

**Document
final**

Bloc 2C : Complément forçages océaniques

Etude exploratoire de l'impact des vagues sur les falaises pour un
évènement météo-marin centennal :
Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio

BRGM/RP-70285-FR

V2, Mars 2021

**Document
final**

Bloc 2C : Complément forçages océaniques

Etude exploratoire de l'impact des
vagues sur les falaises pour un
évènement météo-marin centennal :
Secteur de la citadelle, falaise de
Bonifacio

BRGM/RP-70285-FR

V2, Mars 2021

R. Pedreros, J. Mugica et B. Vignerot

Avec la collaboration de T. Dewez

CEREMA

Vérificateur :
Nom : Malascrabes Marie
Fonction : Chef service risques géologiques
Date : 06/11/2020
Signature : 

INERIS

Vérificateur :
Nom : FRANCK Christian
Fonction : Responsable de l'Unité Auscultation et Surveillance Géologique et Géotechnique
Date : 06/11/2020
Signature : 

BRGM

Vérificateur :
Nom : FILIPPINI Andréa et OLIVEROS Carlos
Fonction : Ingénieur en modélisation hydrodynamique côtière
Date : 06/11/2020
Signature : 

Approbateur :
Nom : REY Anthony
Fonction : Directeur Régional
Date : 05/03/2021
Signature : 

Ce rapport synthétise une partie du programme d'étude (Bloc 2C) et a été rédigé par le BRGM. Conformément au système de gestion de qualité, ce rapport a donc été vérifié et approuvé par le BRGM. Il a par ailleurs été vérifié par les autres opérateurs du groupement pour assurer la cohérence du document par rapport aux objectifs de l'étude.

Une version provisoire du rapport (novembre 2020) a par ailleurs été soumise à l'avis du comité d'experts nommé par la DGPR. Cette version V2 intègre les commentaires et apporte les clarifications attendues pour les objectifs de l'étude.

Mots-clés : régime de vagues, événement météo-marin centennal, analyses statistiques, modélisation numérique des vagues, impact des vagues, falaise, Bonifacio

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

Pedrerros R., Mugica J. et Vignerot B. (2020) –Etude exploratoire de l'impact des vagues sur les falaises pour un événement météo-marin centennal : Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio. BRGM/RP-70285-FR, 71 p., 28 fig, 1ann.

SYNTHESE

Suite à la réalisation de la carte multialéas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio par le Cerema en 2013, la DDTM de Corse-du-Sud et les opérateurs BRGM, Cerema et Ineris ont convenu de mener une étude, sous le pilotage du BRGM, visant à améliorer la connaissance et à évaluer l'aléa « effondrement en grande masse » sous la Citadelle de Bonifacio, notamment au droit de la zone de surplomb (encorbellement d'environ 20 m) figurant en aléa de niveau très élevé.

Il s'agit notamment :

- de mener une analyse géologique et structurale détaillée de la Citadelle et de la zone d'étude en s'appuyant sur trois forages de reconnaissance et des essais en laboratoire ;
- de faire progresser la connaissance en ce qui concerne le fonctionnement hydrogéologique du système et les conséquences potentielles de sa fragilisation ou de l'apparition des mécanismes de rupture pressentis ;
- et de faire également progresser la connaissance sur le comportement du pied de falaise au regard du contexte hydrodynamique maritime (altération hydromécanique de la falaise et action de la houle sur la sape du pied).

Le présent rapport constitue le volet hydromécanique de l'étude globale menée (Bloc 2C).

Cette étude vient compléter les travaux réalisés sur les falaises de Bonifacio. Il s'intéresse plus particulièrement à déterminer le rôle des vagues dans l'érosion des falaises de Bonifacio.

Pour cela, un évènement météo-marin de période de retour conjointe centennale vagues/niveaux d'eau/vent a été considéré. Cet évènement a par la suite été propagé jusqu'aux falaises de Bonifacio à l'aide de la modélisation numérique afin de quantifier l'impact des vagues sur celles-ci.

La mise en œuvre d'une telle modélisation numérique est particulièrement exigeante car elle implique d'échantillonner et de stocker le signal à plusieurs kHz et d'utiliser des tailles de mailles décimétrique pour pouvoir capturer les pressions maximales causées par les impacts des vagues sur la falaise.

Les résultats obtenus sont très encourageants car ils donnent accès à des informations jusqu'à l'heure inconnues en nature du fait de l'absence de mesures in-situ telles que la distribution verticale de la pression, le nombre d'impacts des vagues et leur durée en fonction de la hauteur de la falaise, etc. Ils mettent également en évidence le rôle de protection de la falaise joué par les éboulis contre les impacts des vagues.

Les résultats des simulations montrent également que les vagues ont un rôle important dans l'érosion des falaises de Bonifacio. Ainsi, les vagues exerceraient des pressions maximales de plusieurs MPa lors des impacts et cela jusqu'à plusieurs mètres au-dessus du pied de falaise. Si la relation entre érosion et pression des vagues est encore à définir, les ordres de grandeurs de pression se rapprochent fortement des ordres de grandeur de résistance de la roche et du ciment carbonaté liant les grains.

D'un autre côté, le modèle employé n'a pu être validé que qualitativement faute de données sur site. D'autre part, les limites des modélisations sur des profils aux environnements aussi

hétérogènes spatialement que ceux rencontrés à Bonifacio ont été mises en évidence (présence de nombreux blocs sur la plate-forme, éboulis en pied de falaise, ...).

C'est pourquoi il serait souhaitable de poursuivre l'amélioration de la connaissance sur les mécanismes d'érosion en pied de falaise, par les actions suivantes :

- implanter sur site des capteurs afin de valider quantitativement la modélisation réalisée : au moins un capteur de pression en bordure du platier rocheux situé en pied falaise pour valider la propagation des vagues ; une webcam tournée vers la falaise afin de valider l'action des vagues sur ce secteur (altitudes et vitesses atteintes par exemple) ; 1 capteur de pression à proximité du pied de falaise capable de mesurer les pressions maximales générées par l'impact des vagues ;
- implanter un modèle 2DH (bidimensionnel horizontal) sur le secteur afin de tenir compte des variations morphologiques de cet environnement. Cela passe par l'utilisation d'un modèle à maillage non-structuré (raffinement du maillage uniquement où c'est nécessaire comme à proximité des falaises) et offrant des capacités HPC (Hautes Performance de Calcul) notamment en ce qui concerne la parallélisation (utilisation de plusieurs centaines à milliers de cœurs de calcul) et le traitement des entrées et des sorties des données. C'est ce que proposera le code UHAINA (Filippini et al. 2018) à l'horizon fin 2021, qui est le fruit d'une collaboration étroite entre l'INRIA (CARDAMOM), les UMR EPOC et IMB à Bordeaux et IMAG à Montpellier et à laquelle le BRGM participe activement depuis 2019 ;
- explorer l'impact de vagues moins fortes : annuelles et saisonnières par exemple.

Sommaire

1	RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE DE L'ETUDE	13
1.1	Problématique.....	13
1.2	Objectifs de l'étude – BLOC 2C.....	16
2	CONTEXTE METEO-MARIN GENERAL	17
2.1	Régime climatique general	17
2.2	Contexte oceanographique.....	18
2.3	Caracterisation generale des tempêtes	19
3	DONNEES DISPONIBLES ET DONNEES EXPLOITEES	21
3.1	Observations in situ disponibles	21
3.1.1	Marégraphes du réseau RONIM du SHOM	21
3.1.2	Houlographes du réseau CANDHIS du CEREMA	22
3.2	Donnees issues de modelisations numériques (simulations retrospectives).....	23
3.2.1	Niveaux d'eau « MARS_MED_BRGM »	23
3.2.2	Base de données NWW3 MED de la NOAA	24
3.2.3	Données exploitées.....	25
4	CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS METEO-MARINS CENTENNAUX ..	27
4.1	Analyses statistiques multivariees des extrêmes.....	27
4.2	Modelisation numérique des parametres de vagues et des Niveaux d'eau.....	29
4.3	Caracteristiques de vagues au droit de Bonifacio pour un evenement météo-marin centennal	30
5	CALCUL DE LA PRESSION DES VAGUES EXERCEE SUR LES FALAISES	33
5.1	Caractéristiques des impacts des vagues sur des structures sub-verticales à verticales 33	
5.2	Méthode de calcul des pressions exercées par les vagues.....	37
5.2.1	Modélisation numérique et formules empiriques.....	37
5.3	Résultats	42
5.3.1	Modélisation numérique	42
5.3.2	Comparaison avec les formules empiriques	52
6	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	53
7	BIBLIOGRAPHIE	55

Liste des figures

Figure 1 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018).	14
Figure 2 : Programme d'étude articulé en 4 blocs d'analyse, le bloc 2C est l'objet de ce rapport.	15
Figure 3 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.....	17
Figure 4 : Roses des vagues calculées au large d'Ajaccio (à gauche) et au large de Favone (à droite) entre 1979 et 2010 (NWW3 MED de la NOAA).	18
Figure 5 : Localisation des marégraphes du réseau RONIM situés dans les ports de Corse.	21
Figure 6 : Localisation des houlographes du réseau CANDHIS aux abords des côtes de Haute-Corse. Réalisé avec Google Earth Pro.	22
Figure 7 : Localisation des points d'extraction des niveaux d'eau au repos depuis la base de données MARS_MED_BRGM.....	23
Figure 8 : Emprise et bathymétrie du modèle NWW3 de la NOAA. Source: https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php	24
Figure 9 : Grille des données de vagues et vents issues de la base NWW3 Med de la NOAA (ronds verts) et localisation des extractions ponctuelles correspondants aux points les plus proches des bouées CANDHIS (étoiles rouges) ainsi qu'au point utilisé pour la zone d'étude au large d'Ajaccio (triangle encerclé en rouge).	25
Figure 10 : Localisation des points d'extraction pour les vagues (base de données NWW3, cercles rouges) et les niveaux d'eau (base de données MARS_MED_BRGM, cercles noirs) analysés. Cercles épais, localisations des points retenus dans cette étude(NWW3 465 et Corse 26).	26
Figure 11 : Rose des vents à gauche et rose des vagues à droite, au point NWW3 465 au large d'Ajaccio et du golfe de Valinco.	26
Figure 12 : Emprise des grilles de calcul. Pour Bonifacio, la propagation des vagues est calculée grâce à l'emboîtement des grilles « A » et « I ».	29
Figure 13 : Zoom sur le MNT topo-bathymétrique produit à la résolution de 10 m (grille « I »), sur le secteur de Bonifacio.	30
Figure 14 : Hauteur significative, direction des vagues et période pic pour la combinaison n°8.	31
Figure 15 : Principaux types d'impact de vagues. Source Frandsen et al. 2016.	33
Figure 16 : Série temporelle des pressions enregistrées sur la digue de l'Artha. Dans Larroque et al. 2018.	33
Figure 17 : Evolution de la pression lors d'un impact.	34
Figure 18 : Mesure des impacts des vagues sur un mur vertical : bassin à houle du l'INRS-ETE à Québec. En haut : configuration des expériences. En bas à gauche : exemple d'impact d'une vague sur le mur. En bas à droite : mesure de la pression en fonction de la durée du pic et du type d'impact. Dans Frandsen et al. 2016.	35
Figure 19 : Mesures des pressions de vagues sur le brise-lames de l'Artha à Saint-Jean de Luz. En haut à gauche situation géographique : A brise-lames ; B : houlographe. En haut à droite : enregistrements de la pression 2 hauteurs différentes du brise-lames au niveau du point A. En bas : pic de pression maximal mesuré. Dans Larroque et al. 2018.	36
Figure 20 : MNT de 0.10 m de résolution généré à partir de la fusion du Litto3D et du lever drone (emprise signalée par le polygone pourpre. Les traits rouges correspondent au profils de calcul. Coordonnées CC42 (m) et altitude exprimée en m par rapport à l'IGN78.	40
Figure 21 : Caractéristiques morphologiques des profils de calcul. Altitudes exprimées par rapport à l'IGN78.	42
Figure 22 : Instantanées de la ligne d'eau et des vitesses (profil entier et zoom) de la simulation sur le Profil_O_2 illustrant les interactions entre les vagues incidentes et réfléchies par la falaise.	43
Figure 23 : Instantanée de la ligne d'eau et des vitesses (profil entier et zoom) de la simulation sur le Profil_O_2 montrant l'impact de la vague sur la falaise.	44
Figure 24 : Illustration des limites de la modélisation réalisée sur un profil.	44
Figure 25 : Exemples de modélisation des différentes phases de la propagation des vagues et de la génération du setup sur le Profil_O_1 (en haut) et le Profil_central (en bas).	45
Figure 26 : Exemple de modélisation de la pression exercée par l'impact des vagues en pied de falaise du Profil_O_1. Haut : série temporelle de l'évolution des pressions. Bas : zoom sur un impact.	46
Figure 27 : Exemple de fichier Shape contenant les statistiques pour chacun des points de la falaise du Profil_O_1.	47
Figure 28 : Représentation des principaux résultats pour les différents profils de falaises.	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bouées CANDHIS ancrées aux abords de la Corse.....	22
Tableau 2 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL) pour 35 combinaisons centennales calculées à partir des données au large d'Ajaccio.	28
Tableau 3 : Conditions des forçage et pentes des falaises pour les différents profils.	40
Tableau 4 : Comparaison des pressions maximales modélisées et calculées grâce à des formules empiriques.	52

Liste des annexes

Annexe 1 Réponse des opérateurs aux avis du Comité des experts n°10 et n°8, Février 2021 - Extrait relatif à l'avis n°10 sur le rapport du bloc 2C (version provisoire).....	59
--	----

1 Rappel succinct du contexte de l'étude

1.1 PROBLEMATIQUE

La DGPR a produit une note rappelant le contexte global, dont un extrait est présenté ci-après :

« En 2012-2013, le Cerema a réalisé à la demande de la DDTM de la Corse du Sud une carte multialéas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio. Les résultats de cette étude ont été portés à la connaissance de la commune. Elle identifie deux secteurs particulièrement exposés à l'aléa mouvement de terrain : le secteur de la plage de Sutta Rocca et celui de la citadelle dans la vieille ville. Ils ont fait chacun l'objet d'une étude complémentaire en 2014 afin d'affiner l'aléa, de déterminer des protections envisageables pour la plage de Sutta Rocca et d'examiner la faisabilité d'une instrumentation pour la citadelle.

Le secteur de la citadelle, où l'aléa est qualifié de très élevé, s'avère particulièrement problématique. Il est concerné par 2 types de phénomènes : « chute de petits blocs » (<1 m³), posant essentiellement problème pour les éventuels promeneurs en pied de falaise et « effondrement en grande masse » (environ 1000 m³). Le mécanisme de rupture identifié est une érosion par sape du pied de falaise qui conduit à la mise en surplomb de la partie supérieure. La rupture se produit sous l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique à l'intérieur des fractures sub-verticales du massif. Son extension spatiale est conditionnée par le réseau de fractures.

Environ 33 bâtiments (332 habitants à l'année) sont menacés par un effondrement soudain et brutal en grande masse. Le Cerema préconise dans son rapport de 2014, la surveillance de la fracturation pour évaluer le fonctionnement réel du massif, tout en précisant que l'instrumentation mise en place ne pourra pas dans un premier temps servir de système d'alerte. Plusieurs années d'analyse des données seront nécessaires... ».

Il a été convenu entre la DDTM de Corse du Sud et les opérateurs BRGM, Cerema et Ineris (sous le pilotage du BRGM) de produire une étude visant à améliorer la connaissance et l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse » sous la Citadelle de Bonifacio, et plus particulièrement la zone de surplomb (encorbellement d'environ 20 m, cf. Figure 1) figurant en aléa de niveau très élevé.

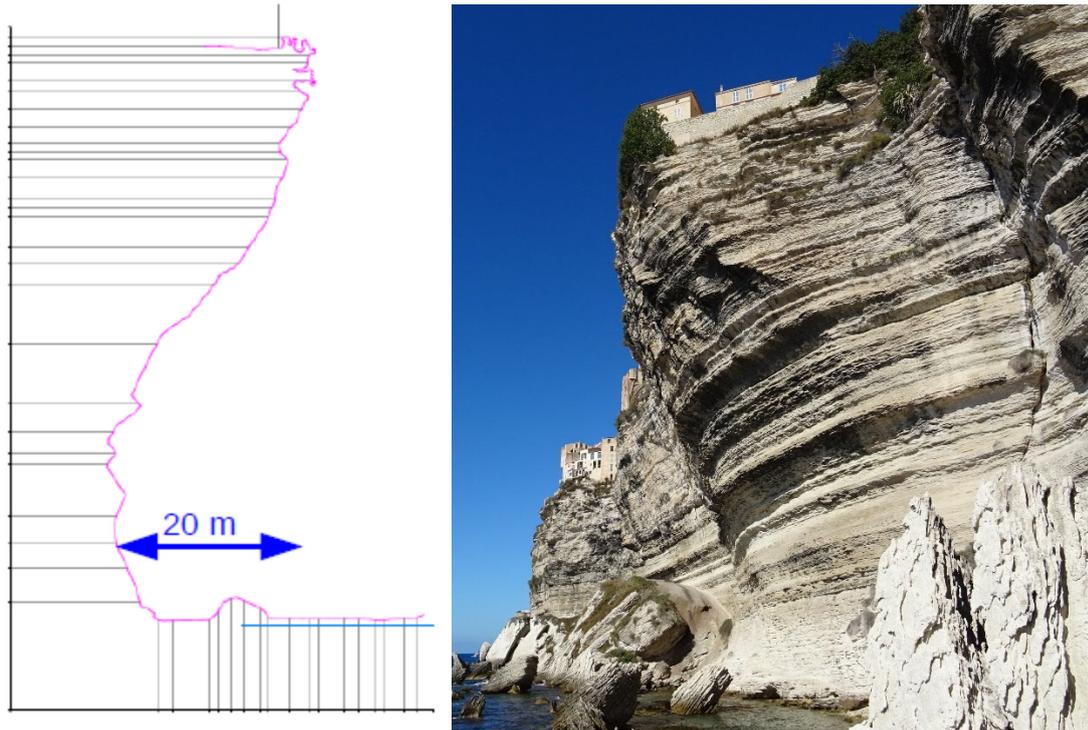


Figure 1 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018).

Il s'agit notamment de produire (cf. Figure 2) une analyse géologique et structurale détaillée de la Citadelle et de la zone d'étude, avec l'appui de trois forages de reconnaissance et d'essais en laboratoire (bloc d'étude 1), de progresser dans la connaissance du fonctionnement hydrogéologique (bloc d'étude 2B, sujet de ce rapport) du système et de ses conséquences potentielles en matière de fragilisation ou de facilitation des mécanismes de rupture préférentielles pressenties, de progresser également dans la connaissance du comportement du pied de falaise au regard du contexte hydrodynamique maritime (altération hydromécanique de la falaise et action de la houle sur la sape de pied, bloc d'étude 2C).

Bloc	Tâche	Sous tâche	Description	Pilote	Perimètre	
0			Synthèse sur les données existantes	CEREMA	Du Port au Cap Petusato	
		0,1	Synthèse des analyses faites depuis 2013	CEREMA		
		0,2	Données Disponibles anciennes (BRGM, CETE, CEREMA...)	CEREMA		
		0,3	Partage des données et métadonnées du groupement sur plate-forme e-cenaris, suivi dispositifs d'observation	INERIS		
1			Forages Inclinés	CEREMA	Citadelle	
		1,1	Redaction CdC	CEREMA		
		1,2	phase AO / autorisation / etude d'impact	BRGM		
		1,3	Suivi forage	BRGM		
		1,4	Géophysique en forage BHTV + radar	BRGM		
		1,5	Instrumentation extensométrie en forage incliné - benchmark, faisabilité et conception	INERIS		
		1,6	Suivi Instrumentation	INERIS		
2			Etudes complémentaires	BRGM	Citadelle/Peninsule	
		2A	Observation du site	INERIS		
			2,1	Aquisition et traitement LIDAR terrestre		INERIS
			2,2	Aquisition et traitement LIDAR aéroporté		BRGM
			2,3	Complement photogrammetrie		BRGM
			2,4	Instrumentation de paroi et observation : installation et maintenance		INERIS
			2,5	Radar Geologique		BRGM
			2,6	Modelisation Facets		BRGM
		2B	Complément Hydrogéologique	BRGM		
			2,9	Terrain / recueil informations AEP/ EU / Pluvial		BRGM
			2,10	Valorisation / Analyse exutoires		BRGM
		2C	Complément Erosion en pied de falaise	BRGM		
			2,11	Photo-interpretation falaise		BRGM
			2,12	Analyse comparative du trait de cote (Litto 3D/Lidar .).		BRGM
			2,13	Etude historicité + événements extremes		BRGM
			2,14	Caractérisation régime de Houle		BRGM
		2,15	Valorisation scenarii d'érosion	BRGM		
3			Construction d'un modèle partagé	BRGM	Citadelle	
		3A	Modèle global	BRGM		
			3,1	Réunions d'échanges		BRGM
			3,2	Modèle et definition des masses potentiellement instables		BRGM
		3B	Modèle Geomécanique	INERIS		
			3,4	Biblio paramètres géomecaniques et calcul géométrique simple		INERIS
			3,5	Essais en laboratoire + forage(s) verticaux pour prélèvements		CEREMA
			3,6	Calcul de stabilité Geomécanique (volume rocheux defini, REX sur dièdre éboulé)		INERIS
			3,7	Calcul de stabilité Geomécanique (volume identifié par sondages, paramétrage continuité, taux de ponts rocheux, ...)		INERIS
	4			Scenario de rupture		BRGM
		4,1	Definition Scenario rupture, Evaluation détaillée de l'aléa	BRGM		
		4,2	Proposition de reponse aux scenario (Mesures de mitigation - volet surveillance)	BRGM		
		4,3	Accompagnement communication	BRGM		

Figure 2 : Programme d'étude articulé en 4 blocs d'analyse, le bloc 2C est l'objet de ce rapport.

Il s'agit également de mettre en place un système d'observation du comportement du massif, au sein des forages entrepris mais également au droit de la Citadelle et des falaises la délimitant (bloc d'étude 2A).

L'évaluation finale de l'aléa « effondrement en grande masse », et la proposition de mesures de mitigation en fonction du niveau retenu (bloc d'étude 4), est l'objectif final de l'étude à l'horizon de mi 2020, au terme de dix-huit mois d'investigations et d'analyses. L'évaluation de l'aléa s'appuiera sur l'ensemble des éléments informatifs acquis, et sur une modélisation géomécanique des mécanismes de mouvement de terrain jugés comme étant les plus pertinents (blocs d'étude 3A et 3B).

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE – BLOC 2C

La sape du pied de falaise et le rôle des protections naturelles existantes que constituent les éboulis sont pointées comme un facteur déterminant dans l'évaluation des aléas. A cet égard, la quantification de l'érosion en pied au niveau de la zone de la Citadelle est à caractériser.

Un premier volet a pour objectif de réaliser une caractérisation du régime de houle, en visant un élément centennal comme évènement de référence. Un second volet de modélisation se base sur la bathymétrie disponible (SHOM Litto 3D) avec comme but de quantifier l'impact du climat de houle (pression et forces de vagues, ou énergies) sur la falaise. L'objectif final, mené par ailleurs, étant de corréliser cet impact au taux d'érosion du pied de falaise.

Cette étude se déroule de la façon suivante, dans les chapitres ci-dessous :

- Chapitre 2 présente le contexte météo-marin général de la Corse ;
- Chapitre 3 est dédié aux données disponibles et utilisées dans cette étude ;
- Chapitre 4 est consacré à la détermination de l'évènement météo-marin centennal de référence de cette étude et à sa propagation grâce à la modélisation numérique jusqu'au large de Bonifacio ;
- Chapitre 5 est dédié au calcul des impacts des vagues sur les falaises de Bonifacio en faisant appel notamment à la modélisation numérique ;
- Chapitre 6 présente finalement les principales conclusions de ces travaux ainsi qu'une mise en perspectives des travaux futurs.

2 Contexte météo-marin général

2.1 REGIME CLIMATIQUE GENERAL

Les vents ont une action majeure sur les aléas côtiers, car ils sont responsables de la génération de la houle au large. La Corse de par sa position géographique est sujette à un régime de vent réputé violent avec des changements de directions fréquents et brutaux. Les vents dominants sont (Stépanian et al., 2011) :

- U Libecciu (le Libeccio), vent violent de secteur ouest à sud-ouest, il touche particulièrement la façade Ouest de l'île. En hiver, il est généralement accompagné de fortes précipitations alors qu'en été, il est associé à un temps doux et sec.
- U Maestrale (le Mistral), vent de secteur nord-ouest, particulièrement intense et sec en été. Il touche la partie occidentale de la Corse.
- A Tramontana (la Tramontane), vent de secteur nord à nord-est violent et froid. En hiver, il est responsable d'un climat humide et froid.
- U Grecale (le Grec), vent d'est qui accompagne de très fortes précipitations sur la façade occidentale de l'île.
- U Levante (le Levant) vent de secteur est à nord-est. Il peut être très violent pendant la période hivernale.
- U Sirocco, vent de secteur sud à sud-est, chaud et humide. Il est souvent convoyeur de poussières venues d'Afrique du Nord.
- U Mezzogiorno, vent chaud et humide de faible intensité provenant du sud (Figure 3).

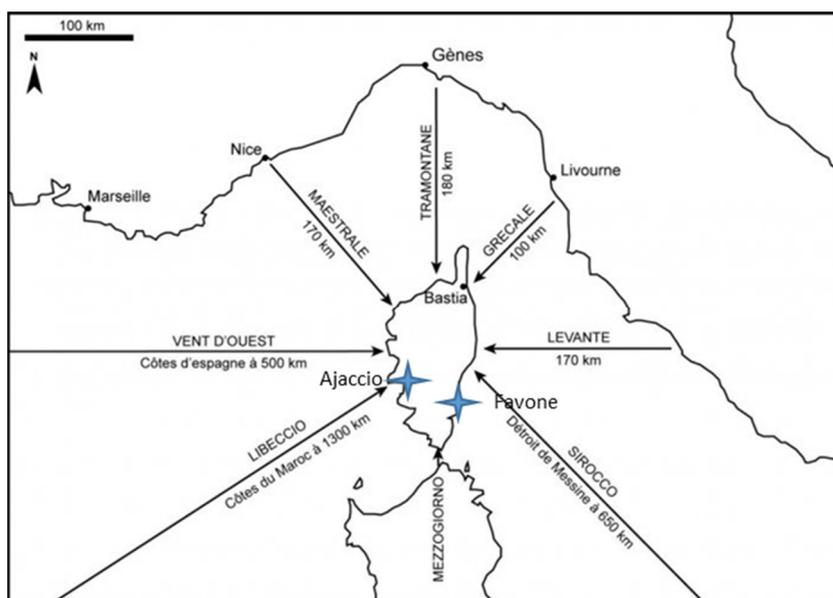


Figure 3 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.

D'autre part, le secteur des bouches de Bonifacio est réputé particulièrement venteux en raison de l'effet Venturi¹ généré par l'espace restreint entre la Corse et la Sardaigne. Ainsi, le vent y souffle 300 jours par an et des records sont régulièrement enregistrés au Cap-Pertusato (par exemple 187 km/h le 29/10/2018 pendant la tempête Adrian).

2.2 CONTEXTE OCEANOGRAPHIQUE

En Méditerranée, la marée est de type microtidale². D'après le SHOM³ avec un marnage de 0,2 m en mortes-eaux⁴ à 0,4 m en vives-eaux⁵.

Les caractéristiques des vagues en Méditerranée se traduisent généralement par une « mer de vent » dont les hauteurs significatives ($H_s < 4$ m) et les périodes (T_p 5 à 10s) sont limitées. Au sud de la Corse, le spectre directionnel de ces vagues est relativement large (nord-ouest à sud-ouest et nord-est à est, Figure 4). Dans le quart sud-est de la Corse, les conditions de vagues sont en moyenne relativement peu énergétiques, mais soumises à une forte saisonnalité avec des tempêtes violentes en hiver et des valeurs de H_s ⁶ dépassant presque chaque hiver les 3m. La direction principale des vagues est sud-est (Figure 4).

Sur la côte Ouest, les conditions de vagues sont bien plus énergétiques, avec des valeurs de H_s dépassant fréquemment 3m en toute saison et 5m en hiver. La direction principale des vagues est ouest à nord-ouest Figure 4).

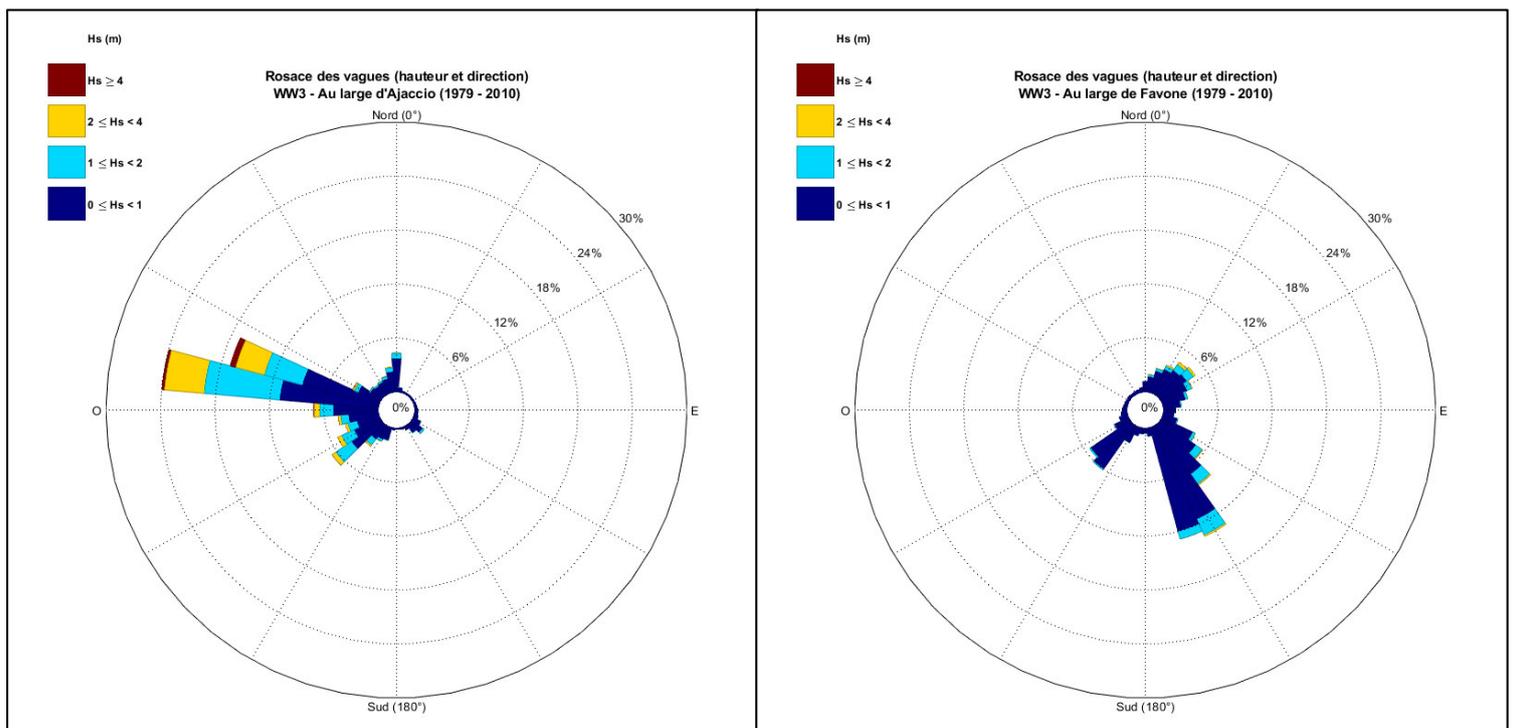


Figure 4 : Roses des vagues calculées au large d' Ajaccio (à gauche) et au large de Favone (à droite)(cf.figure 3) entre 1979 et 2010 (NWW3 MED de la NOAA).

¹ Effet Venturi : Processus en dynamique des fluide d'accélération des particules dans un espace restreint.

² Milieu microtidal : milieu où le marnage est inférieur à 2 mètres, caractéristique des mers fermées.

³ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

⁴ Marée de Morte-eau : marée de coefficient inférieur à 70.

⁵ Marée de Vive-eau : marée de coefficient supérieur à 70.

⁶ H_s : hauteur significative des vagues en mètre, elle représente la moyenne du tiers supérieur des vagues.

2.3 CARACTERISATION GENERALE DES TEMPETES

Les tempêtes sont généralement définies en météorologie comme des évènements avec des vents de vitesse supérieure à 10 Beaufort, soit 90 km/h. En Méditerranée occidentale, la comparaison des vitesses normales entre 1951 et 1980 pour différents points du littoral français montre qu'au niveau du Cap Pertusato, au sud de la Corse, cette classe d'évènements (vent > 90 km/h) représente 10% du temps soit l'équivalent de la fréquence au Cap de la Hague et la moitié de celle mesurée à Ouessant (Tabeaud, 1995).

Du fait de son caractère insulaire, la Corse est exposée aux tempêtes en provenance de tous les secteurs géographiques. Cependant, il existe une grande différence entre la côte occidentale exposée aux vents de secteur ouest qui ont une action sur un long fetch depuis Gibraltar et la côte orientale sur la mer Tyrrhénienne où le fetch entre la péninsule italienne et la Corse est plus limitée.

De manière générale, les tempêtes susceptibles d'avoir le plus d'impact au sud de la Corse se produisent lorsqu'un flux d'Ouest est bien établi entre un anticyclone sur la péninsule ibérique et une dépression au niveau du Golfe de Gênes. Un flux Nord important est alors bien établi et la dépression réoriente ces vents dans des secteurs nord-ouest à sud-ouest sur la Corse. C'est une situation de Libeccio (ouest – sud-ouest) ou de Mistral (nord – nord-ouest).

Cependant, ce sont les tempêtes en provenance du sud-ouest qui peuvent être les plus violentes, lorsqu'elles se forment ou se régénèrent sur la Méditerranée occidentale en provenance de l'Atlantique. Elles sont généralement très creuses en terme barométrique (inférieures à 990 hPa) et se déplacent rapidement d'ouest en est (Stepanian et al., 2011).

Les tempêtes les plus marquantes sont par exemples Lothar et Martin qui ont traversé la Corse les 26 et 28 décembre 1999 (200 km/h de vent, vagues de 6 à 8 m) ou plus récemment la tempête Adrian (29 octobre 2018, 180 km/h au Cap Pertusato, vagues de 5 à 6 m).

3 Données disponibles et données exploitées

En Corse, les observations in-situ (marégraphes et houlographes) sont trop peu nombreuses et pas assez anciennes pour les études d'hydrodynamique marine. Afin de pallier ce manque de données, des simulations rétrospectives sont exploitées. Il s'agit de données de niveaux d'eau, de vagues et de vent générées par modélisation numérique afin d'offrir une large couverture spatiale et temporelle ainsi qu'une fine résolution spatiale et temporelle.

3.1 OBSERVATIONS IN SITU DISPONIBLES

3.1.1 Marégraphes du réseau RONIM du SHOM

Des marégraphes appartenant au Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM) permettent l'observation et le suivi des niveaux d'eau dans certains ports de Corse. Leur emplacement est indiqué sur la Figure 5. Il s'agit d'observatoires secondaires, le port de référence le plus proche étant celui de Toulon (SHOM, 2017).

Les données en ces ports sont disponibles sur le portail <https://data.shom.fr/>. La série temporelle la plus longue gérée par ce réseau est celle d'Ajaccio avec une vingtaine d'années d'acquisition discontinue entre 1981 et nos jours.

Les ports les plus proches de la zone d'étude et abritant un marégraphe sont ceux d'Ajaccio et de Solenzara. Ces deux points de mesures ne représentent cependant pas une résolution spatiale suffisante pour l'analyse tri-variée des extrêmes telle que réalisée pour l'estimation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (ZBPESM) par le BRGM pour l'Etat et exploitée dans cette présente étude (Mugica et al., 2020).



Figure 5 : Localisation des marégraphes du réseau RONIM situés dans les ports de Corse.

Les points verts indiquent les marégraphes pour lesquels les données sont disponibles en temps réel (en violet en différé au moment de l'étude). Source : data.shom.fr

3.1.2 Houlographes du réseau CANDHIS du CEREMA

Le Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ (CANDHIS) est en charge de la gestion, maintenance et mise à disposition des données de vagues *in-situ* en France.

Les bouées en mer proches des côtes Corses sont au nombre de 4 (Figure 6). L'information spectrale condensée des états de mer est estimée à partir d'une mesure hautes-fréquences. Une vingtaine de paramètres sont mesurés et calculés par analyse spectrale. Parmi eux, la hauteur significative **Hm0**, la période moyenne **Tm02**, et la période de pic **Tp**, avec une résolution temporelle initiale de 3 h, puis une résolution horaire, et enfin une acquisition toutes les demi-heures pour les données les plus récentes.



Figure 6 : Localisation des houlographes du réseau CANDHIS aux abords des côtes de Haute-Corse. Réalisé avec Google Earth Pro.

Le Tableau 1 présente les renseignements généraux des 4 bouées présentes le long des côtes de la Corse. Le code et la localisation permettent d'identifier le jeu de données. La position géographique est indiquée en latitude, longitude dans le système WGS84 avec en plus une information de profondeur de mouillage *h* et de distance à la côte exprimée en miles nautiques (1 mile = 1852 m). La couverture temporelle est donnée par la différence entre la date de fin de campagne et la date de début de campagne.

Code bouée	Localisation	Latitude	longitude	Profondeur (m)	Distance à la côte (miles)	Fréquence d'acquisition	Nombre total de données	Début	Fin
02B02	Cap Corse	43°03,66'N	9°16,510'E	140	4.8	1 acquisition/3h, horaire, 2 acquisitions/h	26337	16/03/1999	01/03/2011
02B03	Bastia	42°40,44'N	9°27,270'E	17	0.35	2 acquisitions/h	25450	13/09/2006	19/11/2008
02B04	La Revellata	42°34,150'N	8°39,000'E	130	2.54	2 acquisitions/h	69333	02/05/2013	en cours
02B05	Alistro	42°15,700'N	9°38,600'E	120	3.9	2 acquisitions/h	51338	15/10/2013	en cours

Tableau 1 : Caractéristiques des bouées CANDHIS ancrées aux abords de la Corse.

3.2 DONNEES ISSUES DE MODELISATIONS NUMERIQUES (SIMULATIONS RETROSPECTIVES)

3.2.1 Niveaux d'eau « MARS_MED_BRGM »

Afin de disposer d'un jeu de données de niveaux d'eau au large (intégrant marée et surcote atmosphérique) avec une couverture spatiale et temporelle suffisamment longue et de pallier l'absence de données marégraphiques, des simulations rétrospectives ont été générées par le BRGM spécifiquement pour les études des ZBPESM précitées (Mugica et al., 2020).

Le modèle numérique MARS-2DH (développé à IFREMER, Lazure et Dumas, 2008) a été employé car il permet de calculer l'hydrodynamique au niveau régional à partir des composantes harmoniques de marée (base de données FES2004 - LEGOS, Lyard, 2006) et de données météorologiques (CFSR, Saha et al., 2010).

La base de données « MARS_MED_BRGM » ainsi créée couvre la période 1979 – 2009 (31 ans) avec une résolution spatiale de 2km et une résolution temporelle toutes les 10 min pour les sorties ponctuelles.

Les simulations des niveaux d'eau (en m) et des courants U et V (en m/s) ont été réalisées sur une grille de calcul de résolution 2km ($\sim 0.02^\circ$).

Les composantes harmoniques de la base de données FES2004 sont utilisées afin de générer et d'imposer les conditions de marées sur les limites géographiques du modèle. Les effets météorologiques induits par le vent et la pression sont pris en compte en utilisant les champs de vent et de pression ré-analysés CFSR (Saha et al., 2010).

Les sorties du modèle sont conservées à la fois sur une grille et comme des séries temporelles ponctuelles sur tout le pourtour Corse (Figure 7).

La comparaison de ces simulations rétrospectives avec les observations du marégraphe d'Ajaccio est présentée dans le rapport relatif aux ZBPESM (Mugica et al., 2020).

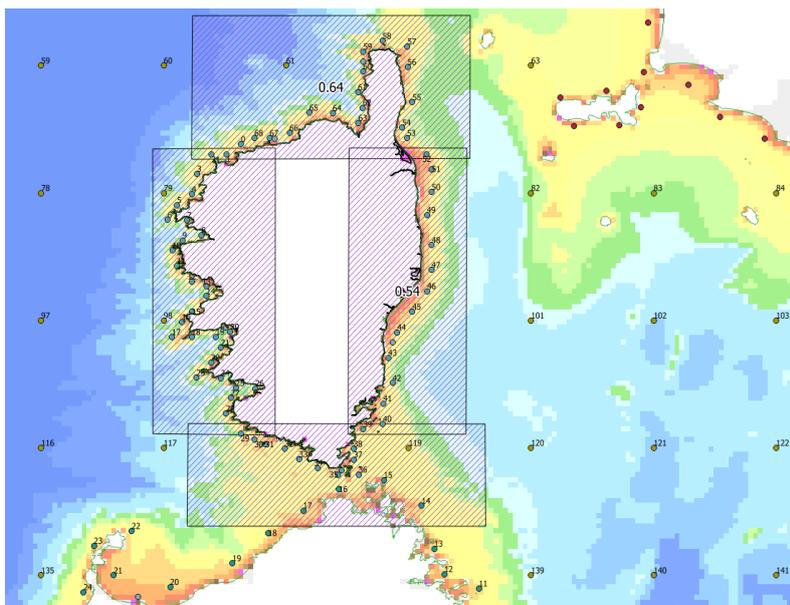
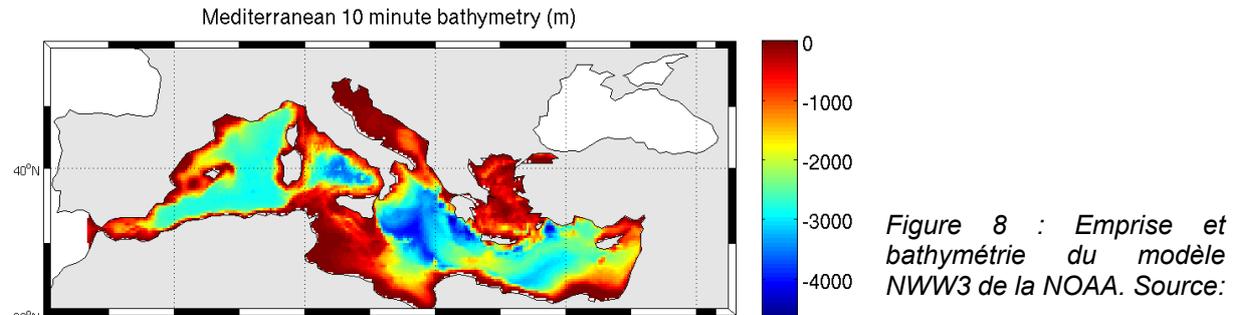


Figure 7 : Localisation des points d'extraction des niveaux d'eau au repos depuis la base de données MARS_MED_BRGM.

3.2.2 Base de données NWW3 MED de la NOAA

La NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency) a généré une base de données d'états de mer sur 31 ans (1979-2009) à l'aide du modèle spectral de 3^{ème} génération WAVEWATCH III® incluant la paramétrisation d'Ardhuin *et al* (2010). Cette base est composée de 15 grilles régulières forcées par les vents haute résolution CFSR (Saha *et al.*, 2010). L'une de ces grilles couvre la Méditerranée (cf. Figure 8) et propose des sorties à résolution spatiale de 10 minutes (i.e 1/6°) et temporelle toutes les 3h.



<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php>.

Une fois la grille récupérée sur le site de la NOAA, il est possible d'en extraire des séries temporelles aux points désirés : dans notre cas proche de la Corse (Figure 9). Les données ainsi disponibles sont :

- les hauteurs significatives de vagues **Hs** exprimées en mètres (m) ;
- la période de pic **Tp** en secondes (s) ;
- la direction de pic des vagues **Dp** en degrés (°).
- la composante zonale **U** du vent utilisée pour forcer le modèle (m/s) ;
- la composante méridionale **V** du vent utilisée pour forcer le modèle (m/s).

La comparaison de ces simulations rétrospectives avec les observations des bouées CANDHIS est présentée dans le rapport relatif aux ZBPESM (Mugica *et al.*, 2020).



Figure 9 : Grille des données de vagues et vents issues de la base NWW3 Med de la NOAA (ronds verts) et localisation des extractions ponctuelles correspondants aux points les plus proches des bouées CANDHIS (étoiles rouges) ainsi qu'au point utilisé pour la zone d'étude au large d' Ajaccio (triangle encerclé en rouge).

3.2.3 Données exploitées

Pour la présente étude, les résultats de l'étude relative aux ZBPESM du BRGM pour la DDTM2A sont exploités. Des séries temporelles de niveaux d'eau (localisation indiquée par les cercles noirs sur la Figure 10) et de vagues (localisation indiquée par les cercles rouges sur la Figure 10) ont été extraites sur la façade sud-ouest de la Corse afin de déterminer, parmi ces séries, les plus représentatives des conditions marines au large de Bonifacio.

L'analyse des niveaux d'eau révèle des conditions assez homogènes sur les différents points d'extraction (Corse 26, 30, 32, 34). Par exemple, les différences sont centimétriques en ce qui concerne les niveaux d'eau de période de retour centennale calculées pour les différentes localisations.

L'analyse des roses de vagues montre deux directions de provenance privilégiées des vagues (cf. Figure 11) : ouest-nord-ouest et sud-ouest. Etant donnée l'orientation du linéaire côtier de Bonifacio, ce sont les vagues de sud-ouest qui auront le plus grand impact sur ce littoral. Cette direction est bien représentée dans les points NWW3 465, 442 et 418 c'est-à-dire au large et à l'entrée des Bouches de Bonifacio. Parmi ces localisations, c'est le point NWW3 465 qui présente les Hs les plus forts et qui est à privilégier puisque cette étude traite d'évènements météo-marin de période de retour centennale.

Cette étude exploitera donc les séries temporelles du point NWW3 465 (au large d'Ajaccio et du golfe de Valinco) pour les vagues et du point Corse 26 (au fond du golfe de Valinco) pour les niveaux d'eau à cause de sa proximité géographique du point précédent (cf. Figure 10).

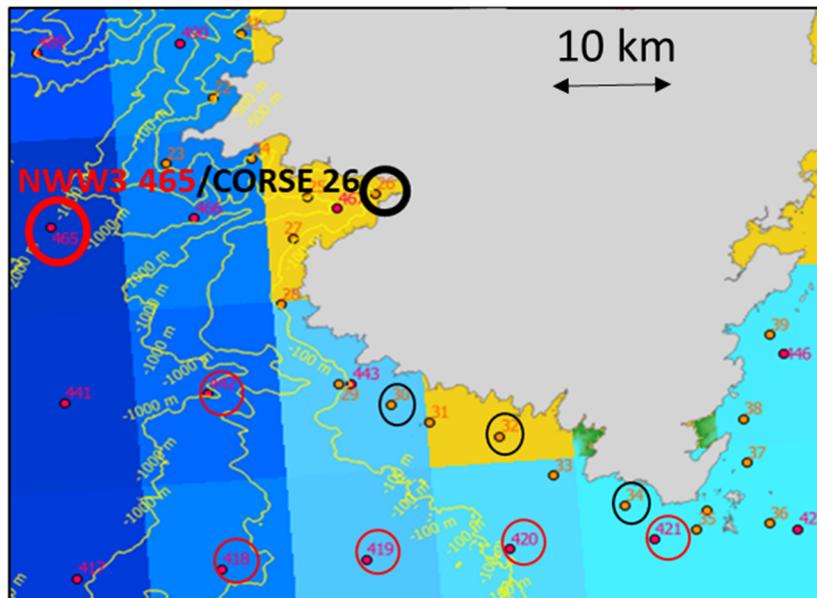


Figure 10 : Localisation des points d'extraction pour les vagues (base de données NWW3, cercles rouges) et les niveaux d'eau (base de données MARS_MED_BRGM, cercles noirs) analysés. Cercles épais, localisations des points retenus dans cette étude (NWW3 465 et Corse 26).

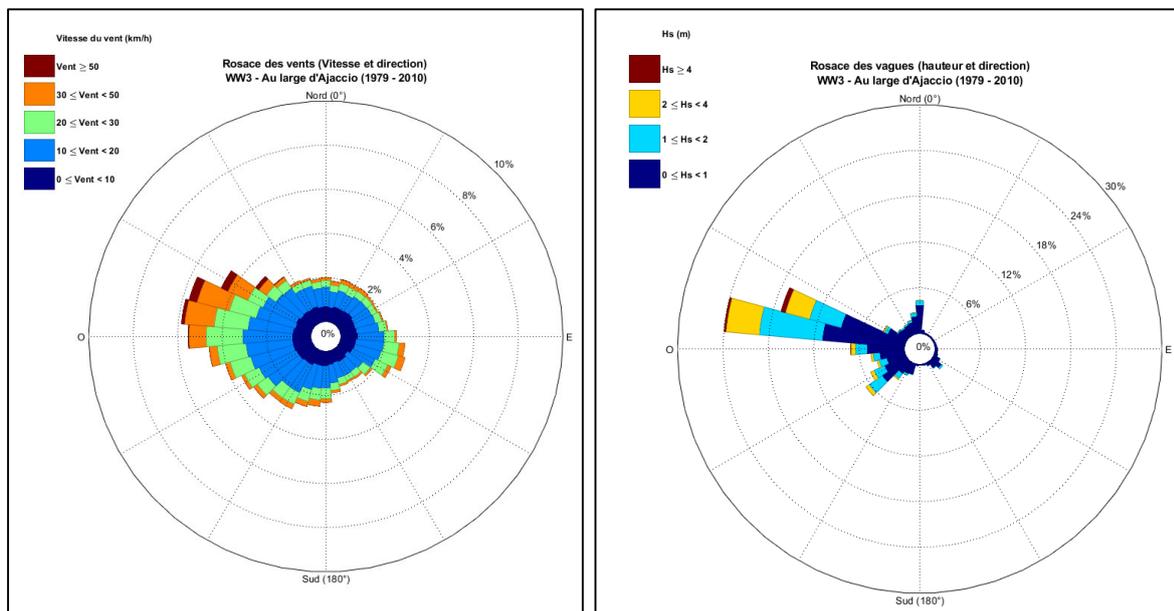


Figure 11 : Rose des vents à gauche et rose des vagues à droite, au point NWW3 465 au large d'Ajaccio et du golfe de Valinco.

4 Caractéristiques des évènements météo-marins centennaux

Les résultats de l'étude relative aux ZBPESM réalisée par le BRGM pour l'Etat ont été entièrement repris pour les besoins de la présente étude. Il s'agit des données météo-marines situées au large d'Ajaccio (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les données, méthodes et résultats sont présentés en détail dans le rapport Mugica et al., (2020).

4.1 ANALYSES STATISTIQUES MULTIVARIEES DES EXTREMES

La détermination des évènements météo-marins centennaux repose sur une analyse statistique multivariée des extrêmes (Heffernan et Tawn, 2004) que le BRGM a également appliquée sur plusieurs sites, notamment en Méditerranée (Nicolae Lerma et al., 2018). Cette approche est utilisée pour déterminer la probabilité que les trois conditions H_s (hauteur significative des vagues), SWL (niveau d'eau au repos au large incluant la marée et la surcote atmosphérique) et U (vitesse du vent) dépassent conjointement des valeurs spécifiées.

Il a ainsi été déterminé un ensemble de triplets de valeurs (H_s ; SWL ; U) associées à une période de retour (ici 100 ans). A chacune de ces combinaisons, une valeur de période de pic T_p a été calculée à partir de la relation entre H_s et la cambrure des vagues S_t . Le choix a été fait de prendre la médiane des valeurs simulées de T_p avec JOIN-SEA (Hawkes et al. 2002) pour chacune des hauteurs H_s . Concernant la direction pic D_p des vagues ainsi que la direction du vent D_u , une valeur unique a été évaluée pour chaque combinaison (H_s ; SWL ; U).

Les principales étapes de la méthode sont les suivantes :

- i. **Préparation du jeu de données** : il s'agit de constituer un échantillon avec un grand nombre de triplets (H_s ; SWL ; U) indépendants ;
- ii. **Ajustement des lois de probabilités** (dites « marginales ») pour chaque variable H_s , SWL et U à l'aide de la loi Pareto Généralisée (GPD *Generalized Pareto Distribution*) ;
- iii. **Ajustement des modèles de dépendance**
 - a. **entre les trois variables extrêmes H_s , SWL et U** : cela repose sur l'approche semi-paramétrique décrite par Heffernan et Tawn (2004) ;
 - b. **entre H_s et T_p** : la distribution conditionnelle empirique S_t sachant H_s est utilisée.
- iv. **Simulation par méthode Monte-Carlo** à l'aide des lois marginales et des modèles de dépendance d'un très grand nombre de combinaisons (H_s ; SWL ; U) possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées ;
- v. **Analyse des extrêmes qui permet de déterminer des triplets (H_s ; SWL ; U)** d'iso-période de retour de dépassement conjoint de 100 ans.

Sur cette base, plusieurs combinaisons centennales (H_s , SWL , T_p , D_p , U , D_u) représentatives ont été définies comme conditions au large des modèles hydrodynamiques et ont été propagées jusqu'à proximité de Bonifacio permettant ainsi de calculer les niveaux marins totaux en intégrant les processus locaux liés à l'effet des vagues et à la géomorphologie (Tableau 2).

Les directions D_p et D_u ont été choisies à partir des analyses précitées ainsi qu'en fonction de la morphologie de Bonifacio. Elles correspondent aux valeurs les plus pénalisantes en terme d'effet à la côte, à savoir une direction de 240° (ouest sud-ouest) pour la provenance des vagues et 225° (sud-ouest) pour le vent (en convention nautique, i.e dans le sens horaire avec 0° correspondant au Nord).

Scénario	H_s (m)	T_p (s)	U (m/s)	SWL (m/NM)
1	8.52	11.44	21.46	0.15
2	8.65	13.5	21.25	0.15
3	8.68	13.5	20.92	0.15
4	8.39	11.38	21.69	0.15
5	8.28	11.28	21.8	0.15
6	8.05	11.16	21.95	0.15
7	8.46	11.41	21.42	0.2
8	8.62	13.5	21	0.2
9	8.69	13	20.05	0.2
10	8.27	11.34	21.68	0.2
11	8.01	11.17	21.89	0.2
12	7.94	11.13	21.93	0.2
13	8.37	11.39	21.27	0.25
14	7.91	11.17	21.63	0.25
15	8.17	11.23	21.47	0.25
16	7.6	11.12	21.75	0.25
17	8.52	11.44	20.75	0.25
18	8.02	11.2	20.66	0.3
19	7.76	10.95	20.91	0.3
20	7.47	10.85	21.07	0.3
21	8.14	11.28	20.19	0.3
22	8.2	11.28	19.16	0.3
23	6.15	10.48	20.23	0.35
24	7.32	10.69	19.32	0.35
25	7.03	10.71	19.59	0.35
26	6.45	10.6	20.11	0.35
27	7.48	11.05	18.54	0.35
28	7.64	11.18	16.74	0.35
29	6.12	10.83	16.84	0.4
30	5.34	10.21	17.83	0.4
31	5.87	10.57	17.21	0.4
32	6.33	10.29	16.27	0.4
33	6.65	10.43	13.84	0.4
34	6.92	11.04	10.49	0.4
35	5.07	10.29	18.11	0.4

Tableau 2 : Valeurs des paramètres de vagues (H_s et T_p), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL) pour 35 combinaisons centennales calculées à partir des données au large d'Ajaccio.

4.2 MODELISATION NUMERIQUE DES PARAMETRES DE VAGUES ET DES NIVEAUX D'EAU

La stratégie de modélisation numérique mise en œuvre pour la cartographie des ZBPESM (Mugica et al., 2020) repose sur l'utilisation de deux modèles : SWAN (Simulating WAVes Neashore, Booij et al. 1999) permettant de calculer la propagation des vagues ainsi que la surcote liée au déferlement de celles-ci (wave setup) et SWASH-2DH dans sa version Saint-Venant (Simulating WAVes till Shore, Zijlema et al. 2011) permettant de calculer les niveaux d'eau et la surcote liée au vent.

Afin d'obtenir la surcote liée au déferlement des vagues (modèle SWAN) 14 grilles⁷ ont été construites dans le cadre des études des ZBPESM en Corse-du-Sud à partir des données bathymétriques du SHOM (MNT Homonim de la Corse à 100 m de résolution et des sondes histolitt) et des données topographiques de l'IGN (RGE Alti à 1m de résolution) (Figure 12) : 2 dites « rang 0 » (ou grille mère « A », trait plein et pointillés en rouge sur la figure) avec une résolution de 50 m et les 12 autres dites « rang 1 » (ou grilles filles, B et C en orange sur la figure) de résolution 10 m. Pour la présente étude, seuls les résultats issus de la grille « I » correspondant au secteur de Bonifacio ont été exploités (Figure 13).

Les caractéristiques de la grille de Bonifacio (10 m) sont les suivantes :

- x_min: 1208810 x_max: 1223490 x_inc: 10 name: x nx: 1469
- y_min: 6046400 y_max: 6060080 y_inc: 10 name: y ny: 1369

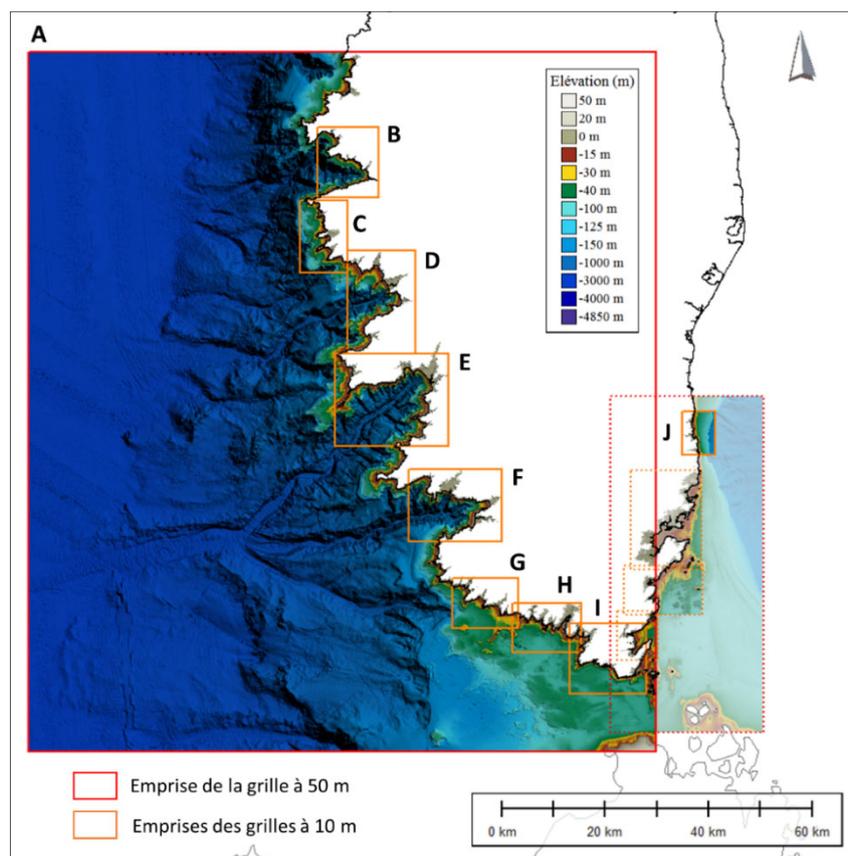


Figure 12 : Emprise des grilles de calcul. Pour Bonifacio, la propagation des vagues est calculée grâce à l'emboîtement des grilles « A » et « I ».

⁷ Les données topo-bathymétriques disponibles et utilisées sont présentées dans le rapport Mugica et al. (2020).

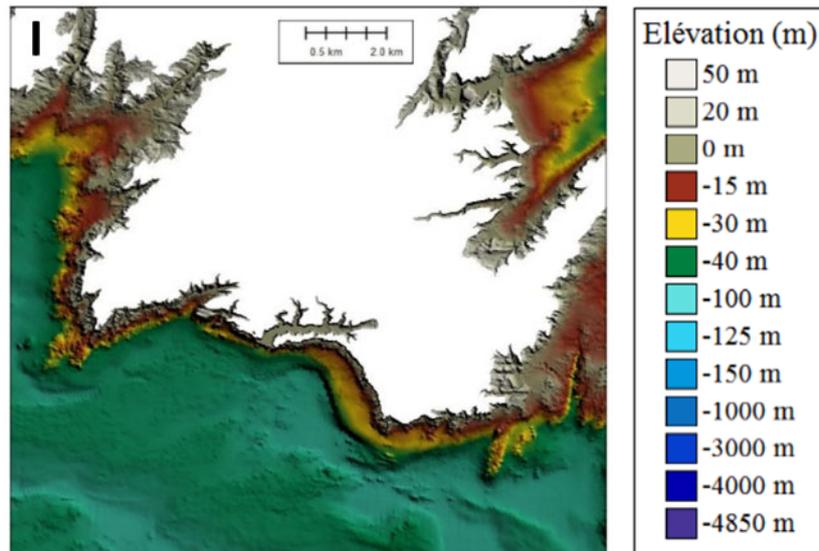


Figure 13 : Zoom sur le MNT topo-bathymétrique produit à la résolution de 10 m (grille « I »), sur le secteur de Bonifacio.

Pour un évènement de référence « actuel », les simulations ont été réalisées avec comme facteurs de forçage les caractéristiques de vent, vagues et niveaux d'eau issues des 35 combinaisons précédemment calculées (Tableau 2). Pour rappel⁸, des marges de +20 cm et de +25 cm sont ajoutées au niveau d'eau au large, avant propagation vers le rivage.

Comme expliqué précédemment, les directions des vagues D_p et du vent D_u ont été choisies à partir des analyses statistiques et de la configuration du site. Elles correspondent aux valeurs les plus pénalisantes en terme d'effet à la côte à savoir une direction de 240° pour la provenance des vagues et 225° pour le vent (en convention nautique, i.e dans le sens horaire avec 0° correspondant au Nord).

4.3 CARACTERISTIQUES DE VAGUES AU DROIT DE BONIFACIO POUR UN EVENEMENT METEO-MARIN CENTENNAL

Les 35 combinaison centennales, dont les caractéristiques sont décrites dans Tableau 2, associées à un vent de vitesse de 21m/s furent propagés jusqu'au littoral de Bonifacio grâce aux modèles mis en place. Parmi celles-ci, c'est la combinaison n°8 qui est la plus impactante en termes de niveaux marins et de hauteur des vagues. Elle correspond à l'une des combinaisons présentant les caractéristiques de vagues les plus importantes ($H_s = 8,62\text{m}$, $T_p = 13,5\text{s}$). C'est pourquoi seuls les résultats de la propagation de cette combinaison depuis le large vers le rivage de Bonifacio sont présentés ici.

La Figure 14 met en évidence une réfraction des vagues d'ouest à l'approche de la côte, leur conférant une direction plus frontale. Leur atténuation avec la diminution de la profondeur est visible mais la hauteur significative est encore de l'ordre de 4-5m à quelques dizaines de mètres du rivage.

^{8 8} Conformément aux recommandations du guide méthodologique, MEDDE, (mai 2014), le calcul du niveau marin au rivage prend en compte l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique pour l'évènement naturel de référence centennal dit « actuel ». Ainsi une marge de **20 cm** est rajoutée au niveau d'eau (de l'évènement naturel centennal) au large pour l'évènement naturel centennal de référence « actuel » dans cette étude. Il est également recommandé dans le guide méthodologique de prendre en compte les incertitudes (sur les données et outils utilisés) et donc de rajouter une marge de **25 cm** au niveau d'eau de l'évènement centennal si les incertitudes ne peuvent être estimées.

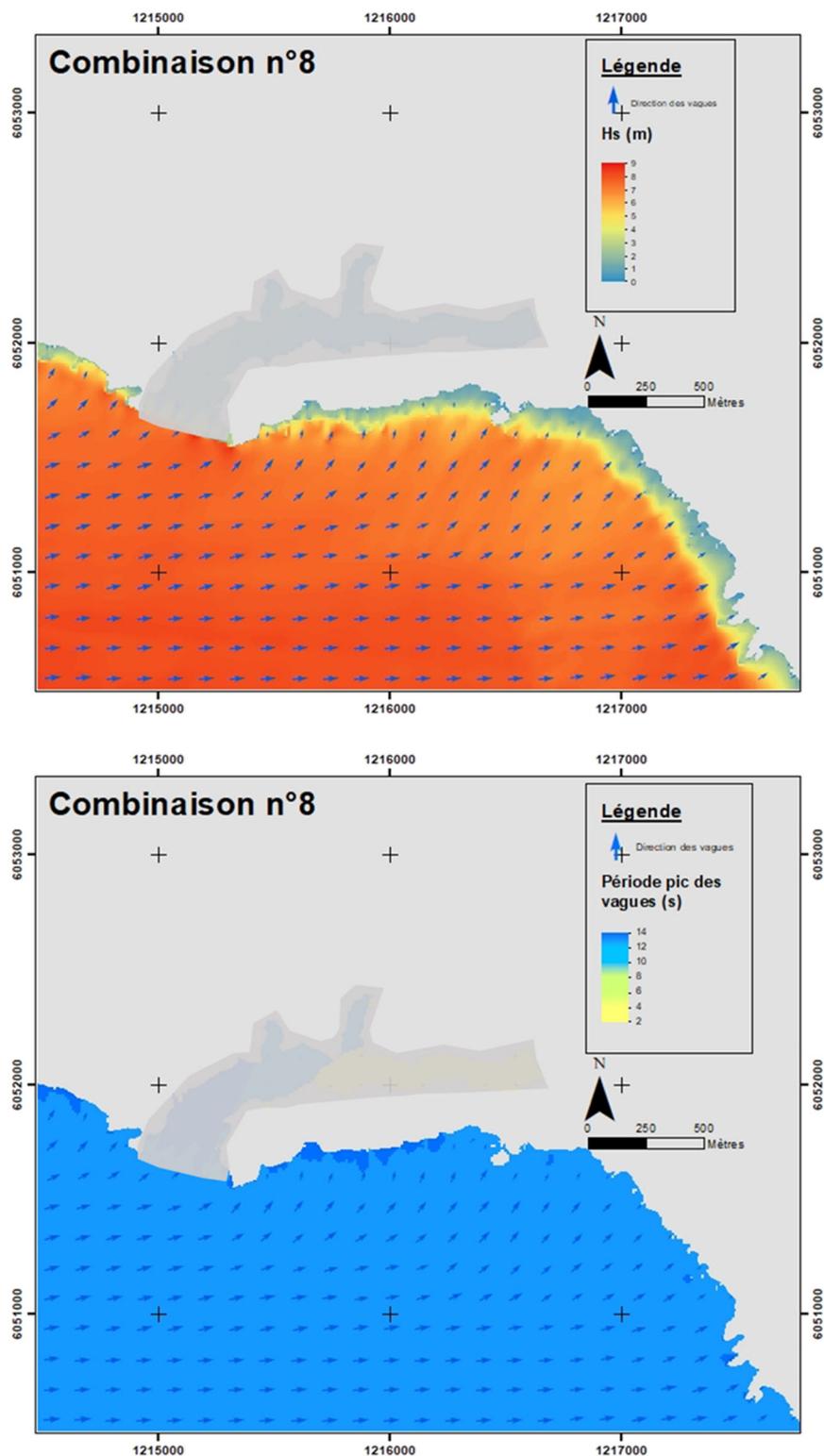


Figure 14 : Hauteur significative, direction des vagues et période pic pour la combinaison n°8.

5 Calcul de la pression des vagues exercée sur les falaises

Dans ce chapitre nous faisons, dans un premier temps, une rapide synthèse sur la connaissance des impacts des vagues sur les structures (sub)verticales comme les falaises ou digues et quais et les formules empiriques utilisées dans ce cadre avant de nous intéresser à la modélisation numérique.

5.1 CARACTERISTIQUES DES IMPACTS DES VAGUES SUR DES STRUCTURES SUB-VERTICALES A VERTICALES

On peut classer les impacts des vagues sur des structures (sub)verticales en 3 types selon Frandsen et al. 2016 (*Figure 15*) :

- **Flip-through** : la crête et le creux de la vague se situent quasiment sur le même plan à proximité de la paroi. Lors de l'impact, l'énergie tend à se focaliser sur un même point et il n'y a pas d'emprisonnement d'air dans ce cas. Les accélérations peuvent être très importantes et les durées des pics de pression très courtes (typiquement entre 0.5 ms et 15 ms) ;
- **Aération faible** : la crête est cette fois ci en légère avance par rapport au creux ainsi, lors de l'impact, une petite poche d'air est emprisonnée contre la paroi. La durée des pics se situe généralement entre 5 ms et 30 ms ;
- **Aération élevée** : elle se caractérise par une grande poche d'air piégée contre la paroi lors de l'impact. Les pics ont une durée plus longue variant entre 30 ms et 100 ms. La pression sur la paroi est principalement contrôlée par la compression de la poche d'air. Les valeurs de pression sont dans ce cas plus faibles que pour les 2 autres types d'impact.

Il est important de signaler que dans la nature ces types d'impacts peuvent se succéder en fonction des caractéristiques irrégulières des vagues du large (hauteur et périodes qui varient dans le temps) et de leurs interactions avec la bathymétrie locale. De plus, on peut se retrouver dans une situation intermédiaire par rapport aux 3 types d'impacts décrits.

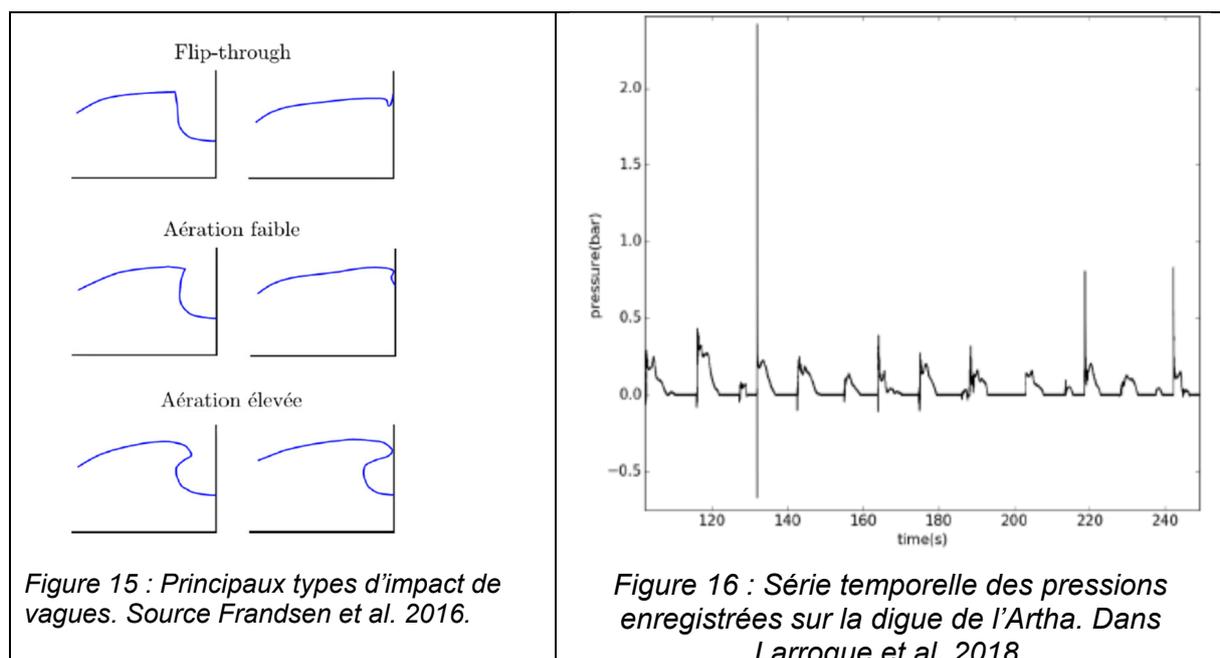


Figure 15 : Principaux types d'impact de vagues. Source Frandsen et al. 2016.

Figure 16 : Série temporelle des pressions enregistrées sur la digue de l'Artha. Dans Larroque et al. 2018.

Ainsi dans la Figure 16 montre un exemple de l'hétérogénéité des impacts (cycles de montée/descente de pression) d'une durée inférieure à 10 s avec des pics maximaux pouvant dépasser les 0.5 bar (50 kPa) sur un temps très faible (largement inférieure à la seconde). En regardant en détail un cycle « type » de montée/descente de pression lors de l'impact des vagues, on peut distinguer 2 phases principales qui se succèdent correspondant à (Figure 17) :

- une phase à la pression maximale (ici « $P_{w,max}$ ») de très courte durée (quelques ms) contrôlée principalement par l'accélération du fluide (pression non-hydrostatique). Il est important de noter qu'il peut y avoir également des pressions négatives très fortes (voir Figure 16). Cela est dû à une phase de décélération brutale du fluide ;
- et une phase à la pression « quasi-hydrostatique » d'une durée plus longue (échelle de quelques secondes) dépendant essentiellement de la hauteur et de la masse volumique de l'eau et de l'accélération terrestre. Cette phase est caractérisée par des valeurs de pression bien plus faibles.

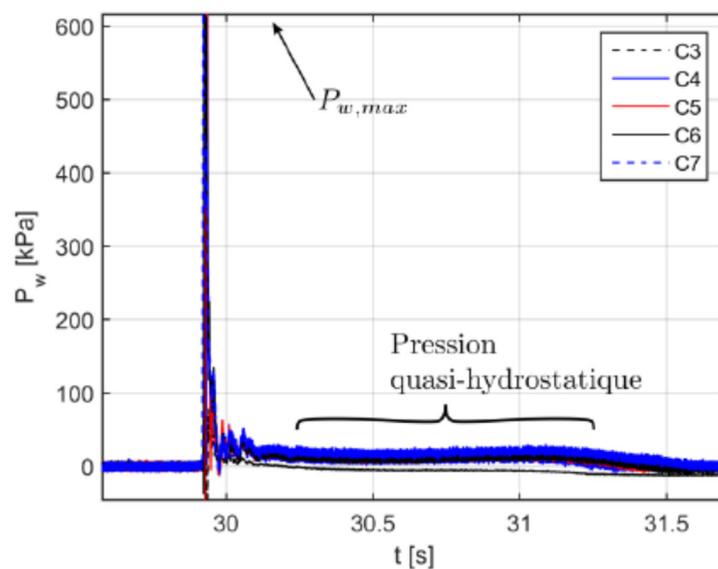


Figure 17 : Evolution de la pression lors d'un impact.

Il existe un grand nombre d'expériences en laboratoire mesurant l'impact des vagues sur des parois (quasi) verticales. Celles-ci mettent en œuvre la mesure des conditions de vagues depuis la zone de génération jusqu'à la proximité du mur ainsi que la mesure des pressions et des courants sur plusieurs hauteurs du mur. Etant donné la période et la valeur des pressions maximales (non-hydrostatiques) attendues, il est nécessaire de faire appel à des capteurs de pression supportant de fortes pressions et pouvant être échantillonnés à plusieurs kHz. Ce dernier point est également valable pour les centrales d'acquisition qui doivent veiller également à disposer de la mémoire nécessaire pour le stockage et à pouvoir synchroniser plusieurs capteurs en même temps. Bien que nombreuses, ces mesures sont peu représentatives des valeurs de pression attendues en nature notamment à cause de la :

- configuration des installations : prise en compte de vagues régulières uniquement, bathymétrie simplifiée, fond fixe, etc...
- gamme des valeurs de hauteurs et de périodes de vagues testées très faibles avec pour conséquence la mesure de valeurs de pression maximales limitées à quelques kPa. A noter que l'application des lois de passage à l'échelle s'avère ici délicat car elles présentent beaucoup d'incertitudes. D'après Bredmose *et al.* (2015) par exemple, le facteur pour passer d'une pression mesurée à l'échelle $\frac{1}{2}$ à l'échelle 1 serait de 2 ou 4 si l'on utilise respectivement l'échelle de similitude de Froude ou la loi de Bagnold-Mitsuyasu.

Parmi ces expériences des impacts des vagues sur des murs verticaux en laboratoires, nous nous intéressons à celle conduite dans le bassin à houle du l'INRS-ETE à Québec (Frandsen et al. 2016, Figure 18) car elle se rapproche des mesures en nature (falaises côtières) : échelle 1/2, bassin à houle de 111,5 m de long, section de 5 x 5 m, tests avec des vagues régulières et irrégulières (hauteur significatives, H_s variant de 0,9 à 1,5 m ; période pic, T_p variant de 4 à 8 s), plage inclinée (pente de 1 :10) couverte de galets et graviers, tests pour les 3 types d'impact.

Les mesures réalisées indiquent que les pressions maximales peuvent atteindre ~ 3,3 MPa pour des conditions de hauteur d'eau de 3,8 m, T_p de 6 s et de H_s de ~ 1,25 m. Ce sont les impacts flip-through et à aération faible qui donnent les pressions les plus fortes. Enfin les auteurs indiquent que le passage à l'échelle 1 conduiraient à des pressions maximales de ~ 14 MPa.

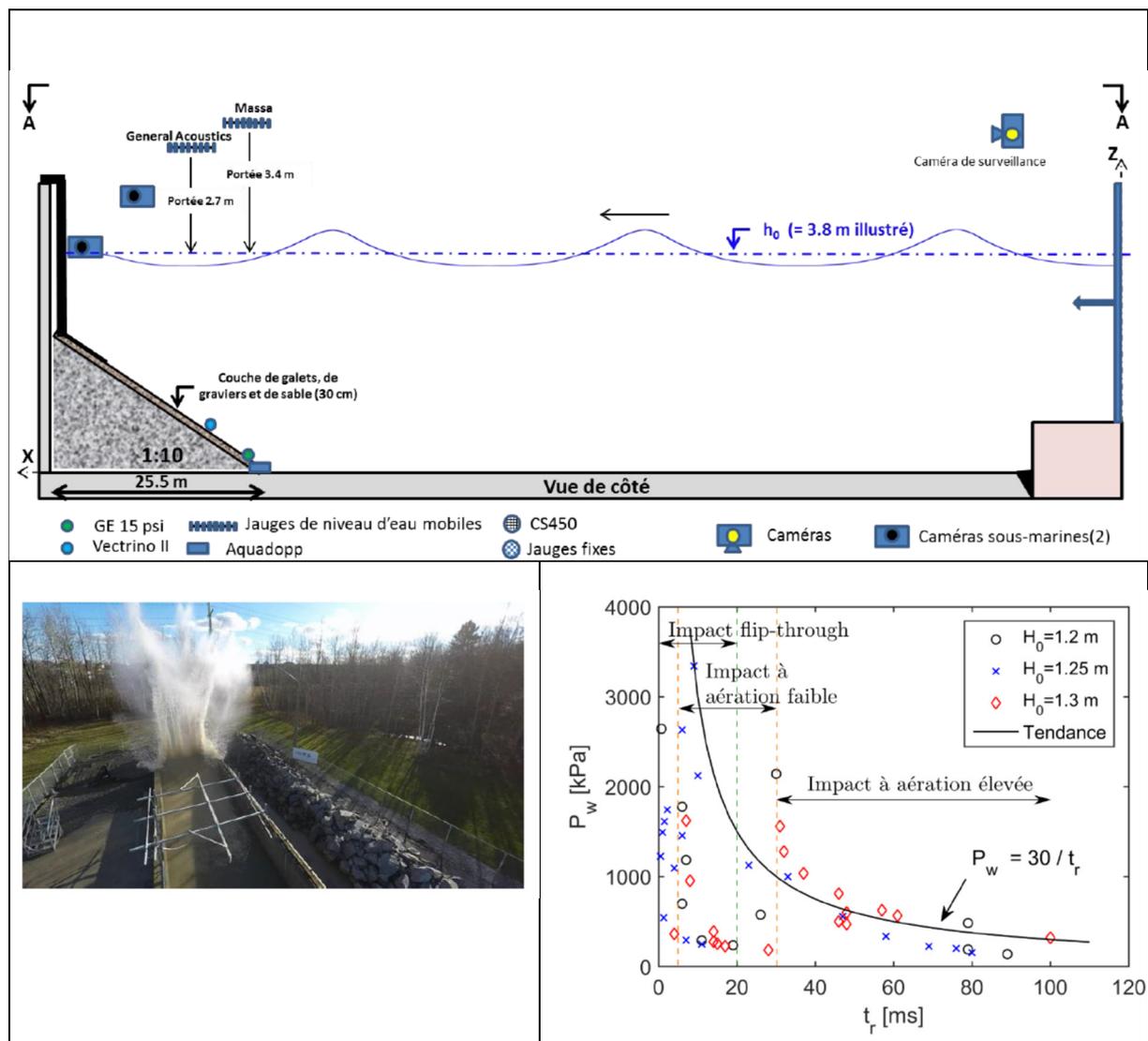


Figure 18 : Mesure des impacts des vagues sur un mur vertical : bassin à houle du l'INRS-ETE à Québec. En haut : configuration des expériences. En bas à gauche : exemple d'impact d'une vague sur le mur. En bas à droite : mesure de la pression en fonction de la durée du pic et du type d'impact. Dans Frandsen et al. 2016.

Les mesures en nature de la pression des vagues sur des parois (sub)verticales sont rares du fait des difficultés de leur mise en œuvre. A notre connaissance il n'en existe pas sur des falaises. Ce qui pourrait se rapprocher le plus concerne des mesures sur des ouvrages d'arts

côtiers comme celles effectuées sur le brise-lames de l'Artha sur des profondeurs de 10 à 15 m à l'entrée de la baie de Saint-Jean de Luz (Larroque et al. 2018 voir Figure 19). Celles-ci ont été conduites entre novembre 2015 et avril 2016. Pendant cette période, l'houlographe situé au large a mesuré des Hs et des Tp variant respectivement de 1,8 à 7,6 m et de 10 à 18 s. Les valeurs maximales de pression mesurées au niveau du brise-lames (Figure 19) se rapprochent de 2,5 bar (250 kPa) et correspondent à des conditions de marée haute, une incidence frontale des vagues, des Hs de 5,5 m et Tp de 13,8 s.

Ces valeurs mesurées sont faibles par rapport à ce que donneraient des formules empiriques (Larroque et al. 2018) voire par rapport à ce qui a été mesuré en laboratoire à l'échelle 1/2. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- situation des capteurs de pression : en bout du brise-lames (où les vagues sont moins fortes) et protégés par des enrochements visant à dissiper l'énergie des vagues ;
- faible nombre de capteurs : les pics de pressions pouvant se situer à d'autres endroits de la digue ;
- caractéristiques des capteurs de pression : ils ont un échantillonnage « naturel » de 1 kHz (1 ms) ce qui est faible pour mesurer les pics maximaux pour des impacts flip-through (voir Figure 18 en bas à droite). De plus, la valeur maximale de pression qu'ils peuvent mesurer est de 10 bar (1 MPa) valeur très faible par rapport aux mesures en laboratoire décrites ci-dessus.

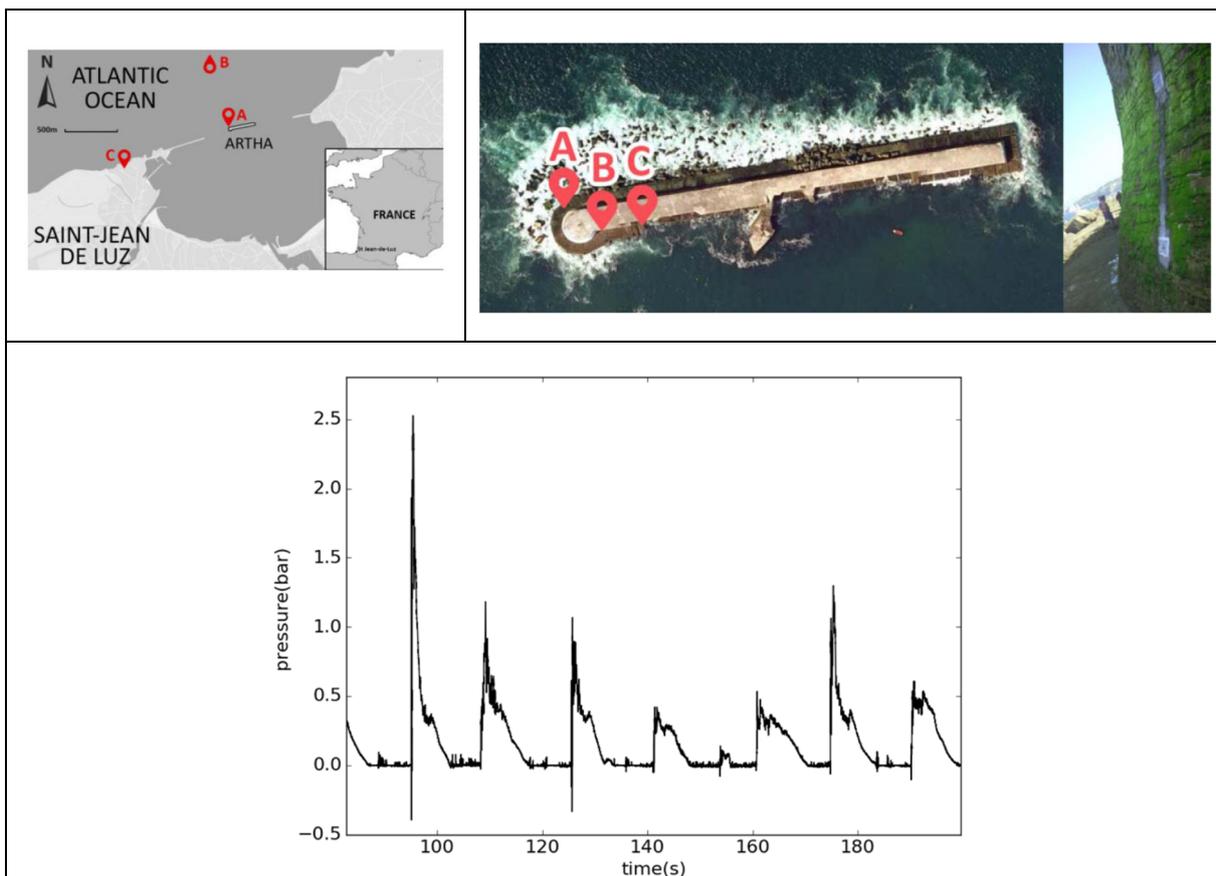


Figure 19 : Mesures des pressions de vagues sur le brise-lames de l'Artha à Saint-Jean de Luz. En haut à gauche situation géographique : A brise-lames ; B : houlographe. En haut à droite : enregistrements de la pression 2 hauteurs différentes du brise-lames au niveau du point A. En bas : pic de pression maximal mesuré. Dans Larroque et al. 2018.

5.2 METHODE DE CALCUL DES PRESSIONS EXERCEES PAR LES VAGUES

Ci-après nous décrivons les différentes méthodes de calcul des pressions exercées par les vagues lors de leurs impacts sur des structures (sub)verticales ainsi que les données nécessaires à la simulation numérique.

5.2.1 Modélisation numérique et formules empiriques

Lorsqu'on ne dispose pas de mesures de pression de vagues, celles-ci peuvent être calculées grâce à des formules empiriques ou bien par modélisation numérique.

5.2.1.1 Formules empiriques

Les formules empiriques existantes concernent essentiellement des ouvrages de protection possédant un mur vertical (brise-lames par exemple). Elles se présentent généralement sous la forme :

$$P_{max} = A\rho_{eau}gH \quad \text{avec :}$$

P_{max} : pression maximale en Pa.

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau en kg.m^{-3} .

g : accélération terrestre en m.s^{-2} .

H : hauteur des vagues en m. Selon les auteurs, cette valeur peut correspondre à H_s au large, H_s au déferlement ou bien H_s à une certaine distance de la paroi.

A : varie d'un auteur à l'autre. Pour Goda 2010 ce terme peut faire intervenir une correction de l'angle d'incidence des vagues, des coefficients de forme dédiés aux brise-lames, ainsi qu'un coefficient prenant en compte du déferlement des vagues suivant une correction de Takahashi et al. 1994. Ces termes sont difficilement transposables à des études concernant les falaises. C'est pourquoi nous privilégierions ici les auteurs ayant calculé la valeur de A grâce à des mesures en laboratoire. Ainsi Kisacik et al. 2010 fixent empiriquement A à 82.

De ce fait la formule précédente, valable pour les murs verticaux, devient :

$$P_{\text{max_Kisacik}} = 82\rho_{eau}gH \quad (\text{Kisacik et al. 2010})$$

Il y a également des formules capables de tenir compte de la pente des murs comme celle proposée par Stanczak 2009 :

$$P_{\text{max_Stanczak}} = K\rho_{eau}gH \tan(\alpha) \quad \text{avec :}$$

α : pente du mur en radians.

K : terme dépendant à la cambrure des vagues. Pour les pressions maximales (à 99.9%) K est égal à :

$$K = 2.5\left(-289\frac{H}{gT^2} + 11.2\right) \quad \text{avec } T : \text{période des vagues en s}$$

La formule de Stanczak 2009 s'exprime alors comme suit :

$$P_{\max_Stanczak} = 2.5(-289 \frac{H}{gT^2} + 11.2)\rho_{eau}gH \tan(\alpha)$$

Ces 2 formules sont facilement applicables en nature puisqu'elles ne dépendent que des caractéristiques des vagues (hauteur, voire période) et des grandeurs physiques connues comme la masse volumique de l'eau et l'accélération terrestre.

La formule de Kisacik et al. 2010 est majorante car elle fait l'hypothèse d'une « falaise » verticale. Celle de Stanczak 2009 est a priori valable pour différentes pentes. A noter toutefois que pour des valeurs proches de la verticale (90°), cette formule tend vers l'infini (tan(pi/2) égal infini).

Enfin, les valeurs de pression maximale obtenues avec ces formules se situent à l'intersection du mur avec le niveau d'eau au repos.

5.2.1.2 Modélisation numérique avec SWASH

Théoriquement il est possible de simuler les pressions exercées par les différents types d'impact de vagues sur des parois (sub)verticales à l'aide de modèles résolvant les équations 3D de Navier-Stokes diphasiques (prise en compte des interactions air-eau). Dans la pratique, ce type de modèle est réservé à des cas académiques voire des expériences en laboratoire (Fullerton et al. 2010) car leur mise en œuvre est complexe et les temps de calcul extrêmement long pour des applications en nature. C'est pourquoi ce sont souvent des modèles simplifiés qui sont utilisés comme ceux résolvant les équations RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes). Ici on considère que les vitesses sont homogènes sur l'horizontale et qu'elles varient uniquement sur la verticale. Ce sont donc des modèles 2DV (profils avec plusieurs couches sur la verticale) qui peuvent être utilisés en diphasique air-eau. Ils sont souvent utilisés afin de reproduire les observations en laboratoire des impacts de vagues (voir par exemple Gao et al. 2015), c'est-à-dire dans des conditions de forçage (vagues) et topo-bathymétriques simplifiées. Leur application en nature reste toujours limitée, entre autres, par des temps de calcul très long (Suzuki et al. 2017).

Enfin, des modèles résolvant les équations des écoulements non-hydrostatiques (équations de Boussinesq par exemple) permettent de modéliser la propagation des vagues, leur déferlement, les courants induits, les interactions vagues-vagues (ondes incidentes/ondes réfléchies par exemple) et vagues-courants ainsi que la submersion marine (dont le franchissement par paquets de mer) avec des temps de calcul bien plus courts que les modèles RANS. Parmi ce type de modèle de vague (dit instationnaire à résolution de phase ou vague-à-vague), il y a SWASH-NH (Non-Hydrostatique, Zijlema et al. 2011) qui est largement utilisé par la communauté internationale et qui a pu être validé en nature dans des environnements particulièrement complexes aussi bien pour le calcul des ondes infragravitaires (Pedreros et al. 2020) que pour le calcul de la submersion marine par franchissements de paquets de mer (Idier et al. 2020).

Bien que SWASH-NH ait déjà été utilisé pour calculer les pressions exercées par les impacts des vagues sur des digues en laboratoire (Vanneste et al. 2014), son application en nature pour des falaises demeure un défi. Rappelons que pour capturer les pressions maximales, il est nécessaire d'échantillonner et stocker le signal à plusieurs kHz et d'utiliser des tailles de mailles décimétrique compte tenu des pentes des falaises. Or, lorsque ces modèles vague-à-vague sont implantés en nature le pas de temps ne dépasse pas les 50 Hz, le stockage se fait à la seconde et les tailles de mailles sont métriques.

Compte-tenu de ces contraintes, la configuration de SWASH-NH retenue pour cette étude est la suivante :

- utilisation des profils 1D (utilisation d'une couche sur la verticale). La mise en place de la 2DH n'est pas possible compte-tenu des temps de calcul et des capacités du modèle à stocker les données. Utilisation d'une taille de maille de 10 cm (espacement régulier) qui est échantillonné à 5 cm par le modèle ;
- pas de temps de calcul 5kHz ;
- durée de la simulation de 30 min : des séries de vagues irrégulières (construites à partir d'un spectre de Jonswap selon une procédure interne du code) sont injectées sur la frontière marine du profil dans un domaine initialement au repos. On laisse se propager les vagues jusqu'au rivage sur une durée de 5 min (phase d'initialisation) pour ensuite exploiter les calculs sur les 25 min restantes (cela représente plus de 100 vagues). Du côté de la falaise, des conditions « sec/mouillé » sont imposées de façon à tenir compte du va-et-vient des vagues sur celle-ci ;
- utilisation d'un frottement spatialisé avec des coefficients de Manning de $0.02 \text{ sm}^{-1/3}$ au large (zone immergées) et de $0.01 \text{ sm}^{-1/3}$ pour les zones émergées par temps calme ;
- stockage des paramètres instantanés (vitesse, niveau d'eau, pression totale (hydrostatique et non-hydrostatique) tous les 10 cm : à 1 Hz sur l'ensemble du profil et à 2kHz uniquement pour les mailles situées entre le pied de la falaise et l'altitude maximale atteinte par les vagues (runup) ;
- stockage des paramètres intégrés sur la durée du calcul tous les 10 cm : Hs, setup (surcote liée au déferlement des vagues)

Parmi les limites de SWASH-NH (ainsi que des autres modèles instationnaires à résolution de phase), il faut noter ;

- qu'il se limite à la modélisation de la surface libre de l'eau sans tenir compte donc de la présence de l'air. De ce fait, seuls les impacts de vagues de type flip-through peuvent être simulés. Toutefois, comme l'indique la Figure 18, c'est ce type d'impact qui génère les pressions parmi les plus fortes ;
- la transition encoche/surplomb des falaises ne peut pas être représentée correctement dans le modèle puisqu'on ne peut associer à chacun des points du profil qu'une seule altitude.

Dans cette étude, nous ne disposons pas des données nécessaires pour valider le modèle ni sur la phase de propagation des vagues ni sur les interactions avec la falaise (niveaux d'eau, vitesse des courants, pressions liées aux impacts des vagues, ...). C'est donc un projet exploratoire visant à évaluer qualitativement ce type de modélisation et à identifier les paramètres à extraire utiles à une meilleure compréhension du rôle des vagues dans l'érosion des falaises.

5.2.1.3 Définition des profils de calcul et conditions de forçage

Une étape préalable à la définition des profils a été la construction d'un MNT de la zone à partir de la fusion des données Litto3D à 1 m de résolution et des levés topographiques du drone restitués à une résolution de 0,10 m. Pour cela, le Litto3D - 1 m a été rééchantillonné à 0,10 m de façon à conserver la résolution native restituée par le drone sur la falaise et la plate-forme rocheuse (cf Figure 20).

Par la suite 6 profils ont été extraits pour les besoins de la modélisation numérique. Ces profils, perpendiculaires au rivage, s'étendent au large jusqu'à une profondeur de ~35 m/IGN78 et jusqu'au sommet des falaises à terre. Le Tableau 3 indique des conditions assez homogènes au large des vagues (Hs, période et incidence) et des niveaux d'eau à cette profondeur. La modélisation des vagues selon des profils implique une incidence nulle entre ceux-ci et la

direction de propagation des vagues. Ce n'est pas le cas ici car l'incidence des vagues du sud-ouest (~N225° à 35 m/IGN78 de profondeur) est plus ou moins oblique en fonction du profil considéré (voir Figure 20). Il faut donc appliquer une correction tenant compte de la réfraction et du gonflement (shoaling) des vagues pour ramener cette incidence à des valeurs proches de zéro. Cela a pour conséquence de diminuer les Hs en entrée des profils (cf. Tableau 3).

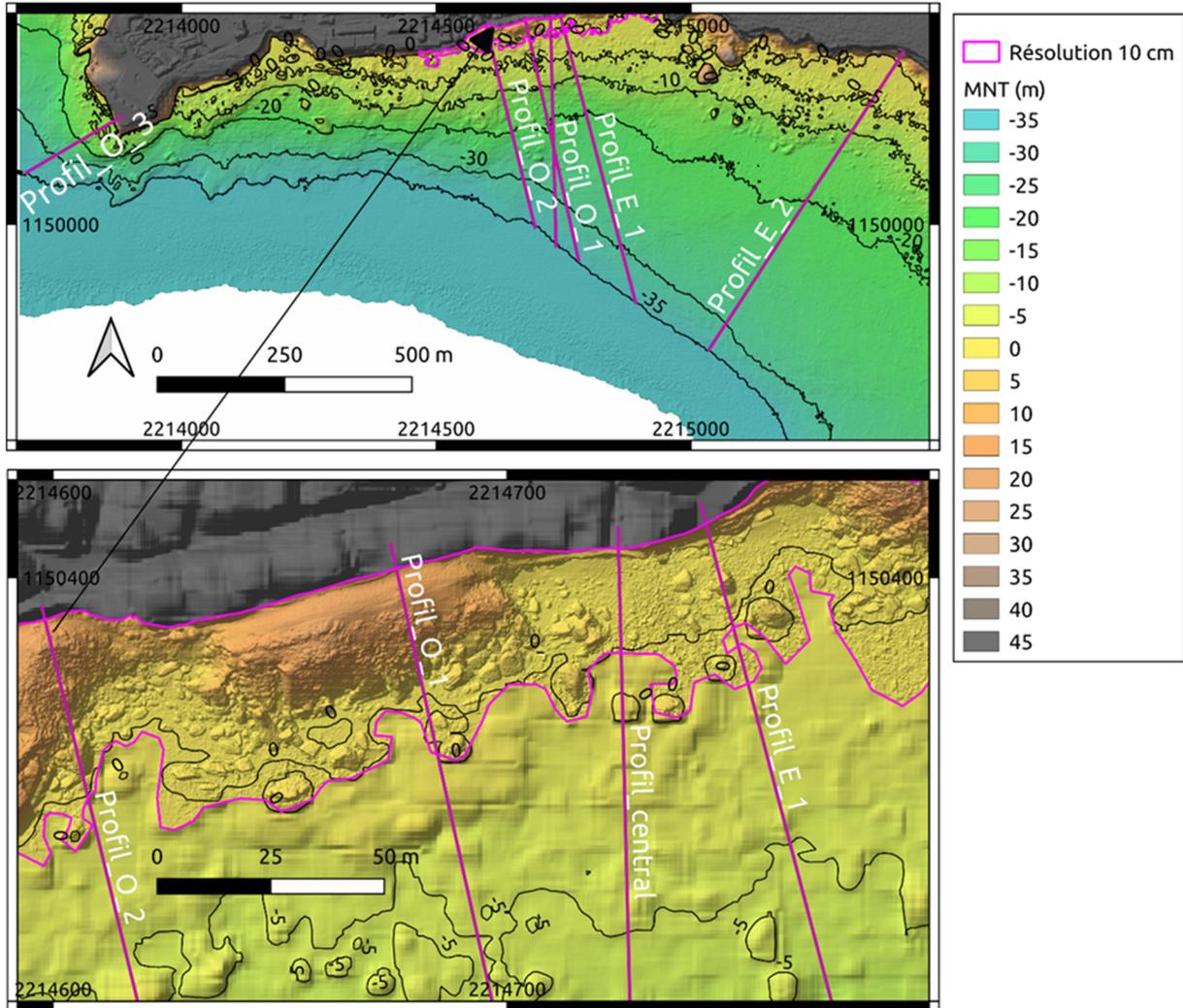


Figure 20 : MNT de 0.10 m de résolution généré à partir de la fusion du Litto3D et du lever drone (emprise signalée par le polygone pourpre). Les traits rouges correspondent au profils de calcul. Coordonnées CC42 (m) et altitude exprimée en m par rapport à l'IGN78.

Nom Profil	Hs au large (m)	Hs corrigé (m)	Tp(s)	NM-large(m/IGN78)	Pente falaise (deg)
Profil_E_2	7.05	6.89	13	0.82	61
Profil_E_1	7.13	4.52	13	0.82	67
Profil_central	7.2	6.31	13	0.82	74
Profil_O_1	7.2	5.66	13	0.82	63
Profil_O_2	7.1	5.49	13	0.82	26.5
Profil_O_3	7.77	7.69	13	0.82	88

Tableau 3 : Conditions des forçage et pentes des falaises pour les différents profils.

Les profils (cf. Figure 20) ont été positionnés de façon à tenir compte des différentes morphologies falaise/plate-forme rencontrées dans la zone. D'est en ouest on retrouve le :

- Profil_E_2 : avec une plate-forme régulière et le pied de la falaise à fleur d'eau ;
- Profil_E_1 : avec une plate-forme d'accumulation plus haute (~0 m/IGN78) caractérisée par la présence d'un bloc de plusieurs mètres de hauteur et qui se prolonge jusqu'au pied de falaise ;
- Profil_central : cette fois-ci la plate-forme d'accumulation est plus large. On retrouve en bordure de celle-ci un bloc dépassant à peine les 0 m/IGN78 ainsi qu'éboulis relativement de faible taille en pied de falaise ;
- Profil_O_1 : il se distingue du précédent profil par la présence d'un éboulis très massif en pied de falaise ;
- Profil_O_2 : là encore il y a la présence d'un éboulis en pied de falaise. Cette fois-ci sa forme est plus irrégulière ;
- Profil_O_3 : il se distingue de tous les autres par la présence d'une plate-forme vers ~15 m/IGN78 de profondeur si bien que le pied de falaise se situe vers 10-11 m/IGN78 de profondeur.

Enfin, nous avons relevé la pente moyenne de la falaise à proximité du niveau d'eau au repos centennal (vers 0,82 m/IGN78⁹ pour ce secteur) des différents profils afin de pouvoir appliquer la formule de Stanczak 2009. Les valeurs de ces pentes sont indiquées dans le Tableau 3.

Les profils central, O_1 et E_1 sont les plus proches de la zone d'étude (citadelle de Bonifacio, et plus particulièrement la zone de surplomb à l'ouest de la plage de Sutta Rocca).

⁹ Comprenant la majoration de 0,45 m liée à la marge de sécurité et à la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour la situation « actuelle » (prise en compte du changement climatique et des incertitudes (MEDDE, 2014))

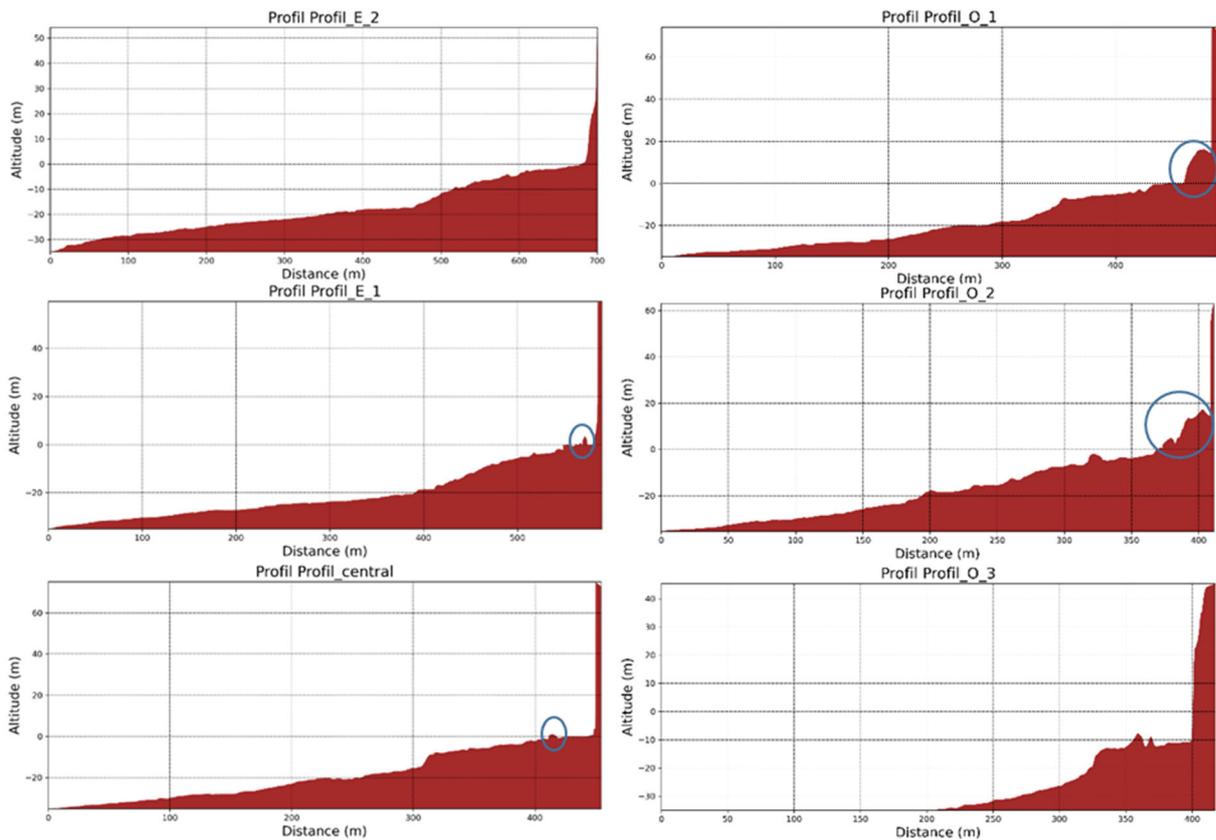


Figure 21 : Caractéristiques morphologiques des profils de calcul. Altitudes exprimées par rapport à l'IGN78.

5.3 RESULTATS

5.3.1 Modélisation numérique

Dans un premier temps nous avons exploité les données instantanées de niveau d'eau et de vitesse extraites sur chacun des points des 6 profils à 1 Hz afin de vérifier la capacité du modèle à propager les vagues sur des morphologies complexes. La Figure 22 montre, par exemple, que les interactions entre les vagues incidentes et celles réfléchies par la falaise sont bien reproduites même en présence d'un relief sous-marin à très forte pente. Ce bon comportement concerne également la phase de l'impact de la vague sur la falaise (Figure 23).

Aucune oscillation numérique (valeur aberrante) n'a été constatée sur la durée de la simulation aussi bien pour les vitesses que pour les niveaux d'eau sur l'ensemble du domaine (y compris au niveau de la falaise) et cela pour les 6 profils.

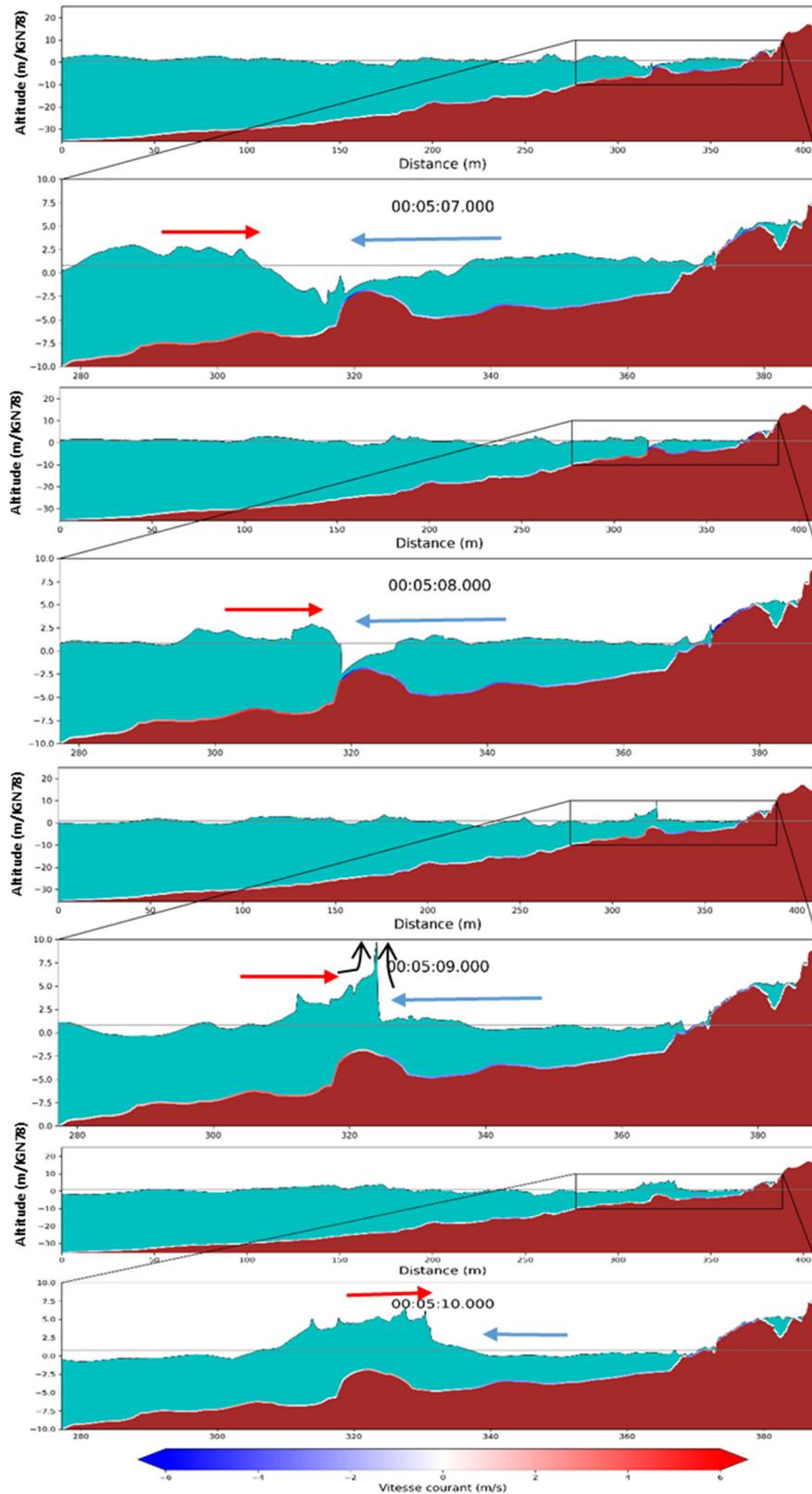


Figure 22 : Instantanées de la ligne d'eau et des vitesses (profil entier et zoom) de la simulation sur le Profil_O_2 illustrant les interactions entre les vagues incidentes et réfléchies par la falaise.

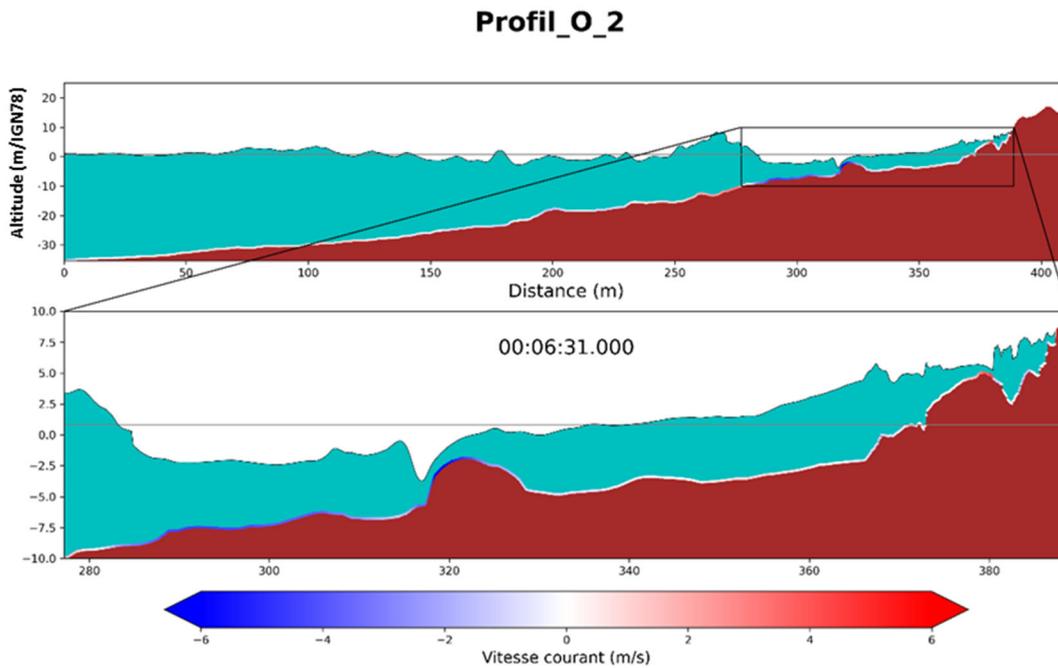


Figure 23 : Instantannée de la ligne d'eau et des vitesses (profil entier et zoom) de la simulation sur le Profil_O_2 montrant l'impact de la vague sur la falaise.

L'examen des résultats du Profil_E_1 (Figure 24) révèle la limite de l'utilisation de la modélisation sur certaines portions du littoral étudié. La présence du bloc pluri-métrique sur la plate-forme d'accumulation de ce profil génère un effet « cuvette » qui se remplit lentement par les vagues les plus fortes et qui empêche l'eau de repartir. Dans la réalité, les vagues incidentes contournent l'obstacle pour atteindre la falaise pour être réfléchies et repartir en sens inverse. Cet effet « cuvette » a pour effet d'augmenter artificiellement la hauteur d'eau en pied de falaise et de diminuer la pression exercée par les impacts des vagues sur celle-ci dans les simulations réalisées.

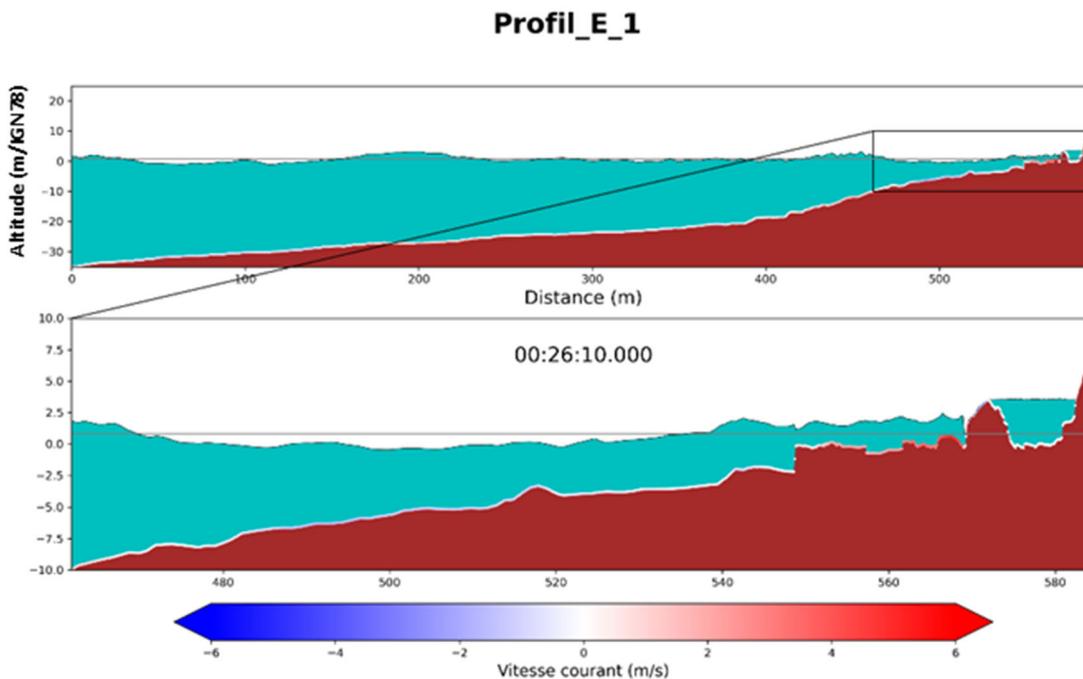


Figure 24 : Illustration des limites de la modélisation réalisée sur un profil.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux paramètres intégrés sur la durée de la simulation H_s et le setup. Là encore le comportement du modèle est capable de reproduire les différentes phases (voir Figure 25) de la propagation des vagues avec des H_s variant peu pour des profondeurs importantes, suivie par une phase de gonflement quand les interactions deviennent fortes avec le fond allant jusqu'à provoquer le déferlement (forte diminution importante des H_s) et le setup que s'en suit. Cela a été vérifié pour les autres profils. A noter qu'il peut y avoir plusieurs zones de gonflement/déferlement en fonction de la morphologie sous-marine.

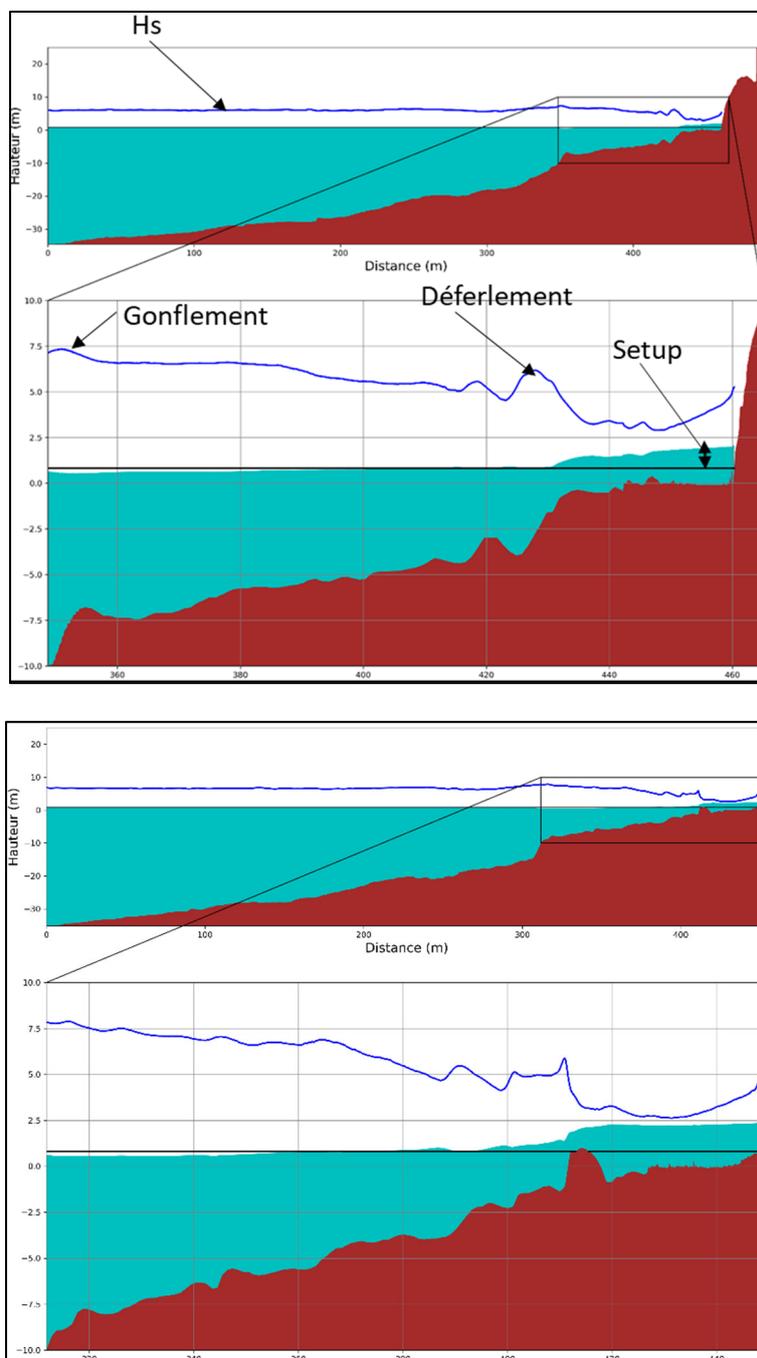


Figure 25 : Exemples de modélisation des différentes phases de la propagation des vagues et de la génération du setup sur le Profil_O_1 (en haut) et le Profil_central (en bas).

Enfin, nous avons analysé les sorties à 2 kHz des niveaux d'eau, des vitesses et des pressions sur la falaise. La Figure 26 montre que le modèle permet de reproduire l'évolution temporelle

des pressions sur la falaise liées aux impacts des vagues avec, dans ce cas précis (en pied de falaise du Profil_O_1) des valeurs maximales pouvant dépasser 1 MPa ainsi que des dépressions très importantes. Le zoom sur la durée d'un impact illustre bien la reproduction du pic maximal de pression non-hydrostatique de très courte durée suivi du palier de pression hydrostatique décrit dans le paragraphe 5.1. Cela permet de valider qualitativement les modélisations mises en place.

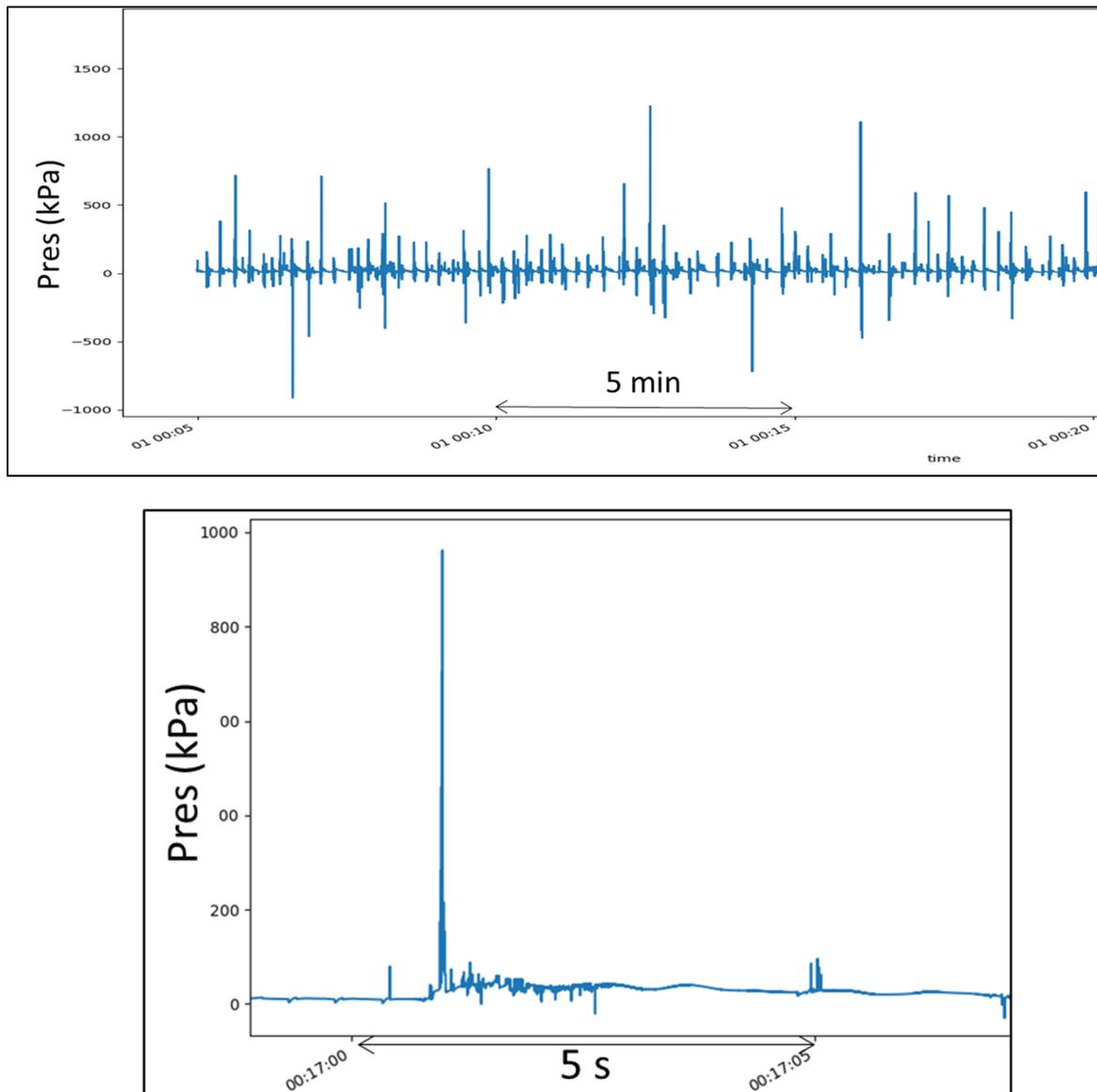


Figure 26 : Exemple de modélisation de la pression exercée par l'impact des vagues en pied de falaise du Profil_O_1. Haut : série temporelle de l'évolution des pressions. Bas : zoom sur un impact.

Le signal à 2 kHz, enregistré au niveau de chacun des points des falaises des différents profils, a été post-traité de façon à isoler chacun des impacts des vagues et à établir des statistiques rassemblées dans des fichiers Shape (1 fichier par profil). Ainsi, comme le montre la Figure 27, les informations pour chacun des points concernent :

- La hauteur et le niveau d'eau maximaux ;
- La durée en eau du point ramenée à 1 heure ;
- Le nombre d'impacts des vagues ramené à 1 heure (cycles_h) ;

- La durée des impacts (maximale, moyenne et l'écart-type). Les temps de début et de fin des impacts ont été déterminés grâce à des seuils fixés sur la vitesse ;
- Les pressions (maximale, moyenne, écart-type et la distribution des pressions à 25, 50 et 45 % ;
- Les vitesses des écoulements (maximale, moyenne et écart-type) ;
- L'histogramme des distributions des pressions maximales des impacts.

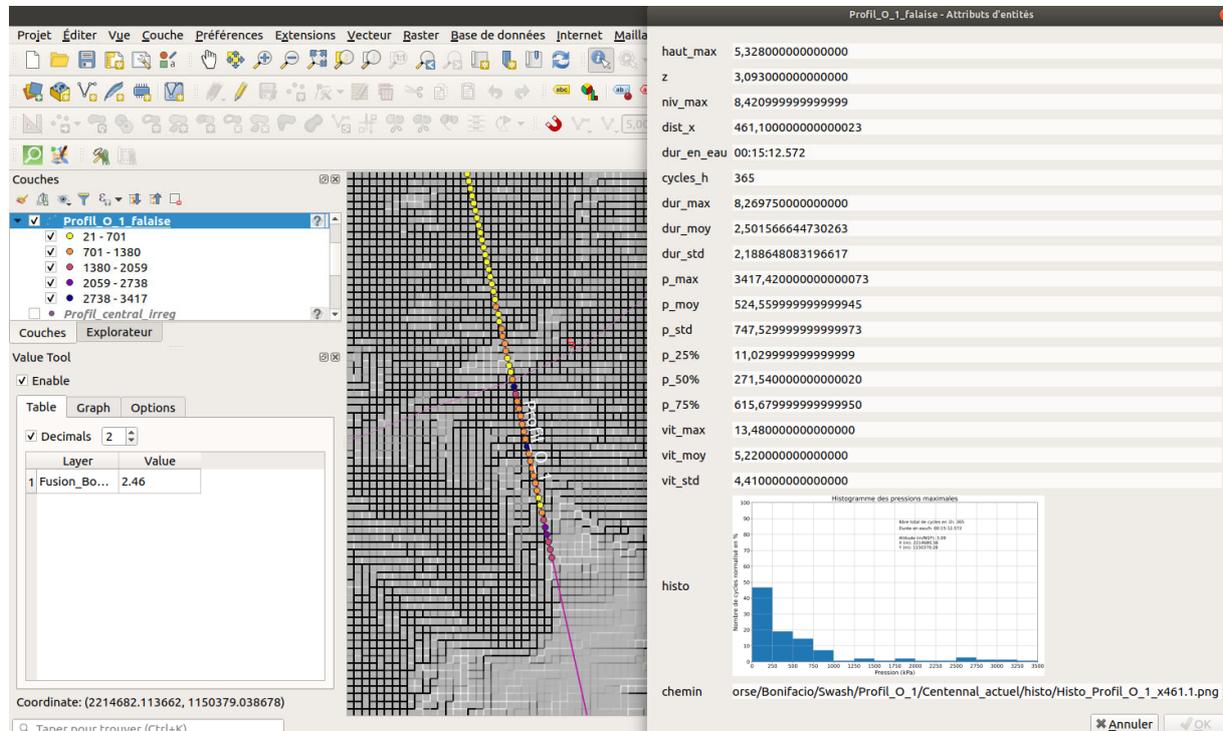


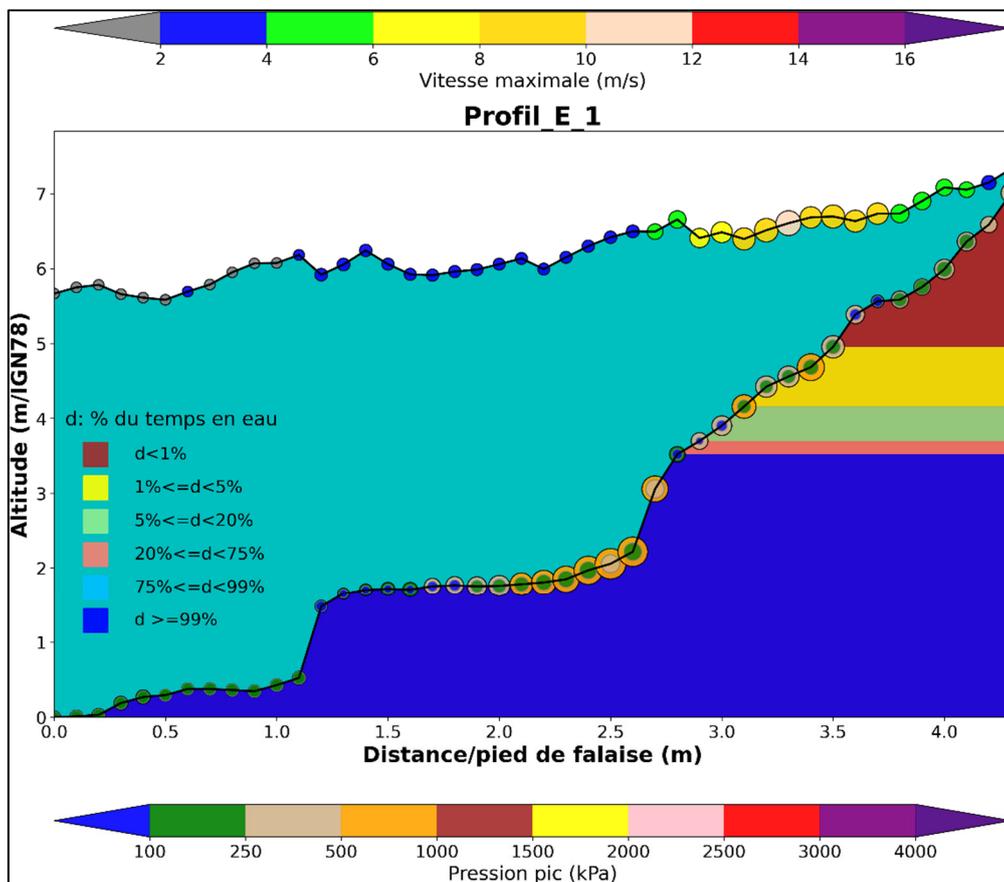
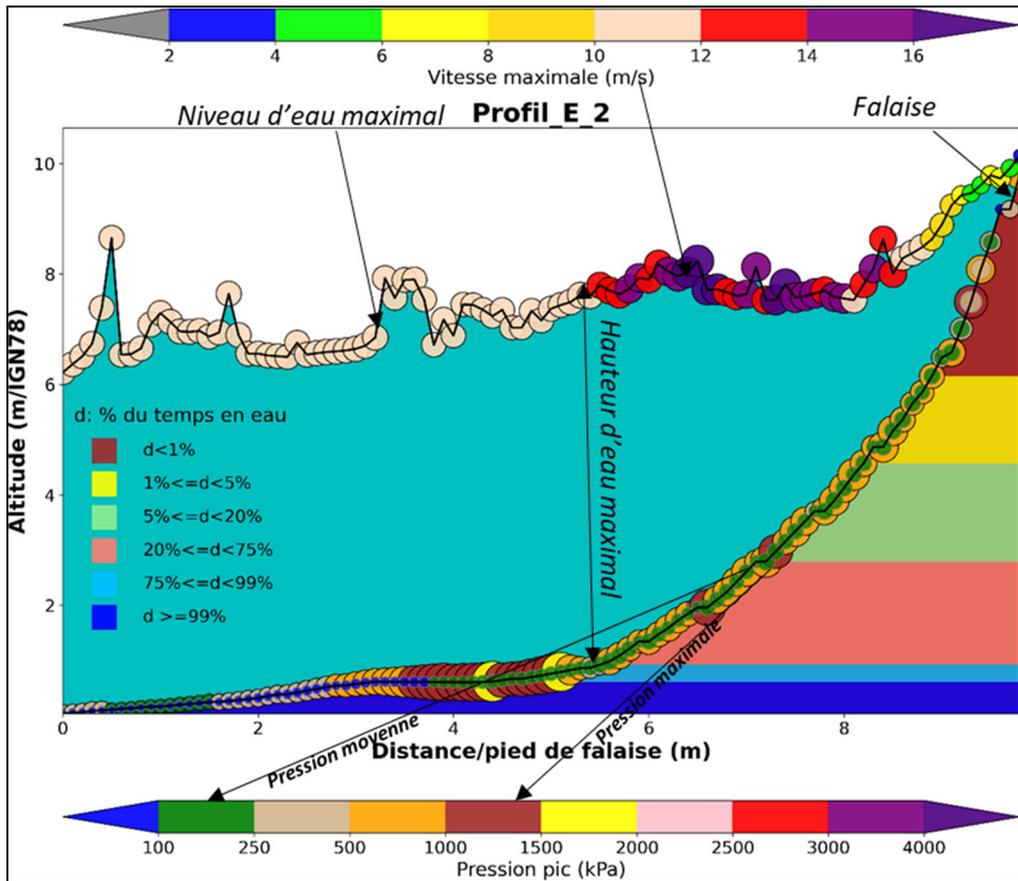
Figure 27 : Exemple de fichier Shape contenant les statistiques pour chacun des points de la falaise du Profil_O_1.

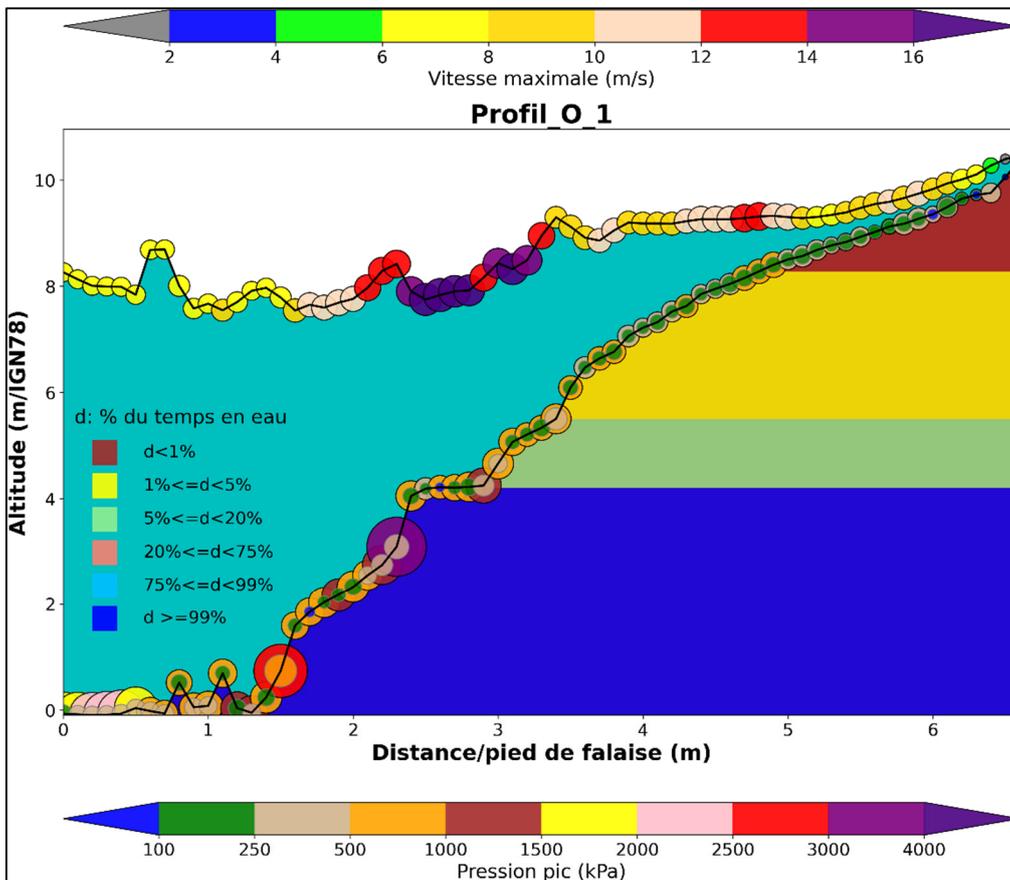
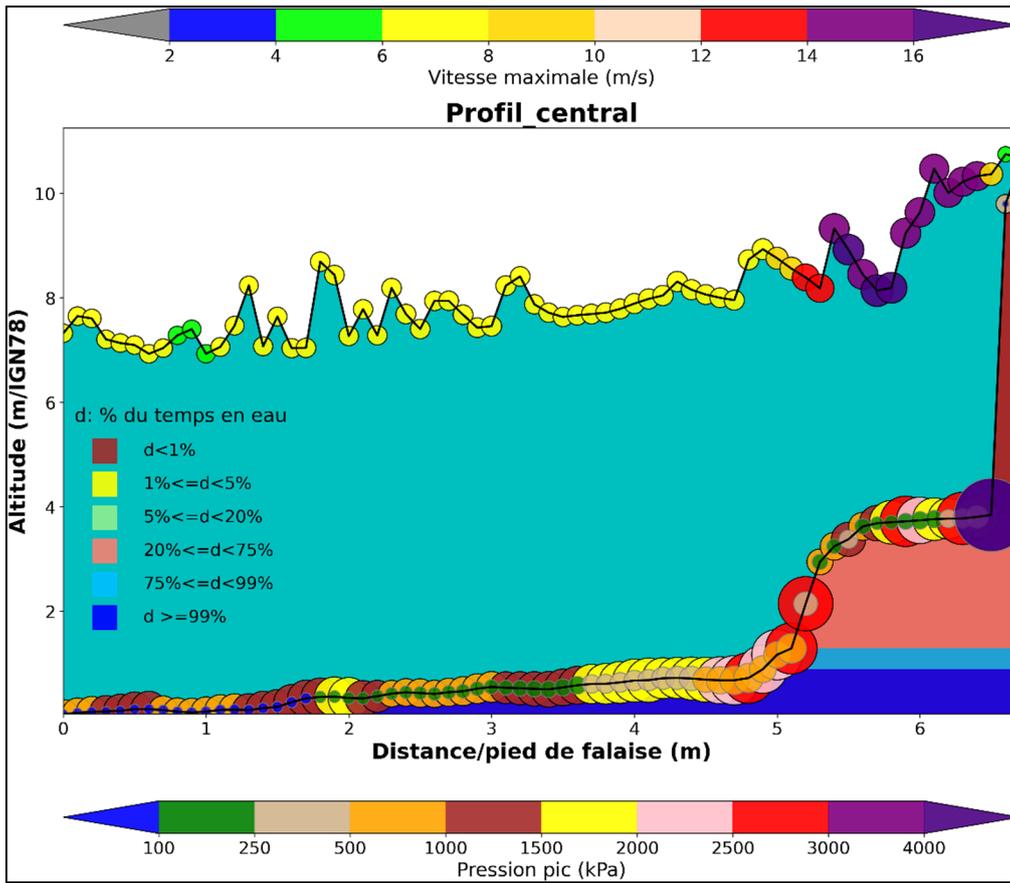
Une partie de ces informations a été synthétisée par profil et sont présentées Figure 28. On peut remarquer que :

- La distribution des pressions sur la verticale est complexe avec des valeurs maximales (dépassant souvent 1 MPa) à proximité du niveau moyen d'eau mais également sur des portions de la falaise ou de l'éboulis plus hautes caractérisées par des ruptures de pente importantes ;
- C'est dans le Profil_O_3 que l'on retrouve les pressions les plus importantes, les maximales dépassant régulièrement les 4 MPa. Les niveaux maximaux d'eau (runup) peuvent ici dépasser les 20 m/IGN78. Cela s'explique par 3 facteurs :
 - o l'orientation de la falaise avec une incidence des vagues quasi perpendiculaire (les valeurs de Hs au large et de Hs corrigé sont très proches, respectivement de 7,77 m et de 7,69 m, voir Tableau 3),
 - o la profondeur importante de la plate-forme et du pied de falaise si bien que la majorité des vagues déferle directement sur la falaise,
 - o une falaise quasi verticale (~88°);
- Comme on pouvait le prévoir les pressions du Profil_E_1 sont anormalement faibles (limite de la modélisation 1D pour ce type de profil présentant de gros bloc rocheux proche du rivage et intégré dans le modèle topo-bathymétrique utilisé) ;
- **Sur les profils caractérisés par la présence d'éboulis massifs répartis de manière homogène (Profil_O_1 et Profil_O_2), la totalité de l'énergie des vagues est dissipée par ceux-ci. La falaise est « naturellement » protégée avec des valeurs d'impacts nulles. A partir de ces simulations, les résultats pour ce type de profil tendent à**

montrer que l'impact des vagues sur l'érosion en pied de falaise est limité en présence d'éboulis ;

- Sur le Profil_central, l'éboulis de moindre taille (taille unitaire des blocs moindre, espacement plus important entre blocs) ne suffit pas à absorber toute l'énergie des vagues. Des impacts sont possibles sur le point de contact entre l'éboulis et la falaise (+ 4 m/IGN78) générant des pressions très importantes (supérieures à 4 MPa) ;
- Sur le Profil_E_2, les vagues sont bien dissipées au niveau de la plate-forme si bien que les distributions des pressions maximales et des pressions moyennes sont plus ou moins homogènes sur la falaise (maximum de l'ordre de 1,5 MPa vers + 7m/IGN78).





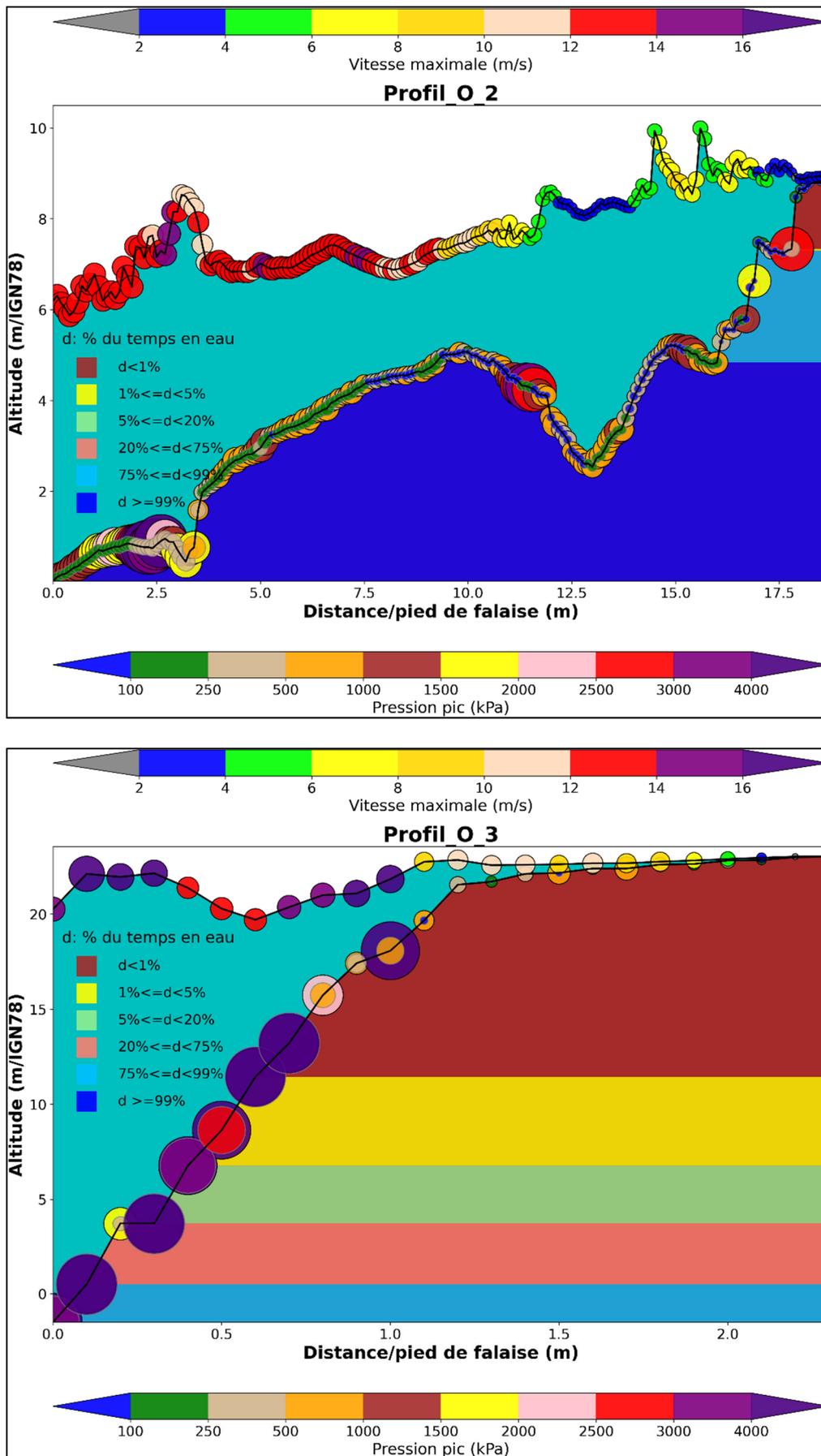


Figure 28 : Représentation des principaux résultats pour les différents profils de falaises.

5.3.2 Comparaison avec les formules empiriques

L'analyse des résultats de modélisation nous a montré que les processus liés à la propagation des vagues et à leur impact sur les falaises sont particulièrement complexes et s'éloignent beaucoup des conditions de laboratoire grâce auxquelles les formules empiriques ont été établis.

Nous les appliquons dans cette étude dans l'unique objectif d'avoir des ordres de grandeur des pressions maximales théoriques attendues. Dans les formules utilisées, il n'est pas précisé quelle est la valeur de Hs à prendre en compte : Hs au large ou Hs au déferlement. C'est pourquoi nous avons utilisé les 2 valeurs de Hs pour le calcul des pressions maximales.

Comme attendu, le Tableau 4 indique que c'est la formule « majorante » de Kisacik et al. 2010 qui donne les valeurs les plus fortes (hypothèse de mur vertical) avec des valeurs variant généralement entre 4.5 et 6 MPa à l'exception du Profil_O_3 (falaise quasi-verticale) où c'est la formule de Stanczak 2009 qui donne des valeurs particulièrement élevées (54 MPa à 88 MPa). Les valeurs modélisées à proximité de ~0.82 m/IGN78 sont du même ordre de grandeur (en écartant le Profil_E_1). Elles sont toutefois plus faibles car plus proches des conditions réelles.

Nom Profil	Hs au large (m)	Hs corrigé (m)	Hs Déferl. (m)	Tp(s)	Setup (m)	NM total (m/IGN78)	Runup (m/IGN78)	Pente falaise (deg)	Pmax Kisacik (Kpa)		Pmax Stanczak (kPa)		Pmax modélisée (kPa)	
									Hs corrigé	Hs Déf.	Hs corrigé	Hs Déf.(m)	Alt. ~ 0.82 m/IGN78	Max Falaise (Alt m/IGN78)
Profil_E_2	7.05	6.89	7.7	13	0.99	1.81	10.14	61	5 679.8	6 350.9	3 123.8	3 443.4	1 500.8	1 591.8 (0.62)
Profil_E_1	7.13	4.52	5.4	13	1.33	2.15	7.33	67	3 729.1	4 453.9	2 788.7	3 281.7	173.2	909.1 (2.05)
Profil_central	7.2	6.31	5.9	13	1.55	2.37	10.68	74	5 200.5	4 866.2	5 585.1	5 262.7	2 523.9	96 562.2 (3.85)
Profil_O_1	7.2	5.66	6.2	13	1.28	2.1	10.46	63	4 669.7	5 113.7	2 853.7	3 096.3	2 774.0	3 417.4 (3.09)
Profil_O_2	7.1	5.49	9.7	13	1.6	2.42	9.04	26.5	4 528.2	8 000.4	705.0	1 156.4	1 950.0	4 389.8 (0.77)
Profil_O_3	7.77	7.69	14.1	13	0.3	1.12	23.04	88	6 339.3	11 629.5	54 572.3	88 760.6	35 271.5	45 727.5 (3.69)

Tableau 4 : Comparaison des pressions maximales modélisées et calculées grâce à des formules empiriques.

6 Conclusions et perspectives

L'objectif principal de cette étude était de déterminer si les vagues avaient un rôle dans l'érosion des falaises de Bonifacio. Pour cela nous nous sommes intéressés à un évènement météo-marin de période de retour conjointe centennale vagues/niveaux d'eau/vent. Cet évènement a été propagé jusqu'aux falaises de Bonifacio à l'aide de la modélisation numérique afin de quantifier l'impact des vagues sur celles-ci (hauteur d'action des vagues et pressions sur la falaise).

La mise en œuvre d'une telle modélisation numérique est particulièrement exigeante car elle implique d'échantillonner et de stocker le signal à plusieurs kHz et d'utiliser des tailles de mailles décimétrique pour pouvoir capturer les pressions maximales causées par les impacts des vagues sur la falaise.

Les résultats obtenus sont très encourageants car ils donnent accès à des informations jusqu'à l'heure inconnues en nature du fait de l'absence de mesures in-situ telles que la distribution verticale de la pression, le nombre d'impact des vagues et leur durée en fonction de la hauteur de la falaise, etc. Ils mettent également en évidence le rôle de protection de la falaise joué par les éboulis contre les impacts des vagues.

Les résultats des simulations montrent également que les vagues exercent des pressions pouvant être très fortes (supérieures à 4 MPa), qui ont vraisemblablement un rôle important dans l'érosion des falaises de Bonifacio. Ces pressions maximales de plusieurs MPa induites par les impacts des vagues peuvent s'appliquer jusqu'à plusieurs mètres au-dessus du pied de falaise. Si la relation entre érosion et pression des vagues est encore à définir, les ordres de grandeurs de pression se rapprochent fortement des ordres de grandeur de résistance de la roche et du ciment carbonaté liant les grains.

Le modèle employé n'a pu être validé que qualitativement faute de données sur site. D'autre part, les limites des modélisations ont été mises en évidence sur des profils aux environnements aussi hétérogènes spatialement que ceux rencontrés à Bonifacio (présence de nombreux blocs sur la plate-forme, éboulis en pied de falaise, ...).

C'est pourquoi il serait souhaitable de poursuivre l'amélioration de la connaissance sur les mécanismes d'érosion en pied de falaise, par les actions suivantes :

- implanter dans la zone des capteurs afin de valider quantitativement la modélisation :
 - o au moins un capteur de pression en bordure de plate-forme pour valider la propagation des vagues ;
 - o une webcam tournée vers la falaise afin de valider l'action des vagues sur ce secteur (altitudes et vitesses atteintes par exemple) ;
 - o 1 capteur de pression à proximité du pied de falaise capable de mesurer les pressions maximales générées par l'impact des vagues ;
- implanter un modèle 2DH sur le secteur afin de tenir compte des variations morphologiques de cet environnement. Cela passe par l'utilisation d'un modèle à maillage non-structuré (raffinement du maillage uniquement où c'est nécessaire comme à proximité des falaises) et offrant des capacités HPC (Hautes Performance de Calcul) notamment en ce qui concerne la parallélisation (utilisation de plusieurs centaines à milliers de cœurs de calcul) et le traitement des entrées et des sorties des données. C'est ce que proposera le code UHAINA (Filippini et al. 2018) à l'horizon fin 2021, qui est le fruit d'une collaboration étroite entre l'INRIA (CARDAMOM), les UMR EPOC et IMB à Bordeaux et IMAG à Montpellier et à laquelle le BRGM participe activement depuis 2019 ;
- explorer l'impact de vagues moins fortes : annuelles et saisonnières par exemple.

7 Bibliographie

Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, & F. Collard (2010) - Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40(9):1917–1941.

Booij N., Ris R.C. and Holthuijsen L.H., (1999) – A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, **104**, C4, 7649-7666.

Bredmose, H., Bullock, G. N. et Hogg, A. J. (2015). Violent breaking wave impacts. part 3. effects of scale and aeration. *Journal of Fluid Mechanics* 765, 82–113.

Filippini Andrea Gilberto, Sébastien de Brye, Vincent Perrier, Fabien Marche, Mario Ricchiuto, et al. (2018). UHAINA : A parallel high performance unstructured near-shore wave model. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, May 2018, La Rochelle, France. pp.47-56.

Frandsen, J. B., O. Gauvin Tremblay et R. Xhardé, (2016). Modélisation de l'impact des vagues sur un mur vertical : une expérience à grande échelle réalisée en canal hydraulique. Rapport No R1672, INRS-ETE, Québec (Qc): xvii + 117 p.

Fullerton, A. M., Brucker, K.A., O'Shea, T.T., Dommermuth, D. G., Fu, T. C., and Brewton, S. (2010). A comparison of measured and predicted wave impact pressures from breaking and non-breaking waves, "Proceedings of the 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, California, USA, 2010.

Gao, F. & Ma, Zhihua & Zang, J. & Causon, D.M. & Mingham, C.G. & Qian, Ling. (2015). Simulation of breaking wave impact on a vertical wall with a compressible two-phase flow model. 2015. 679-683. ISOPE Conference.

Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. 3rd edition. S.1.: World Scientific.

Hawkes, P. J., Gouldby, B. P., Tawn, J. A., and Owen, M. W. (2002): The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design, *J. Hydraul. Res.*, 40, 241–251, 2002.

Heffernan, J. E. and Tawn, J. A. (2004) - A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion), *J. Roy. Stat. Soc. Ser. B*, 66, 497–546.

Idier, D.; Pedreros, R.; Rohmer, J.; Le Cozannet, G. (2020). The Effect of Stochasticity of Waves on Coastal Flood and Its Variations with Sea-level Rise. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, 8, 798.

Kisacik, D., Verleysen, P., Van Bogaert, P., & Troch, P. (2010). Comparative study on breaking wave forces on vertical walls with cantilever surfaces. In Proceedings of the 20th (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-2010 (pp. 888-894). (Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference; Vol. 3).

Larroque B., Arnould P., Luthon F., Poncet P-A., Rahali A., et al. (2018). In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater: preliminary results. *Journal of Coastal Research, Coastal Education and Research Foundation*, 2018, 85, pp.1 - 5. <10.2112/SI85-001.1>. <hal-01809649>

Lazure P. et Dumas F. (2008) - An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS), *Advances in Water Resources*, **31**, 233-250.

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. (2006) – Modelling the global ocean tides : modern insight from FES2004 *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.

Mugica J., Pedreros R., Louisor J., Rohmer J., Maspataud A., Laigre T. avec la collaboration de Nicolae Lerma A., Paris F. (2020) – Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines – Secteurs de Sant’Amanza (Bonifacio) à Zonza. Rapport final. BRGM/RP-68934-FR, 134 p., 76 fig., 3 tabl., 3 ann., 1 CD.

Mugica J., Pedreros R., Louisor J., Maspataud A., Koechler F. avec la collaboration de Nicolae Lerma A., Paris F. (2020) – Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines – Secteurs de Corse-du-sud. Rapport final. BRGM/RP-69376-FR.

Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., Elineau, S., Paris, F., Durand, P., Anselme, B., & Pedreros, R. (2018) - High-resolution marine flood modelling coupling overflow and overtopping processes: framing the hazard based on historical and statistical approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 207-229.

Pedreros, R.; Idier, D.; Le Roy, S.; David, A.; Schaeffer, D.; Durand, J., and Desmazes, F., (2020). Infragravity waves in a complex macro-tidal environment: High frequency hydrodynamic measurements and modelling. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95*, pp. 1235–1239. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Saha, S., et al. (2010) - The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 91, 1015-1057.

Shom (2017) - Ouvrage de marée. *References Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée.* Edition 2017. 120 p.

Stanczak, G., (2009). *Sea Dikes Breaching Initiated by Breaking Wave Impacts - Preliminary Computational Model.* TU Braunschweig report number: T06-09-04.

Stepanian A., Balouin Y., Belon R. et Bodéré G. (2011) – ROL – Etude complémentaire sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59046-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann

Suzuki, T.; Altomare, C.; Veale, W.; Verwaest, T.; Trouw, K.; Troch, P.; Zijlema, M. (2017). Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH. *Coast. Eng.* 2017, 122, 108–123.

Vanneste, D.F.A., Altomare, C., Suzuki, T., Troch, P., Verwaest, T., (2014). Comparison of numerical models for wave overtopping and impact on a sea wall. in: P.J. Lynett (Eds.), *Proc. 34th Int. Conf. on Coast. Engng., Seoul, Korea*, published by the Coastal Engineering Research Council, paper no. structures.5

Tabeaud M. (1995) – Les tempêtes sur les côtes méditerranéennes françaises. In : Annales de Géographie, 1995, t. 104, n°584 pp.389-401.

Takahashi, S., Tanimoto, K., and Simosako, K. (1994). A proposal of impulsive pressure coefficient for the design of composite breakwaters. Proc. Int. Conf. Hydro-Technical Engrg. for Port and Harbor Constr. (Hydro-Port 94), Yokosuka, Japan, 489-504.

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coast. Engng., 58, 992-1012.

Annexe 1

Réponse des opérateurs aux avis du Comité des experts n°10 et n°8, Février 2021 - Extrait relatif à l'avis n°10 sur le rapport du bloc 2C (version provisoire)

Réponse des opérateurs aux avis du Comité des experts n°10 et n°8

Note de synthèse des réponses aux commentaires

CEREMA
INERIS
BRGM

Février 2021

Réponse des opérateurs aux avis du Comité des experts n°10 et n°8

Note de synthèse des réponses aux commentaires

**CEREMA
INERIS
BRGM**

Février 2021

B. Vignerot & R. Pedreros (BRGM) C. Franck, & A. Thoraval (INERIS)

Vérification : A. Rey (BRGM) – le 05/02/2021

Référence : AP18BAS0017_2021-0026

Sommaire

1	REVUE DES COMMENTAIRES AVIS N°10.....	6
1.1	Chapitre 1 : Rappel succinct du contexte	6
1.2	Chapitre 2 : Contexte météo-marin général.....	6
1.3	Chapitre 3 : Données disponibles et données exploitées	6
1.4	Chapitre 4 : Caractéristiques des événements météo-marins centennaux	6
1.5	Chapitre 5 : Calcul de la pression des vagues.....	7
1.6	Conclusions et perspectives	8
1.7	Conclusion du Comité d'experts	8
2	REVUE DES COMMENTAIRES AVIS N°8.....	11

1 Revue des commentaires Avis n°10

Une revue séquentielle du document : Avis technique n°10 sur le rapport « Bloc 2C : Complément forçages océaniques Étude exploratoire de l'impact des vagues sur les falaises pour un évènement météo-marin centennal, Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio » faites le 11 Janvier 2021 est proposée dans les paragraphes suivants.

1.1 CHAPITRE 1 : RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE

Experts : Le rapport transmis ne traite que de la définition des évènements météorologiques maritimes extrêmes et de la caractérisation du régime de houle (items 2.13 et 2.14 de la figure 2). L'obtention de ces données est prolongée par une étude hydraulique pour simuler la rencontre des vagues avec la côte au voisinage de la falaise de Bonifacio.

Devant le manque d'éléments conclusifs issus de la photo interprétation de falaise et de comparaison de traits de cote, ce bloc d'étude a été approfondi dans la valorisation du régime de houle et notamment sur une étude de propagation des vagues en 2D (1DH) sur la falaise.

1.2 CHAPITRE 2 : CONTEXTE METEO-MARIN GENERAL

Experts : Figure 4 : Améliorer la lisibilité. Localiser Favone.

Ok, noté

1.3 CHAPITRE 3 : DONNEES DISPONIBLES ET DONNEES EXPLOITEES

Experts : On n'a pas de données de houle dans le sud de la Corse. D'où recours à des simulations et extrapolations. Pas de données sur le vent à Pertusato ??

En effet il n'y a pas d'observations de houle dans le sud de la Corse. Il faut cependant noter que la durée des séries temporelles enregistrées par les houlographes est généralement insuffisante pour effectuer des calculs de période de retour centennal. Lorsque ces séries existent, elles sont utilisées pour valider/corriger les bases de données de vagues pluri-décennales issues de la modélisation numérique.

Vent à Pertusato : une longue série temporelle des vents (direction/intensité) existe bien à Pertusato. Néanmoins cette station, de par sa position géographique (à terre et à une altitude ~116m), ne sont pas représentatifs des conditions de génération et de propagation des vagues.

Experts : Figure 10 : mettre une échelle.

OK noté

1.4 CHAPITRE 4 : CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS METEO-MARINS CENTENNAUX

Experts : Comment identifier la houle la plus dangereuse ? La répartition statistique des « houles ordinaires », sur un petit nombre d'années, peut-elle être extrapolée pour trouver des houles exceptionnelles, de retour centennal ?

La méthode déployée pour établir des événements de période de retour centennale est représentative de l'état de l'art. Cela passe, notamment, par l'utilisation de série de données

suffisamment longue (31 années continues) et sur une même fenêtre temporelle (1979-2009) pour les vagues, les niveaux d'eau et le vent.

Elle correspond à la méthode dite « rigoureuse » indiquée dans le guide méthodologique du Plan de Prévention des Risques Littoraux¹. Les principales étapes aboutissant aux valeurs centennales sont rappelées chapitre 3.2 et 4 du présent rapport. Pour le détail, on peut se référer au rapport de Mugica et al. 2020². Enfin sur un plan international, cette méthode est décrite dans Nicola- Lerma et al. 2018³.

Experts : La modélisation (combinaison 8) montre une déviation des vagues au voisinage de la côte pour les orienter perpendiculairement à la falaise à l'approche de la côte au droit de la Citadelle. Cette réorientation des vagues, faisant initialement un angle relativement faible par rapport à la direction de la crête de la falaise dans le secteur de la Citadelle, qui dépend de la géométrie et de la régularité du fond marin, produit une dissipation d'énergie : le modèle en tient-il compte correctement ?

Oui

1.5 CHAPITRE 5 : CALCUL DE LA PRESSION DES VAGUES

Experts : Les calculs sont effectués sur 6 profils (il faudrait faire mieux apparaître le profil O3 sur la figure 20)

OK noté

Experts : Les résultats numériques montrent qualitativement une bonne prise en compte de l'influence de la géométrie du fond marin (dans la direction du profil), mais ils restent qualitatifs car ils ne tiennent pas compte des effets tridimensionnels de la surface du fond marin (présence de gros blocs, notamment)

Tout à fait d'accord. Il faudrait mettre en place un modèle 2DH à très haute résolution afin de tenir compte de l'influence de la surface du fond marin (z) dans les deux dimensions de l'espace (x et y), inclus dans la proposition faite dans le cadre de la tâche EROS 2 du programme proposé dans le projet de convention pour 2021-2023.

Experts : On souhaiterait avoir des éléments sur les mécanismes de l'érosion de la paroi (voir infra)

Experts : Le tableau 4 montre la forte dispersion des valeurs suivant l'approche utilisée. Cas des formules empiriques : que faut-il penser de $P = 54$ ou 88 MPa ? Il faudrait être plus explicite sur la fiabilité de ces valeurs.

¹ MEDDE (2014) – Guide Méthodologique, Plan de Prévention des Risques Littoraux. Version de mai 2014, 169p.

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, 200 p., 91 fig., 4 tabl., 6 ann., 1 CD.

³ Nicolae Lerma, A; Bulteau, T; Elineau, S; Paris, F; Durand, P; Anselme, B; Pedreros, R. (2018). High-resolution marine flood modelling coupling overflow and overtopping processes: framing the hazard based on historical and statistical approaches. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Volume: 18 Issue: 1 Pages: 207-229 DOI: 10.5194/nhess-18-207-2018.

Il s'agit des valeurs obtenues avec la formule de Stanczak 2009 qui est très sensible aux fortes pentes. La paroi étant ici quasi verticale (88°), la formule se trouve en limite d'application donnant des valeurs surestimées.

Experts : La figure 28, qui s'étend sur trois pages (49 à 51) en fin de rapport, demande d'être expliquée, analysée. Il faut enrichir le texte sur ces résultats finaux.

Les résultats des profils ont été mis l'un après à l'autre dans une même figure pour pouvoir les comparer facilement entre eux. De plus un effort dans la présentation a été fait afin de synthétiser le maximum d'information par profil et donner ainsi au lecteur un accès rapide aux principaux résultats (la légende des paramètres présentés est indiquée sur le 1^{er} profil). L'analyse et les principales conclusions de ces résultats sont présentées avant la figure.

1.6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Experts : Le projet d'instrumentation, de mesures sur site, est présenté de façon très succincte. Comment valider l'outil numérique ? Il faut du temps... Mais il pourrait être utile d'instrumenter, outre sous la citadelle, une autre falaise plus battue par les vagues, moins protégée par les éboulis, afin d'avoir plus rapidement une validation de l'outil.

Notre proposition d'instrumentation a été faite compte tenu des objectifs recherchés et de la difficulté à instrumenter la falaise. Tout à fait d'accord que la validation de l'outil gagnerait à instrumenter une autre falaise telle que décrite, les équipements seraient implantés à l'extrémité de la péninsule faisant face à la houle.

1.7 CONCLUSION DU COMITE D'EXPERTS

Experts : Le rapport du bloc 2C ne répond que partiellement au plan initial rappelé au chapitre 1 : seuls 2 items sur 5 sont réellement traités, cela mériterait un commentaire.

Les analyses de photo-interprétation (années 1950 à nos jours) n'ont pas levé de changements majeurs de morphologie de falaise sur le secteur d'étude. Les analyses comparatives du trait de côte par photos aériennes depuis Juillet 1952 complétées par les données lidar n'ont pas permis d'identifier les zones de recul du trait de côte. Ainsi ces méthodes n'ont pas apporté d'éléments vis-à-vis de la problématique d'éboulement.

S'il ne fait aucun doute que des événements d'ampleur se produisent sur la cote, aucun n'est daté ou suffisamment documenté pour améliorer la compréhension sur les processus cycliques d'érosion régressive. Seuls les événements récents (abattoirs, golf de Spérone et Campo Romanello) sont suffisamment documentés pour comprendre les prédispositions et les déclencheurs de ces phénomènes, dont le recul s'est fait principalement en tête de falaise.

Experts : L'ensemble donne l'impression d'une discipline scientifique très jeune. Des modèles numériques, sans doute performants, mais qui ont du mal à être alimentés en données et à être validés par des mesures.

La discipline est jeune en ce qui concerne les applications en nature. Le problème ne réside pas dans l'alimentation en données des modèles mais bien dans leur validation par des mesures in situ. D'où notre projet d'instrumentation prévu dans le cadre de la tâche EROS 2 du programme proposé dans le projet de convention pour 2021-2023.

Experts : Les calculs hydrauliques de propagation des vagues vers les côtes corses, en particulier à l'approche de Bonifacio, ou le calcul des pressions maximales contre la falaise par les vagues lors d'un événement centennal sont bien menés et intéressants, même si certains points sont discutables.

L'exercice est en effet très intéressant notamment dans la quantification des pressions lors des impacts des vagues sur la falaise. Les limites de l'approche sont bien indiquées dans l'étude : utilisation de profils uniquement et besoin de validation avec des données in-situ.

Experts : L'étude hydraulique réalisée pourra servir à :

- (1) Définir la hauteur de remontée des vagues contre la falaise lors de tempêtes,
- (2) Localiser des protections à mettre en place en pied de falaise pour la protéger contre la mer.

L'étude sert bien au (1) et (2), entre autres, mais uniquement pour des profils. Les résultats nécessitent, d'autre part, d'être validés quantitativement.

Experts : Dans la perspective opérationnelle qui est celle de cette étude (éléments complémentaires pour l'établissement du PPR : zonage avec mesures de prévention), il est possible de tirer des enseignements de ces deux conclusions, sans nécessairement avoir besoin d'affiner l'étude.

Si le site était caractérisé par un environnement homogène (plage sous-marine, plate-forme, falaise), oui. Malheureusement ce n'est pas le cas : présence de nombreux blocs sur la plate-forme, éboulis en pied de falaise, pentes des falaises... De plus il ne faut oublier le manque de validation quantitative des modélisations.

Experts : La stratégie consistant à mettre en place de gros éboulis en pied de falaise apparaît comme un axe important de la prévention sur le long terme : elle devrait ralentir de façon substantielle la dégradation de l'équilibre de la falaise avec le temps.

Experts : S'agissant de développements relevant plus de la recherche, le Comité estime que, vis-à-vis de ce problème d'érosion du pied de falaise, la compréhension des mécanismes de cette érosion serait peut-être plus importante que le raffinement des modèles numériques : rôles complémentaires d'une altération progressive (variations de température, vent, sel...) et de l'agression mécanique des tempêtes sporadiques ? Bien qu'il soit utile de connaître les caractéristiques des vagues lors des tempêtes, la question de l'importance respective de l'altération hydromécanique de la falaise et de l'action répétitive de la houle sur la sape du pied reste entière. Cette question ne se traite pas par les seules simulations numériques en hydraulique... Il est mentionné à juste titre en conclusion du rapport (p. 53) que « la relation entre érosion et pression des vagues est encore à définir. » Comme expliqué précédemment, dans ce contexte géologique de la falaise, la pression exercée par les vagues n'est probablement pas le seul paramètre ayant une influence sur l'érosion de la falaise. Le ruissellement des vagues et le rôle de la physico-chimie sont aussi des facteurs à considérer.

La modélisation numérique proposée ne correspond pas à un objectif en soi, ce n'est pas un raffinement, ce n'est pas un développement de recherche (cette recherche s'est faite en amont sur environ quinze années). Il s'agit de la mise en place d'un outil numérique adapté au contexte de Bonifacio dans l'objectif de mieux décrire l'impact des vagues sur les falaises (pression exercée, altitude maximale atteinte, vitesses, durée/altitude soumise aux vagues, etc.) pour des événements extrêmes (centennaux à annuels) mais également pour des vagues saisonnières. Cela permettra de connaître l'exposition (durée de sape répétitivité, « ruissellement », etc.) du pied de falaise aux vagues aussi bien par temps calme que lors des tempêtes les plus intenses. C'est cette approche qui contribuera à établir la relation entre une érosion observée et action des vagues.

Experts : L'approfondissement de l'étude hydraulique par l'installation de capteurs de pression ou de caméras d'observation des vagues contre la falaise présente éventuellement un intérêt

pour la recherche en hydraulique, mais n'en présente guère pour l'étude de l'érosion de la falaise. Le Comité insiste une fois de plus sur l'utilité de caractériser au mieux la vitesse d'érosion du pied de falaise, par observation LIDAR ou Radar géo-référencées sur une longue période (10 ans au moins).

L'observation de l'érosion de la falaise sur une longue durée est indispensable mais est-elle suffisante ? :

- Faudra-t-il attendre 10 ans au minimum pour déterminer les premières tendances sur la vitesse du recul du pied de la falaise ?
- Est-ce que les tendances obtenues seront extrapolables dans le futur dans un contexte de changement climatique avec la modification notamment : de l'élévation du niveau de la mer, de la fréquence/intensité des tempêtes, etc... ?

Vraisemblablement non. L'utilisation conjointe des résultats de la modélisation numérique de l'action des vagues sur la falaise (par tout type de temps, tempêtes annuelles à centennales et également pour les vagues saisonnières) et des observations de recul du pied de falaise à venir (Lidar ou Radar) permettrait de mieux comprendre la relation « action des vagues/recul de la falaise », c'est-à-dire :

- de déterminer si les vagues ont une action prépondérante ou non dans le recul de la falaise
- d'identifier correctement les zones les plus exposées et le rôle des éboulis
- de tester l'efficacité de la mise en place « d'éboulis » pour limiter l'action des vagues (si l'action de celles-ci est jugée importante)

En complément (ce n'est pas prévu dans le projet), cette approche conjointe observation/modélisation est également exploitable dans un contexte de changement climatique. Des sorties des modèles climatiques pour différents scénarios d'émission des gaz à effet de serre pourraient alimenter les modélisations numériques pour déterminer les nouvelles conditions d'exposition de la falaise aux vagues et ajuster ainsi les vitesses de recul associées.

Enfin, l'approfondissement de l'étude hydraulique par l'installation de capteurs de pression ou de caméras d'observation des vagues contre la falaise ne présente, en soi, aucun intérêt pour la recherche en « hydraulique » (ne répond à aucun verrou/défi scientifique). Néanmoins cette étude, associée à la modélisation numérique, représente bien une clef pour mieux comprendre le recul des falaises en explorant le rôle des vagues.



Direction territoriale Méditerranée

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76

Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr



*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Parc Technologique Alata BP 2 F-60550 Verneuil-en-Halatte

tél +33(0)3 44 55 66 77 fax +33(0)3 44 55 66 99 **internet** www.ineris.fr

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Etablissement public à caractère industriel et commercial – RCS Compiègne B 381 984 921 – Siret 381 984 921 00019 – APE 7120B – TVA Intracom FR 73 381 984 921



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 du BRGM en Corse

Immeuble Agostini

Zone industrielle de Furiani

20600 – Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33



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 du BRGM en Corse

Immeuble Agostini
Zone industrielle de Furiani
20600 – Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33