulation automobile, machinerie lourde, etc.).

L'amplitude de ces vibrations ambiantes est généralement inférieure à 10 $\mu\text{m/s}$, mais varie selon la fréquence considérée et en fonction des causes de la vibration. En dessous de 1 Hz, le bruit sismique est généralement dû à des causes naturelles, notamment les vagues océaniques, tandis qu'au-delà de 1 Hz, le bruit sismique est principalement dû aux activités humaines.

Le bruit sismique est principalement constitué d'ondes de surface (ondes de Love et Rayleigh), mais comprend aussi des ondes de volume (ondes P et S).

3.2. PRINCIPE DE L'ECOUTE SISMIQUE PASSIVE POUR LA DETECTION ET LA SURVEILLANCE DES COMPARTIMENTS ROCHEUX INSTABLES

Nombre de systèmes physiques (patin de frein, instrument de musique, écaille rocheuse...) sont susceptibles d'être le siège d'oscillations amorties. Ces oscillateurs peuvent emmagasiner temporairement de l'énergie sous deux formes : potentielle ou cinétique. L'oscillation est le phénomène par lequel l'énergie du système passe d'une forme à l'autre de façon périodique. L'énergie injectée est peu à peu absorbée par les éléments dissipatifs du système (amortisseur visqueux en mécanique, frottements...), jusqu'à ce que le système revienne à un état d'équilibre stable. Ces oscillations sont la somme de mouvements à des fréquences de résonances qui dépendent des caractéristiques du système physique étudié.

Une écaille rocheuse est un objet complexe possédant une infinité de fréquences de résonance dont les valeurs dépendent de la géométrie de l'écaille, de ses caractéristiques élastiques et ses conditions aux limites (en particulier de la rigidité de l'interface avec le massif rocheux, influencée par la proportion de ponts rocheux le long de l'interface et par la proportion de l'interface sur laquelle s'exerce un contact en friction). D'une manière indirecte, déterminer les fréquences de résonance d'une écaille rocheuse permet donc d'obtenir des informations sur le volume instable en jeu, sa rigidité, ainsi que sur le pourcentage de ponts rocheux qui rattache l'écaille au massif.

Dans la pratique, on n'enregistre pas directement la réponse libre d'un système oscillant comme une écaille rocheuse mais plutôt la réponse du système sous vibrations forcées, puisque celui-ci est constamment soumis à des forces extérieures (vent, séismes, trains, voitures...). Or, lorsqu'un système oscillant amorti est sollicité à des fréquences proches de ces fréquences propres, il se produit un phénomène de résonance, c'est-à-dire d'accumulation de l'énergie générant des oscillations plus importantes. Dans le milieu naturel, le bruit sismique couvrant un très large spectre fréquentiel, il contient aussi les fréquences de résonance du système. Celui-ci accumule de l'énergie à ses fréquences de résonance qui sont déterminées à partir du traitement du signal d'enregistrements sismiques (spectre, décrétement aléatoire, etc.).

Depuis une dizaine d'année, l'écoute sismique passive est donc utilisée avec succès pour l'étude de compartiments rocheux instables. 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; Burjánek et al., 2012; Bottelin, 2014; Burjánek 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 (entre 1 et 5 pics en moyenne), 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 F_0 , 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 (Burjánek et al., 2012).

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 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).

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 selon la même stratégie que Iannucci et al. 2018. 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 F_0 et le volume du compartiment instable (en effet, la valeur de F_0 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). 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.

Les mesures d'écoute sismique ont été réalisées du 29/01 au 31/01/2019 sur la Citadelle de Bonifacio. Les paragraphes suivants présentent le dispositif instrumental, le déroulement des mesures, le traitement du signal qui a été utilisé pour traiter les données, ainsi que les premiers résultats et leur interprétation.

4. Descriptif de la campagne d'acquisition

4.1. CAPTEURS UTILISES

Les capteurs utilisés pour réaliser les mesures de bruits sismiques sont des sismomètres CMG6-TD. Ces capteurs sont adaptés pour l'enregistrement du signal sismique dans les 3 directions de l'espace pour des fréquences entre 0,33 Hz et 40 Hz. Cette bande de fréquence couvre entièrement la bande de fréquence utile pour laquelle on observe habituellement des fréquences de résonance de blocs instables (1 à 10 Hz, voir les études citées en paragraphe 3.2).

Ces capteurs sont particulièrement adaptés pour la réalisation de campagnes de mesures temporaires car le système d'acquisition est inclus dans le capteur, ce qui facilite leur déploiement.

Lors des mesures, la fréquence d'acquisition a été fixée à 200 Hz, ce qui correspond donc à une fréquence de Nyquist de 100 Hz.

Pour chaque point de mesure, les capteurs sont nivelés, orientés selon le Nord magnétique, branché à une batterie 12 V, relié à une antenne GPS via un câble de 10 m, recouvert d'une caisse en plastique renversée et recouverte d'un poids pour le protéger du vent (Illustration 2). Enfin, la caisse de protection comporte une affiche d'information pour expliquer les mesures en cours aux riverains (Illustration 3).



Illustration 2 : Déploiement des sismomètres CMG-6TD le 29/01/2019 dans la Citadelle de Bonifacio



Caractérisation sismologique : Mesures du bruit de fond sismique

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer l'imagerie, les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Ses missions sont : la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques, la coopération internationale, la sécurité minière, la formation et l'appui aux entreprises pour les sciences de la terre. A ce titre, il a été sollicité par la DDTM pour caractériser le sous-sol à Bonifacio via des méthodes sismologiques passives.

Pourquoi ces mesures ?

- > Les stations sismologiques vont utiliser les vibrations naturelles générées par de multiples sources (séismes lointains, océans, circulation routière) pour recueillir des données sur le sous-sol proche par la méthode HV.
- > Les agents BRGM effectueront des mesures ponctuelles d'une heure en plusieurs endroits des environs.
- > Chaque mesure sera :
 1. Peu encombrante : les sismomètres occupent peu de place, ne demandent pas une installation en dur spécifique et ne nécessiteront au plus qu'un trou de quelques centimètres dans la terre
 2. Courte, sans déploiement de sismomètre sur des périodes de temps étendues
- > Ces mesures permettront de mieux connaître la structure du sous-sol à partir de l'analyse des vibrations même les plus faibles détectées
- > Ces mesures ne préjugent en rien de l'aléa sismique dans la zone : la connaissance des séismes est apportée par les réseaux nationaux indépendants regroupés sous RESIF, qui mène ces études indépendamment sous l'autorité de l'Etat ; les mesures présentées ne visent qu'à obtenir une caractérisation des couches du sous-sol pour des études géotechniques.

Ce que nous vous demandons

- > Nous désirons déployer dans votre périmètre des sismomètres qui resteront en place une heure ou moins.
- > Ces sismomètres seront parfaitement autonomes, et auront une empreinte minimale sur vos lieux (déchets éventuels ramassés, aucun matériel ne reste en place)
- > Vous pouvez avoir une activité normale à côté des sismomètres : nous analyserons le signal de telle sorte que vos activités ne nous gênent pas ; à l'inverse, aucune activité engendrant une nuisance visuelle ou sonore importante ne sera effectuée (de par la nature des mesures effectuées)
- > Nous vous demandons juste de ne pas déplacer la boîte vous-même : contactez le numéro de téléphone ci-dessous et nous viendrons sur place
- > Nos interventions sont prévues du 25/01 au 01/02/2015 entre 21h et 6h

Contacts BRGM pour en savoir plus :
Mickael Delatre (m.delatre@brgm.fr) ou
Clara LEVY (c.levy@brgm.fr)
BRGM direction Risque et Prévention
N°tel: 02 38 64 35 61
N°portable : 06 52 23 96 76 ou 06 64 32
31 15



Illustration 3 : Aperçu de l'affiche d'information pour expliquer les mesures en cours aux riverains

4.2. DESCRIPTION DES MESURES DE BRUIT SISMIQUE

Les mesures d'écoute sismique ont été réalisées du 29/01 au 31/01/2019, selon les informations préalablement transmises à la mairie de Bonifacio. Les points de mesure réalisés sont présentés en (

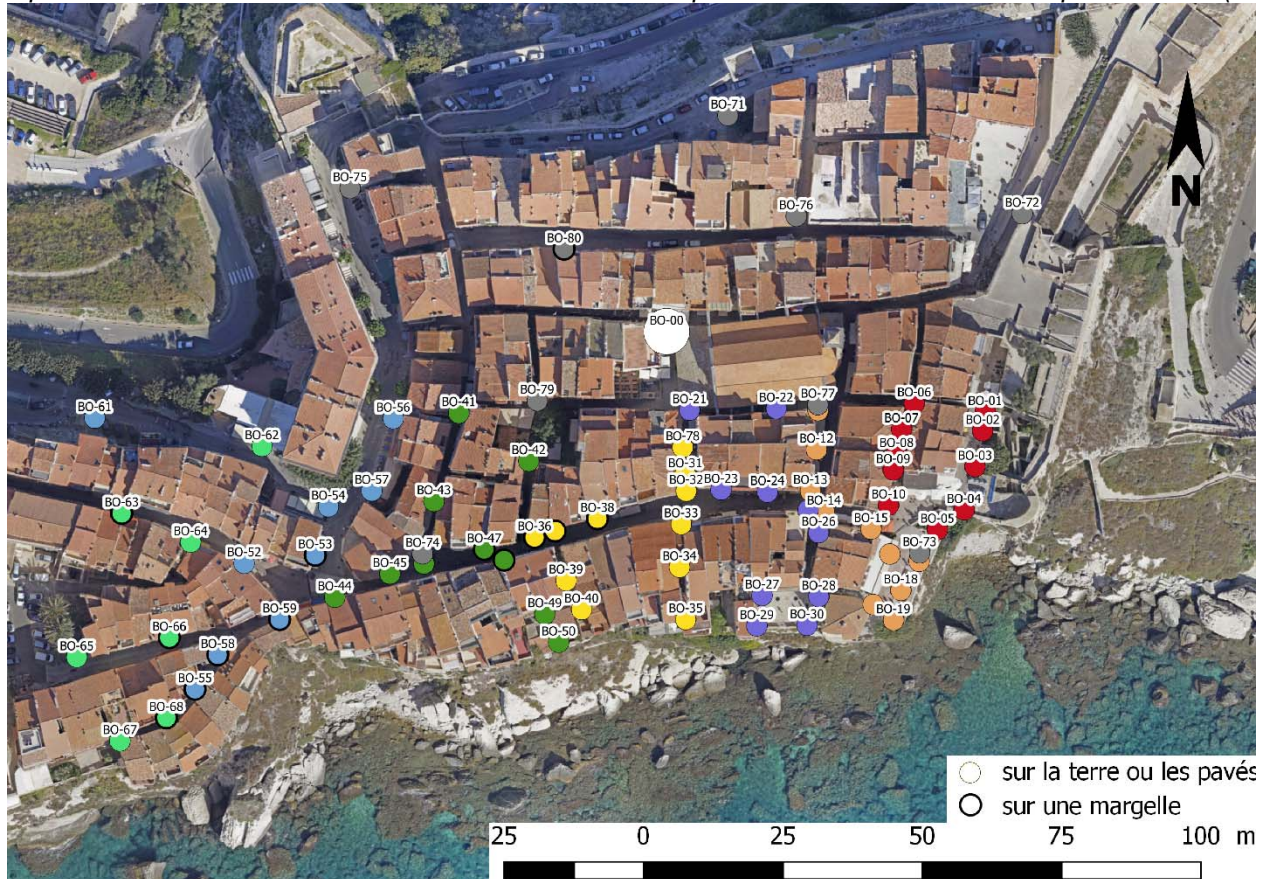


Illustration 4).

Pour chacun de ces points de mesure :

- l'enregistrement des données a été réalisé entre 19h et 1h (heure française) pour éviter au maximum les bruits sismiques d'origine anthropique (moteur de climatiseurs, etc.) ;
- la durée de l'enregistrement sismique varie entre 1h et 2h (en théorie, cette durée d'enregistrement est suffisante pour obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant, et qui correspond pour la fréquence d'intérêt minimale de 0,5 Hz, à un minimum de 1800 cycles enregistrés);
- la localisation du point de mesure a été réalisé en utilisant l'orthophotographie haute définition du site (1 pixel = 3 cm) et un distancemètre laser pour trianguler la position du capteur à partir des angles de bâtiments.

Par ailleurs, les mesures sont réalisées par groupes de 11 capteurs, avec systématiquement le même capteur BO0 à une position de référence (voir l'illustration 4).

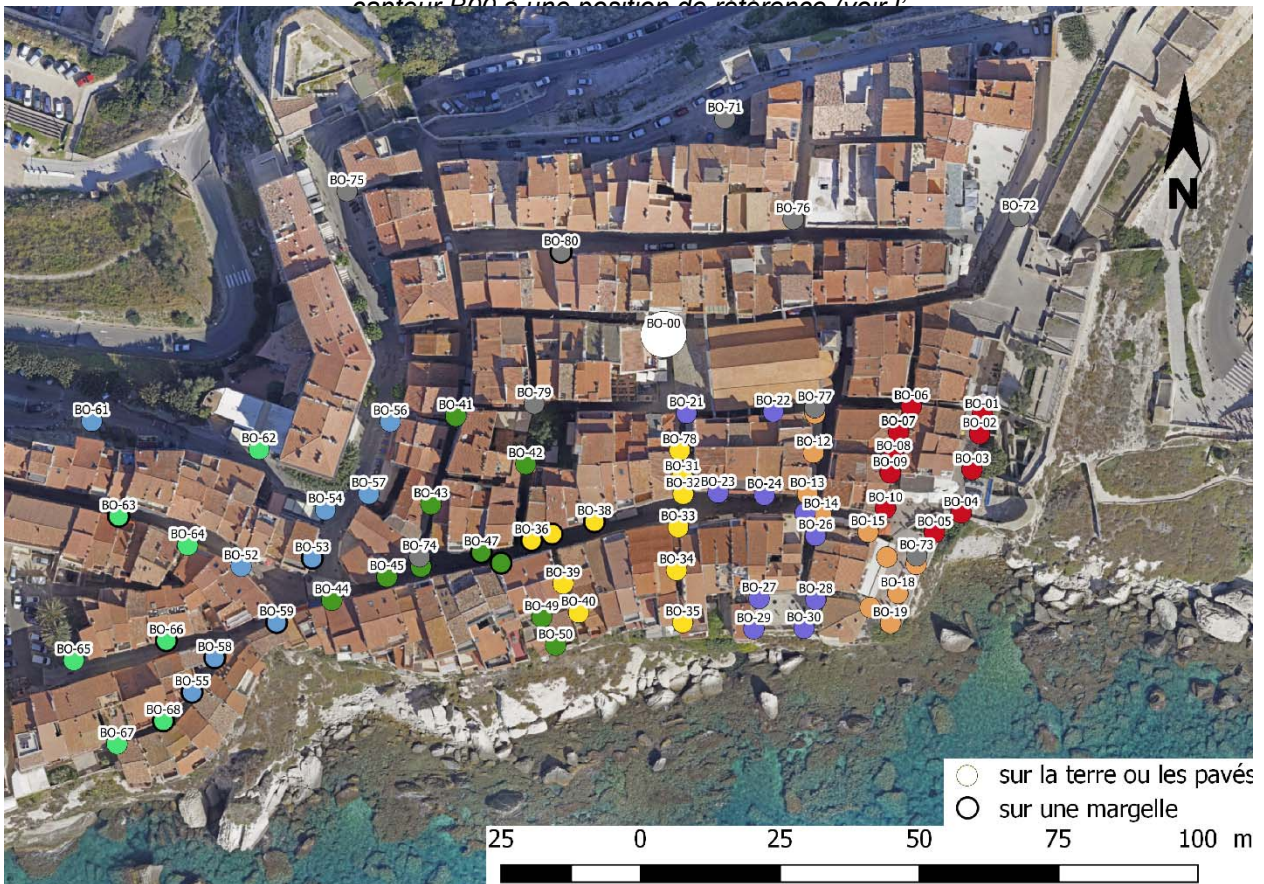


Illustration 4). Les mesures synchrones sont numérotées par dizaines (ex: B01 à B10, puis B11 à B20, etc.). La station de référence permet de prendre en compte la variation temporelle des sollicitations sismiques (vent, grêle, etc.), ce qui permet de comparer des mesures réalisées à des instants différents (sur plusieurs jours, par exemple). Les conditions climatiques ont été extrêmement variables entre les 29, 30 et 31 janvier 2019 (pluie, grêle, vents forts). Le département était placé en vigilance jaune pendant le passage de la tempête Gabriel (29 et 30 janvier 2019).

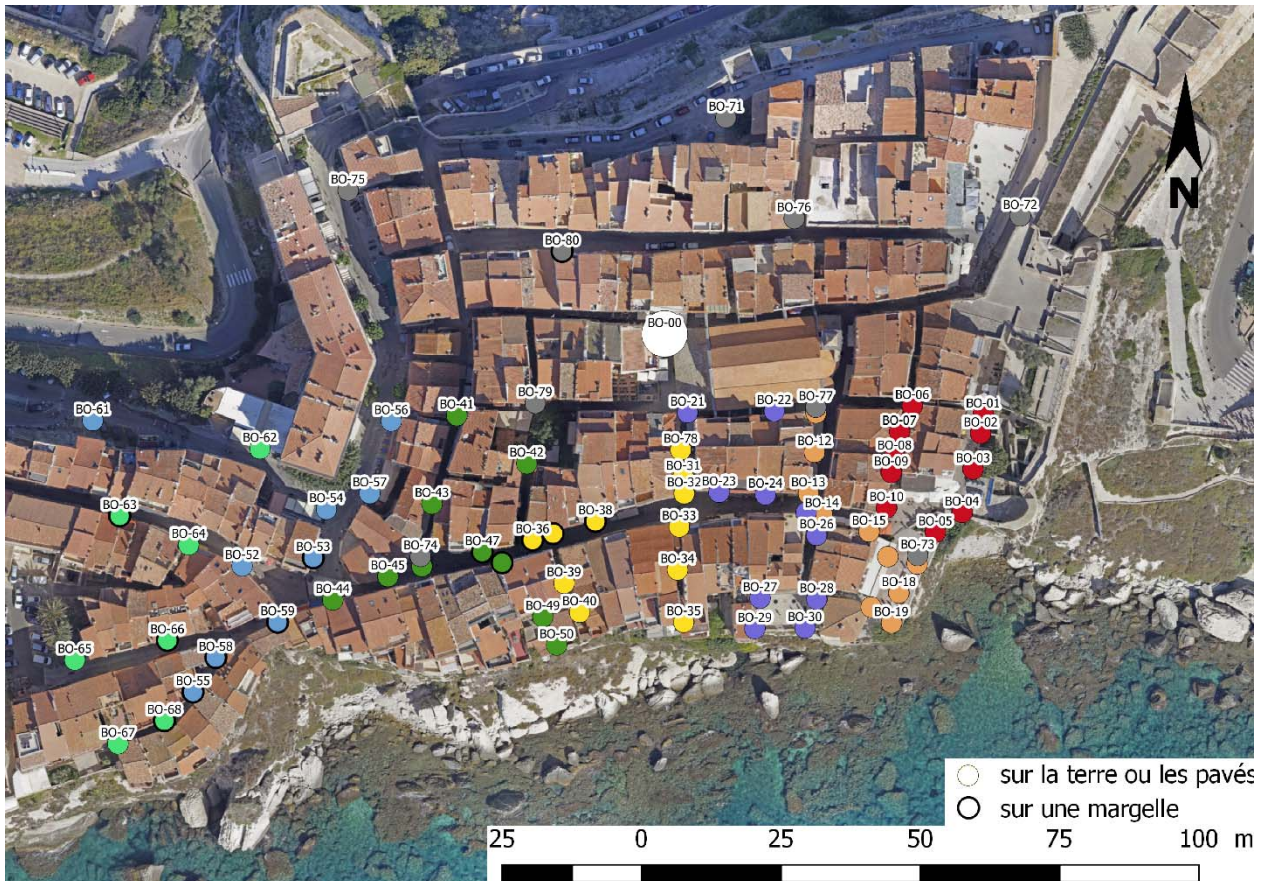


Illustration 4 : Positions des point de mesure en écoute sismique pour l'expérience des 29, 30 et 31 janvier 2019 à la Citadelle de Bonifacio. La station de référence BO-00, commune à tous les groupes de mesures est signalée par un cercle blanc, tandis que chaque groupe de mesures simultanées est signalé par une couleur différente.

5. Déroulement des mesures – problèmes expérimentaux

5.1. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS

Dans la mesure du possible, les capteurs ont été placés hors des bâtiments (afin de ne pas enregistrer les fréquences propres des bâtiments), et avec le plus de distance possible (pour éviter une éventuelle zone d'influence du bâtiment). Dans la pratique, il n'a pas toujours été évident de le réaliser, puisque les ruelles de la Citadelle sont parfois très étroites (moins de 5 m,

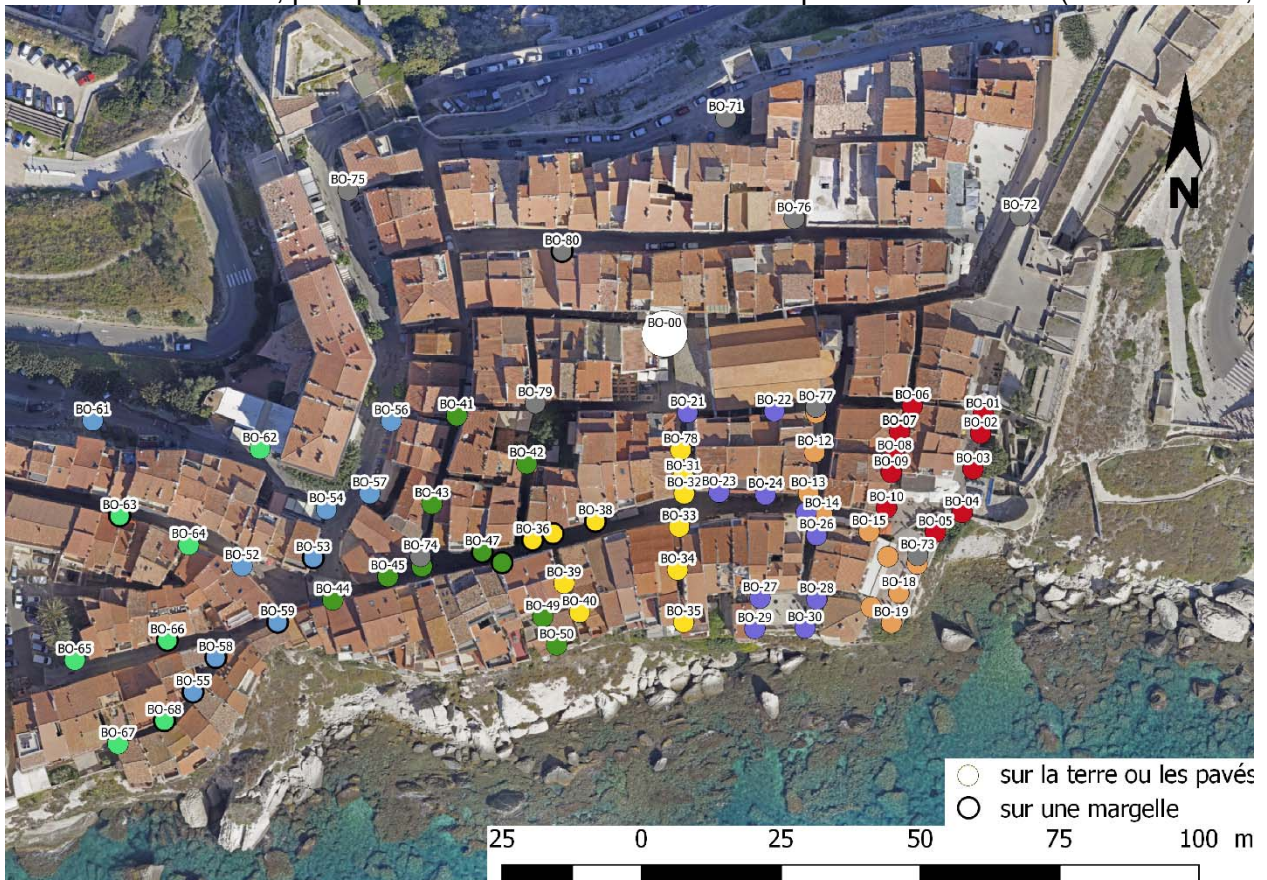


Illustration 4). De plus, la circulation automobile n'ayant pas été interrompue pendant les phases d'acquisition, les capteurs n'ont pas été placés au milieu des rues passantes pour la préservation des instruments de mesure. Enfin, pour 13 points de mesure, la rue étant trop en pente, le capteur a été

installé sur une margelle d'immeuble pour être à niveau (voir les points cerclés de noir en

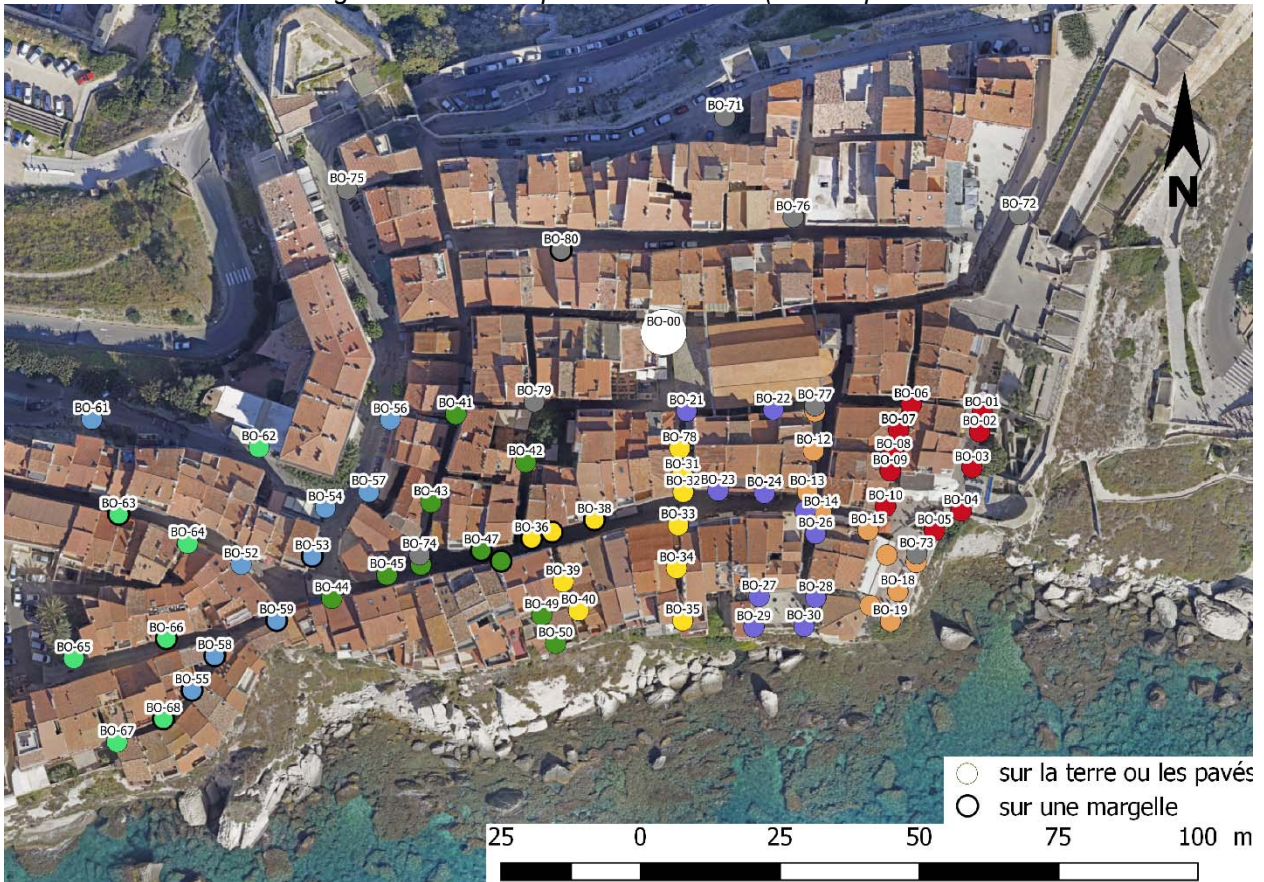


Illustration 4). L'interprétation des résultats pour ces points de mesure doit être faite avec prudence.

Pour des raisons similaires, les capteurs n'ont pas été placés à l'aplomb de vides connus (citernes, etc.). En plus des plans fournis par la mairie qui référencent ces ouvrages, les travaux en cours à la Citadelle lors des mesures sismiques ont grandement aidé à un placement adéquat des capteurs. En effet, ces travaux consistaient notamment à la réfection des réseaux (eaux usées, etc.) et de l'intégralité du pavement. Les emplacements des réseaux étant parfaitement visibles lors de ces travaux, les points non

cerclés de noirs en

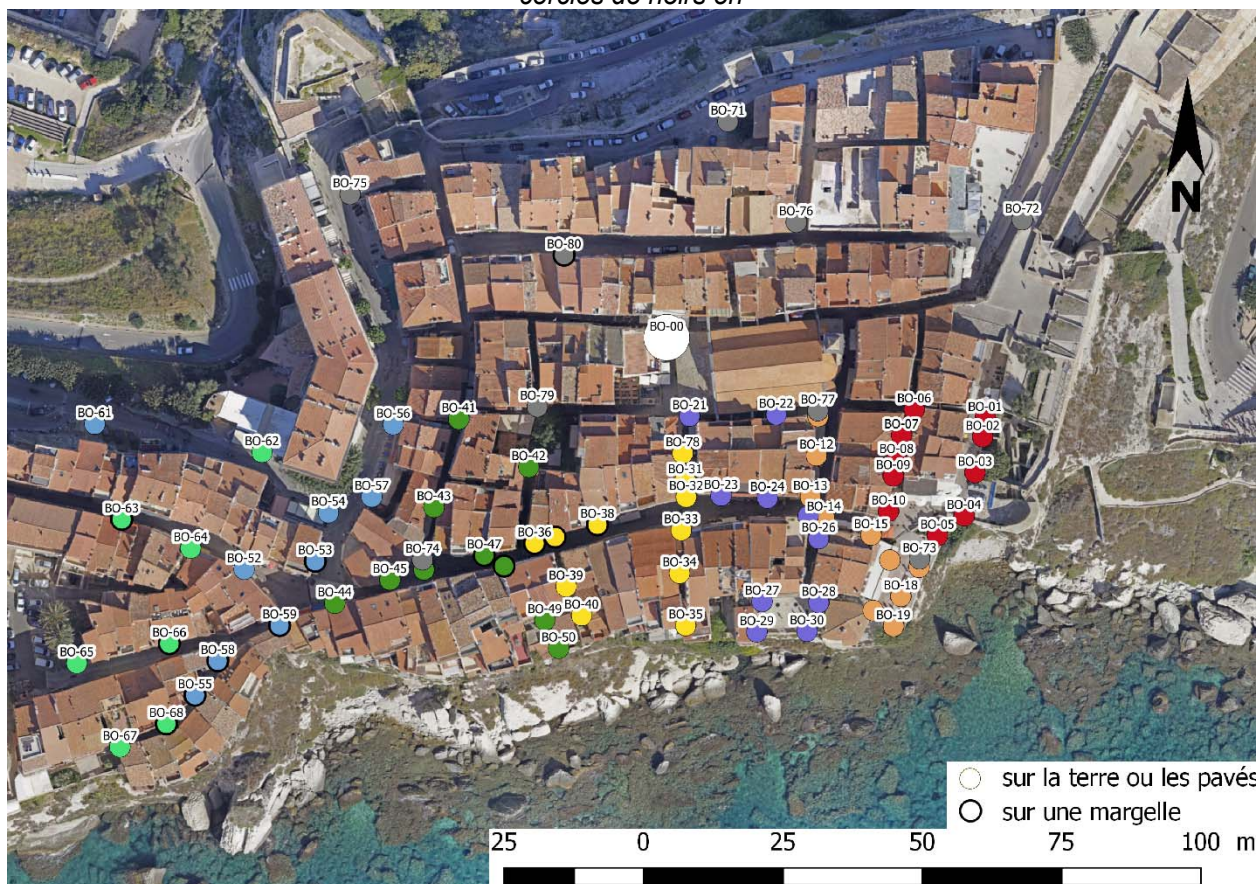


Illustration 4 sont donc positionnés soit directement au sol, ou sur les pavés, et ne sont à priori pas situés à l'aplomb de vides.

5.2. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION TEMPORELLE

Malgré l'utilisation des 10 m de câble pour l'antenne GPS, la synchronisation temporelle des signaux a quelquefois échoué (certaines ruelles de la citadelle sont trop étroites pour capter simultanément le signal d'au moins 3 satellites), certains points de mesure ont donc dû être déplacés.

5.3. PROBLEME DE BRUIT SISMIQUE D'ORIGINE ANTHROPIQUE

Pour quasiment tous les capteurs, malgré les mesures de nuit, des bruits de moteurs ont été enregistrés (climatiseurs, chambres froides, etc.). L'illustration 5 montre les signaux sismiques et les spectres de Fourier d'un enregistrement d'une heure pour le capteur BO-79. Au-dessus de 10 Hz, le spectre comporte des pics très fins, probablement les fréquences d'un (ou de) moteur(s). Cette forme effilée des pics montre que le signal n'est quasiment pas amorti à ces fréquences, c'est-à-dire que la vibration est entretenue dans le temps, comme celle d'un moteur. Au contraire, le pic observé à 1,2 Hz est large et correspond à un signal amorti. Son interprétation est discuté en paragraphe 7.1.

La plupart des pics en fréquences liés à l'activité humaine observés sur les données de Bonifacio sont supérieurs à 10 Hz, c'est-à-dire qu'ils sont, à priori, au-dessus des fréquences qui nous intéressent.

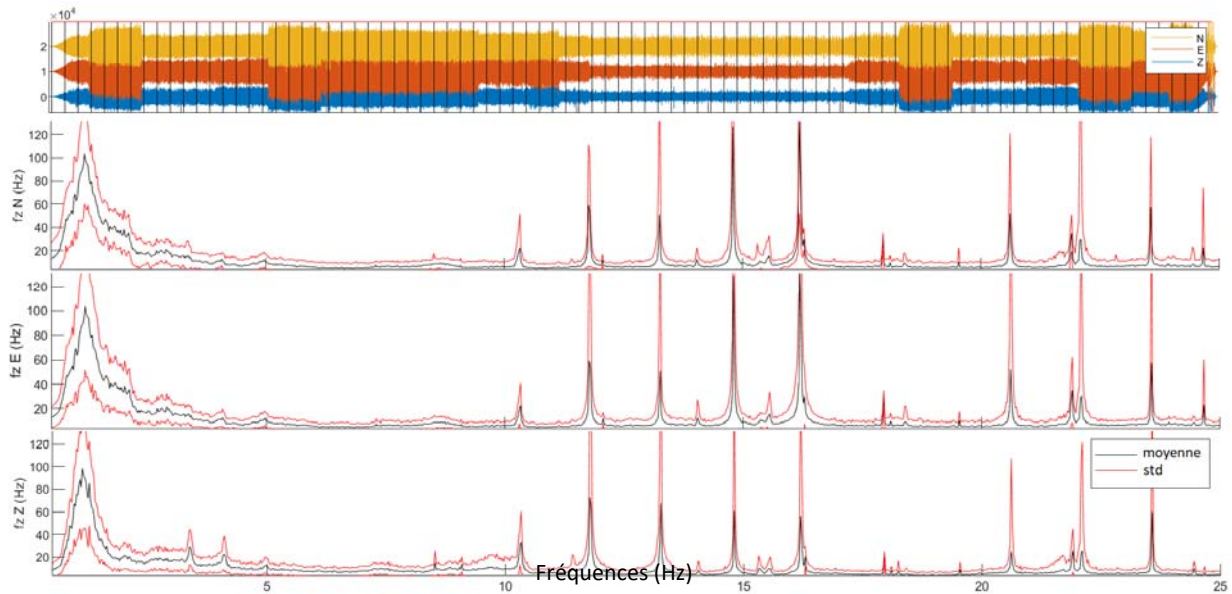


Illustration 5 : En haut : les signaux sismiques du capteur BO-79 pour une heure d'enregistrement et selon ses 3 composantes (N,E,Z). En bas : les spectres de Fourier de ces enregistrements.

5.4. PROBLEME INSTRUMENTAL

Pour 4 points de mesure, l'enregistrement des données s'est interrompu inopinément (BO-15, BO-25, BO-35, BO-55). Le capteur impliqué pour ces mesures a donc un défaut (possiblement, une zone mémoire endommagée).

6. Le traitement du signal réalisé

Les étapes de traitement du signal appliquées aux données sismiques de Bonifacio sont les suivantes :

- les données sont filtrées entre 0,5 et 20 Hz avec un filtre butterworth d'ordre 4 ;
- des fenêtres de bruit de 60 s sont sélectionnées dans le signal, avec les critères suivants :
 - un rapport signal sur bruit $SNR=STA/LTA$ inférieur à 3 pour les trois voies N,E,Z ;
 - avec STA (Short Term Average) l'amplitude moyenne du signal sur 0,5 s ;
 - LTA (Long Term Average) l'amplitude moyenne du signal sur 60 s ;
 - les fenêtres de bruit délimitées par un rapport $SNR < 3$ sont réduites d'un pré-trigger et d'un post trigger de 1 s ;
 - un recouvrement est possible entre fenêtres de bruit de 60%.
- le spectre de chaque fenêtre de bruit est calculé avec un algorithme de FFT (Fast Fourier Transform);
- chaque spectre est lissé avec la fonction de Konno-Ohmachi et son paramètre b fixé à 40 ;
- la fenêtre de bruit de la station de référence BO-00 la plus proche en temps (+/- 60 s) est recherchée, son spectre est calculé ;
- 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 spectres dépasse 50 pour un point de mesure. Les données de chaque station sont donc comparées individuellement avec la station de référence. D'autres méthodes de traitement du signal plus complexes (par exemple, la Frequency Domain Decomposition ou FDD) peuvent être appliquées pour traiter conjointement les mesures synchrones (ici, des groupes de 11 capteurs). Les apports potentiels de ces méthodes sont discutés en perspectives (paragraphe 9).

L'

Illustration 6 montre les spectres obtenus pour 187 fenêtres de bruit pour la station BO-01, et les spectres obtenus pour des fenêtres de bruit de la station de référence BO-00. Cette illustration montre aussi l'amplification relative du spectre selon les 3 directions de mesures par rapport au capteur de référence. Cette amplification est rarement importante ; elle est toujours inférieure à 5 à Bonifacio.

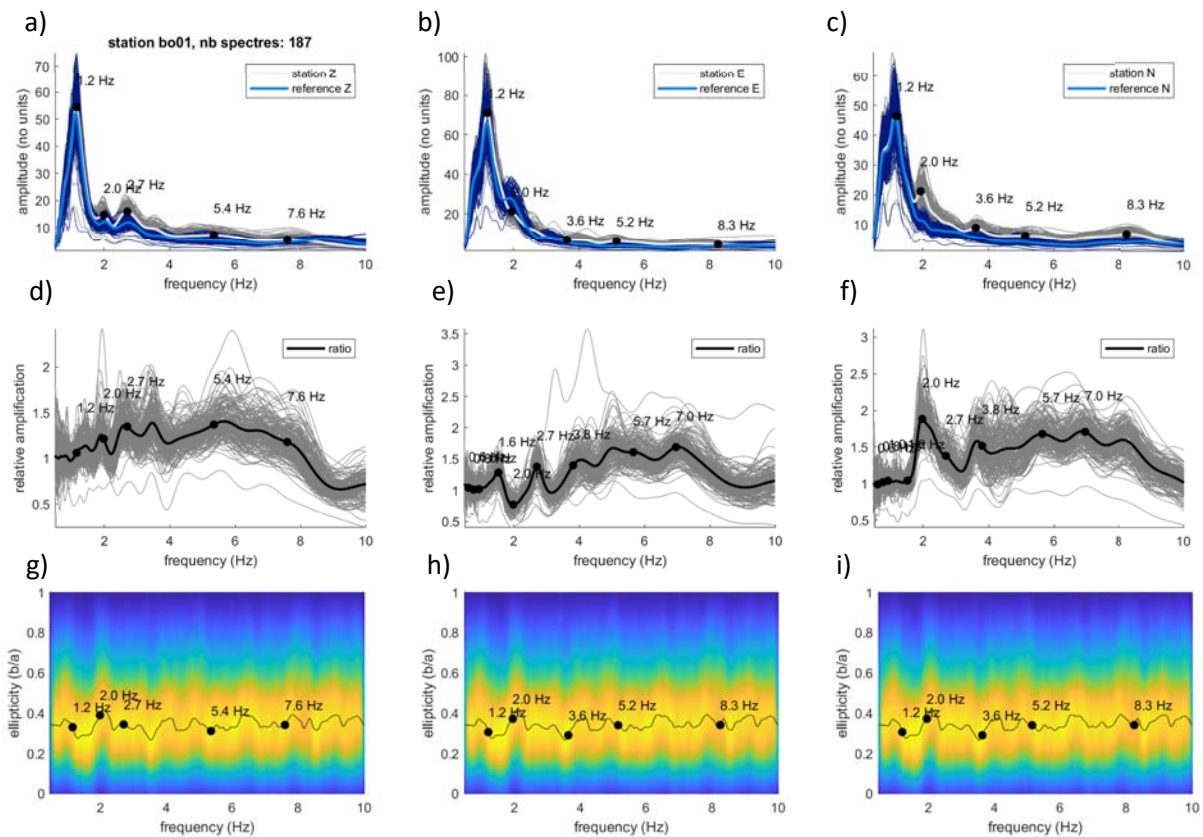


Illustration 6 : a), b) et c) : Spectres obtenus pour 187 fenêtres de bruit pour le capteur BO-01 selon les directions Z, E, N (en gris), et la moyenne des spectres (en blanc). Spectres obtenus pour des fenêtres de bruit du capteur de référence BO-00 (en bleu) et la moyenne des spectres (en bleu clair). d), e) et f) amplification relative du spectre à BO-01 par rapport à la référence BO-00 selon les trois directions Z, E, N. g), h), i) ellipticité du signal sismique en fonction de la fréquence pour le capteur BO-01 selon les trois directions Z, E, N.

Les pics en fréquence sont étudiés : 1) selon la direction verticale (Z), 2) selon les directions horizontales (voir l'illustration 7 qui montre un exemple des spectres horizontaux pour le capteur BO-01 selon l'azimut par rapport au nord).

Le pointé automatique des pics en fréquence est réalisé en utilisant la valeur et le signe de la dérivée du spectre dans la direction Z et selon la direction horizontale (en fonction de l'azimut par rapport au Nord). Ce pointé est reporté en exemple sur l'

Illustration 6 a) b) et c). L'ensemble des pics pointés n'est pas toujours significatif (certains pics ont une amplitude faible et une forme de pic « en cloche » peu marquée). L'interprétation des pics en fréquence s'est donc principalement focalisée pour les pics ayant une grande répartition spatiale (i.e., observable sur au moins 4 capteurs différents) et prioritairement pour les pics avec une amplitude et une forme de pic marquée.

Pour le pointé des pics en fréquence selon la direction horizontale, on relève aussi l'azimut des maximums en fréquence.

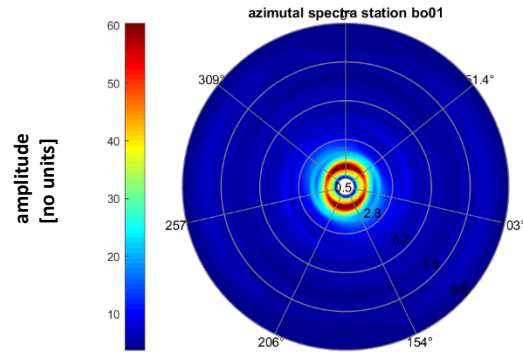


Illustration 7 : Spectre du capteur BO-01 dans le plan horizontal selon l'azimut par rapport au Nord magnétique. Du centre du cercle vers le bord du cercle, la fréquence varie de 0,5 Hz à 10 Hz. L'amplitude du spectre de Fourier est représentée avec l'échelle de couleurs. Sur ce capteur, on observe une principale direction de vibration horizontale N-S à 1,2 Hz, puis une deuxième direction principale de vibration NO-SE à 2,0 Hz.

7. Répartition géographique des pics en fréquence

L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a finalement pu être menée pour 56 points de mesure sur les 78 qui ont été réalisés :

- l'acquisition n'a pas correctement fonctionné pour 4 points de mesures (voir le paragraphe 5.4) ;
- pour 18 points de mesure, la durée des enregistrements ne permet pas d'obtenir un minimum de 50 fenêtres de bruit. En effet, malgré des enregistrements d'en moyenne 1h30, le bruit anthropique est parfois trop intense pour être en mesure de sélectionner des fenêtres de bruit dans le signal (à la fois sur le capteur et simultanément sur le capteur de référence).

L'illustration 8 montre le nombre d'occurrences pour lequel un pic en fréquence est observé selon la direction verticale, mais aussi selon la direction horizontale. L'analyse de la répartition spatiale des pics en fréquence est poursuivie pour les pics visibles sur au moins 4 capteurs.

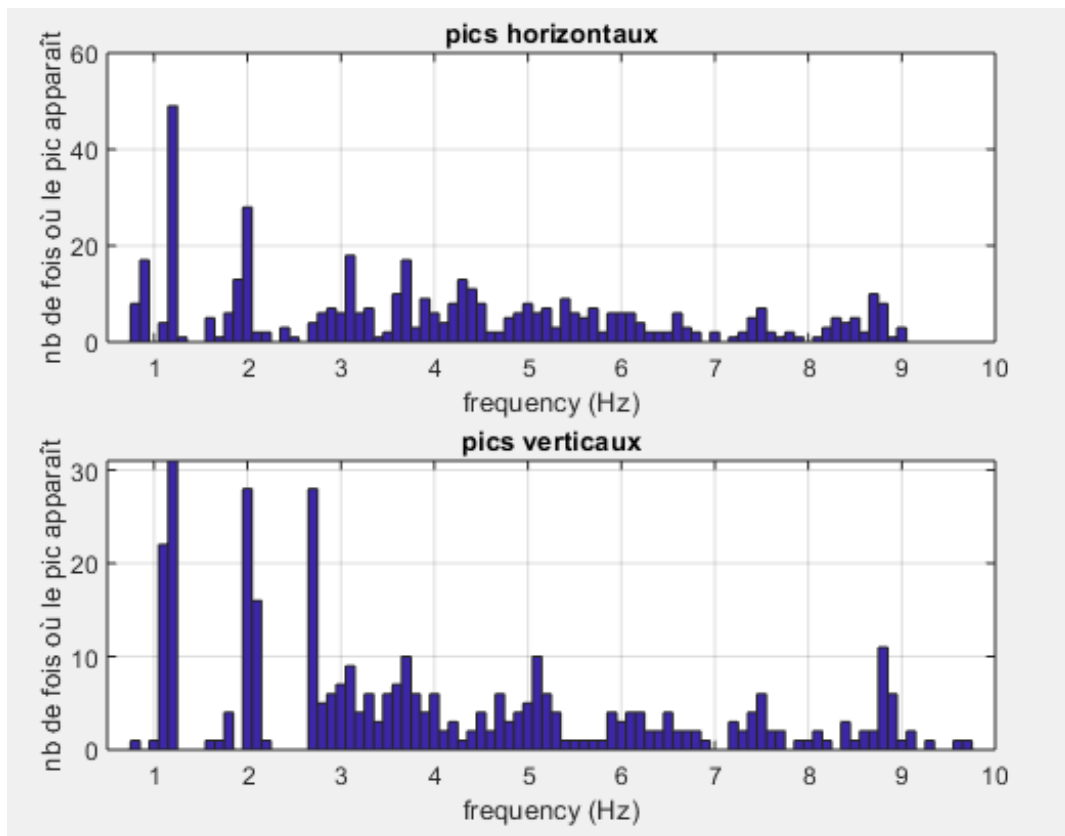


Illustration 8 : Nombre de fois pour lequel un pic en fréquence est observé selon la direction horizontale (en haut) et selon la direction verticale (en bas).

7.1. COMPORTEMENT A 1,1 ET 1,2 HZ

Un pic en fréquence à 1,1 Hz ou 1,2 Hz est observé sur tous les capteurs¹ dans la direction horizontale, ainsi que la direction verticale (Illustration 9 à Illustration 11). L'amplitude des pics est plus importante dans la direction horizontale (Illustration 10 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

L'Illustration 9 montre l'azimut de vibration pour ce pic pour chacun des capteurs concernés dans la direction horizontale. La direction de vibration est assez homogène sur l'ensemble de la Citadelle. Comme indiqué aux paragraphes 4 et 6, les capteurs sont orientés au Nord magnétique et l'azimut de vibration est estimé par rapport au Nord magnétique. Pour le tracé sur la carte en Illustration 9, l'azimut est corrigé de la déclinaison entre Nord magnétique et Nord géographique à Bonifacio (i.e., environ 2,6° d'après le modèle implémenté sur <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination>).

L'amplitude des pics (i.e., la longueur des flèches sur l'Illustration 9) sont normalisées par rapport à celle du capteur BO-00. Ainsi, la flèche au capteur BO-00 est de longueur 1.

L'amplitude des pics dans la direction verticale est plus importante dans la partie sud-est (Illustration 11). Les ratios pour la variation d'amplitude par rapport au capteur BO-00 sont concentrés sur la gamme de valeurs 0,9 et 1,27.

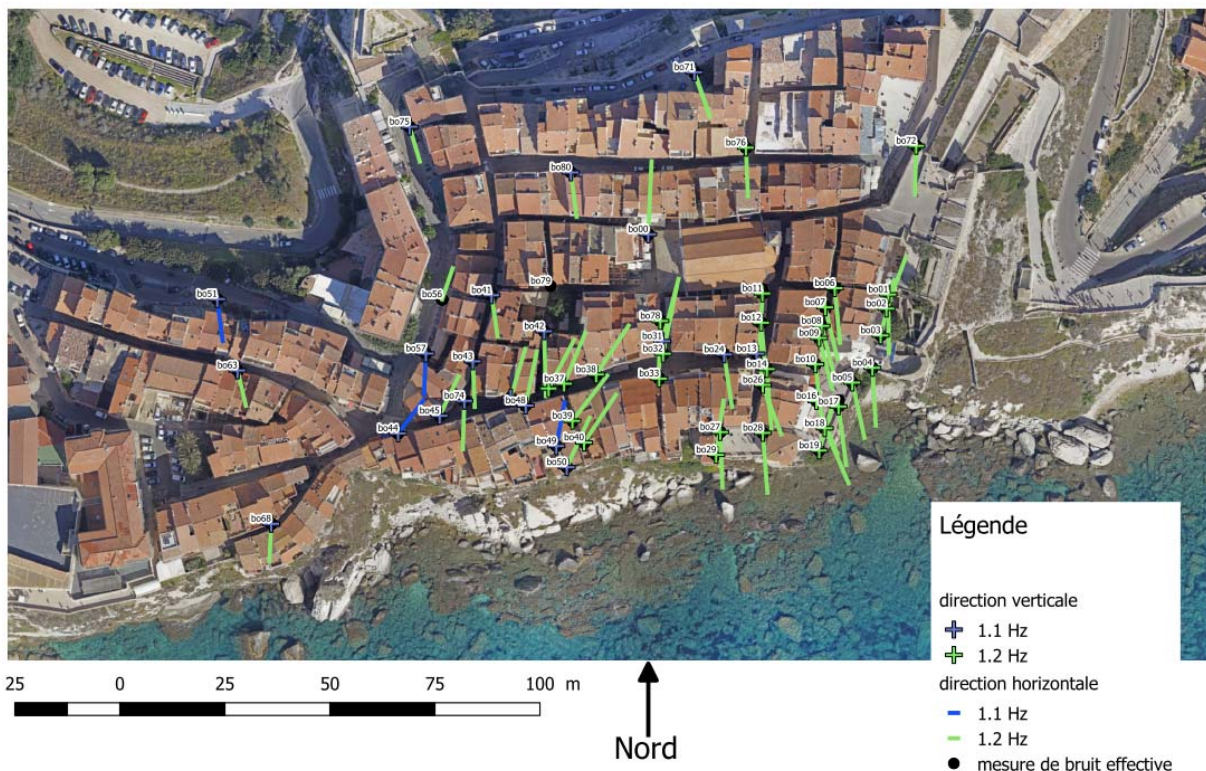


Illustration 9 : Représentation des pics en fréquence observés à 1,1 et 1,2 Hz à Bonifacio dans les directions verticale et horizontale. Les traits représentent les amplitudes et les azimuts de vibration dans la direction horizontale.

¹ Parmi les 56 les capteurs où la mesure de bruit sismique a permis de poursuivre l'analyse fréquentielle jusqu'au bout

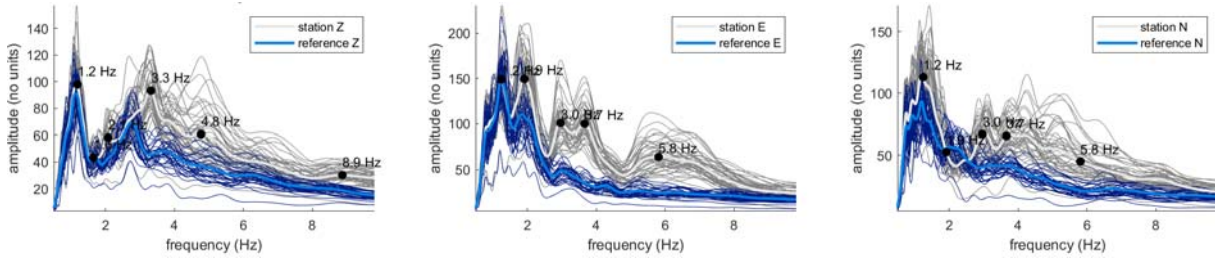


Illustration 10 : Exemple de spectres de bruit sismique pour le capteur BO-38, avec une position centrale sur la Citadelle de Bonifacio. Le pic en fréquence à 1,2 Hz est le plus énergétique de tous et son amplitude est légèrement plus importante sur les voies horizontales.

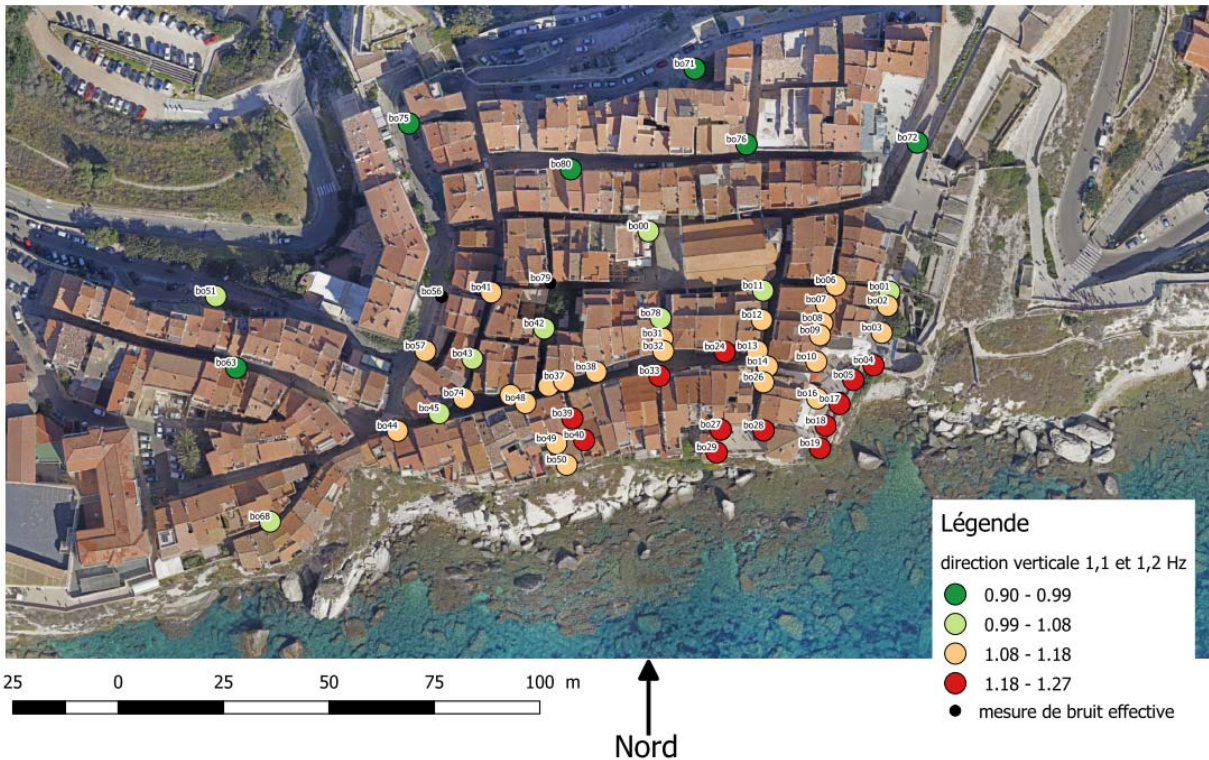


Illustration 11 : Représentation des amplitudes de vibration observées à 1,1 et 1,2 Hz à Bonifacio dans la direction verticale. Les amplitudes sont normalisées par rapport à la station BO-00.

7.2. COMPORTEMENT ENTRE 1,8 ET 2,1 HZ, A 2,7 HZ

Les pics en fréquences observés entre 1,8 et 2,7 Hz sont répartis en secteurs très distincts (Illustration 12). En se déplaçant d'Ouest en Est, on observe 4 secteurs successifs :

- un secteur observé sur uniquement deux capteurs, avec un pic dans la direction horizontale à 2,1 Hz (secteur 1) ;
- un secteur avec un pic dans la direction horizontale à 1,8 Hz et un pic dans la direction verticale à 2 Hz (secteur 2) ;
- un secteur avec un pic dans la direction horizontale à 1,9 Hz et un pic dans la direction verticale à 2,1 Hz (secteur 3) ;
- un secteur avec un pic dans la direction horizontale à 2 Hz et un pic dans la direction verticale à 2 Hz (secteur 4). Notons que sur ce secteur, on observe aussi un pic dans la direction verticale à 2,7 Hz (Illustration 13 et Illustration 14).

Notons que l'écart de fréquences entre les pics observés pour les secteurs 2 et 3 n'est pas très important (1,8 à 1,9 Hz dans la direction verticale et 2 à 2,1 Hz dans la direction horizontale), et que les directions de vibration (Illustration 12) sont assez homogènes (environ Nord-Sud). Il n'est pas à exclure que ces deux secteurs n'en soient qu'un seul.

Par ailleurs, les capteurs à la limite Ouest du secteur 4 (BO-00, BO-78, BO-31, BO-32, BO-33) ont des directions de vibration intermédiaires entre celles des capteurs plus à l'Est (BO-03, BO-04, BO-17, etc.) qui sont Ouest-Est et celles de capteurs du secteur 3 qui sont plutôt Nord-Sud. Ces capteurs ont sans doute été situés très proche de la limite entre les secteurs 3 et 4 (pour visualiser les limites de secteurs voir l'illustration 19).

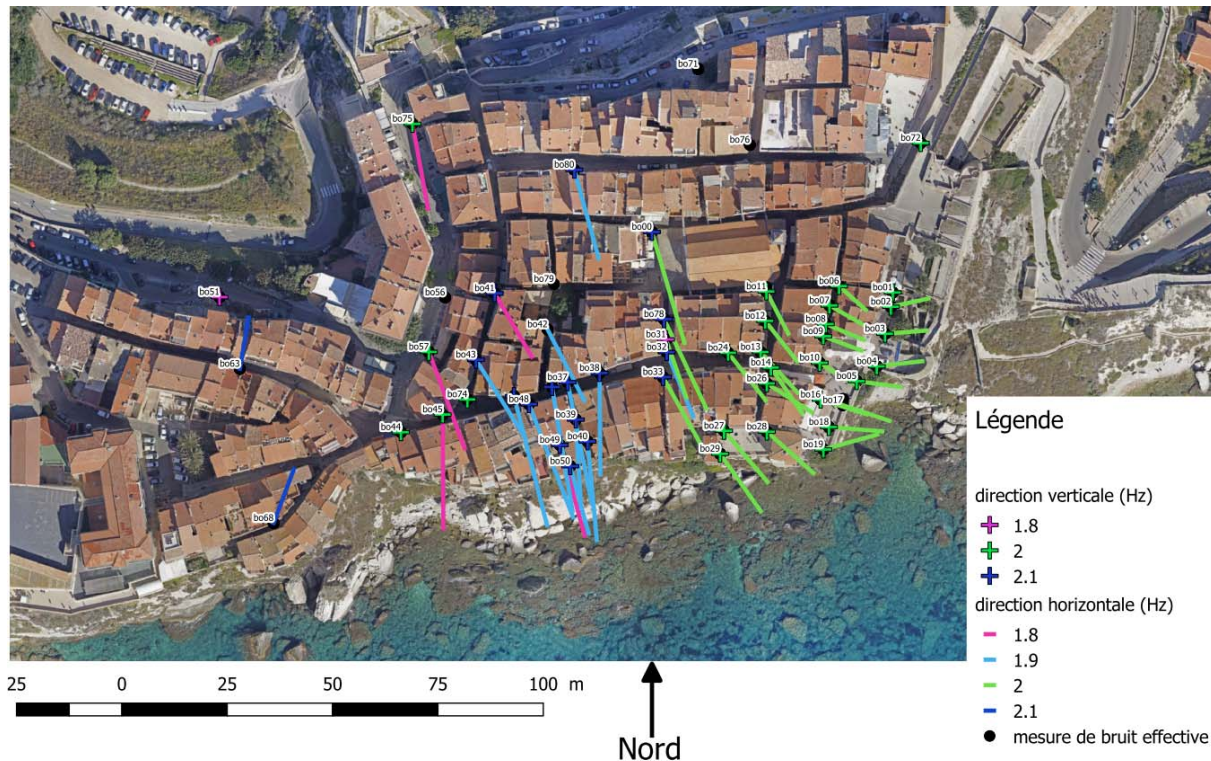


Illustration 12 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 1,9, 2,0 ou 2,1 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale. 4 secteurs avec des pics homogènes en fréquence sont distingués, voir l'illustration 19 pour visualiser les limites géographiques de ces secteurs.

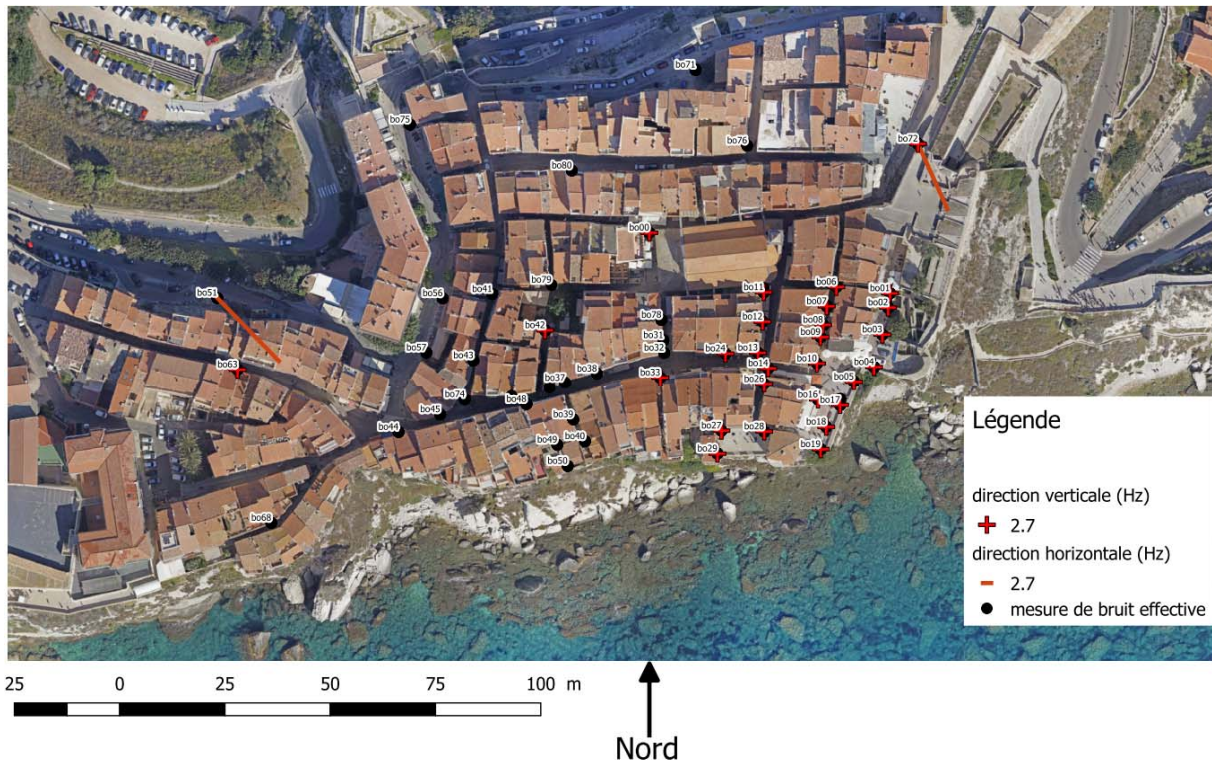


Illustration 13 : Représentation des pics en fréquence observés à 2,7 Hz à Bonifacio dans les directions verticale et horizontale. Les traits représentent les amplitudes et les azimuts de vibration dans la direction horizontale.

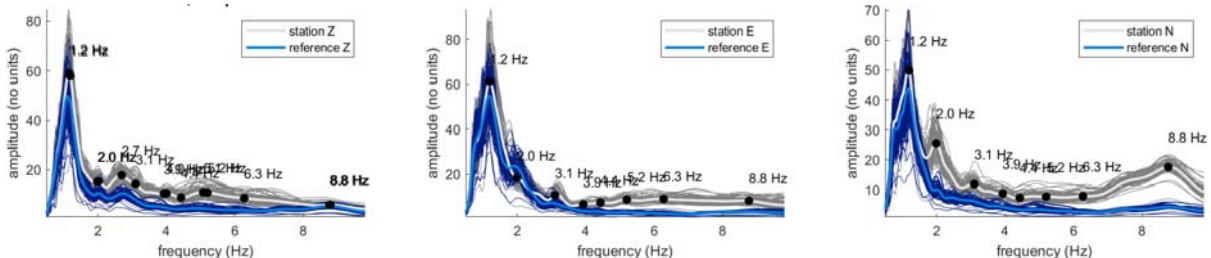


Illustration 14 : Exemple de spectres de bruit sismique pour le capteur BO-16, sur le secteur 4.

7.3. COMPORTEMENT A 3,0, 3,1 ET 3,2 HZ, A 3,6 ET 3,7 HZ, ET ENTRE 8,3 ET 8,8 HZ

Les pics en fréquences observés entre 3,0 et 8,8 Hz sont aussi répartis en secteurs.

Ainsi on observe (Illustration 15):

- au niveau du secteur 1 précédemment défini (voir le paragraphe 7.2), un pic dans la direction horizontale à 3,1 Hz ;
- au niveau du secteur 2 précédemment défini, un pic dans la direction verticale à 3 ou 3,1 Hz ;
- au niveau du secteur 3 précédemment défini, un pic dans la direction horizontale à 3 Hz (vibration de direction Nord-Sud) et un autre à environ 3,7 Hz;
- sur la partie sud du secteur 4, un pic à 3,1 Hz (voir 3,2 Hz pour les capteurs les plus au Nord) à la fois dans la direction verticale et la direction horizontale (vibration de direction Est-Ouest).

Notons que les capteurs de la partie Nord du secteur 4 (capteurs BO-06, BO-01, BO-02, BO-04, BO-07) ne présentent pas ce pic à 3,1 Hz, mais on peut observer un pic en fréquence sur ces capteurs à 3,6 et 3,7 Hz (Illustration 16), qui n'est pas observé sur la partie sud.

Cette subdivision du secteur 4 en deux sous-secteurs 4.1 et 4.2 s'observe aussi avec les pics en fréquence observés à 8,3-8,4 Hz dans la partie Nord (Illustration 17) et à 8,7 et 8,8 Hz dans la partie Sud (Illustration 18). L'analyse automatique des spectres pour le pointé des pics en fréquence révèle aussi des comportements sectorisés aux fréquences 4,1, 4,8 et 5,1-5,2 Hz (voir les illustrations en annexe), mais ces pics sont très faiblement exprimés sur les spectres et sont donc à la limite de la détection. Leur répartition dans l'espace ne sera donc pas interprétée.

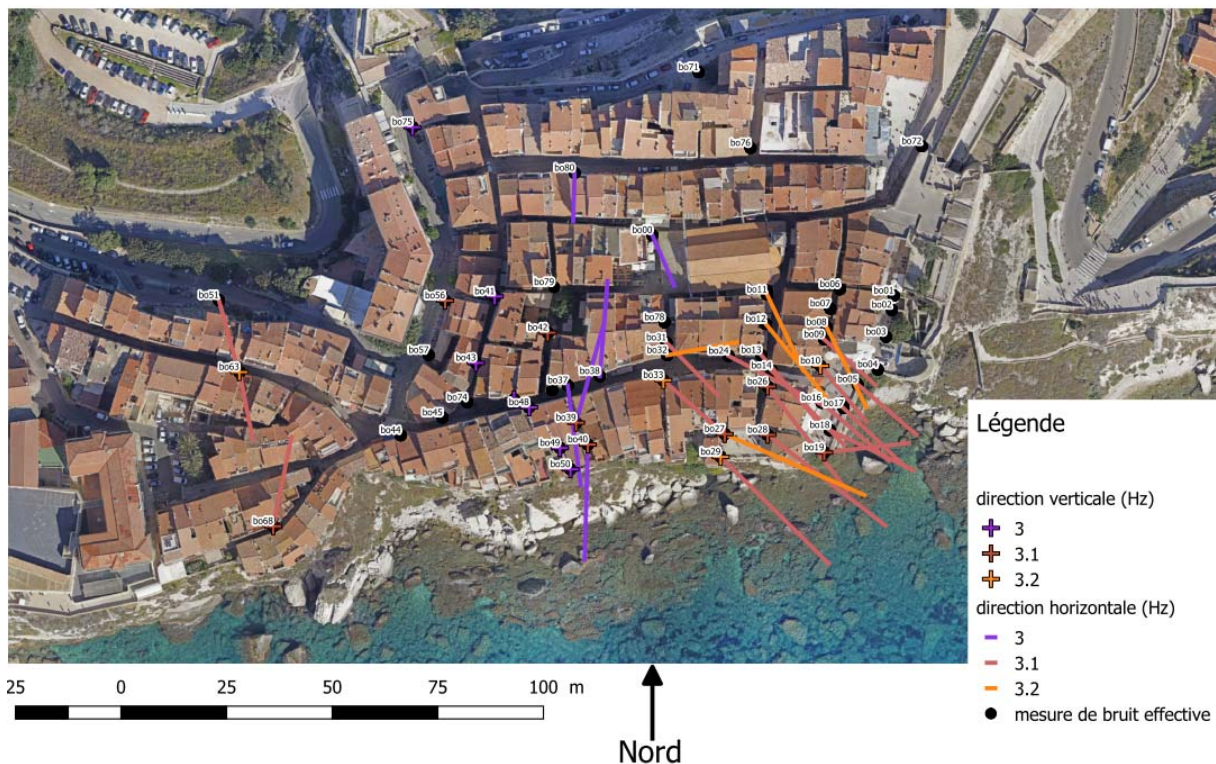


Illustration 15 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 3,0, 3,1 et 3,2 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale

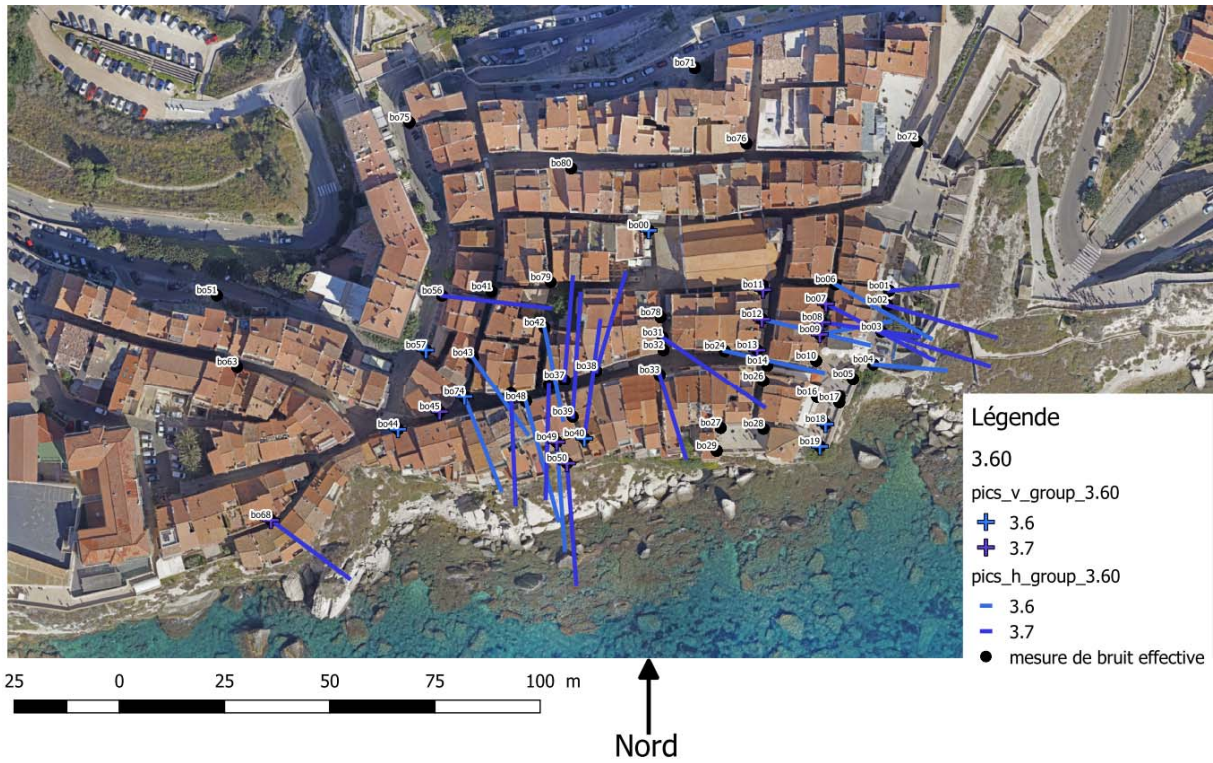


Illustration 16 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration à 3,6, et 3,7 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale

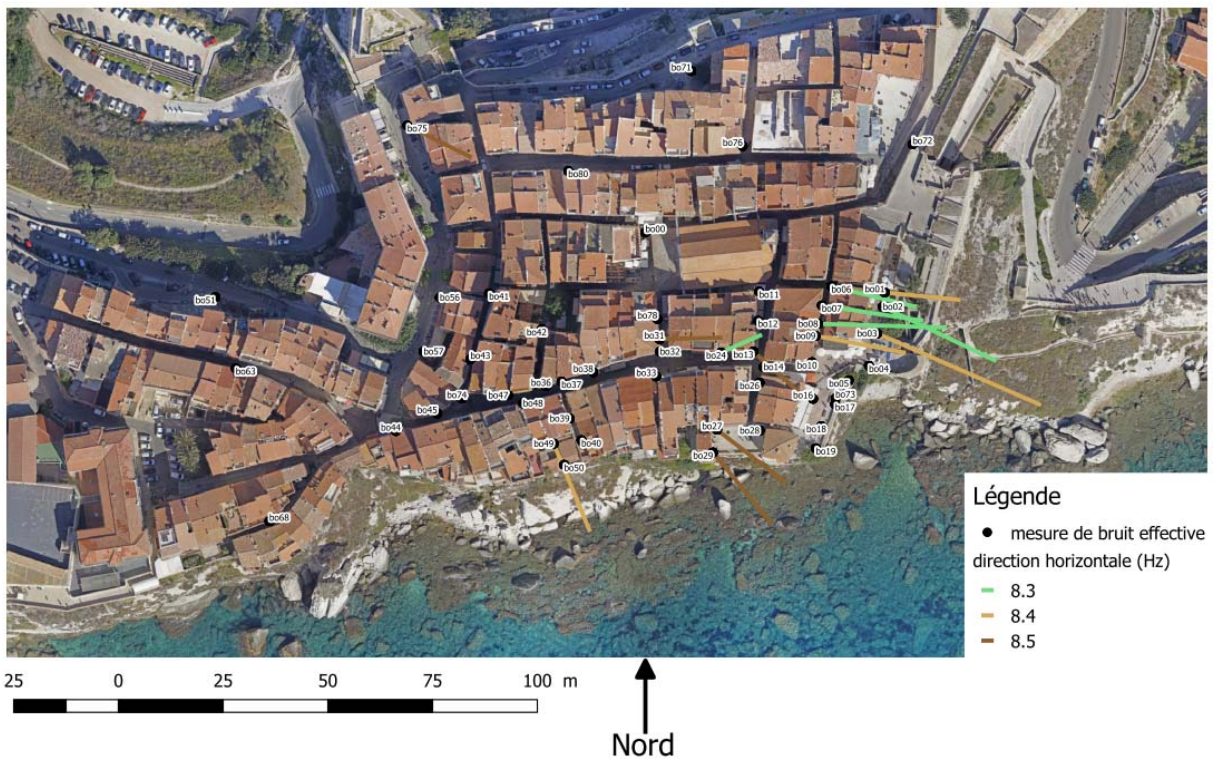


Illustration 17 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 8,3 et 8,5 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale

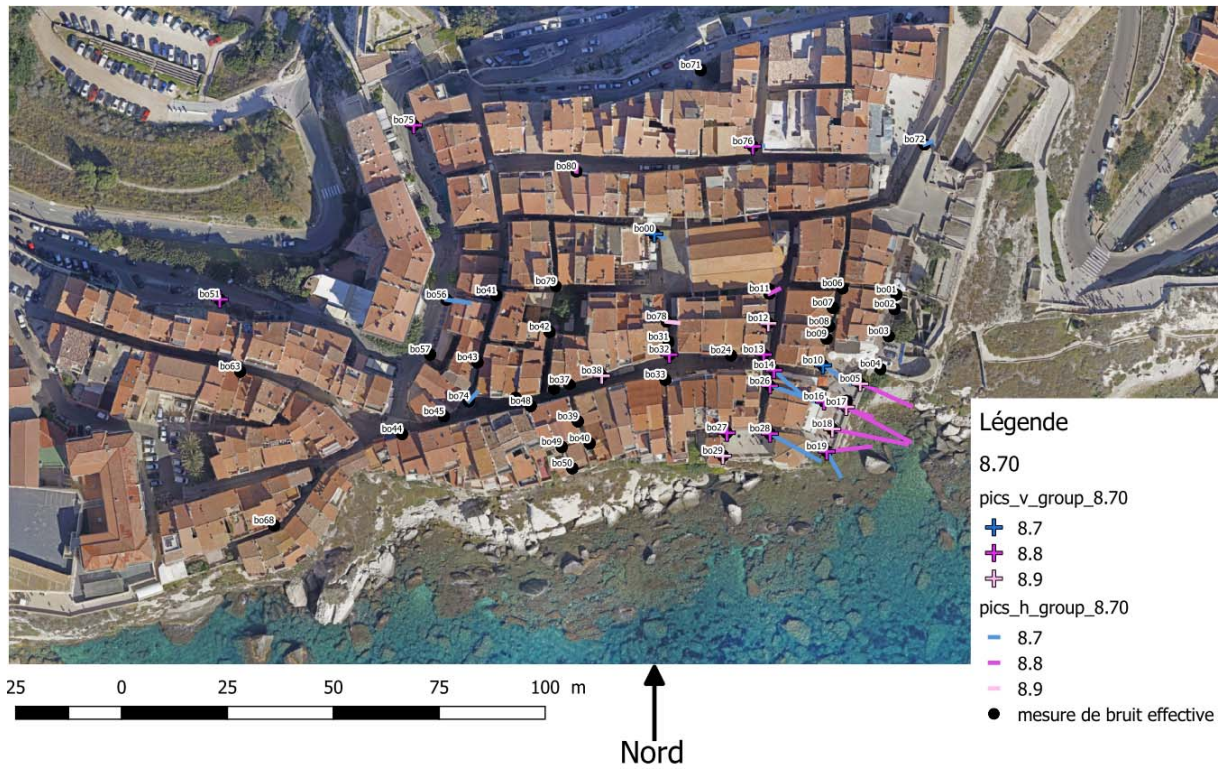


Illustration 18 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 8,7 et 8,9 Hz a été observée à Bonifacio dans la direction verticale et/ou dans la direction horizontale

8. Interprétation des résultats

8.1. VIBRATION GLOBALE DE LA CITADELLE DE BONIFACIO

L'uniformité de la vibration à 1,1-1,2 Hz au niveau de la Citadelle laisse penser qu'on observe ici un mode de résonance de la Citadelle dans son entièreté. Les directions de vibration sont compatibles avec cette hypothèse. Par ailleurs, l'augmentation des amplitudes de vibration dans la direction verticale plus on se rapproche de la zone de surplomb (Illustration 11 et Illustration 1c) est cohérent avec une vibration plus libre dans les zones de surplomb, assimilable à la vibration d'une poutre horizontale encastrée à son extrémité nord. Une confirmation pourrait être obtenue en appliquant la méthode de la Frequency Domain Decomposition (Zhang and Brincker, 2005 ; Brinker, 2014).

L'amortissement associé à ce pic en fréquence n'a pas été calculé. Une inspection visuelle des sommes de spectres montre que la largeur du pic est compatible avec un amortissement de plus de quelques pourcents (4-5 %), ce qui est réaliste pour la vibration d'un objet naturel.

Un pic en fréquence ayant une valeur supérieure à 1 Hz pour un objet aussi volumineux indique que son matériau constitutif est très compétent (i.e., rigide), ce qui a pu être confirmé par les essais en laboratoire sur des carottes rocheuses prélevées par forages au Sud-Est-ce la Citadelle (étude en cours de publication, communication personnelle de B. Vignerot).

8.2. SUBDIVISION EN 4 GRANDES UNITES

Quatre unités présentent des modes de vibration homogènes, pour des fréquences entre 1,9 et 3,7 Hz. C'est-à-dire que pour chacune de ces zones, on observe :

- une constance des directions et des amplitudes de vibration pour différents pics en fréquence ;
- 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 quatre unités de vibrations est qu'elles correspondent à quatre grand blocs, probablement séparés par des fractures d'orientation N-S :

- bien que l'amortissement associé à ces pics en fréquence n'ait pas été calculé, une inspection visuelle des sommes de spectres montre que la largeur des pics est compatible avec des amortissements comparable à ceux d'objets naturels (voir en particulier Bottelin et al., 2013). Cela exclut l'hypothèse que ces pics en fréquence soient liés à la présence de moteurs ;
- un éventuel artefact de changement de comportement lié aux variations des sollicitations sismiques du massif avec les conditions climatiques est une hypothèse très peu probable. D'une part, les données ont été normalisées avec les données du capteur de référence BO-00 afin d'éviter ce genre d'artefact. Ensuite, les zones de comportement homogène englobent des données de capteurs installés à l'occasion de différentes sessions de mesure (2 sessions pour les secteurs 1 et 2 et 3 sessions pour les secteur 3 et 4) ;

- ces zones ne correspondent pas à des ensembles de bâtiments jointifs, et ces pics ne correspondent donc pas à des modes de vibration de bâtiments. Des mesures de vibrations par GBRAR à Bonifacio ont permis de mettre en évidence les premières fréquences de résonance d'un bâtiment typique de la Citadelle (2 à 3 étages en maçonnerie), soit 4,3 et 6,1 Hz (rapport BRGM/RP- 69532-FR).

Notons que les positions des limites de ces secteurs ne sont pas forcément bien contraintes avec la géométrie du réseau de capteurs. Par exemple, la limite nord du secteur 4 n'est pas localisé très précisément : plus au Nord que les capteurs BO-01, BO-06 mais plus au Sud que les capteurs BO-72, BO-76. L'interprétation des limites de secteurs est présenté en Illustration 19.

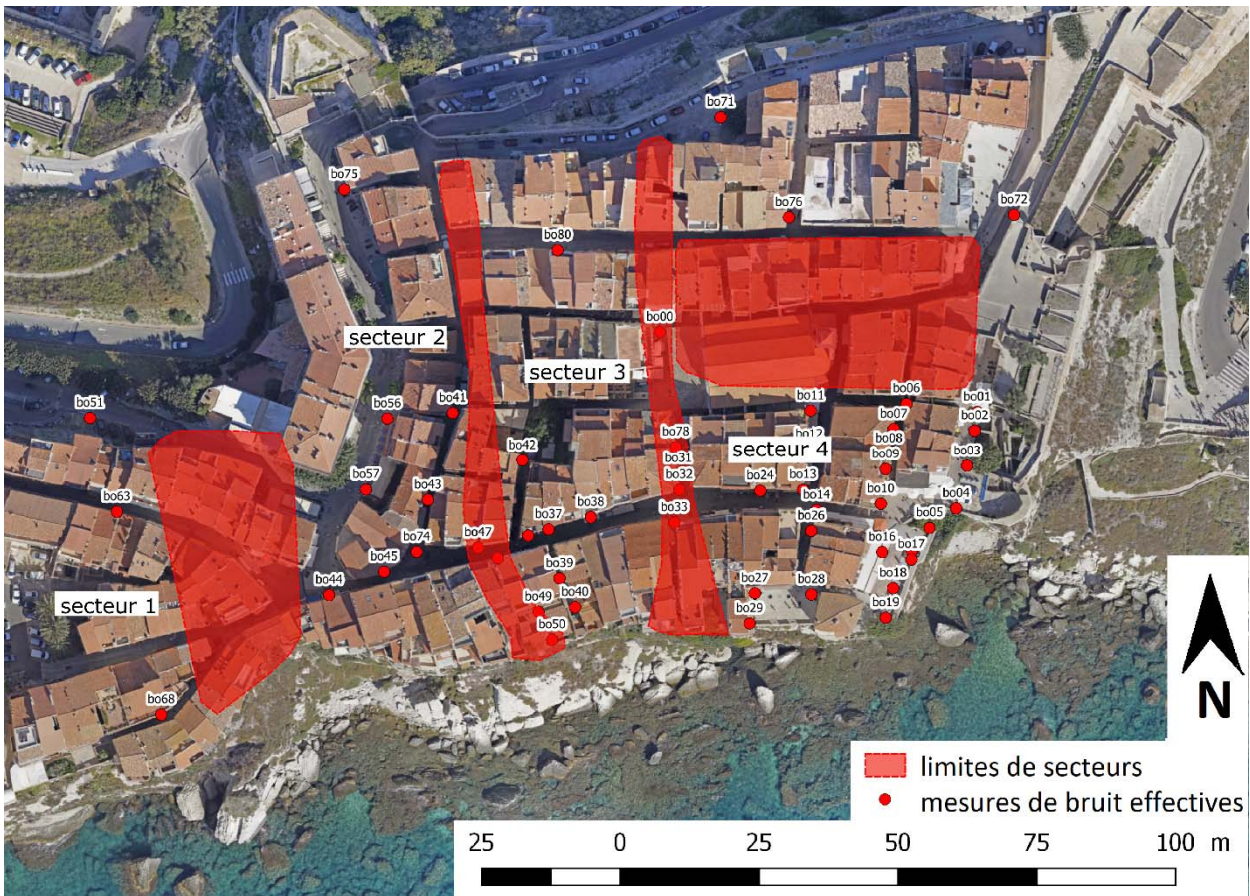


Illustration 19 : Interprétation de la répartition géographique des pics en fréquence en quatre blocs distincts.

8.3. SUBDIVISION DU SECTEUR SUD-EST (SECTEUR 4) EN DEUX BLOCS

Comme présenté en paragraphe 7.3, la répartition géographique des pics en fréquence n'est plus homogène au niveau du secteur 4 au-delà de 3 Hz et on peut distinguer deux sous-secteurs, l'un au Nord et l'autre au Sud (Illustration 20).

L'hypothèse la plus probable pour expliquer la présence de ces sous unités de vibrations est qu'elles correspondent à deux blocs, probablement séparés par une fracture d'orientation N110°. De même que précédemment :

- ces zones ne correspondent pas à des ensembles de bâtiments jointifs, et ces pics ne correspondent donc pas à des modes de vibration de bâtiments ;

- bien que l'amortissement associé à ces pics en fréquence n'ait pas été calculé, une inspection visuelle des sommes de spectre montre que la largeur des pics est compatible avec des amortissements comparable à ceux d'objets naturels. Notons que le pic à 8,8 Hz est généralement plus large que les autres pics observés (Illustration 14). Ce qui indique que l'amortissement associé à cette fréquence de vibration est plus important. Cette différence de comportement peut être interprété différemment:
 - 1) l'endommagement intrinsèque du bloc est plus important que celui des autres blocs ;
 - 2) les conditions aux limites de ce bloc sont différentes et sans doute plus favorables que pour les autres blocs avec plus de mobilisation de l'interface en friction et/ou un pourcentage de pont rocheux plus élevé. Cette hypothèse s'appuie sur les résultats de simulations présentés dans Levy et al. (2010b) qui montrent que la largeur du 1^{er} pic de résonance pour un bloc s'affine pour un pourcentage de ponts rocheux décroissant de 21% jusqu'à la chute du bloc avec 0% de ponts rocheux.

L'hypothèse que nous favoriserons est l'hypothèse n°2, car nous observons sur cette zone à la fois le comportement global de la Citadelle et le comportement de ce bloc. Par ailleurs, si le bloc était très indépendant, on s'attendrait à observer des amplitudes plus importantes pour ces pics, au moins comparables à celles observées pour les pics à 1,2 Hz et 2 Hz, ce qui n'est pas le cas.

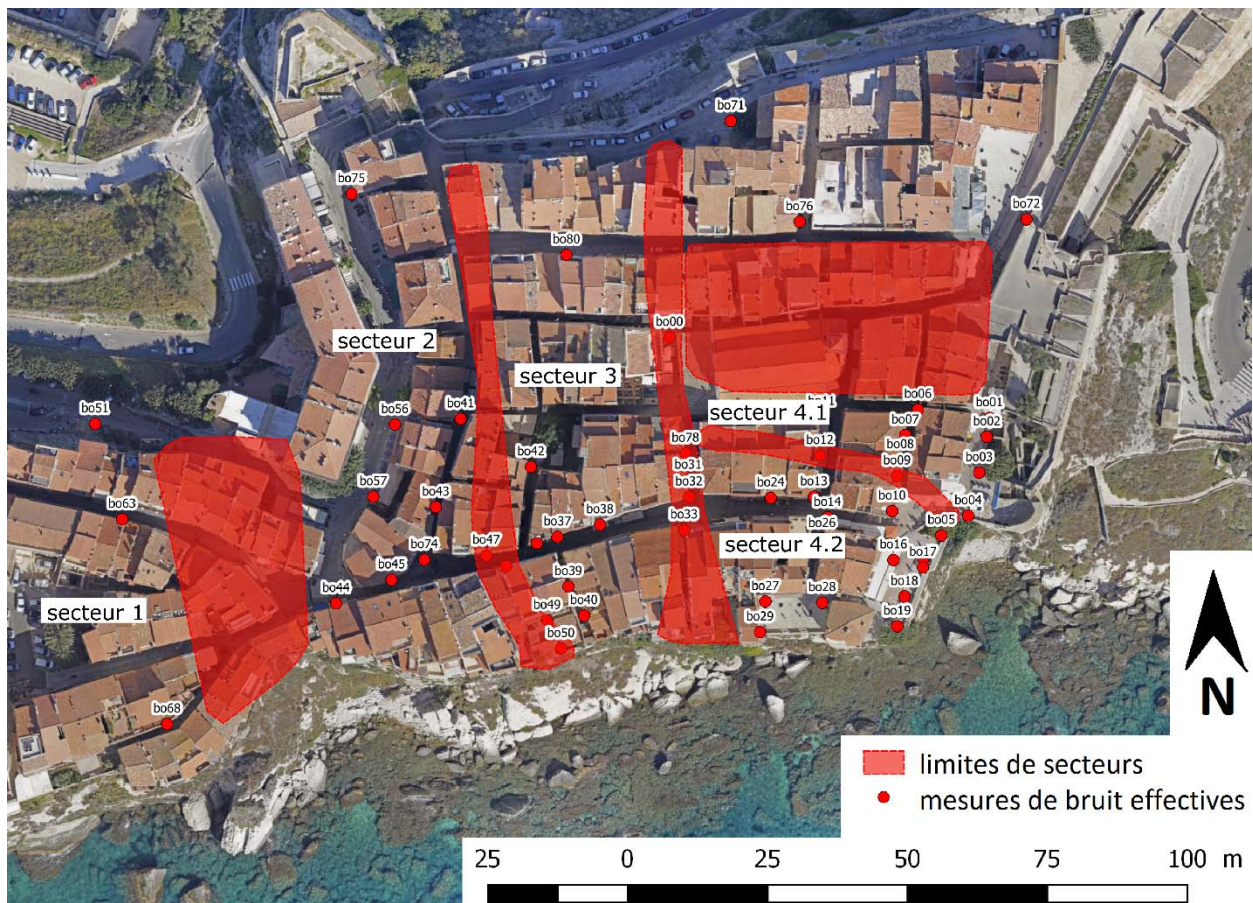


Illustration 20 : Interprétation de la répartition géographique des pics en en faveur d'une subdivision du secteur 4 en deux sous-secteurs.

8.4. BILAN

L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a pu permettre 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 du surplomb.

Les amplitudes et les largeurs des pics en fréquence obtenus pour ce bloc peuvent être interprétées de deux manières différentes : 1) le bloc n'est pas encore très indépendant du reste du massif, 2) l'endommagement intrinsèque du bloc est important. L'hypothèse que nous favoriserons est l'hypothèse n°1, car nous observons sur cette zone à la fois le comportement global de la Citadelle et le comportement du bloc.

Notons que ces résultats montrent globalement que la roche à Bonifacio est très compétente (un pic en fréquence ayant une valeur supérieure à 1 Hz pour un objet aussi volumineux indique que son matériau constitutif est très compétent), ce qui a pu être confirmé par les essais en laboratoire sur des carottes rocheuses prélevées par forages au Sud-Est-ce la Citadelle (étude en cours de publication, communication personnelle de B. Vignerot).

9. Conclusions et perspectives

Des mesures d'écoute sismique ont été réalisées du 29/01 au 31/01/2019 sur la Citadelle de Bonifacio. Autant que possible, les caractéristiques des pics en fréquences (amplitude, direction, amortissement, etc.) ont été analysées dans l'objectif d'en déduire des informations qualitatives sur la taille relative des blocs et leur degré de désolidarisation.

L'analyse de la répartition géographique des pics en fréquence a pu permettre d'identifier la fréquence de résonance de la Citadelle ainsi que quatre zones au comportement homogène en fréquence (constance des directions et des amplitudes pour différents pics en fréquence du spectre de Fourier, limites de changement de comportement localisées aux mêmes endroits pour les différents pics en fréquences). L'hypothèse la plus probable pour expliquer la présence de ces quatre unités de vibrations est qu'elles correspondent à quatre grands blocs, probablement séparés par des fractures d'orientation N-S. Une origine anthropique de ces comportements en fréquence est jugée peu probable par les auteurs. En effet, les amortissements observés sont comparables à ceux d'objets naturels (et non pas de moteurs), et ces zones ne correspondent pas à des ensembles de bâtiments jointifs et ces pics ne correspondent donc pas à des modes de vibration de bâtiments. **La géométrie du compartiment rocheux en surplomb au Sud-Est de la Citadelle a pu être précisée avec la détection de ses limites probables à l'Ouest et au Nord (qui correspondent probablement à des structures de type fissures ou failles). Les amplitudes et les largeurs des pics en fréquence obtenus pour ce compartiment rocheux peuvent être interprétées de deux manières différentes : 1) le bloc n'est pas encore très indépendant du reste du massif, 2) l'endommagement intrinsèque du bloc est important. L'hypothèse que nous favoriserons est l'hypothèse n°1, car nous observons sur cette zone à la fois le comportement global de la Citadelle et le comportement du bloc.** A l'échelle de la Citadelle, les résultats montrent que la roche est très compétente avec peu d'endommagement interne (un pic en fréquence ayant une valeur supérieure à 1 Hz pour un objet aussi volumineux indique que son matériau constitutif est rigide), ce qui a pu être confirmé par les essais triaxiaux en laboratoire sur des carottes rocheuses prélevées par forages au Sud-Est de la Citadelle.

Les hypothèses émises dans ce rapport pourraient être étayées/confirmées par plusieurs moyens :

- refaire des mesures de bruit sismique à la Citadelle en plaçant les capteurs selon un maillage plus dense pour mieux contraindre les limites de blocs ;
- appliquer la méthode de la Frequency Domain Décomposition (FDD) sur les données sismiques pour pouvoir reconstruire les déformées modales de la Citadelle et des différents blocs et confirmer leur fonctionnement (par exemple, une vibration de type poutre horizontale encastree sur une extrémité pour les zones de surplomb). Cela pourrait potentiellement donner des informations qualitatives sur le taux de découplage entre blocs ;
- appliquer la méthode du décrétement aléatoire (Jeary, 1997; Dunand, 2005) sur les données sismiques pour pouvoir quantifier plus précisément l'amortissement associé aux fréquences de résonance ;
- faire la comparaison des résultats obtenus avec les données du CEREMA qui ont été acquises à Sutta Rocca, un site très proche de la Citadelle de Bonifacio qui possède une géologie et une configuration comparables (Payeur et Mercerat, 2017).

Par ailleurs, nous recommandons d'installer un capteur sismique de manière permanente sur le secteur 4.2 afin de pouvoir suivre l'évolution des fréquences de résonance de ce bloc dans le temps. Les variations de ces fréquences de résonance peuvent être liées : 1) à une augmentation de l'endommagement interne du bloc ou une dégradation de l'état de sa fracture arrière, 2) aux changements de comportement des matériaux avec la température et la teneur en eau. Afin de pouvoir distinguer les changements de fréquence de résonance réversibles liés aux conditions météorologiques, des changements de fréquence de résonance irréversibles liés à de l'endommagement, cette installation doit impérativement s'accompagner de mesures des conditions météorologiques. En particulier, il sera nécessaire de mesurer la température en profondeur (par exemple, dans une cave) et en surface, ainsi que de mesurer la pluviométrie.

10. Bibliographie

André, J. P., Barthet, Y., Ferrandini, M., Ferrandini, J., Reynaud, J. Y., & Tessier, B. (2011). *The Bonifacio formation (Miocene of Corsica): transition from a wave-to tide-dominated coastal system in mixed carbonate-siliciclastic setting*. Bulletin de la Société géologique de France, 182(3), 221-230.

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., 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.

Cerema (2013). *Réalisation de la carte multi-aléas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio*. N° d'affaire 10R000046.

Cerema (2014). *Bonifacio – secteur de la Citadelle – Détermination de l'aléa éboulement*. N° d'affaire C14MN0073.

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*. Geophysical Journal International, 213(3), 1876-1897.

Dunand (2005). *Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil*. PhD thesis, Grenoble University.

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

Jeary, A. P. (1997). *Damping in structures*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 72, 345 –355, selected papers from the Ninth International Symposium on Wind Engineering.

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., Mourot, P., & Hantz, D. (2010). *Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France)*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115(F4).

Lévy, C., Baillet, L., Jongmans, D., Mourot, P., & Hantz, D. (2010b). *Caractérisation dynamique d'une écaille calcaire (Chamousset, Vercors)*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010, Grenoble, juillet 2010.

Payeur, J.B., Mercerat D. (2017). *Auscultation des massifs rocheux : caractérisation dynamique par mesure in situ*. Rapport de suivi 2016. CEREMA Direction Territoriale Méditerranée – Laboratoire de Nice – RGGC.

Pinnegar, C. R. (2006). *Polarization analysis and polarization filtering of three-component signals with the time—frequency S transform*. *Geophysical Journal International*, 165(2), 596-606.

Reynaud, J. Y., Ferrandini, M., Ferrandini, J., Santiago, M., Thinon, I., ANDRÉ, J. P., ... & Tessier, B. (2013). *From non-tidal shelf to tide-dominated strait: The Miocene Bonifacio Basin, Southern Corsica*. *Sedimentology*, 60(2), 599-623.

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*. *Geophysical Journal International*, 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.

Annexe 1

comportements sectorisés aux fréquences 4,1, 4,8 et 5,1-5,2 Hz

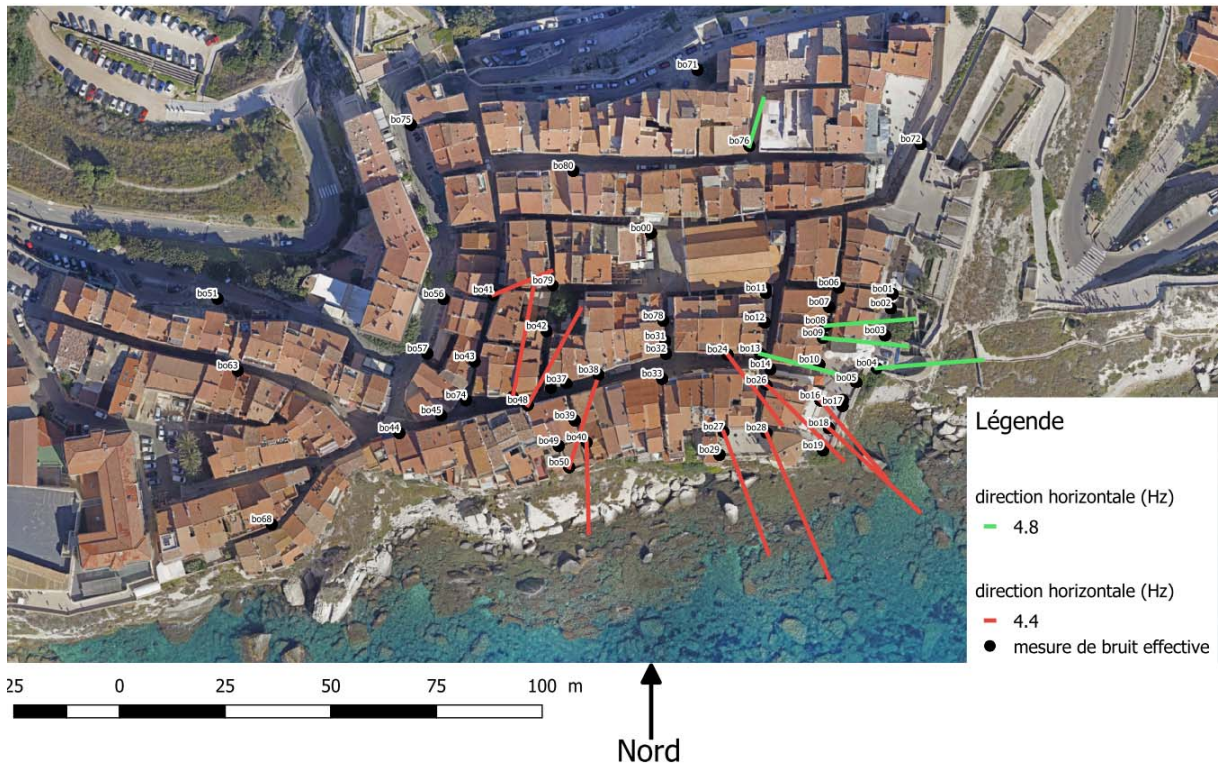


Illustration 21 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 4,4 et 4,8 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction horizontale

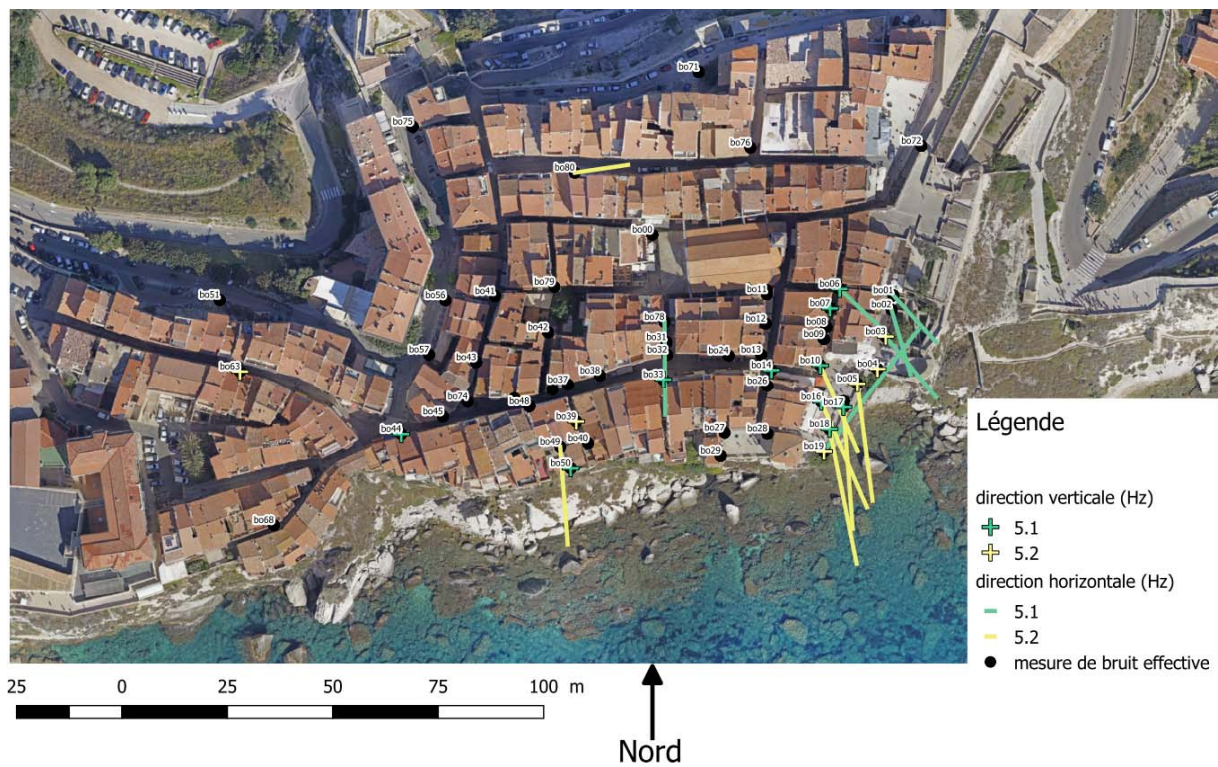


Illustration 22 : Représentation des capteurs pour lesquels une vibration entre 5,1 et 5,2 Hz a été observé à Bonifacio dans la direction



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 Corse

Immeuble Agostini
Zone Industrielle de Furiani
20600 – Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33