

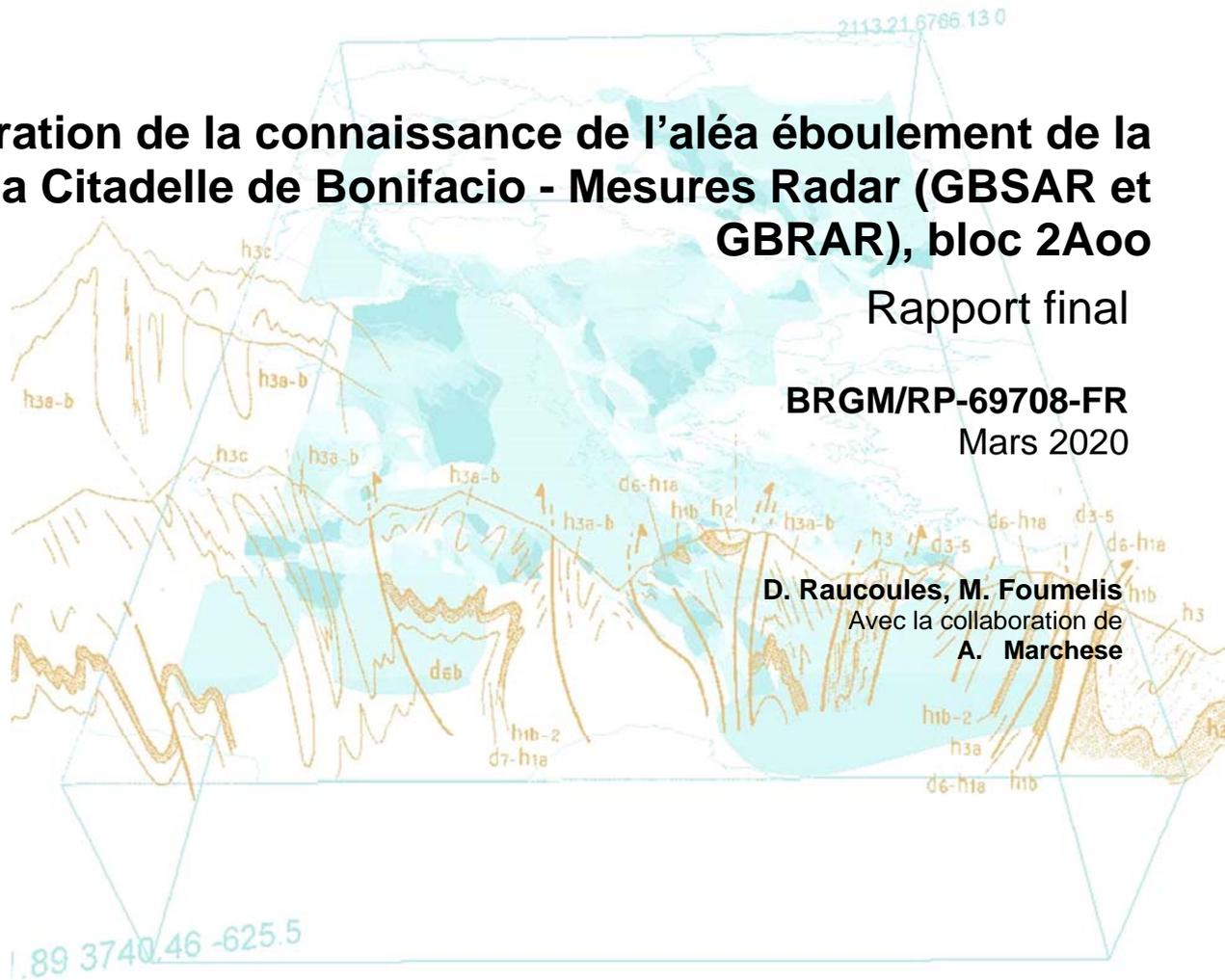


Amélioration de la connaissance de l'aléa éboulement de la falaise de la Citadelle de Bonifacio - Mesures Radar (GBSAR et GBRAR), bloc 2Aoo

Rapport final

BRGM/RP-69708-FR
Mars 2020

D. Raucoules, M. Foumelis
Avec la collaboration de
A. Marchese



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service Public du BRGM

Ce document a été vérifié par : de Michele Marcello date : 01/04/2020

Approbateur :

Nom : REY Anthony Fonction : Directeur régional du BRGM en Corse

Date : 14/04/2020

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 : Interférométrie Radar, GBSAR, GBRAR, Bonifacio.

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

Raucoules D., Foumelis M. avec la collaboration de Marchese A. (2020) – Amélioration de la connaissance de l'aléa éboulement de la falaise de la Citadelle de Bonifacio - Mesures Radar (GBSAR et GBRAR), bloc 2Aoo. Rapport BRGM/RP-69708-FR, 17 p., 12 fig.

Synthèse

Dans le cadre de l'étude d'amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement de la falaise de la Citadelle de Bonifacio (étude menée par le BRGM, l'INERIS et le CEREMA pour le compte des services de l'état depuis mi 2018), une série d'investigations *in situ* a été réalisée afin de préciser les modèles géologique, géométrique et géomécanique du site.

Ainsi, l'étude proposée vise à utiliser l'interférométrie radar (satellitaire et au sol) afin de fournir une information complémentaire aux autres observations produites dans le cadre du projet, pour caractériser la falaise de Bonifacio. Il s'agit :

- d'interférométrie GBRAR (Ground Based Real Aperture Radar - radar à ouverture réelle au sol) visant à identifier des modes de vibrations propres de différentes parties de la falaise ;
- d'interférométrie SAR (Synthetic Aperture Radar - radar à synthèse d'ouverture) satellitaire (basée sur des données issues des satellites Sentinel-1) visant à cartographier d'éventuels mouvements de subsidence sur la citadelle ;
- d'interférométrie SAR au sol (Ground Based Synthetic Aperture Radar - GBSAR) pour observer d'éventuels mouvements sur la falaise elle-même.

Les résultats du GBRAR ont permis d'identifier des modes de vibration cohérents avec les mesures de sismique passive (effectuées dans le cadre du même projet) et - par ailleurs - les mesures SAR interférométriques n'ont pas mis en évidence de mouvements de surface (à la précision des techniques utilisées près).

Sommaire

1. Contexte.....	6
2. Capteurs utilisés	7
3. Mesures vibrométriques	8
3.1. SITUATION DES MESURES.....	8
3.2. RESULTATS	11
3.2.1. Synthèse des Observations	12
3.3. DISCUSSION.....	13
4. Mesures interférométriques Sentinel-1.....	13
4.1. JEU DE DONNEES.....	13
4.2. RESULTATS	14
4.3. DISCUSSION.....	15
5. Mesures GBSAR.....	15
5.1. SITUATION DU CAPTEUR.....	16
5.2. RESULTATS	16
5.3. DISCUSSION.....	16
6. Conclusion	17
7. Bibliographie	17

Liste des figures

Figure 1: Capteur IBIS en configuration IBIS-S	7
Figure 2: Capteur IBIS en configuration IBIS-L. En situation près de la Chapelle de Saint-Roch à Bonifacio.	8
Figure 3 : Position du capteur IBIS-S dans le Jardin des Vestiges.....	9
Figure 4 : Position du capteur en bas de la falaise (depuis le cheminement d'accès à la plage de Sutta Rocca).....	9
Figure 5 : Vue de cornets réflecteurs (trièdres) fixés sur le mur de la Place du Marché.....	10
Figure 6 : Distances entre le capteur et certains cornets réflecteurs ainsi que l'angle Sud Ouest de la Place du Marché.....	10
Figure 7 : Exemple de spectre en fréquence correspondant un bâtiment situé Place du Marché vu depuis le bas de la falaise. On notera les pics de fréquences (notamment 1.8Hz et 4.3Hz). On notera que bien que mesuré depuis une distance de 92 m ce spectre est le meilleur que nous ayons obtenu au cours de cette étude.	11
Figure 8 : Exemple de spectre correspondant à un cornet réflecteur vu du Jardin des Vestiges.....	12
Figure 9 : Carte de déformation superposé à une image optique du secteur. Les zones non couvertes correspondent à des secteurs à faibles cohérence interférométrique (notamment en raison de présence de végétation). Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence).....	14
Figure 10 : Carte de déplacements en ligne de visée du satellite à l'échelle de la commune. Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence). On notera la présence d'une signature de subsidence au Nord Est du port. L'étoile bleue indique le point que nous avons choisi comme référence (les mouvements sont mesurés relativement à ce point).....	14
Figure 11 : Carte de déplacements en ligne de visée du satellite. Extrait sur la zone d'intérêt. Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence).	15
Figure 12 : Position (étoile bleue) choisie pour le capteur.....	16

1. Contexte

Dans le cadre de l'étude d'amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement de la falaise de la Citadelle de Bonifacio, une étude basée sur la télédétection radar (basée au sol et satellitaire) a été réalisée dans le volet « observations » du projet. Cette étude s'inscrit dans la tâche 2A00 du projet global.

Il s'agit d'une part de produire des mesures vibrométriques complémentaires de l'écoute sismique mise en œuvre dans le cadre du projet (tâche 2A0) et d'autre part de mettre en évidence d'éventuels mouvements lents se produisant sur le site de la Citadelle.

Trois méthodes basées sur l'interférométrie radar au sol et satellitaire ont été proposées. Elles sont proposées conjointement du fait de leur complémentarité pour la problématique du site. 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 détail, il a été réalisé les mesures d'interférométrie radar suivantes :

- Interférométrie SAR satellitaire (cf Hanssen, 2001, Massonnet et al., 1998) à partir de données issues du satellite Sentinel 1. Il s'agit d'une part de produire des interférogrammes (i.e. images de différence de phase) donnant le déplacement suivant la ligne de visée du capteur. Aussi – du fait que, de par sa nature, le satellite image une zone depuis le haut - la technique est plutôt adaptée à la mesure de la composante verticale du mouvement. Etant limitée par la résolution du capteur Sentinel 1 (environ 20 m) on s'attendra de fait à une mesure peu dense sur le secteur d'intérêt qui est de faible extension. Toutefois, s'il s'avérait que sur le secteur la cohérence interférométrique soit bonne, les satellites de la constellation Sentinel 1 (A et B) ont une répétitivité de 12 jours et une archive de données acquises remontant à 2015 (mise à jour en permanence) ce qui permettrait de produire des séries temporelles sur plusieurs années des mouvements verticaux de ces points avec une précision de l'ordre de quelques mm/an à mettre éventuellement à jour postérieurement (en cas de nécessité de suivi par la suite) ;
- Interférométrie GBRAR (radar à ouverture réelle au sol – cf. Negulescu et al., 2013). Il s'agira de mesurer des oscillations de faibles amplitudes (la technique est potentiellement sensible à la dizaine de microns pour des vibrations de l'ordre du Hertz) de cibles « naturelles » mais également des cornets réflecteurs (dispositifs métalliques d'une vingtaine de cm rétrodiffusant le signal radar) que nous fixerons sur des roches/murs potentiellement affectés par le phénomène suivi. Le but est de mettre en évidence des différences de modes de vibration entre différentes parties des éléments à suivre pouvant suggérer des faiblesses structurelles. Ces mesures sont effectuées à partir du capteur IBIS FS acquis par le BRGM qui a une portée théorique de plusieurs centaines de mètres. Un temps de mesures de l'ordre de l'heure est souvent suffisant mais la précision de la mesure augmentant avec le temps de mesure, il est souhaitable d'augmenter ce temps pour des vibrations de très faibles amplitude. Ces mesures permettent uniquement la mesure des vibrations dans la direction de visées du radar, elles sont donc moins précises que l'écoute micro-sismique réalisée avec des capteurs sismiques 3 composantes. Cependant, la méthode est complémentaire

car elle permet de faire des mesures de vibration le long de la falaise et plus seulement en tête de falaise comme avec les capteurs sismiques ;

- Interférométrie GBSAR (radar à ouverture de synthèse au sol). De façon analogue à l'interférométrie SAR satellitaire, le GBSAR imagera le déplacement suivant la ligne de visée (qui est plutôt horizontale contrairement à l'imagerie satellitaire). Il s'agira d'observer d'éventuels mouvements ayant eu lieu entre deux campagnes de mesures et nous tenterons (les phénomènes de pertes de cohérence pouvant être très limitatifs pour une telle mesure) de produire des résultats interférométriques entre les deux campagnes afin d'identifier des mouvements très lents. Nous utiliserons le même type capteur que pour les mesures GBRAR sur des supports différents : la tête du radar s'adaptant sur trépied pour GBRAR ou sur rail pour faire du SAR. Dans le cadre de cette étude Georeva et IDS nous ont exceptionnellement prêté une deuxième tête de radar.

2. Capteurs utilisés

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé le capteur IBIS acquis par le BRGM. Il s'agit d'un radar fonctionnant à une fréquence d'environ 17 GHz (bande Ku) fonctionnant 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 200Hz. La mesure est un jeu de 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. Sa portée maximum est d'environ 1 km. Il y a la possibilité d'installer un accéléromètre sur le capteur afin de prendre en partie en compte les vibrations propres de l'instrument.

En configuration IBIS-L, le capteur est positionné sur un rail de 2,5 m sur lequel il se déplace afin de permettre un traitement de synthèse d'ouverture, qui à partir de mesures répétées permet de mettre en évidence d'éventuels déplacements.



Figure 1: Capteur IBIS en configuration IBIS-S



Figure 2: Capteur IBIS en configuration IBIS-L. En situation près de la Chapelle de Saint-Roch à Bonifacio.

3. Mesures vibrométriques

3.1. SITUATION DES MESURES

Deux emplacements pour le capteur IBIS-S ont été choisis. Dans les deux cas il s'agissait d'emplacements offrant une vue sur la Place du Marché ou de la Falaise sous la Place du Marché. Ces emplacements sont situés dans le jardin des Vestiges et sur le chemin d'accès à la mer près de la Chapelle de Saint-Roch en bas de la falaise. 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 aux mouvements verticaux et Est-Ouest. Les mesures se sont étalées sur environ deux jours par emplacement.



Figure 3 : Position du capteur IBIS-S dans le Jardin des Vestiges.



Figure 4 : Position du capteur en bas de la falaise (depuis le cheminement d'accès à la plage de Sutta Rocca)

Par ailleurs, 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 (cf. Figure 5).



Figure 5 : Vue de cornets réflecteurs (trièdres) fixés sur le mur de la Place du Marché.



Figure 6 : Distances entre le capteur et certains cornets réflecteurs ainsi que l'angle Sud Ouest de la Place du Marché.

3.2. RESULTATS

Les données ont été traitées à l'aide de l'outil (IBIS data viewer) fourni avec l'instrument. Il permet notamment à partir des séries temporelles de mouvements obtenues d'extraire un spectre en fréquence. Les figures suivantes montrent des exemples de résultats obtenus.

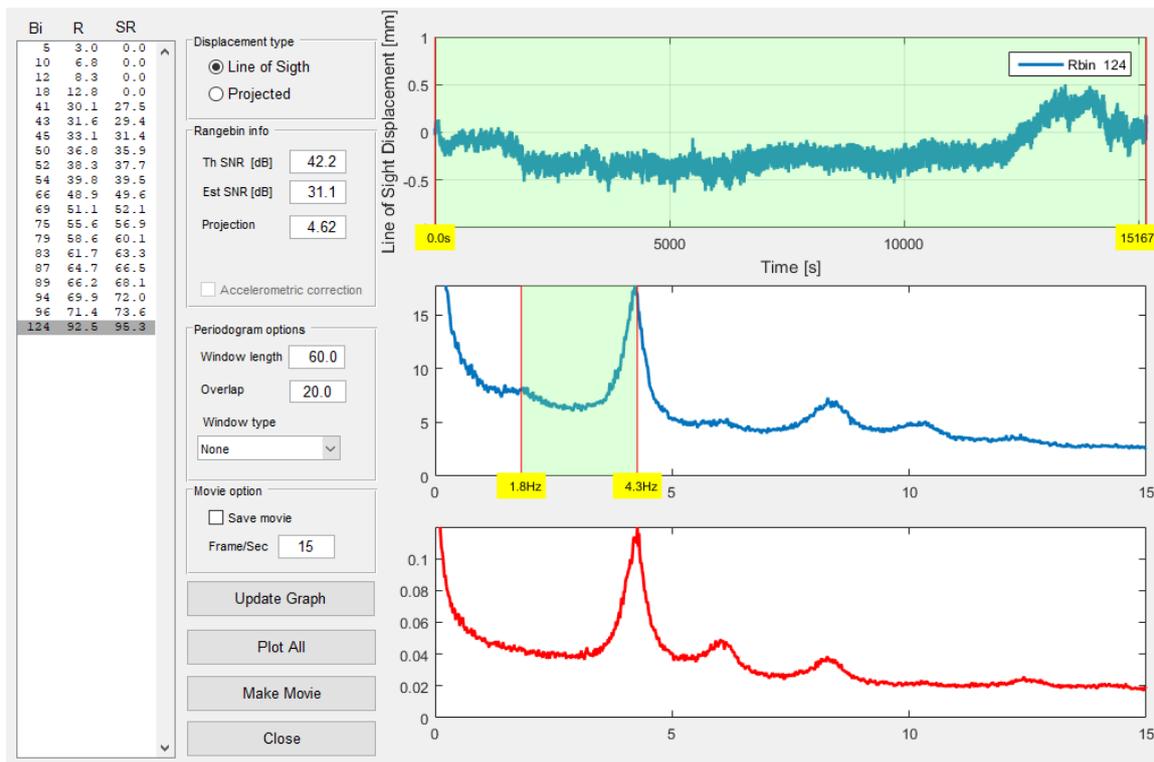


Figure 7 : Exemple de spectre en fréquence correspondant un bâtiment situé Place du Marché vu depuis le bas de la falaise. On notera les pics de fréquences (notamment 1.8Hz et 4.3Hz). On notera que bien que mesuré depuis une distance de 92 m ce spectre est le meilleur que nous ayons obtenu au cours de cette étude.

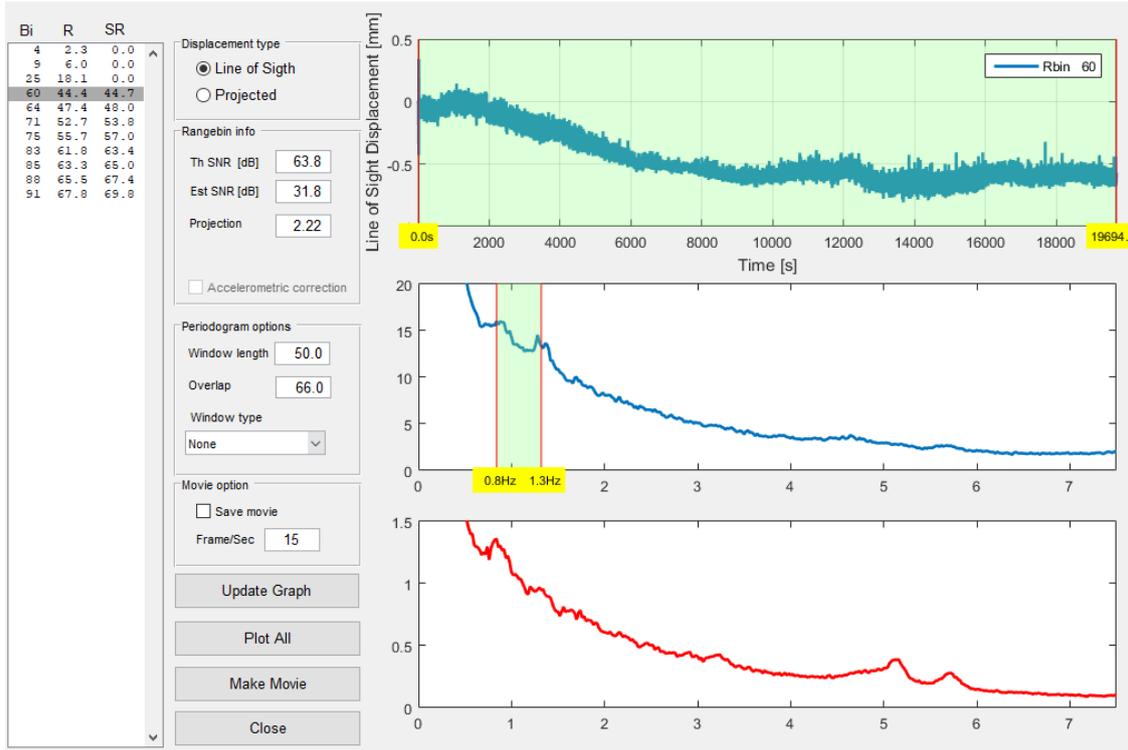


Figure 8 : Exemple de spectre correspondant à un cornet réflecteur vu du Jardin des Vestiges.

3.2.1. Synthèse des Observations

Observations sur les mesures IBIS S à partir du bas de la Chapelle de Saint-Roch.

- Les fréquences 1,7-1,8 Hz apparaissent dans la falaise sous la Place du Marché mais aussi sur la falaise sous le jardin des Vestiges ;
- Les fréquences 2,3-2,5 Hz apparaissent sur deux profils sous la Place du Marché ;
- Le profil du bâtiment situé Place du Marché met en évidence les fréquences 1,8 Hz, 4,3 Hz mais également 6,1 Hz 8,3 et 10,4 Hz. Ce profil est particulièrement peu bruité et correspond (facilement localisable vue la distance de 92 m) à un bâtiment identifiable.

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 Hz et 6,1 Hz ne sont identifiées que pour ce point. Les fréquences 8,3 Hz 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'en prend en compte l'information fournies par l'accéléromètre installé sur le capteur.

Observations sur les mesures IBIS S à partir du Jardin des Vestiges.

Sur 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 de fréquences sont clairement identifiables sur plusieurs points :

- Un premier pic à 0,8 - 0,9 Hz ;
- Un second à 1,3 - 1,4 Hz.

Observations (jardin des vestiges)

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.

3.3. DISCUSSION

Les données sismiques concordent avec ces observations pour les pics 1,7/1,8 Hz et 2,5 Hz vus depuis le bas de la falaise (donc assimilables à des vibrations soient verticales soient Est-Ouest) et 1,3 Hz vu depuis le Jardin des Vestiges (donc Nord Sud).

4. Mesures interférométriques Sentinel-1

4.1. JEU DE DONNEES

Pour le traitement par interférométrie SAR satellitaire, le choix s'est porté sur un traitement de type stacking. En effet, nous sommes partis du principe que les mouvements étaient a priori faibles, aussi une estimation de la vitesse moyenne était un indicateur suffisant pour identifier un éventuel mouvement. En cas de détection d'un mouvement, une étude plus approfondie sur l'évolution de cette déformation pourrait être éventuellement proposée postérieurement.

Cette étude se base sur l'utilisation de données Sentinel 1 A et B.

Nous avons traité 77 images couvrant la période 2015-2018.

Le pas échantillonnage a été choisi à 15 m (la résolution spatiale des données Sentinel-1 étant de l'ordre de 20m) afin d'avoir un niveau de détail suffisant.

4.2. RESULTATS

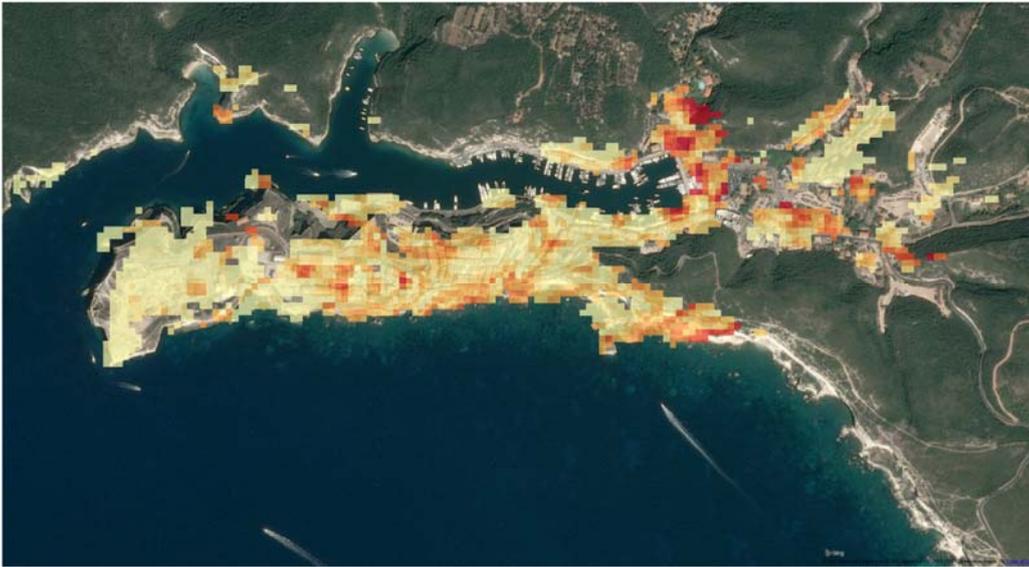


Figure 9 : Carte de déformation superposé à une image optique du secteur. Les zones non couvertes correspondent à des secteurs à faibles cohérence interférométrique (notamment en raison de présence de végétation). Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence).

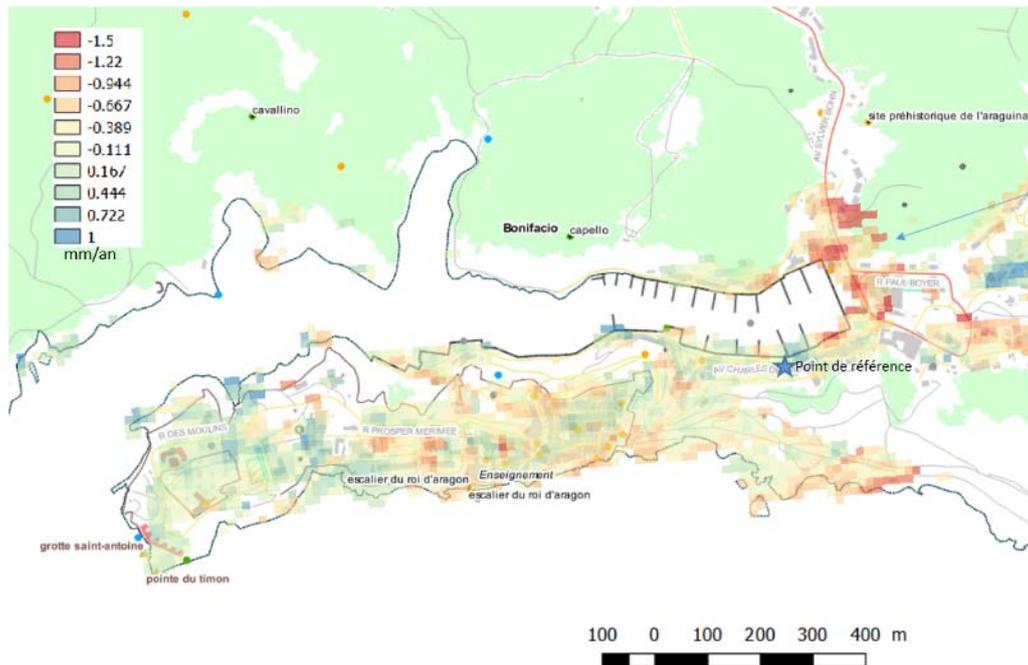


Figure 10 : Carte de déplacements en ligne de visée du satellite à l'échelle de la commune. Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence). On notera la présence d'une signature de subsidence au Nord Est du port. L'étoile bleue indique le point que nous avons choisi comme référence (les mouvements sont mesurés relativement à ce point)



Figure 11 : Carte de déplacements en ligne de visée du satellite. Extrait sur la zone d'intérêt. Le code couleur rouge indique un mouvement d'une portion de la surface s'éloignant du satellite (i.e. subsidence).

La zone d'intérêt ne semble pas montrer de subsidence > 0,8 mm/an (donc peu significative compte tenu de la précision de la mesure)

4.3. DISCUSSION

Le traitement interférométrique a permis de faire les observations suivantes :

- Une détection d'une signature de faible subsidence entre le port et la Rue Paul Boyer (<1,5 mm/an) ;
- Sur le secteur de la Place du Marché: détection insuffisamment significative (< 0,8 mm/an, de l'ordre de l'erreur de mesure) de subsidence sur la période 2015-2018.

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.

5. Mesures GBSAR

Il s'agissait de mettre en place et d'acquérir une première série de données en vue d'une prochaine mesure initialement envisagée pour octobre 2019. L'idée étant de mesurer les éventuels mouvements ayant eu lieu entre ces deux campagnes de mesures.

5.1. SITUATION DU CAPTEUR



Figure 12 : Position (étoile bleu) choisie pour le capteur.

Le choix du site est lié à la facilité d'accès, au positionnement face à la falaise et à l'accès à l'électricité au niveau de la Chapelle de Saint-Roch (remerciements : Mairie de Bonifacio). Outre un relevé photographique, la position du rail a été matérialisée par l'implantation de clous.

5.2. RESULTATS

Le capteur a fonctionné de façon continue pendant 3 jours afin d'acquérir les données. Il n'a pas été produit pour l'instant de carte de déformation.

5.3. DISCUSSION

Au vu des résultats Sentinel-1 montrant une stabilité sur plusieurs années, la reprise des mesures en octobre ne semble pas nécessaire – sauf évènement spécifique se produisant d'ici cette date.

6. Conclusion

Cette étude basée sur des moyens interférométriques radar, a permis de :

- Confirmer la stabilité (en terme de subsidence) du secteur de la Place du Marché sur la période 2015-2018 à partir de données satellitaires issues des capteurs Sentinel 1. Elle a par ailleurs mis en évidence une légère subsidence sur le secteur du Port ;
- Estimer certaines fréquences propres sur la falaise et la Place du Marché afin de compléter les informations obtenues à partir de sismomètres ;
- Effectuer une première campagne de mesures GBSAR sur la falaise sous la place du Marché en prévision de futures mesures de mouvements.

7. Bibliographie

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

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, Engineering Structures, vol 51, p. 10-22



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34