

Rapport d'expertise :

Avis technique sur le phénomène de submersion marine du port de Bonifacio (Corse-du-Sud) le 24 mai 2021

BRGM/RP-70906-FR
Juin, 2021

Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations Appuis à la police de l'eau
Catastrophe naturelle Autres

Date de réalisation de l'expertise : Juin 2021

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Corse-du-Sud, Bonifacio

Auteurs BRGM : J. Mugica, Y. Balouin, K. Hamon Kerivel

Demandeur : DDTM de Corse-du-Sud

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : qualite@brgm.fr

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.

La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Aucune diffusion du présent document vers des tiers identifiés ne sera volontairement engagée par le BRGM sans notification explicite du demandeur.

Le BRGM a mis en place un dispositif de déontologie visant à développer une culture de l'intégrité et de la responsabilité dans le quotidien de tous ses salariés.

Après examen, il est ressorti qu'il n'existait aucun lien d'intérêt :

- ***entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,***
- ***entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise.***

susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Pedreros R.	Nom : Rey A.
Date : 25/06/2021	Directeur du BRGM en Corse :
Signature : 	Date : 30/06/2021
	Signature : 

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

Mots-clés : expertise, appuis aux administrations, submersion marine, seiche, Corse-du-Sud

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

Mugica J., Balouin Y., Hamon Kerivel K. (2021) – Avis technique sur le phénomène de submersion marine dans le port de Bonifacio (Corse-du-Sud) le 24 mai 2021. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-70906-FR. 26p., 10 fig., 1ann..

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Introduction	6
2. Contexte général	6
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	6
2.2. HISTORIQUE	7
3. Constat	8
4. Diagnostic	10
4.1. CONDITIONS METEO-MARINES LE 24 MAI 2021	10
4.2. INTERPRETATION ET HYPOTHESES.....	15
5. Risque résiduel	16
6. Recommandations	16
7. Déclaration	18
8. Annexes	19

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone concernée par la submersion marine (scan25® IGN2012, et BD Ortho® IGN2016).	7
Figure 2 : Extrait de la carte des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines pour un événement centennal sur le site du goulet de Bonifacio (Mugica et al., 2020).	8
Figure 3 : Illustration des vitesses d'écoulement les plus importantes depuis le quai Comparetti vers les zones en contrebas (à gauche) et des hauteurs d'eau atteintes (au centre et à droite, sources Facebook).	9
Figure 4 : Illustration des zones d'altitude inférieure à 1,5 m/NGF dans le goulet de Bonifacio susceptibles d'avoir été submergées par la mer le 24 mai 2021 et des zones d'écoulement rapide vers les zones les plus basses (cadre rouge).	10
Figure 5 : Préviation marégraphique du SHOM à Bonifacio exprimées en m/ZH (https://maree.shom.fr/harbor/BONIFACIO/hlt/0?date=2021-05-24&utc=standard).	11
Figure 6 : Hauteurs significatives (Hs) de vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016).	12
Figure 7 : Périodes (T) des vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016).	13
Figure 8 : Observations des conditions de vent au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.infoclimat.fr).	13
Figure 9 : Observation de la pression atmosphérique au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.meteociel.fr).	14

Figure 10 : Carte de la pression atmosphérique pour l'Atlantique nord (www.meteociel.fr). 14

Liste des Annexes

Annexe 1 – Note technique transmise en première urgence le 27 mai 2021 19

1. Introduction

La DDTM de Corse-du-Sud (DDTM2A) a sollicité le 25 mai 2021, le BRGM en Corse pour réaliser un diagnostic du phénomène de submersion marine, constaté le 24 Mai 2021 dans le port de Bonifacio. Les objectifs de la mission sont les suivants :

- Identifier si possible la cause de la submersion marine ;
- Evaluer le niveau de risques résiduels ;
- Emettre des recommandations pour le suivi et l'amélioration des connaissances de ce type de phénomène.

Ce diagnostic s'appuie sur des témoignages (revue de presse et échange avec la capitainerie du port de Bonifacio) supplémentés par une analyse des informations disponibles menée au travers de la consultation des bases de données accessibles. Une première note technique a été émise en urgence et transmise à la DDTM2A le 27 mai 2021 (Annexe 1).

Le phénomène a également fait l'objet d'une note¹ de la société PREDICT à la demande de la mairie de Bonifacio, fournie au BRGM par la DDTM2A.

L'expertise s'inscrit dans le cadre des missions d'Appui aux Administrations menées par le BRGM au titre de l'année 2021.

Ce rapport d'expertise ne constitue pas une étude du risque de submersion marine de détail mais pointe les probables causes pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes en particulier et des biens à proximité du site expertisé. Il vise également à apporter les premières recommandations en matière de suivi et d'amélioration des connaissances de ce type de phénomène afin d'évaluer les risques dans un second temps, dans le cadre d'études complémentaires spécifiques.

2. Contexte général

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

L'évènement de type submersion marine s'est produit sur la commune Bonifacio au niveau du port (Figure 1). Cependant, le présent avis technique considère les paramètres météo-marins à une échelle spatiale plus large (régionale) que celle du site expertisé tels que présentés dans les paragraphes suivants.

¹ Rapport d'évènement sur la variation rapide des niveaux d'eau dans le port de Bonifacio le 24 mai 2021, Rapport technique de la société PREDICT à la demande de la mairie de Bonifacio, 4p.

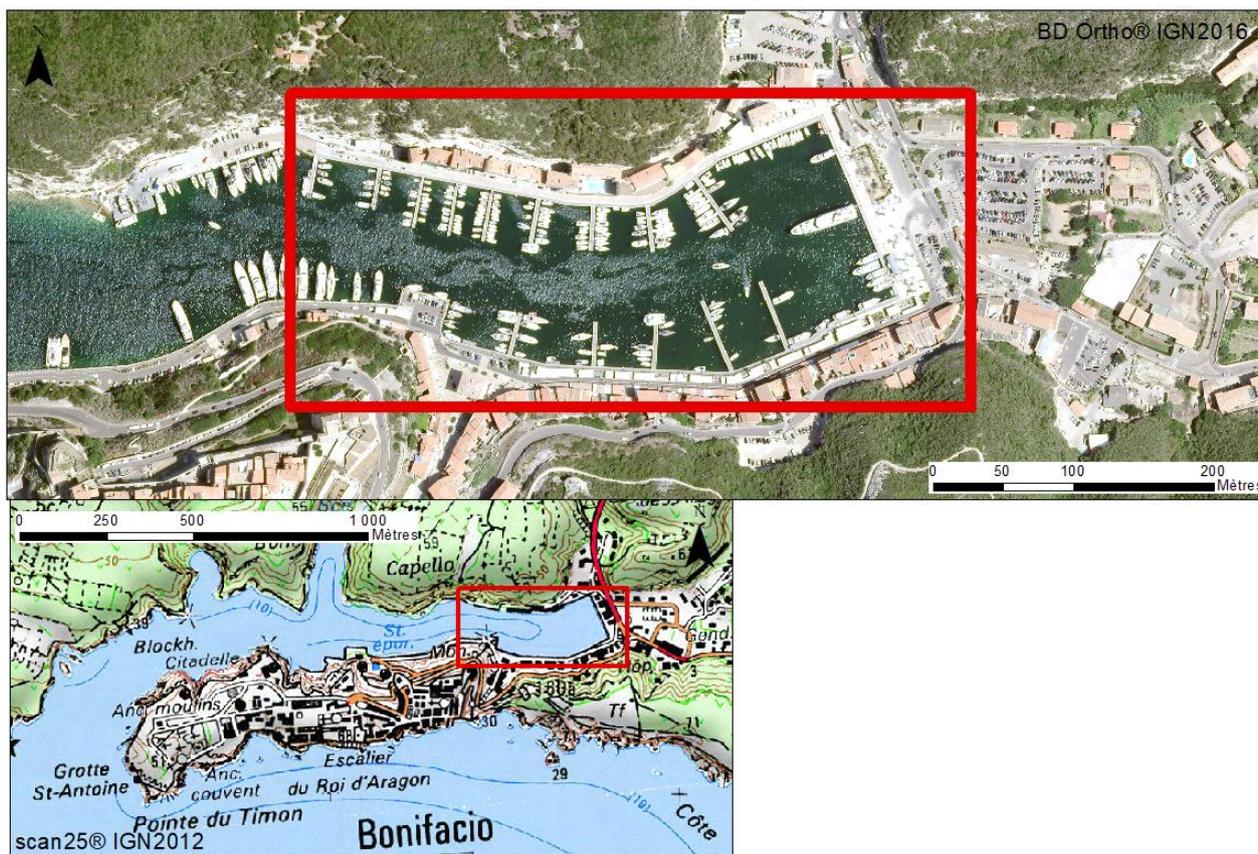


Figure 1 : Localisation de la zone concernée par la submersion marine (scan25© IGN2012, et BD Ortho© IGN2016).

2.2. HISTORIQUE

La base de données nationale sur les inondations (www.georisques.gouv.fr), gérée par le BRGM pour le compte du MTE, ne mentionne pas d'évènement d'inondations par submersion marine sur le territoire communal de Bonifacio ou au voisinage dans des contextes similaires. De même, l'approche historique réalisée par le BRGM dans le cadre de l'étude pour la DDTM2A relative à l'estimation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (ZBPESM), n'a pas mis en évidence d'évènement similaire dans le goulet de Bonifacio (Mugica et al., 2020²).

La cartographie des ZBPESM est une actualisation de l'Atlas des Zones Submersibles (AZS, 2014³) prenant en compte les caractéristiques géomorphologiques et météo-marines de la Corse. Il s'agit d'une approche dite « statique », c'est-à-dire que la dynamique de la submersion marine n'est pas estimée ni représentée, mais elle fournit les emprises et hauteurs d'eau potentielles lors de submersion marine générée par un évènement météo-marin centennal (Figure 2). Compte tenu de

² Mugica J., Louisor J., Maspataud A., Pedreros R., Koechler F. (2020) – Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Corse-du-Sud. Communes d'Osani à Bonifacio et communes de Conca et Sari-Solenzara. Rapport final., BRGM/RP-69376-FR, 200p., 91 fig., 4 tabl., 6ann., 1CD.

³ L'Atlas des Zones Submersibles (AZS) a été réalisé en 2014 au 1/10 000^{ème} par la DREAL de Corse et la DDTM de Corse-du-Sud. Il s'agit d'une première estimation basée sur un niveau marin de référence unique (2m/NGF) pour l'ensemble du littoral méditerranéen français, calculé par le CEREMA en 2013.

la configuration encaissée de la marine de Bonifacio, l'emprise potentielle d'une submersion marine reste relativement limitée aux premiers mètres du littoral pour l'évènement « actuel » (rouge + bleu) et s'étend au niveau des parkings pour l'évènement « 2100 » (rouge + bleu + vert, Figure 2).

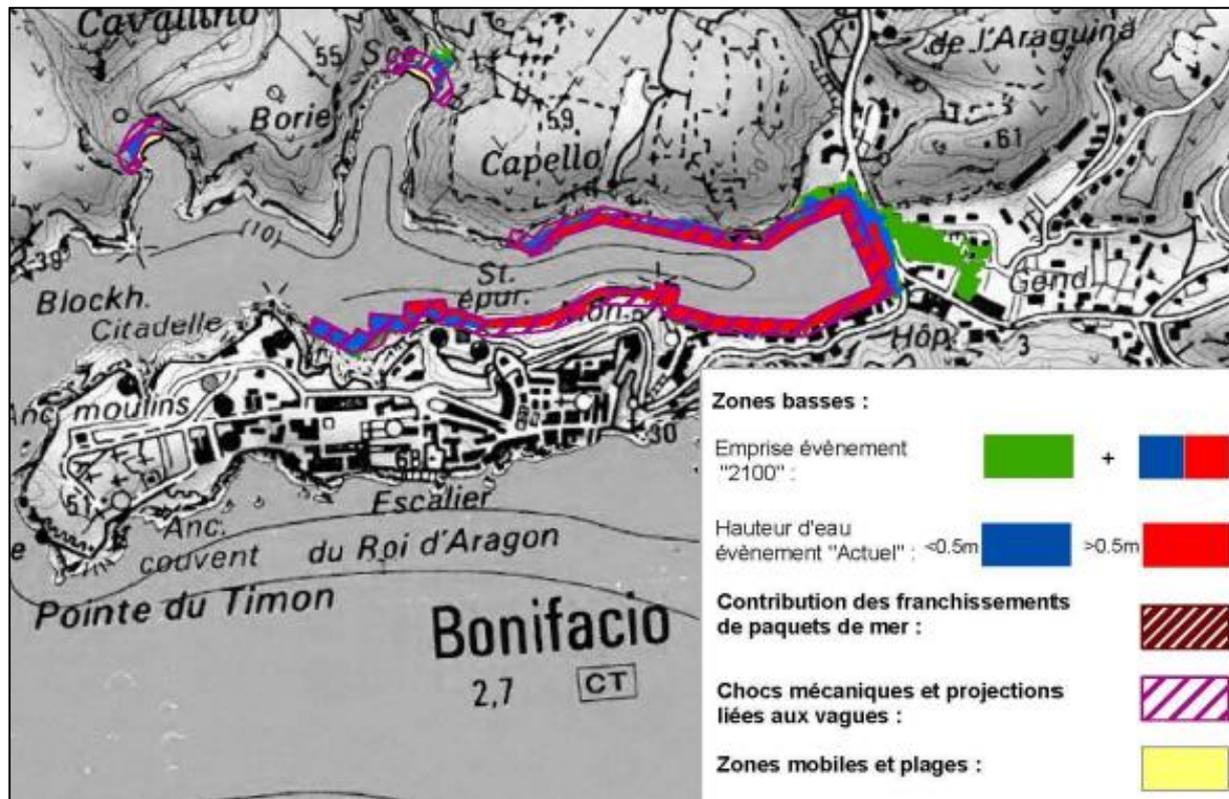


Figure 2 : Extrait de la carte des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines pour un évènement centennal sur le site du goulet de Bonifacio (Mugica et al., 2020).

Il n'existe pas de Plan de Prévention des Risques Littoraux liés à des submersions marines, ni de porter à connaissance de ce phénomène sur le territoire communal de Bonifacio.

Après consultation de la base de donnée GASPARD disponible sur la plateforme Géorisques (www.georisques.gouv.fr), la commune n'a pas fait l'objet, à ce jour, d'arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour des phénomènes similaires à celui observé le 24 mai 2021.

Une rapide recherche bibliographique ne permet pas de retrouver d'articles de presse traitant de phénomènes similaires dans la zone.

3. Constat

Le 24 mai 2021 en fin de matinée, le port de Bonifacio a fait l'objet d'un phénomène ayant causé une submersion marine des quais avec l'inondation des rez-de-chaussée de plusieurs bâtiments de la marine (Figure 2).

Les témoignages rendent compte de hauteurs d'eau d'une trentaine de centimètres au-dessus des quais dont l'altitude moyenne est de 1,1 m/NGF, ce qui permet de déduire un niveau marin atteint de 1,4 à 1,5 m/NGF maximum. A titre de comparaison, le niveau marin de référence pour un évènement météo-marin centennal « actuel » au large à Bonifacio, calculé dans le cadre de l'étude des ZBPESM (Mugica et al., 2020²) et utilisée pour la cartographie présentée Figure 2 est de 1,8 m/NGF.

Alors que la submersion marine n'aurait duré que quelques dizaines de minutes (voire plus dans les zones basses où l'évacuation naturelle de l'eau n'a pas été possible), un phénomène d'oscillation du plan d'eau ($\pm 1\text{m}$) a été observé pendant 3 heures environ. La période de ces oscillations serait de 15 minutes environ.

L'existence de zones basses en arrière des quais a pu par endroit générer des vitesses d'écoulement relativement rapides. Heureusement, les faibles hauteurs d'eau ont limité le risque pour les vies humaines et le phénomène n'a généré aucune victime. A notre connaissance, les dégâts générés ne concernent que les rez-de-chaussée de quelques bâtiments du quai Comparetti.

Aucune visite de terrain et aucune cartographie de la zone impactée n'ont été réalisées pour la présente expertise. Cependant, une analyse fine des clichés et vidéos consultées sur Internet combinée à la configuration topographique des quais permet d'estimer l'emprise de la zone submergée ainsi que les zones où les vitesses d'écoulement ont été maximales. Conformément aux témoignages, cette carte (Figure 3) confirme l'exposition dominante du quai Comparetti au Sud.



Figure 3 : Illustration des vitesses d'écoulement les plus importantes depuis le quai Comparetti vers les zones en contrebas (à gauche) et des hauteurs d'eau atteintes (au centre et à droite, sources Facebook).

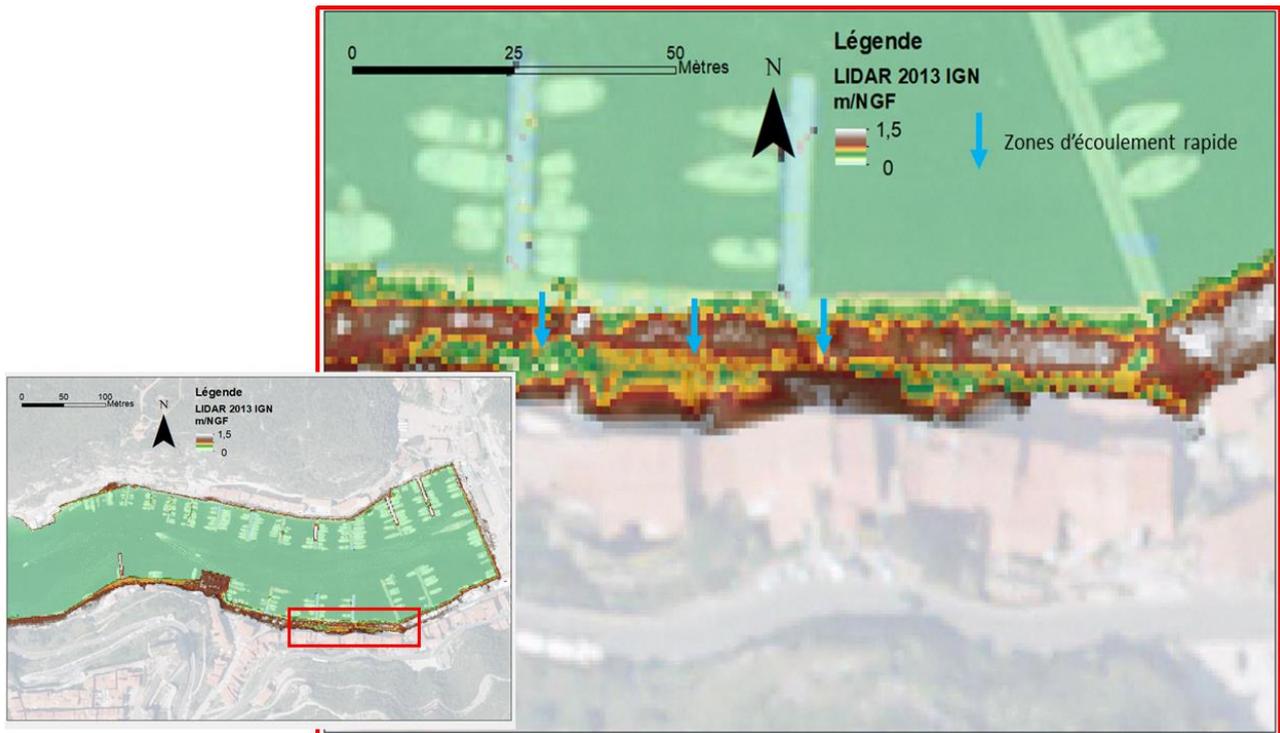


Figure 4 : Illustration des zones d'altitude inférieure à 1,5 m/NGF dans le goulet de Bonifacio susceptibles d'avoir été submergées par la mer le 24 mai 2021 et des zones d'écoulement rapide vers les zones les plus basses (cadre rouge).

4. Diagnostic

4.1. CONDITIONS METEO-MARINES LE 24 MAI 2021

- Données marégraphiques

Il n'existe pas de marégraphe sur le port de Bonifacio ni dans les environs. C'est pourquoi nous faisons appel aux prévisions de marée astronomique du SHOM à Bonifacio qui fournissent une valeur de 0,46 m/ZH à 7h34 (heure légale) soit 0,098 m/NGF à 5h34 UTC.

Ces niveaux marins ne sont supérieurs que de 1 cm à ceux du 23 mai et inférieurs que de 3 cm à ceux des marées de vives-eaux du 28 mai (Figure 4). D'autre part, ces niveaux de marée sont inférieurs de 6 cm à ceux des dernières grandes marées d'équinoxe de septembre 2020 par exemple.

Submersion marine du port de Bonifacio (24/05/2021)

Sunday May 23, 2021				Monday May 24, 2021			Tuesday May 25, 2021			Wednesday May 26, 2021					
Hour	Height	Coefficient		Hour	Height	Coefficient	Hour	Height	Coefficient	Hour	Height	Coefficient			
LW	00:39	0.26	---	LW	01:29	0.24	---	LW	02:17	0.23	---	LW	03:03	0.23	---
HW	06:51	0.46	---	HW	07:34	0.46	---	HW	08:15	0.46	---	HW	08:54	0.45	---
LW	13:23	0.21	---	LW	14:00	0.19	---	LW	14:36	0.18	---	LW	15:13	0.17	---
HW	19:36	0.43	---	HW	20:19	0.45	---	HW	21:01	0.47	---	HW	21:43	0.48	---

Figure 5 : Préviation marégraphique du SHOM à Bonifacio exprimées en m/ZH
(<https://maree.shom.fr/harbor/BONIFACIO/hlt/0?date=2021-05-24&utc=standard>).

Les données de niveaux d'eau à Ajaccio et à Porto Torres (Sardaigne) observées sur le site de l'IOC (<http://ioc-sealevelmonitoring.org/>), mettent en évidence un pic la première partie de la journée du 24 mai, mais qui est bien inférieur aux niveaux des marées d'équinoxe ou des niveaux enregistrés lors des dernières tempêtes hivernales par exemple.

- Conditions de vagues

Les deux houlographes du réseau CANDHIS (CEREMA) en Corse (La Revelatta et Alistro), ne fournissent pas d'enregistrement après le 13 et 18 mai 2021. Les simulations rétrospectives de l'IFREMER réalisées à partir du code WAVEWATCH III, ont donc été consultées (Figures 5 et 6) et ne mettent pas en évidence de conditions de vagues particulières ($H_s < 1,25$ m, $T < 6$ s) et susceptibles de générer une surcote significative (wave setup). La direction des vagues passant de l'est au nord-ouest ne semble pas présenter de caractère défavorable par rapport à l'orientation du goulet de Bonifacio (est-ouest, ouvert à l'ouest),

Submersion marine du port de Bonifacio (24/05/2021)

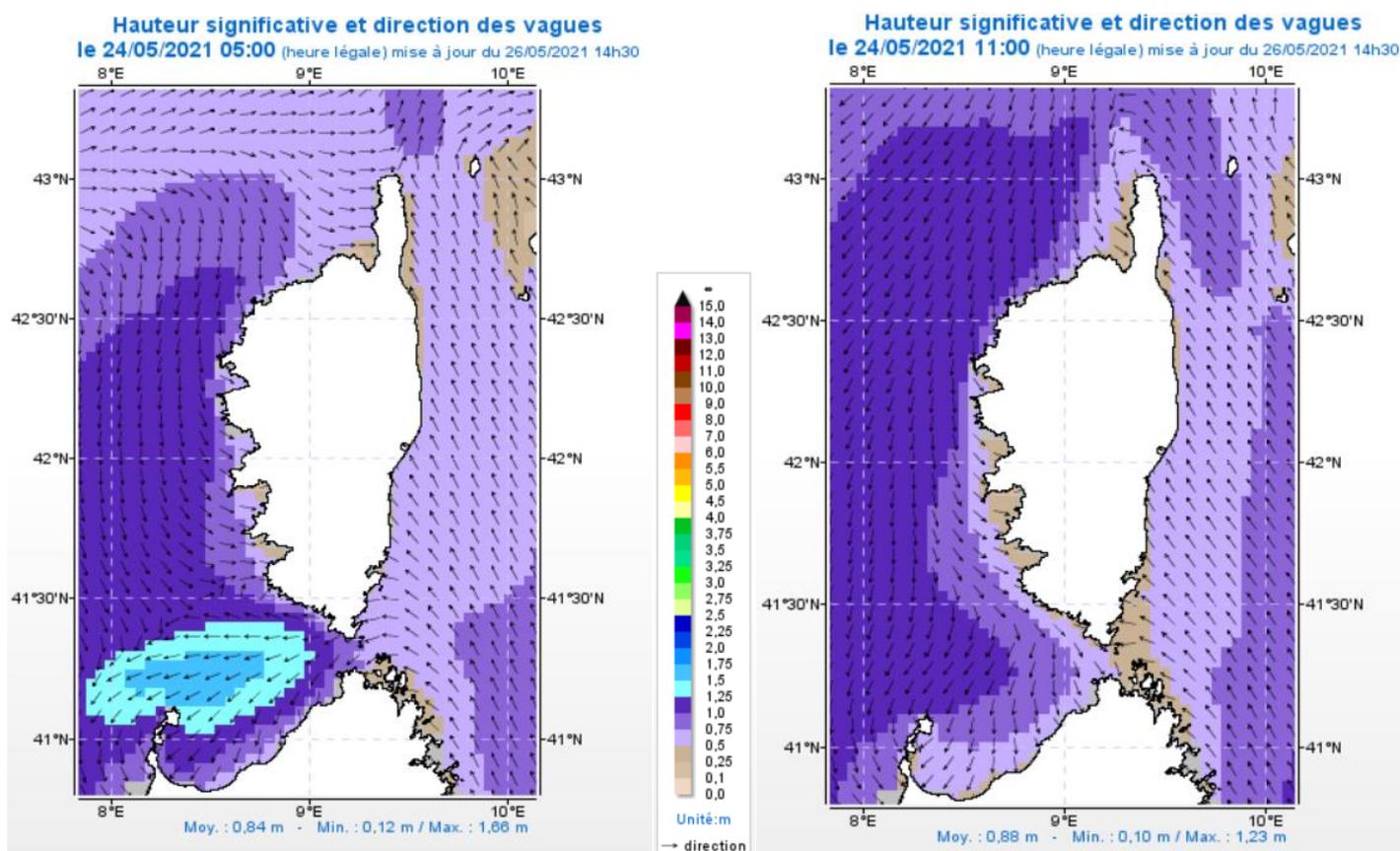


Figure 6 : Hauteurs significatives (H_s) de vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016).

Submersion marine du port de Bonifacio (24/05/2021)

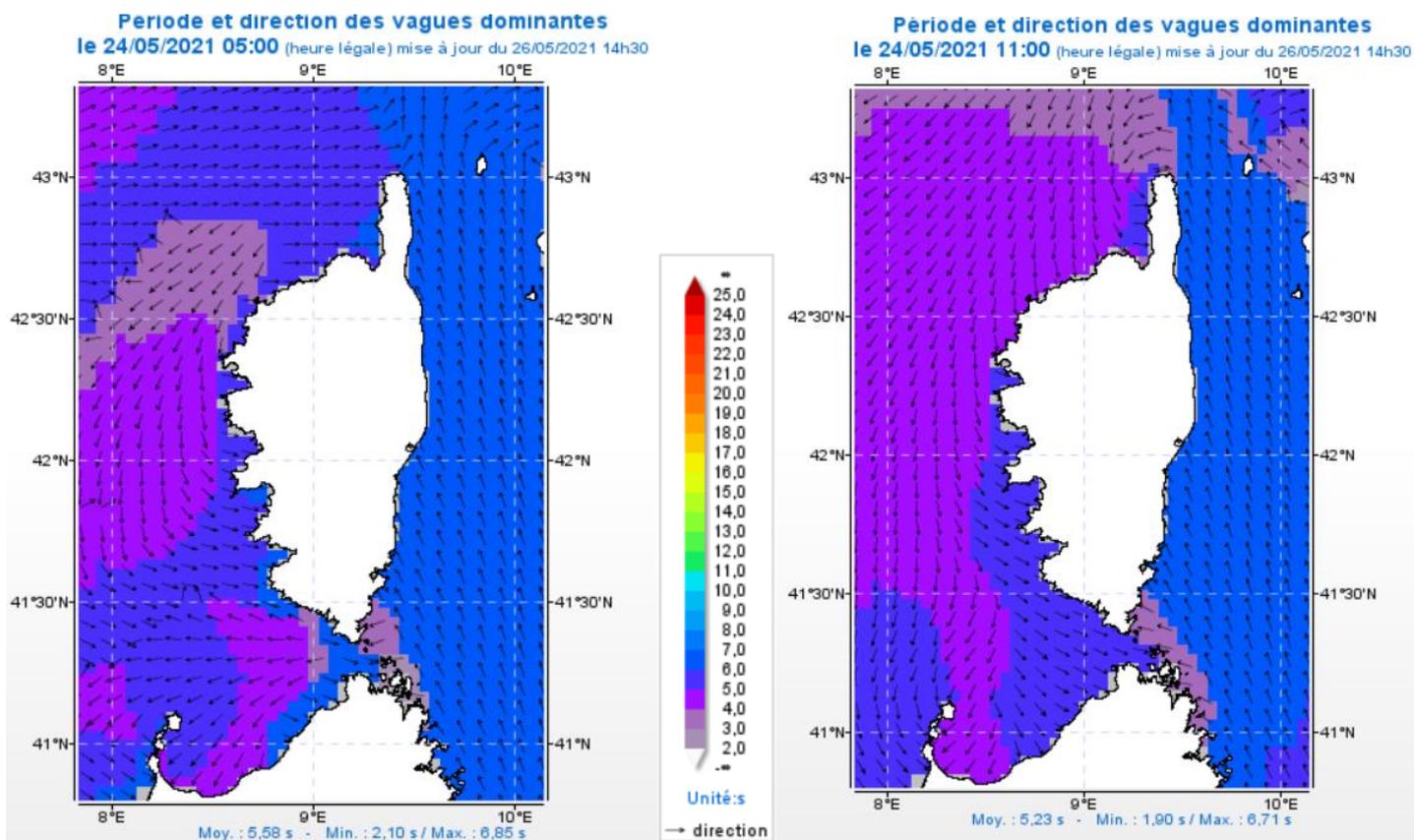


Figure 7 : Périodes (T) des vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016).

- Conditions de vent

Les mesures de vitesse et direction de vent, localement à la station du Cap Pertusato (Figure 7), témoignent d'un vent relativement faible à modéré la première partie de la journée (vent moyen de nord-est <40 km/h) au moment du phénomène. Il forcit la deuxième partie de la journée et s'oriente ouest – nord-ouest. Ces conditions de vent ne sont pas particulièrement favorables à la génération d'une surcote atmosphérique (poussée des masses d'eau) dans la configuration géomorphologique du goulet de Bonifacio (orienté ouest-est et ouvert à l'ouest) et susceptible d'induire une submersion marine.

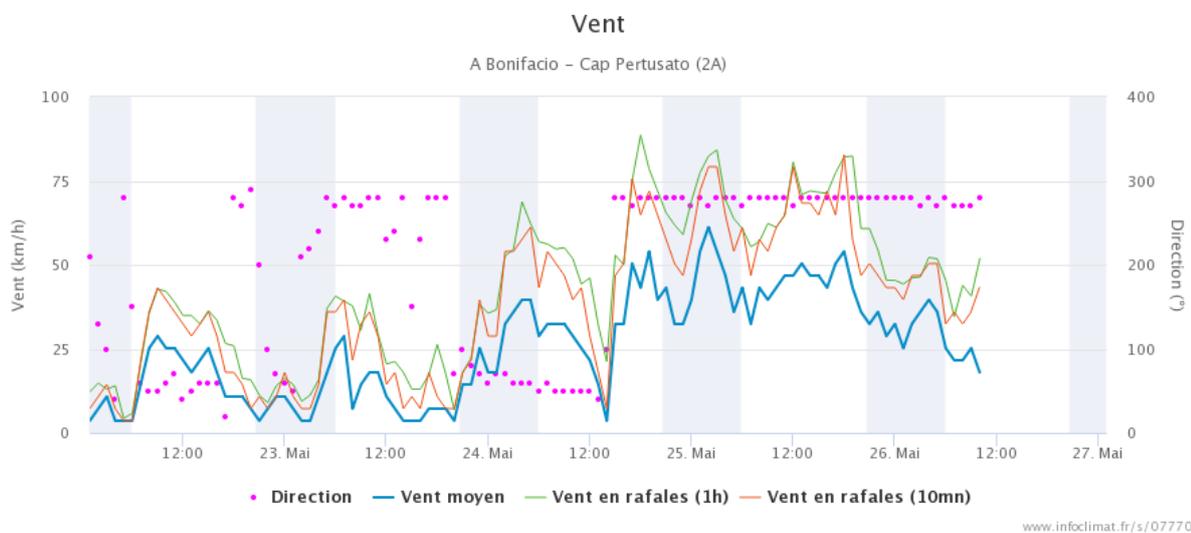


Figure 8 : Observations des conditions de vent au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.infoclimat.fr).

- Pression atmosphérique

Les enregistrements de pression atmosphérique au Cap Pertusato (Figure 9) (www.meteociel.fr) montrent une chute rapide de pression de 4 hPa le 24 mai en début de journée. La surcote atmosphérique (effet de baromètre inverse) générée est donc de l'ordre de seulement quelques centimètres (4 cm). Régionalement (Figure 10), la configuration atmosphérique en Europe le 24 mai ne présente pas de gradient de pression exceptionnel pouvant être à l'origine du phénomène observé à Bonifacio.



Figure 9 : Observation de la pression atmosphérique au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.meteociel.fr).

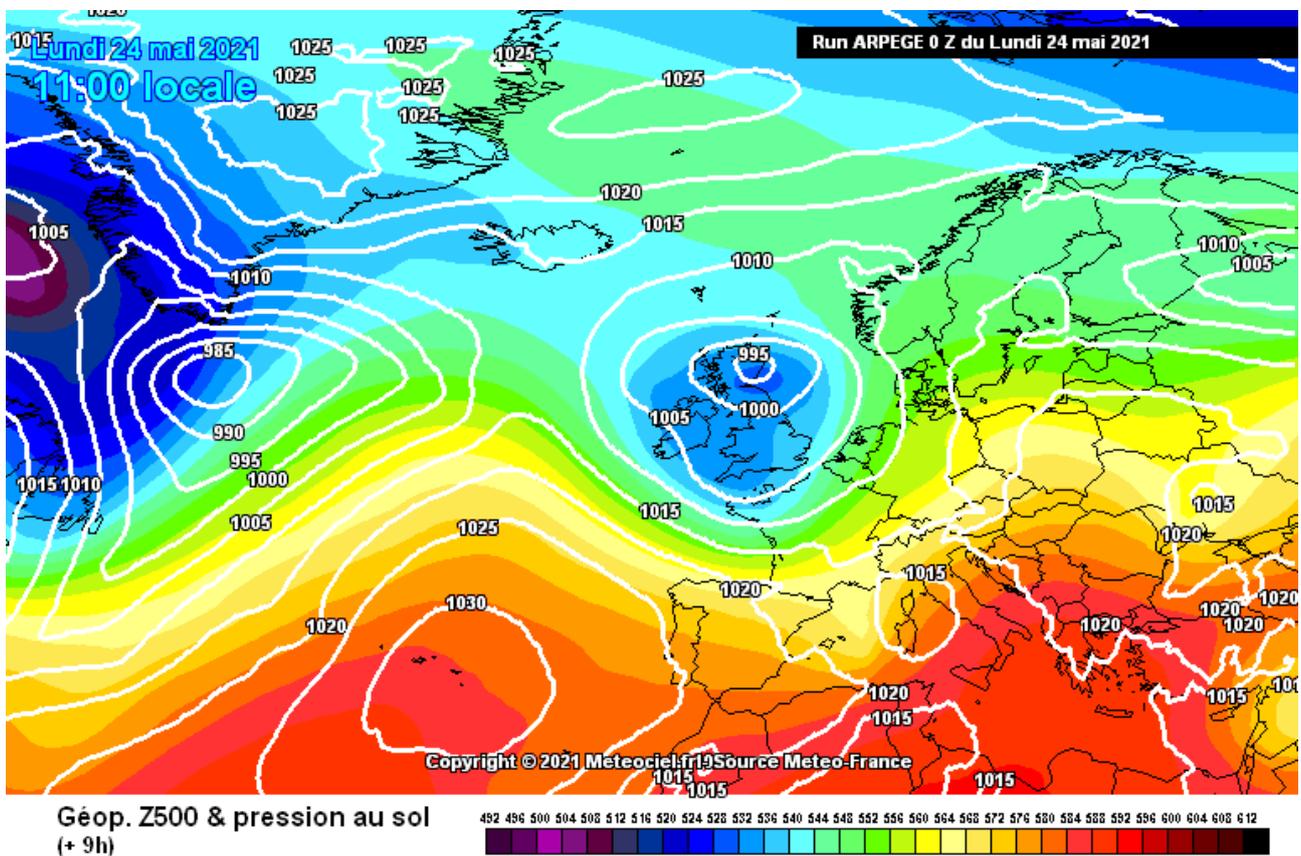


Figure 10 : Carte de la pression atmosphérique pour l'Atlantique nord (www.meteociel.fr).

4.2. INTERPRETATION ET HYPOTHESES

Les témoignages recueillis suite à la submersion marine du port de Bonifacio du 24 mai 2021, décrivent des oscillations de plus ou moins 1 m d'amplitude toutes les 15 minutes environ sur une durée de 3 heures, ce qui permet de qualifier le phénomène observé à comme une seiche.

Une seiche est un phénomène ondulatoire à période longue (de plusieurs minutes à plusieurs heures) communément observé dans les ports⁴. A Bonifacio, la seiche semble avoir été amplifiée par la résonance des ondes en lien avec la configuration semi-fermée du goulet, ce qui expliquerait que le plan d'eau ait atteint un niveau important d'environ 1,5 m/NGF, à l'origine de la submersion marine des quais. A titre de comparaison, le niveau marin de référence pour un événement météo-marin centennal au large de Bonifacio, calculé dans le cadre de l'étude des ZBPESM (Mugica et al., 2020²) est de 1,8 m/NGF.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'origine de cette seiche.

D'une part, aucun enregistrement sismique ne permet d'envisager l'hypothèse d'un tsunami généré par un glissement de terrain ou un séisme tel que vérifié sur le site national d'information sur la sismicité RENASS (<https://renass.unistra.fr>).

D'autre part, les paramètres météo-marins observés ne présentent pas de caractère exceptionnel et ne sont pas considérés susceptibles d'avoir pu générer une surcote atmosphérique et/ou une surcote liée aux vagues pouvant être à l'origine de cette submersion marine (débordement).

C'est pourquoi, il est considéré que la seiche et la consécutive submersion marine n'ont pas pu être générées par un épisode tempétueux ou un tsunami.

Certains états de mer sont susceptibles de générer des ondes infragravitaires (ondes longues) pouvant causer des seiches. Ce phénomène a été documenté dans plusieurs ports de la côte Atlantique⁵. Cependant, l'état de mer au large de Bonifacio le 24 mai 2021 permet d'éliminer cette hypothèse.

La seiche observée à Bonifacio a aussi pu être générée localement par la chute de pression atmosphérique⁶ ou d'autres variations possiblement non détectées car trop rapides pour être captées par l'instrumentation disponible à proximité. Le rapport de la société PREDICT transmis par la DDTM2A identifie également une seiche générée par une variation rapide de la pression atmosphérique. Bien que les variations dans la pression atmosphérique puissent expliquer ce phénomène de seiche comme c'est fréquemment le cas des seiches portuaires et comme les données disponibles le laissent supposer, la contribution des autres paramètres météo-marins ne peut cependant être écartée.

Il est aussi possible que l'origine de l'onde gravitaire soit due à une configuration atmosphérique régionale spécifique pouvant générer un « météo-tsunami »⁷. Ce phénomène, documenté en Méditerranée et particulièrement en mer Adriatique et aux Baléares, désigne la génération d'une onde gravitaire potentiellement destructrice pouvant se propager (tel un tsunami) à l'échelle du

⁴ http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/etudes-meteo-oceaniques/seiche

⁵ Ardhuin, F., Devaux, E., & Pineau-Guillou, L. (2010). Observation et prévision des seiches sur la côte atlantique française. *XIèmes Journées Nationales " Génie Civil-Génie Côtier*, 22-24.

⁶ De Jong, M. P. C., Holthuijsen, L. H., & Battjes, J. A. (2003). Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C4).

⁷ Vilibić, I., Denamiel, C., Zemunik, P., & Monserrat, S. (2020). The Mediterranean and Black Sea meteotsunamis: an overview. *Natural Hazards*, 1-45.

bassin méditerranéen bien que d'origine météorologique. Un échange avec Jadranka Šepić de l'université de Split en Croatie a permis de prendre connaissance de l'existence d'un phénomène de météotsunami enregistré en Croatie le 24 mai 2021 (<https://www.jutarnji.hr/video/news/pogledajte-trenutak-kada-je-ogromni-plimni-val-pogodio-otok-ist-znali-smo-sto-nas-ceka-15075797>). Il est donc possible que les deux submersions marines observées résultent d'un même phénomène atmosphérique, une étude avait permis de faire le lien entre plusieurs phénomènes similaires à l'échelle de la Méditerranée entre les 23 et 27 Juin 2014⁸. Il est cependant prématuré de relier formellement les deux événements, même si l'existence d'un phénomène de météo-tsunami documenté en Croatie semble indiquer que les conditions atmosphériques le 24 mai 2021 étaient propices à la génération d'ondes gravitaires. Les champs de pression atmosphérique (Figure 10) ne semblent pas indiquer les conditions habituellement requises pour la génération d'un météo-tsunami. Toutefois, la génération de ce type de résonances sous l'effet de phénomènes atmosphériques à grande échelle en lien avec la configuration locale d'un bassin est un phénomène très spécifique aux caractéristiques des sites ne peut être exclu. Dans le cas d'un phénomène régional, l'absence, localement, de compte rendu de submersion marine similaire à celle observée à Bonifacio indique que la configuration du goulet et du port a un rôle amplificateur⁹ résultant en un phénomène de seiche

5. Risque résiduel

Malgré l'absence d'archive disponible, les phénomènes d'oscillation du niveau d'eau dans le goulet de Bonifacio ne sont pas rares d'après les témoignages, même s'il est difficile en l'absence de données objectives à ce stade d'établir une fréquence de ce type de phénomène et de leur intensité le cas échéant. Il semble que le phénomène à l'origine de la submersion marine du 24 mai 2021 ne soit donc pas un événement extraordinaire, cependant l'intensité du phénomène le 24 mai 2021 semble plus importante provoquant ainsi la submersion marine d'une partie du port alors qu'aucun autre événement de ce genre n'est documenté.

Il est impossible d'exclure la possibilité qu'un phénomène de ce type -une submersion marine liée à une seiche- se reproduise à l'avenir ni de préciser son intensité. Les potentiels dommages matériels ou humains ne peuvent donc être exclus en cas de nouvel épisode. Il est aussi impossible dans l'état actuel des connaissances de prévoir ou prédire si et /ou quand un phénomène d'une intensité équivalente ou supérieure se produira.

Par conséquent, les enjeux présents au sein et aux abords immédiats de la zone portuaire de Bonifacio, notamment le quai Comparetti, qui présente une altitude légèrement plus basse que le reste des quais, sont potentiellement exposés à ce type de phénomène de submersion marine.

6. Recommandations

Le phénomène d'oscillation dans le goulet de Bonifacio est très peu voire pas documenté. Comme présenté précédemment, il n'est pas possible à ce stade de préciser l'occurrence ni l'intensité du phénomène, ce qui ne permet pas de qualifier précisément le risque pour les nombreux enjeux présents au niveau du port de Bonifacio. Cette forte concentration d'enjeux et la possibilité d'un ou

⁸ Šepić, J., Vilibić, I., Rabinovich, A. B., & Monserrat, S. (2015). Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Scientific reports*, 5(1), 1-8.

⁹ Okihiro, M., Guza, R. T., & Seymour, R. J. (1993). Excitation of seiche observed in a small harbor. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C10), 18201-18211.

plusieurs nouveaux phénomènes de submersion marine pouvant les impacter induit la nécessité de mettre en place une stratégie de gestion de ce risque. A ce stade et en l'état actuel des connaissances, le BRGM recommande dans un premier temps de mettre en place des mesures permettant d'améliorer les connaissances sur le phénomène.

La prévention du risque de submersion marine telle que recommandée dans le guide méthodologique du MEDDE¹⁰ (mai 2014), implique la nécessité d'améliorer la connaissance du phénomène de seiche et des mécanismes qui en sont à l'origine. Le guide recommande dans un premier temps de constituer une base de données de ce phénomène puis dans un second temps d'analyser ces mécanismes.

Ainsi, en cohérence avec les prescriptions du guide PPRL, plusieurs types de suivis sont envisageables pour le port de Bonifacio dans des cadres à définir. Dans ce cadre, il est recommandé :

- **Suivi à minima**

Il repose sur l'identification d'observateurs de référence (personnel des ports par exemple, à sensibiliser et à former pour permettre ce type de suivi) à minima dans le port de Bonifacio mais aussi si possible dans les ports de Figari et Sant'Amanza, deux sites, l'un à l'est et l'autre à l'ouest, qui présentent une situation encaissée, abritée, favorable à l'observation de potentiels phénomènes ondulatoires comme à Bonifacio. Et à des fins de comparaison, des observations au niveau d'un site tel que la Tonnara avec une situation géographique plus ouverte seraient complémentaires. Il s'agit d'informer systématiquement et dans les plus brefs délais le BRGM lorsque des oscillations du plan d'eau se produisent, qu'elles déclenchent ou non une submersion marine. Les paramètres météo-marins (vent, vagues, précipitation, pression) pourront ainsi être recueillis et analysés par le BRGM. Dans le cas d'oscillations associées à une submersion marine, des indicateurs supplémentaires devront être relevés (laises de mer, type de dégâts, traces d'érosion marine, figures sédimentaires, etc.) par des agents sur place dans les plus brefs délais et par le BRGM à l'occasion de visites de terrain dans les jours suivants l'évènement.

- **Suivis approfondis**

Des suivis approfondis reposent sur l'acquisition de données haute-fréquence d'élévation du plan d'eau (capteurs de pression sub-aquatiques) permettant de caractériser le phénomène ondulatoire dans le goulet de Bonifacio¹¹ et de le mettre en relation avec les conditions atmosphériques locales au Cap Pertusato. Il s'agit de déterminer quels sont les paramètres météo-marins (vent, vagues, précipitation, pression) à l'origine des oscillations puis de vérifier s'ils sont générés localement en ou liées à des phénomènes de météo-tsunami. Ces informations devraient permettre d'évaluer le rôle amplificateur joué par la géométrie spécifique au Goulet de Bonifacio. Ce type de suivi doit également être accompagné d'observations sur le terrain en particulier en cas de submersion marine afin de relever les caractéristiques du phénomène (emprises, hauteurs d'eau, indications sur les vitesses d'écoulement, etc.) indispensables à la compréhension des mécanismes impliqués.

Pour le calcul des niveaux marins de référence dans le cadre de PPRL par exemple, les seiches ne sont généralement pas prises en compte car elles sont généralement filtrées lorsque les mesures des marégraphes s'effectuent à une fréquence horaire. C'est donc une marge de sécurité déterminée sur la base de la connaissance historique et/ou l'analyse des enregistrements marégraphiques qui est généralement appliquée. Ne disposant actuellement pas de cette connaissance, il apparaît impératif de mettre en place avant l'hiver prochain le suivi à minima. Etant donné que sans condition météo-marine particulièrement défavorable (surcote atmosphérique et/ou

¹⁰ Guide méthodologique : Plan de Prévention des Risques Littoraux. Rapport du MEDDE, version de mai 2014, 169p.

¹¹ Masina, M., Archetti, R., Besio, G., & Lamberti, A. (2017). Tsunami taxonomy and detection from recent Mediterranean tide gauge data. *Coastal Engineering*, 127, 145-169.

surcote liée aux vagues ou de fortes vagues), ce phénomène de seiche est capable de générer une élévation du plan d'eau de plus d'un mètre, il est fortement recommandé de mettre en place le suivi approfondi pour estimer plus spécifiquement la contribution des seiches aux phénomènes de submersion marine.

Malgré les lacunes de connaissances actuelles, compte tenu des enjeux présents (port et urbanisation), il est impératif que le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) prenne en compte cet aléa et que les usagers du port en soient informés. L'amélioration des connaissances, grâce aux suivis préconisés précédemment qui seront en place, permettra de préciser les mesures de prévention et de sauvegarde et ainsi d'actualiser le PCS.

7. Déclaration

Le BRGM déclare qu'il n'existe aucun lien d'intérêt :

- **entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,**
- **entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise,**

susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise.

8. Annexes

Annexe 1 – Note technique transmise en première urgence le 27 mai 2021

Note relative à la caractérisation de la submersion marine du port de Bonifacio le 24 mai 2021

1. Description du phénomène

Le 24 mai 2021 en fin de matinée, le port de Bonifacio a fait l'objet d'un phénomène ayant causé une **submersion marine** des quais avec l'inondation des rez-de-chaussée de plusieurs bâtiments de la marine.

Les témoignages rendent compte de hauteurs d'eau d'une trentaine de centimètres au-dessus des quais dont l'altitude moyenne est de 1,1 m/NGF, ce qui permet de déduire un niveau marin atteint de **1,4 à 1,5 m/NGF maximum**.

Alors que la submersion marine n'aurait duré que quelques dizaines de minutes (voire plus dans les zones basses où l'évacuation naturelle de l'eau n'a pas été possible), un phénomène d'oscillation du plan d'eau (± 1 m) a été observé pendant 3 heures environ. La période de ces oscillations serait de 15 minutes environ.

L'existence de zones basses en arrière des quais a pu par endroit générer des vitesses d'écoulement relativement rapides. Heureusement, les faibles hauteurs d'eau ont limité le risque pour les vies humaines et le phénomène n'a généré aucune victime.

Aucune visite de terrain et aucune cartographie de la zone impactée n'ont été réalisées pour la présente note technique. Cependant, une analyse topographique des quais permet d'estimer l'emprise de la zone submergée ainsi que les zones où les vitesses d'écoulement ont été maximales. Conformément aux témoignages, cette carte confirme l'exposition dominante du quai Comparetti (quai au sud).



Figure 1 : Illustration des vitesses d'écoulement les plus importantes depuis le quai Comparetti vers les zones en contrebas (à gauche) et des hauteurs d'eau atteintes (au centre et à droite, sources Facebook).

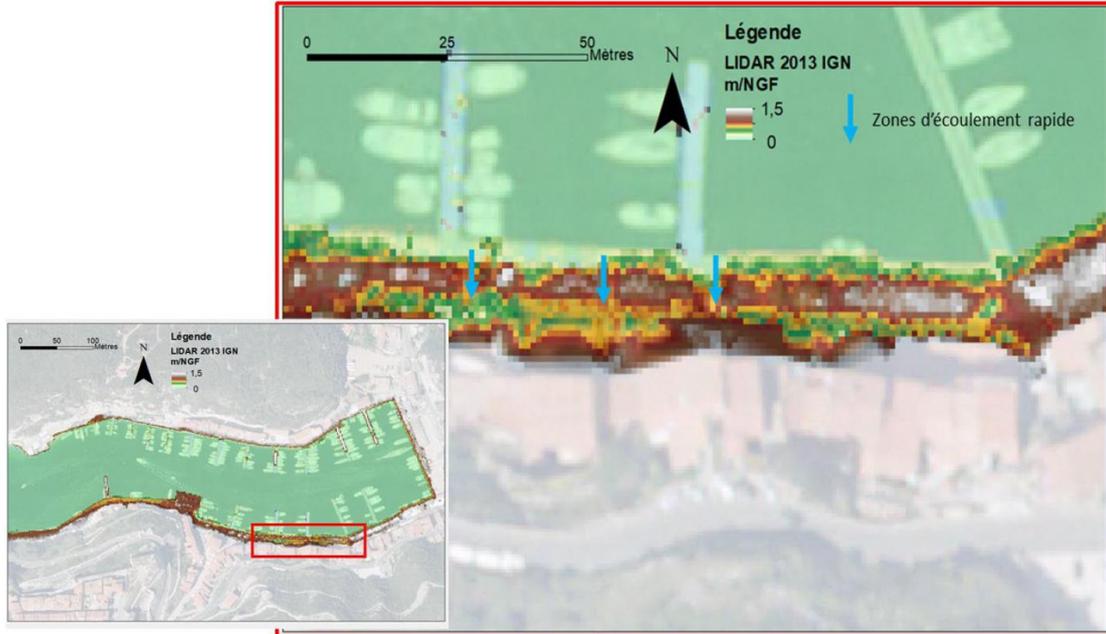


Figure 2 : Illustration des zones d'altitude inférieure à 1,5 m/NGF dans le goulet de Bonifacio susceptibles d'avoir été submergées par la mer le 24 mai 2021 et des zones d'écoulement rapide vers les zones les plus basses (cadre rouge).

2. Conditions météo-marines du 24 mai

- Données marégraphiques de niveau d'eau

Les prévisions de marée du SHOM fournissent un niveau marin maximal de 0,46 m/ZH à 7h34 soit **0,21 m/NGF à 5h34 UTC**.

Ces niveaux marins ne sont supérieurs que de 1 cm à ceux du 23 mai et inférieurs que de 3 cm à ceux des marées de vives-eaux du 28 mai. D'autre part, ces niveaux de marée sont inférieurs de 6 cm à ceux des dernières grandes marées d'équinoxe de septembre 2020 par exemple.

Sunday May 23, 2021				Monday May 24, 2021			Tuesday May 25, 2021			Wednesday May 26, 2021					
Hour	Height	Coefficient		Hour	Height	Coefficient	Hour	Height	Coefficient	Hour	Height	Coefficient			
LW	00:39	0.26	---	LW	01:29	0.24	---	LW	02:17	0.23	---	LW	03:03	0.23	---
HW	06:51	0.46	---	HW	07:34	0.46	---	HW	08:15	0.46	---	HW	08:54	0.45	---
LW	13:23	0.21	---	LW	14:00	0.19	---	LW	14:36	0.18	---	LW	15:13	0.17	---
HW	19:36	0.43	---	HW	20:19	0.45	---	HW	21:01	0.47	---	HW	21:43	0.48	---

Figure 3 : Prévision marégraphique du SHOM à Bonifacio exprimées en m/ZH (<https://maree.shom.fr/harbor/BONIFACIO/hlt/0?date=2021-05-24&utc=standard>).

Les données de niveaux d'eau à Ajaccio et à Porto Torres (Sardaigne) observées sur le site de l'IOC¹ (<http://ioc-sealevelmonitoring.org/>) et le réseau national italien (<https://www.mareografico.it/>), mettent en évidence un pic la première partie de la journée du 24 mai, mais qui est bien inférieur aux niveaux des marées d'équinoxe ou des niveaux enregistrés lors des dernières tempêtes hivernales par exemple.

- Conditions de vagues

Les deux houlographes du réseau CANDHIS (CEREMA) en Corse (La Revelatta et Alistro), ne fournissent pas d'enregistrement après le 13 et 18 mai 2021. Les simulations rétrospectives de l'IFREMER réalisées à partir du code WAVEWATCH III, ont donc été consultées et **ne mettent pas en évidence de conditions de vagues particulières (Hs < 1,25 m, T < 6s) et susceptibles de générer une surcote significative (wavesetup).**

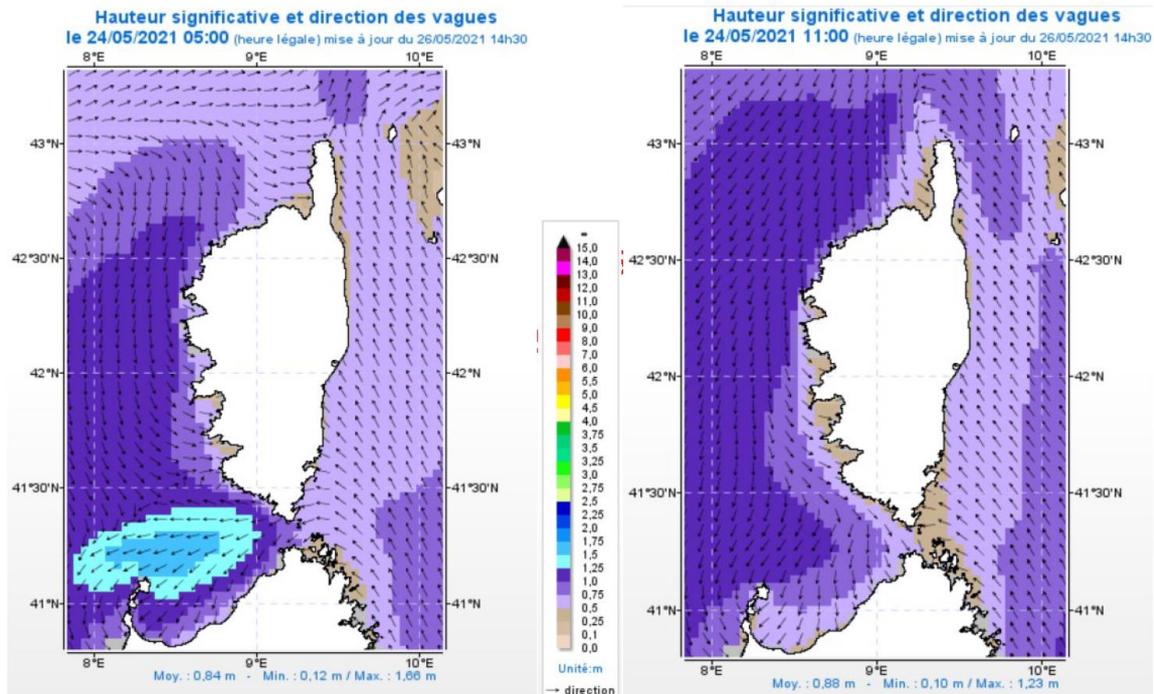


Figure 4 : Hauteurs significatives (Hs) de vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016, <https://marc.ifremer.fr>).

¹ Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) (2021): Sea level station monitoring facility. Accessed at <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org> on 2021-05-26 at VLIZ. DOI: [10.14284/482](https://doi.org/10.14284/482)

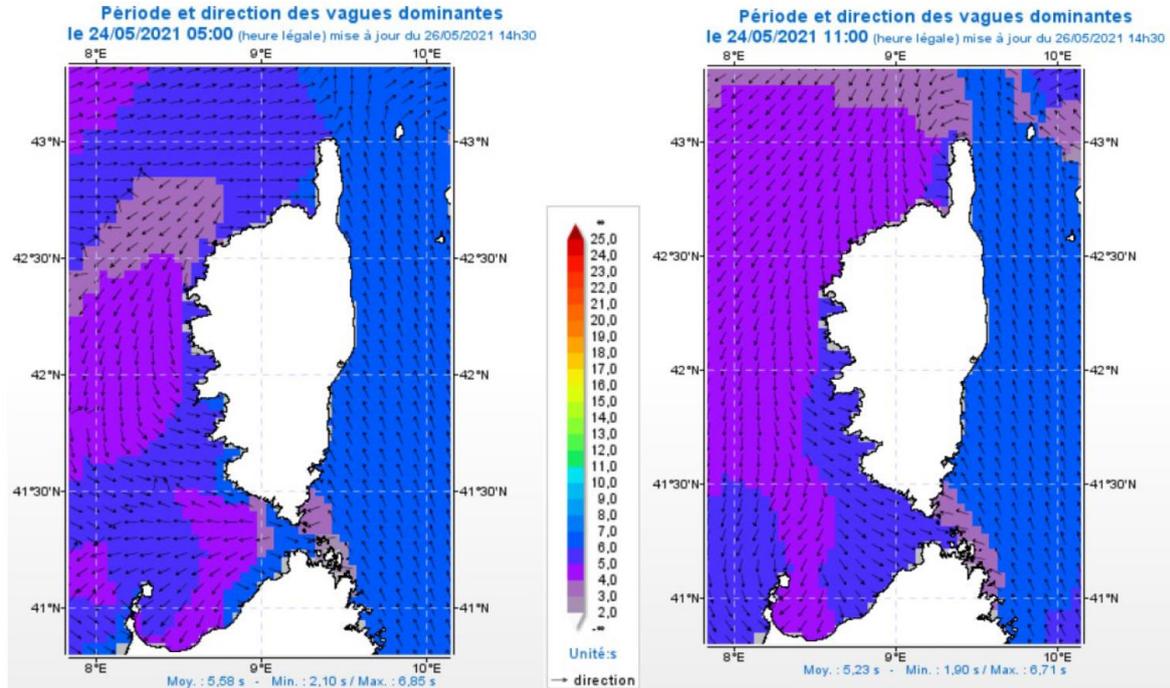


Figure 5 : Périodes (T) des vagues le 24 mai 2021 à 5h (à gauche) et à 11h (à droite) issues du code WAVEWATCH III produites par l'IFREMER (©MARC, 2016, <https://marc.ifremer.fr>).

- Conditions de vent

Les mesures de vitesse et direction de vent localement à la station du Cap Pertusato témoignent d'un vent relativement faible à modéré la première partie de la journée (vent moyen de nord-est <40 km/h) au moment du phénomène. Il forçait la deuxième partie de la journée et s'orientait ouest – nord-ouest. Ces conditions de vent ne sont **pas particulièrement favorables à la génération d'une surcote liée au vent (poussée des masses d'eau) dans la configuration géomorphologique du goulet de Bonifacio** (orienté ouest-est et ouvert à l'ouest) et susceptible d'induire une surélévation du plan d'eau.

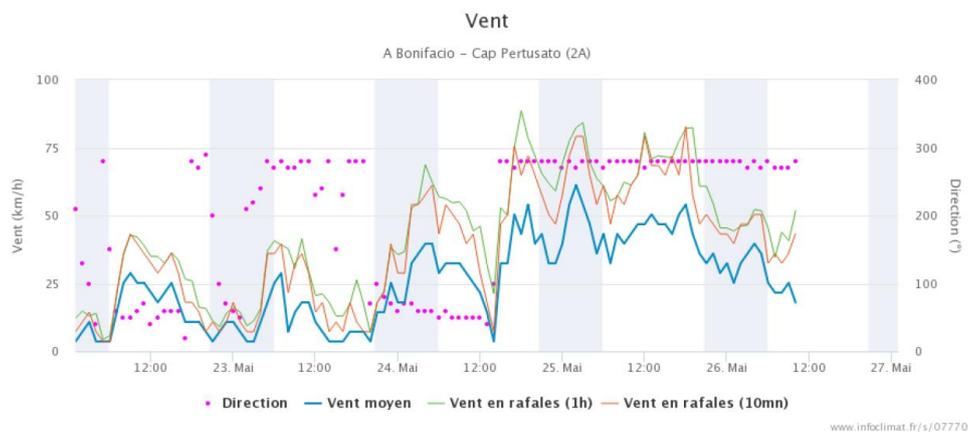


Figure 6 : Observations des conditions de vent au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.infoclimat.fr).

- Pression atmosphérique

Les enregistrements de pression atmosphérique au Cap Pertusato (www.meteociel.fr) montrent une baisse de pression jusqu'à 1013 hPa le 24 mai en début de journée. Si l'on considère que la pression atmosphérique « normale » est de 1025 hPa, la surcote atmosphérique (effet de baromètre inverse) générée est donc de l'ordre de 13 cm.



Figure 7 : Observation de la pression atmosphérique au Cap Pertusato le 24 mai 2021 (www.meteociel.fr).

3. Autres facteurs potentiels

Parmi les autres phénomènes pouvant induire des variations significatives du plan d'eau, on trouve les tsunamis d'origine sismique ou les météotsunamis bien connus en méditerranée, notamment sur les côtes croates et les Baléares.

Les tsunamis météorologiques (meteotsunamis, Sepic et al., 2015², Vilibic et al., 2021³) sont de longues vagues océaniques rares mais dangereuses, qui ont les mêmes fréquences et échelles spatiales que les vagues de tsunami. Les météotsunamis ne sont cependant pas liés à l'activité sismique, aux explosions volcaniques ou aux glissements de terrain sous-marins, mais au forçage atmosphérique: sauts de pression, ondes de gravité atmosphérique, passages frontaux, grains, etc. la génération de vagues prononcées dans la mer dépend du transfert de résonance d'énergie de l'atmosphère vers la mer. Deux types de résonance jouent un rôle: la résonance de Proudman (Proudman, 1929) et la résonance du port (Honda et al., 1908). La résonance de Proudman se produit lorsque la vitesse du forçage atmosphérique correspond à la vitesse des vagues des grands océans; et la résonance du port se produit lorsque la fréquence des ondes océaniques entrantes est égale la fréquence des seiches ⁴ dans le port sinistré.

Aucun enregistrement sismique ne permet d'envisager l'hypothèse d'un tsunami généré par un glissement de terrain ou un séisme ou une activité volcanique (Etna et Stromboli par exemple) tel que vérifié sur le site national d'information sur la sismicité RENASS (<https://renass.unistra.fr>).

Les données de pression atmosphérique à l'échelle du bassin méditerranéen (données ECMWF) permettent d'éliminer l'hypothèse d'un météotsunami, phénomène qui est connu en méditerranée lorsque d'importantes différences de pression se produisent.

document provisoire

² Šepić, I., Vilibić, I., Rabinovich, A. et al. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Sci Rep* 5, 11682 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep11682>

³ Vilibić, I., Denamiel, C., Zemunik, P. et al. The Mediterranean and Black Sea meteotsunamis: an overview. *Nat Hazards* 106, 1223–1267 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04306-z>

⁴ Les seiches sont des oscillations stationnaires dans un bassin fermé ou semi-fermé (refmar.fr). Elles se manifestent par des oscillations de la hauteur d'eau, dont l'amplitude et la période varient selon la configuration du bassin. L'amplitude des seiches peut varier considérablement d'un port à l'autre. Elles se produisent dans de nombreux ports, mais restent souvent peu perceptibles car de faible amplitude. En France des seiches d'amplitude non négligeable se produisent notamment à Brest, Le Conquet, Cherbourg ou encore Royan. Les seiches les plus importantes sont mesurées sur l'île de Groix, à Port-Tudy, où elles peuvent atteindre 1,7 mètres.

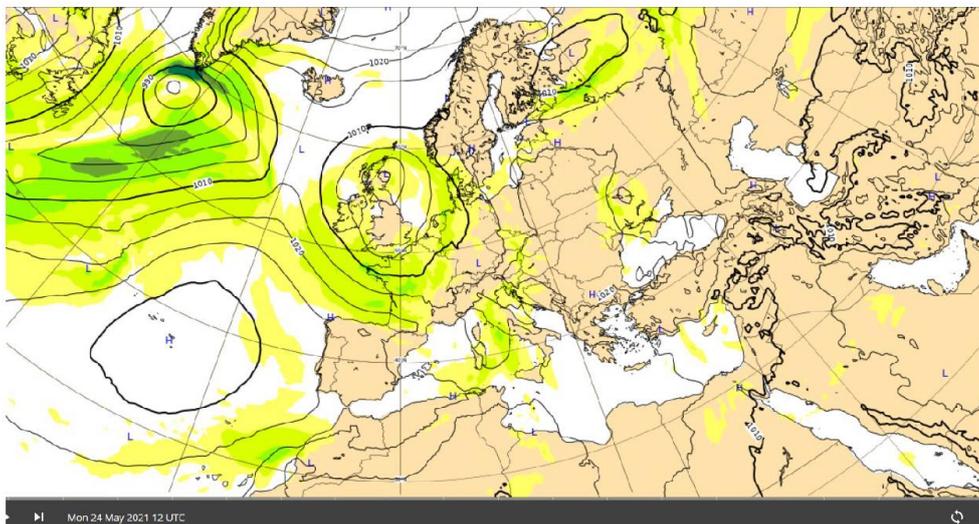


Figure 8 – Carte des pressions atmosphériques au niveau de la mer le 24 mai 2021 (données ECMWF).

4. Interprétation et hypothèses

Les paramètres météo-marins observés ne présentent pas de caractère exceptionnel et ne sont pas considérés susceptibles d'avoir pu générer une surcote atmosphérique et/ou une surcote liée aux vagues pouvant être à l'origine de cette submersion marine (débordement). C'est pourquoi d'autres hypothèses ont été vérifiées.

Les oscillations qui ont précédé le phénomène de submersion marine observé sur le port de Bonifacio appuient l'hypothèse d'une seiche, qui correspond à une onde gravitaire dont la période est comprise entre celles des houles les plus longues (~25s) et celle des marées semi-diurnes. L'amplitude de ce phénomène peut être amplifiée par la résonance des ondes en lien avec la configuration semi-fermée du goulet de Bonifacio, ce qui expliquerait que le plan d'eau ait atteint un niveau important (~ 1,5 m/NGF⁵), à l'origine de la submersion des quais.

Bien que la variation de pression atmosphérique pourrait expliquer l'amplification de ce phénomène de seiche comme c'est fréquemment le cas des seiches portuaires et comme les données disponibles le laissent supposer, la contribution des autres paramètres météo-marins ne peut être écartée. Ce phénomène n'étant pas rare dans le goulet de Bonifacio (tous les 2 à 3 ans d'après les témoignages collectés), mais très peu documenté, un suivi systématique des oscillations du plan d'eau (qu'elles génèrent ou non une submersion marine) avec le recensement et l'analyse des paramètres météo-marins (vent, vagues, précipitation, pression) permettrait à terme d'améliorer la caractérisation de ce phénomène et l'identification des mécanismes qui en sont à l'origine.

⁵ A titre de comparaison, le niveau marin de référence pour un évènement météo-marin centennal au large de Bonifacio est de 1,8 m/NGF tel que défini dans l'estimation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Corse-du-Sud (Mugica et al., 2020, étude réalisée par le BRGM pour la DDTM de Corse-du-Sud).



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. 02 38 64 34 34

Direction Régionale du BRGM en Corse
Immeuble Agostini, Zone Industrielle de Furiani
20600 Bastia – France
Tél. : 04 95 58 04 33