



Rapport Technique du Projet POCTEFA MAREA

Auteurs : *Stéphane Abadie et Denis Morichon (SIAME),*

Benoît Larroque (SIAME), Florian Arnoux (LMAP), Inaki de Santiago (SIAME),

Avec la contribution de : Philippe Arnould (LIUPPA), Marion Beauvivre (SIAME),
Christine Bouisset (PASSAGE), Isabelle Degrémont (PASSAGE),
Estelle Egurrola (SIAME), Ivan Kojadinovic (LMAP),
Philippe Maron (SIAME),

et en collaboration avec : Xavier Bertin (U. La Rochelle - LIENS)

Contents

1	Introduction	2
1.1	Rappel des termes du projet	2
1.2	Contribution aux livrables	2
1.3	Synthèse des Données Livrées	3
2	Méthode	4
2.1	Analyse statistique (3.1)	4
2.1.1	Base de données historiques des dommages liés aux tempêtes sur la côte Basque.	4
2.1.2	Base de données historiques des forçages intervenant dans le risque tempête (niveau d'eau, vagues)	5
2.2	Indicateurs de danger (3.3.1)	5
2.2.1	Submersion : Analyse statistique du lien entre les variables d'aléas et les dommages par submersion	5
2.2.2	Estimation du niveau d'eau à la côte à partir des paramètres globaux de vagues au large	8
2.2.3	Influence de la morphologie d'une plage sur l'impact d'une tempête	10
2.2.4	Indicateurs de danger pour la digue de l'Artha	11
2.3	Système de mesures temps réel (4.4.1)	13
2.3.1	Système temps réel de mesures des pression d'impact sur la digue d' Artha	13
2.3.2	Système de mesures par caméras vidéo des phénomènes de submersion	15
3	Résultats	17
3.1	Analyse statistique (3.1)	17
3.1.1	Base de données historiques des dommages liés aux tempêtes sur la côte Basque.	17
3.1.2	Base de données historiques des forçages intervenant dans le risque tempête (niveau d'eau, vagues)	18
3.2	Indicateurs de danger (3.3.1)	19
3.2.1	Submersion : Analyse statistique du lien entre les variables d'aléas et les dommages par submersion	19
3.2.2	Estimation du niveau d'eau à la côte à partir des paramètres globaux de vagues au large	21
3.2.3	Influence de la morphologie d'une plage sur l'impact d'une tempête	23
3.3	Indicateurs de danger pour la digue de l'Artha	27
3.4	Système de mesures temps réel (4.4.1)	27
3.4.1	Système temps réel de mesures des pression d'impact sur la digue d'Artha	27
3.4.2	Système de mesures par caméras vidéo des phénomènes de submersion	31

1 Introduction

1.1 Rappel des termes du projet

Le document de réponse à l'appel d'offre MAREA prévoyait les actions suivantes auxquelles l'UPPA a contribué :

- Activité 3.1 Caractérisation de l'hydrodynamisme côtier basque et signatures historiques des événements tempétueux
- Activité 3.3 : De l'échange de données scientifiques transfrontalières à la définition d'indicateurs locaux d'aide à la gestion
- Activité 4.1 Systèmes d'observation en temps réel pour le suivi et la caractérisation des impacts des événements tempétueux

Les livrables correspondant sont :

- Livrable 3.1 Disposer d'une base de données statistiques et d'éléments historiques pour comparer les caractéristiques des tempêtes actuelles (hauteurs d'eau et impacts) avec celles des tempêtes passées afin de créer une échelle caractérisant les événements extrêmes
- Livrable 3.3.1 : indicateurs locaux et transfrontaliers d'aide à la gestion des risques côtiers.
- Livrable 4.1 mise en place de systèmes innovants pour l'observation et le suivi du littoral en temps réel à l'échelle de la plage sous l'effet de tempêtes.

1.2 Contribution aux livrables

La contribution de l'UPPA à l'ensemble des livrables du projet MAREA inclut: Pour le livrable 3.1 :

1. une base de données historiques des dommages liés aux tempêtes sur la côte Basque.
2. une base de données historiques des forçages intervenant dans le risque tempête (niveau d'eau, vagues).

Pour le livrable 3.3.1 concernant les indicateurs :

1. pour la submersion
 - une analyse statistique du lien entre les variables d'aléas et les dommages par submersion
 - le développement d'une formule empirique pour prédire le niveau d'eau à la côte
 - une étude numérique sur l'influence des évolutions morphologiques
2. un travail sur les indicateurs de danger pour la digue de l'Artha
3. un travail sur les indicateurs d'agitation dans le port de Bayonne

Enfin la contribution de l'UPPA au livrable 4.1 est:

1. Un système temps réel de mesures des pressions d'impact sur la digue d' Artha,
2. Un système de mesures par caméras vidéo des phénomènes de submersion.

1.3 Synthèse des Données Livrées

1. Un catalogue des tempêtes historiques,
2. Base données sous forme de tableur des dommages des événements historiques,
3. Base de données des forçages historiques (vague et niveau d'eau),
4. Données vidéo des deux stations (Biarritz, Anglet)
5. Levés profils topo avant et après tempêtes Biarritz et Anglet,
6. Levés topo-bathy pendant la campagne de mesure de Biarritz 2018,
7. Mesures de pression d'impact digue Artha,
8. Niveaux d'eau dans le port de Bayonne pendant événements de tempêtes,
9. Données de Vagues sur la période du projet (Bouée d'Anglet),
10. Rapports de stage de master (M. Beauvivre, E. Egurolla, T. Keroullé, P.E. Marteau, B. Atarigiya).

2 Méthode

2.1 Analyse statistique (3.1)

2.1.1 Base de données historiques des dommages liés aux tempêtes sur la côte Basque.

Une base de données [1], collectée par une recherche dans les archives sur la période 1950-2014, a été réalisée afin de connaître les événements historiques des inondations côtières le long de la côte basque. Les principales sources de données proviennent d'une recherche systématique dans la presse nationale et locale, en particulier le journal régional Sud-Ouest, ainsi que dans les archives publiques tenues par les représentants du gouvernement, les organismes publics et les autorités locales. La méthodologie s'est inspirée du projet français COCORISCO [10] sur les risques côtiers et s'est appuyée sur les expériences antérieures de recherche et de cartographie des archives historiques sur les catastrophes menées par une partie de l'équipe. Une évaluation de la probabilité de submersion et des dommages connexes a été effectuée. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur la zone de la Grande Plage à Biarritz pour laquelle les séries d'informations les plus continues ont été collectées. Nous avons essayé de trouver des preuves de submersion ou de non-submersion. Les événements qui ont provoqué des submersions à la Grande Plage ont été marqués par un indice 1 et 0 en cas de non-submersion. Un indice de confiance (1: fiable, 0: faible fiabilité) a été ajouté à cette information pour un traitement statistique plus pertinent. La même analyse a été effectuée pour l'intensité des dommages. Une échelle à trois niveaux (2 pour les dommages significatifs, 1 pour les dommages modérés et 0 pour les dommages nuls) a été choisie comme étant la plus appropriée aux données. Un indice de confiance sur cette valeur a également été ajouté pour le traitement ultérieur. Des renseignements indiquant si l'événement était classé ou non dans la catégorie catastrophe naturelle (Arrêtés CATNAT) et si, pendant la tempête, des mesures de protection (e.g., la construction d'un brise-lames temporaire devant le casino) ont été prises ont également été ajoutés pour compléter cette base de données.



Figure 1: Exemple de document d'archive. Photos du casinos de Biarritz après la tempête Hercules (4-7 Janvier, 2014). Archives municipales.

2.1.2 Base de données historiques des forçages intervenant dans le risque tempête (niveau d'eau, vagues)

Une base de données d'aléa couvrant la même période a également été constituée [2]. Elle est composée des données de vagues et de niveau d'eau. Les données de niveaux d'eau sont obtenues par les observations au marégraphe de Socoa. Comme il y a beaucoup de données manquantes et que les observations ne couvrent pas l'ensemble de la période considérée, une reconstruction du signal a été effectuée à partir d'une routine python publique nommée Pytides [4]. Le modèle utilisé pour la reconstruction fait la somme de trois composantes: le niveau moyen de l'eau au temps t , qui est une moyenne mobile calculée à partir des moyennes mensuelles des mesures, le signal de marée à l'instant t , calculée par analyse harmonique des observations du marégraphe, et une estimation grossière de la surcote atmosphérique au temps t , obtenue à partir de données de simulation de la pression atmosphérique. La dernière partie du modèle pourrait être discutable puisqu'elle ne prend pas en compte le vent. Néanmoins, ce modèle assez simple semble suffisant pour obtenir des séries précises de valeurs de niveau d'eau pour la période 1949-2015. D'autre part, il semble que ce niveau d'eau soit assez homogène spatialement comme le montre les comparaisons des marégraphes de Socoa et de Boucau. Les observations des vagues étant également limitées spatialement et temporellement, les données de vagues utilisées dans ce travail, ont été obtenues par des simulations numériques. La simulation principale, appelée WWMII, couvre la période d'étude (1949 à 2015). Elle a été réalisée à l'aide d'un système de modélisation qui couple le modèle de circulation 2DH basé sur SELFE [22] et le modèle spectral WWMII2 pour les vagues [16]. La configuration décrite dans [3] a été mise en œuvre sur l'ensemble de l'océan Atlantique Nord, avec une résolution spatiale de quelques dizaines de km dans l'océan profond à 1 km le long de la côte du golfe de Gascogne (Figure 2). Ce modèle a été forcé avec les champs de vent et de pression sous-jacents provenant de la réanalyse NCEP/NCAR [7], assurant ainsi une bonne homogénéité temporelle sur la période étudiée. Le modèle donne accès aux paramètres de vagues intégrés (i.e., hauteur significative H_{m0} , etc) à quelques points correspondant aux mesures ou devant les principales villes côtières basques (à -100m et -15m de profondeur). Des comparaisons ont également été effectuées avec la base de données HOMERE obtenue à partir du modèle spectral WAVEWATCH III et une grille non structurée couvrant le golfe de Gascogne [16].

2.2 Indicateurs de danger (3.3.1)

2.2.1 Submersion : Analyse statistique du lien entre les variables d'aléas et les dommages par submersion

L'objectif ici est de faire le lien entre les données d'aléa (vagues et hauteur d'eau) issues de la base de données précédemment décrite et les dommages à la côte connus via le tableau 1 par une fonction dite de dommage qu'il nous faut déterminer. Plusieurs variables peuvent être utilisées pour construire cette fonction de dommage. Tout d'abord, les variables dites primitives, à savoir les paramètres statistiques des vagues (la hauteur H_s , les périodes T_{m10} , T_p , la direction θ_p) et le niveau d'eau η , doivent logiquement contenir toutes les informations nécessaires pour expliquer les dommages. Ils peuvent être utilisés directement pour construire un critère expliquant les dommages. Mais des variables agrégées peuvent aussi être calculées à partir de ces variables primitives pour obtenir une information plus physique. Ces variables agrégées sont calculées pour un état de mer donné représenté par le temps t dans ce qui suit.

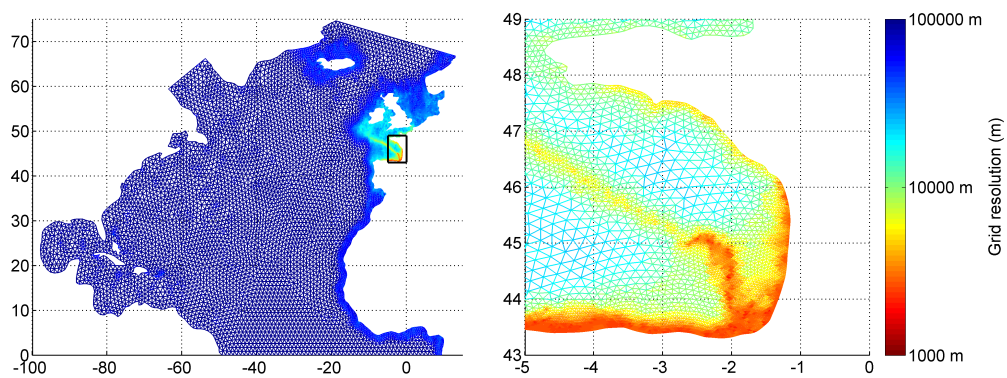


Figure 2: Maillage utilisé pour la simulation WWMII. La figure de gauche montre la zone de l’Océan Atlantique concernée et la figure de droite montre le zoom sur le domaine correspondant au Golfe de Gascogne. L’échelle de couleur décrit la taille des mailles utilisées dans chaque secteur du domaine [3].

On définit le flux d'énergie des vagues P ($J.m^{-1}.s^{-1}$) à un endroit donné pour chaque état de mer t qui représente la puissance locale des vagues par mètre de crête.

Le flux est calculé comme suit :

$$P = EC_g \quad (1)$$

dans laquelle E ($J.m^{-2}$), la densité d'énergie des vagues est donnée par $E = \frac{1}{16}\rho g H_{s,t}^2$, (ρ densité de l'eau de mer et g gravité) et C_g vitesse de groupe par :

$$C_g = \frac{1}{2}C_p \left(1 + \frac{4\pi h}{\lambda(t)} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda(t)}\right)}\right) \quad (2)$$

avec h profondeur locale. Cette vitesse de groupe implique le calcul de la vitesse de phase $C_p = \sqrt{\frac{\lambda_t \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda(t)}\right)}{2\pi}}$ et a longueur d'onde $\lambda(t)$ solution de l'équation implicite suivante $\left(\frac{2\pi}{T_{m10}(t)}\right)^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda(t)}\right)$.

Pour le calcul du run-up, nous nous sommes appuyés sur la formulation empirique proposée par [19] qui permet de donner une estimation de la hauteur d'inondation dépassée par seulement 2% des vagues d'un état de mer donné :

$$R_{2\%} = R_\nu + R_{inc} + R_{IG} \quad (3)$$

dans laquelle :

- $R_\nu = 0.35\sqrt{H_s \frac{gT_{m10}^2}{2\pi}}\beta$: la partie liée au set-up des vagues
- $R_{inc} = 0.75\sqrt{H_s \frac{gT_{m10}^2}{2\pi}}\beta$: la partie liée au swash
- $R_{IG} = 0.06\sqrt{H_s \frac{gT_{m10}^2}{2\pi}}$: la partie infra gravitationnelle du run-up

Nous obtenons finalement une matrice avec des variables géophysiques brutes ($H_s, T_p \dots$), des variables agrégées (P et $R_{2\%}$ et le niveau d'eau η correspondant au marégraphe le plus proche sur la période 1949-2015).

Le traitement des données est effectué à l'aide de R, l'environnement logiciel gratuit pour les statistiques avancées [20]. Les données sur les vagues sont échantillonnées toutes les trois heures, tandis que les données sur les niveaux d'eau sont connues toutes les heures. La première opération consiste à fusionner les deux ensembles de données. Pour ce faire, il faut interpoler les données des vagues à l'échelon temporel du niveau d'eau (c.-à-d. 1H). Des essais ont également été effectués avec le pas de temps 3H (c.-à-d. en ne considérant le niveau d'eau que lorsque les données sur les vagues sont connues) et les résultats étaient très semblables.

Un sous-ensemble de ce tableau composé de données sur les vagues et les niveaux d'eau est ensuite extrait en ne considérant que les données correspondant au maximum local du niveau d'eau η (c.-à-d. en ne retenant que les situations de marée haute). On suppose que l'information pertinente pour expliquer les dommages causés par les inondations côtières est contenue dans cette période spécifique de marée haute.

Nous considérons ensuite deux hypothèses différentes pour expliquer l'occurrence de dommages lors d'une inondation côtière. Dans le premier cas, les dommages sont générés plutôt sur une échelle de temps courte lorsque les paramètres de la tempête (vagues, niveau d'eau) atteignent des valeurs extrêmes. Pour caractériser cet effet, nous nous appuyons sur les maxima des variables. Ainsi, nous définissons (ici pour le cas des cycles de marées considérés) :

$$VarMaxp[i] = \max_{j=i-p}^i Var[j] \quad (4)$$

Où Var peut être n'importe quelle variable d'aléa.

Dans le cas où deux variables, disons x et y , sont utilisées conjointement pour expliquer les dommages, et comme l'équation 4 peut conduire à des maxima non simultanés pour x et y , il peut être intéressant de calculer également des maxima simultanés pour les deux variables pendant la période considérée. Dans ce cas, nous définissons comme $SimVarMaxp[i]$ le maximum calculé.

Dans le second, les dommages s'expliquent par un effet cumulatif de plusieurs événements destructeurs de marée haute. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons calculé des variables cumulatives, c'est-à-dire la somme de la variable au cours des marées hautes destructrices successives ainsi que des variables moyennes.

$$VarSump[i] = \sum_{j=i-p}^i Var[j] \quad (5)$$

$$VarMeanp[i] = \frac{1}{p} \sum_{j=i-p}^i Var[j] \quad (6)$$

2.2.2 Estimation du niveau d'eau à la côte à partir des paramètres globaux de vagues au large

L'étude précédente a montré que la prévision du niveau d'eau maximum atteint pendant une tempête peut constituer un indicateur d'impact permettant de prévoir l'intensité d'une tempête pour un site donné. L'objectif de cette action est de mettre au point une formulation empirique permettant de prévoir le niveau d'eau sur le site pilote de la Grande Plage de Biarritz en fonction des paramètres statistiques des vagues au large et des spécificités géométriques locales. Cette formulation porte exclusivement sur la prédiction du run-up $R_{2\%}$ qui représente la contribution des vagues (set-up et swash) au niveau d'eau maximum à la côte. Elle nécessite de prendre en compte à la fois la contribution des ondes courtes ($T < 25$ s) et celle des ondes longues (25 s $< T < 300$ s) [19].

Pour mettre au point cette formule, deux set de données ont été constitués tout au long du projet pour différentes conditions climatiques. Le premier set de données correspond aux paramètres statistiques de vague. Ces paramètres sont obtenus toutes les 30 minutes à partir des mesures du houlographe directionnel d'Anglet (bouée Datawell du réseau CANDHIS). Ils comprennent notamment la hauteur significative des vagues H_s , la période pic T_p , la direction moyenne θ_{min} et l'étalement directionnel s . Ces mesures, réalisées à 50 m de fond, sont représentatives de l'état de mer au large de la Grande Plage de Biarritz avant que la houle se transforme par interaction avec les petits fonds dans la baie et déferle.

En parallèle, une base de données de hauteur d'eau en haut de plage a été déterminée en combinant des mesures vidéométriques, haute fréquence, de position de la ligne d'eau et des levés

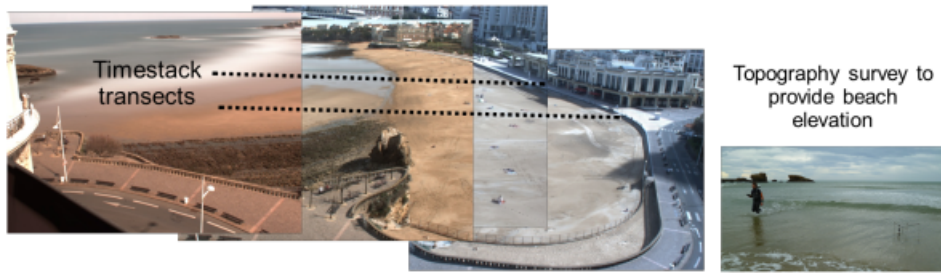


Figure 3: Profiles le long desquels sont collectées les images timestacks (gauche) et levés topographiques (droite)

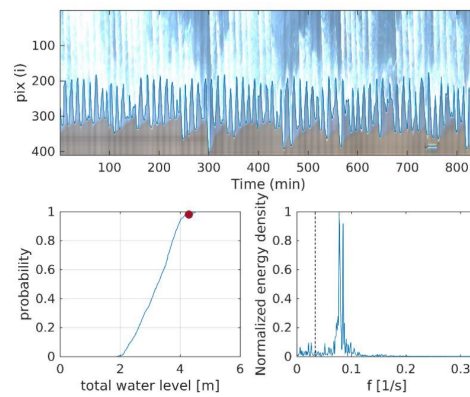


Figure 4: Détection de la ligne d'eau et estimation de $R_{2\%}$

topographiques de profils de la plage, réalisés à marée basse, avec un GPS (figure 3). L'évolution de la position de la ligne d'eau est obtenue à partir de l'analyse d'images timestack collectées à 1Hz par la station vidéo de Biarritz (installée au centre de congrès Bellevue) toutes les 15 minutes. Ces images timestack permettent d'enregistrer le long d'un transect, perpendiculaire au trait de côte (figure 1), la variation d'intensité des pixels au cours du temps. Un algorithme de traitement d'image, basé sur une méthode de segmentation, permet ensuite d'extraire l'interface entre la partie sèche de la plage et la partie immergée qui constitue la ligne d'eau (figure 4). En combinant cette information géoréférencée avec les mesures topographiques de la plage le long du profil, on obtient une mesure de la hauteur d'eau à partir de laquelle on peut calculer $R_{2\%}$ qui correspond au 98-centile des run-up mesurés (figure 4).

2.2.3 Influence de la morphologie d'une plage sur l'impact d'une tempête

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'influence de la morphologie et de son évolution sur la réponse d'une plage sableuse soumise à une tempête. L'étude porte sur deux sites ateliers:

- cas 1: Grande Plage de Biarritz [13]
- cas 2: Plages sud d'Anglet [5]

Pour ces deux cas, des simulations numériques basées sur le code XBeach en mode surfbeat [15] ont été réalisées pour différents scénarios de tempête.

Cas 1 : Grande Plage de Biarritz (GPB)

Dans cette étude, on s'intéresse à la variabilité spatiale des régimes d'impact (collision et submersion) le long de la plage pour une bathymétrie constante. Le modèle numérique de la GPB a été validé et calibré en comparant les valeurs des niveaux d'eau maximum mesurés pendant une tempête avec les valeurs estimées à partir des résultats de la simulation. Le modèle validé a ensuite été appliqué pour simuler des tempêtes avec différentes périodes de retour. Les caractéristiques de ces tempêtes ont été établies à partir d'une analyse bi-variée de 66 ans (1949-2014) de rejeu de données de houle en se plaçant au niveau de la bouée d'Anglet. Dans un premier temps, les événements de tempête de la base de données ont été isolés en considérant qu'une tempête correspond à un événement pendant lequel le flux d'énergie est supérieur à une valeur seuil pendant au moins 72h. Ensuite, seuls les événements de tempête dont le flux d'énergie des vagues a été le plus important au cours de chaque année civile ont été pris en compte pour l'analyse des copules. La distribution marginale de H_s et de T_p a été modélisée par une distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV). La méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée pour estimer les paramètres de cette distribution. Enfin, la dépendance de H_s et T_p a été étudiée en utilisant la copule bivariée de Frank.

Cas 2 : Plages sud d'Anglet

Dans cette étude, on cherche à déterminer des indicateurs permettant de prévoir l'impact d'une tempête. Un modèle numérique des plages sud d'Anglet a été mis au point, validé et calibré à partir de mesures de terrain. Contrairement au cas précédent, cette version du modèle permet de prendre en compte l'évolution de la morphologie de la plage au cours d'une tempête. Plusieurs scénarios ont été étudiés pour différentes conditions de marée, de conditions de vagues au large et de durée de tempête. La première partie de l'étude a consisté à mettre au point une classification des régimes de tempête au large du site d'Anglet. Cette classification a été réalisée à partir d'une analyse statistique de la même base de données de rejeu de vagues utilisée dans l'étude précédente. La méthode comprend trois étapes:

- étape 1 : sélection d'événements extrêmes basée sur une valeur seuil (1% d'occurrence) du flux d'énergie des vagues
- étape 2 : regroupement des tempêtes en fonction de leur flux d'énergie moyen et de leur durée. La méthode de regroupement est basée sur l'algorithme des k-médoïdes (avec un nombre fixe de $k=6$) [11]. Cette méthode, bien que semblable à la méthode k-means, s'est révélée plus robuste au bruit et aux valeurs aberrantes.
- étape 3 : analyse des paramètres intra-tempête pour chaque cluster.

Enfin, les valeurs représentatives H_s , T_p , et la durée de chaque groupe de tempêtes ont été synthétisées dans un catalogue de tempête.

2.2.4 Indicateurs de danger pour la digue de l'Artha

L'objectif de cette partie du projet est de définir des indicateurs de dommage basés sur les variables d'aléas et/ou les mesures réalisées en temps réel permettant aux équipes techniques en charge de l'ouvrage d'avoir une idée des dégâts associés à une tempête annoncée ou en cours pour permettre une planification optimale des interventions. Les 3 types de dommages considérés dans cette étude sont :

- Le glissement et le retournement de la muraille verticale
- le déplacement des blocs de la carapace
- l'endommagement localisé du parement de la muraille.

Le premier type de dommage est très peu probable mais il est étudié néanmoins pour fournir une idée de l'intensité d'un événement vis à vis de ce type de risque. Les 2 autres type de dommage sont réels et régulièrement constatés [8, 6].

Pour le risque de stabilité globale de l'ouvrage (i.e., glissement ou retournement de la muraille), on se base sur la formule dite de Goda [9] modifiée par [17] (pour tenir compte de manière plus précise de la pression impulsive due à l'impact). Cette formule permet d'obtenir la force générée par une vague caractéristique de l'état de mer sur la muraille et de la comparer aux forces résistantes que sont le poids et le frottement sur l'interface avec la fondation. Les caractéristiques générales de l'ouvrage ont été obtenus dans [8] (Figure 5). La difficulté majeure a été de définir la hauteur de vague caractéristique pour un état de mer donné (i.e. le paramètre H_{design}). Étant donné l'incertitude sur ce paramètre compte tenu de la complexité des phénomènes qui entrent en jeu (déferlement de vagues irrégulières au dessus d'un champs de blocs également irrégulier), nous avons choisi de manière arbitraire une hauteur de vague caractéristique qui conduise à un coefficient de sécurité de 1 pour la tempête la plus défavorable du jeu de donnée (i.e., 2 Février 2014). En conséquence, cet indicateur donnera comme information le rang relatif d'un évènement donné vis à vis de cette tempête de référence mais ne pourra pas être interprété en absolu. Le calcul de cet indicateur n'est effectué qu'à marée haute en prenant comme hypothèse que les hauteurs de vagues qui atteignent l'ouvrages sont maximales à cet instant.

Pour le déplacement des blocs, on se base sur une formule empirique de dimensionnement développé pour les blocs béton cubiques [21]. Inversée, pour donner le dommage et non la taille du bloc, cette formule s'écrit :

$$N_{od} = \left(\left(\frac{H_s}{\Delta D_n S_{om}^{-0.1}} - 1 \right) * N^{0.3} * \frac{1}{6.7} \right)^{2.5} \quad (7)$$

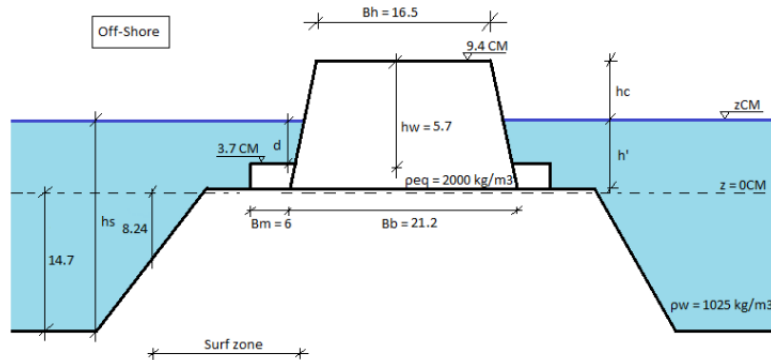


Figure 5: Géométrie considérée pour l'étude de la stabilité globale et dimensions et paramètres associés

où H_s est la hauteur de vague significative, N le nombre de vagues de la tempête, $\Delta = \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1$ avec ρ_r et ρ_w les masses volumiques respectives des blocs béton et de l'eau, s_{om} la cambrure des vagues moyenne et D_n le côté d'un bloc cubique équivalent. A noter que cette formule empirique, de par sa construction, peut conduire à une indétermination mathématique lorsque $\frac{H_s}{\Delta D_n s_{om}^{0.1}}$ est inférieur à 1, ce qui intervient pour des tempêtes relativement fréquentes sur le site. Ces tempêtes ne sont simplement pas considérées pour l'instant.

De la même manière que pour la stabilité globale, l'indicateur est utilisé pour donner le positionnement de la tempête considérée relativement de la tempête la plus critique (i.e., $N_{odMax} = 1.72$ en 1951) pour ce type de dommage sur le jeu de données historique. 4 seuils sont considérés :

- $N_{od} < 0.1$, contient 70% des événements, correspond à un niveau de danger bas;
- $0.1 < N_{od} < 0.4$, contient 20% des événements, correspond à un niveau de danger modéré;
- $0.4 < N_{od} < 0.8$, contient 9% des événements, correspond à un niveau de danger haut;
- $0.8 < N_{od}$, contient 3% des événements, correspond à un niveau de danger critique;

Un seuil de détection des tempêtes à 5m en H_s est adopté et permet d'obtenir environ 2 tempêtes par an globalement sur le jeu de données historique. Les vagues sont propagées en pied d'ouvrage avec des formules de shoaling classiques, un écrêtage par déferlement est appliqué et la variation du niveau d'eau pris en compte. La détermination du paramètre H_s en pied de structure représente une difficulté équivalente à la définition du H_{design} pour la stabilité globale. Compte tenu de l'incertitude sur ce paramètre critique, les résultats préliminaires obtenus sont encore à considérer avec précautions.

Pour ce qui est du dommage local sur la paroi, on se base sur la mesure de pression d'impact réalisée en temps réel (10 kHz) sur le musoir. Le dommage est pour l'instant simplement supposé proportionnel à la pression maximale mesurée.

Un site internet a été développé pour héberger et rendre à terme disponible les prévisions de ce prototype de système de surveillance. Un ensemble de routines python ont été développées pour effectuer ponctuellement ou en temps réel les calculs nécessaires. Pour la prédiction des états de mer en temps réel (vagues et niveau d'eau), nous utilisons le site du SHOM qui fournit ces informations par simulations numériques.



Figure 6: Station de mesure et installation photovoltaïque

2.3 Système de mesures temps réel (4.4.1)

2.3.1 Système temps réel de mesures des pression d'impact sur la digue d' Artha

[12], [14] L'objectif consistait à mettre en place un laboratoire in-situ sur la digue de l'Artha dans la baie de Saint Jean de Luz (Pyrénées Atlantiques – 64) pour mesurer les pressions d'impact des vagues sur cet ouvrage côtier. Le site de l'Artha étant un site isolé (aucun réseau énergétique sur place) il a été nécessaire de dimensionner une installation autonome énergétiquement et interrogeable à distance. Une station de mesure (basée sur un compactRIO de la marque National Instruments ©) alimenté par un système photo-voltaïque et relié à un routeur GSM pour la communication à distance a été mis en place depuis le mois de septembre 2014. Les expérimentations menées avec cette lors de ces travaux de recherche expérimentale doivent permettre de :

- Pérenniser les campagnes de mesures (laboratoire in-situ, mesures 24h/24, 7J/7),
- Paramétrer des vitesses d'acquisition variables et élevées (de 100 Hz jusqu'à 1MHz)
- Construire progressivement un observatoire in-situ en fonction des résultats obtenus (Flexibilité de la station de mesures).

Ce laboratoire in-situ doit s'adapter aux contraintes suivantes :

- Site Off Shore soumis à des conditions extrêmes
- Transmission du signal sur 40 mètres (distance entre capteur et emplacement de la station de mesure communicante)
- Observation des impacts 24h/24, 7j/7 à chaque début d'heure
- Données paramétrables en temps réel : Durée de mesures / Fréquence d'échantillonnage

Afin de répondre aux objectifs qui ont été fixés et de s'adapter aux contraintes d'une telle expérimentation les choix techniques ont été effectués :



Figure 7: Positionnement des 16 capteurs sur le musoir Ouest de la digue

- Pour alimenter électriquement la station, un système photo-voltaïque (Voir figure ??) a été dimensionné et installé. Ce système est composé des éléments suivants : un Régulateur MPPT solaire STECA Solarix PRS 1010 (10A 12V-24V), une batterie Banner SBV 200 – 12V 200Ah et un panneau solaire REC245PE pour régulateurs MPPT.
- Des capteurs de pression piezoresistifs Keller avec une étendue de mesure de 0 à 5 bars, une transmission de signal en 4-20mA (contrainte grande distance) avec une protection IP68 pour résister au milieu marin. 16 capteurs ont été positionnés où le déferlement des vagues a été constaté comme étant le plus intense (voir figure 7)
- La station de mesure choisie est un Compact RIO 9076 équipé d'un module NI9203 pour le branchement des capteurs. Pour communiquer avec le Compact RIO situé sur la digue nous utilisons un routeur 3G UR5i v2 relié au port ethernet du Compact RIO. Le Compact RIO nous permet :
 - De gérer l'acquisition des mesures à haute vitesse grâce à la puce FPGA dont il est équipé.
 - De générer des webservices grâce au serveur web embarqué sur le cRIO pour changer des paramètres de l'expérience, piloter une expérience, regarder l'état du système. . .
 - De reprogrammer à distance la centrale de mesure.
 - De télécharger via le serveur FTP du cRIO les résultats de mesure.
 - D'augmenter facilement la capacité de stockage de la station de mesure.

Une photographie de l'installation est disponible en figure 6 et un schéma simplifié décrit en figure 8.

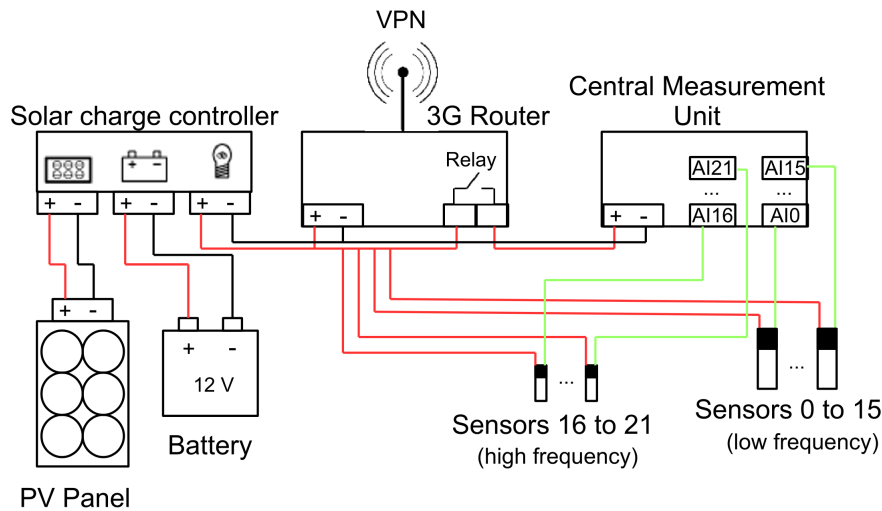


Figure 8: Schéma décrivant l'installation

2.3.2 Système de mesures par caméras vidéo des phénomènes de submersion

L'acquisition de données d'impact le long d'une plage pendant des événements de tempête est un véritable enjeu afin d'une part de caractériser les processus physiques qui contrôlent l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire, et d'autre part de pouvoir déterminer des indicateurs d'impact objectifs. Les méthodes de mesure traditionnelles qui consistent à installer des instruments de mesure (courantomètre, capteurs de pression,...) dans la zone de surf sont souvent coûteuses et difficiles à mettre en oeuvre et à maintenir lors d'événements extrêmes. La mesure par vidéométrie constitue une alternative crédible dont les domaines d'application depuis quelques décennies s'étendent aux domaines suivants:

- le suivi morphodynamique,
- l'étude des courants de baine,
- l'estimation de la topographie d'une plage,
- l'inversion bathymétrique
- la mesure haute fréquence du niveau d'eau

Dans le cadre du projet MAREA, la station vidéo d'Anglet, opérationnelle depuis 2013, a été complétée en 2017 par une deuxième station située au centre des congrès Bellevue. Cette station, installée à 30m de haut, est dédiée au suivi des événements de submersion le long de la Grande Plage de Biarritz. Elle est composée de 4 caméras Point Grey Research Flea3 FL3-FW-20S4C dont 3 sont équipées de lentilles de 8 mm et une de 12 mm afin de couvrir l'ensemble de la plage et de la zone de surf avec suffisamment de précision. Dans la zone d'intérêt, à savoir la partie supérieure de la plage, la résolution angulaire (direction perpendiculaire au trait de côte) varie de 1 à 15 cm et la résolution radiale (direction parallèle au trait de côte) de 1 à 5 m. Les caméras sont connectées à un PC (figure 9) qui pilote l'acquisition des images et le transfert vers un serveur de stockage hébergé par l'université de Pau et des Pays de l'Adour. Les protocoles d'acquisition et de transfert des images sont basés sur le logiciel libre SIRENA.



Figure 9: Station vidéo de Biarritz installée en 2017

La mise en place de la station et la détermination des paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras ont été réalisées en étroite collaboration avec l'équipe d'AZTI. Des routines matlab de traitement d'image ont été développées afin de déterminer de manière quasi-automatique la position de la ligne d'eau sur les images timestacks.

Nom de la Tempête	Date début	Date fin	Durée (jours)	Submersion	confiance	Intensité des dommages	confiance
St1	28/12/1951	30/12/1951	2	1	1	2	1
St2	14/12/1958	15/12/1958	1	0	0	0	1
St3	12/11/1961	14/11/1961	2	0	0	0	1
St4	17/01/1965	20/01/1965	3	1	1	1	1
St5	30/10/1967	05/11/1967	6	1	1	1	0
St6	11/12/1968	17/12/1968	6	1	1	0	0
St7	20/01/1972	22/01/1972	2	1	0	0	1
St8	06/02/1974	08/02/1974	2	1	0	0	1
St9	24/01/1984	25/01/1984	1	0	0	0	1
St10	30/01/1988	01/02/1988	2	0	0	0	1
St11	25/02/1989	27/02/1989	2	0	0	0	1
St12	30/01/1990	01/02/1990	2	1	1	1	1
St13	07/02/1996	09/02/1996	2	0	0	0	1
St14	28/12/1998	02/01/1999	5	1	1	1	1
Martin	27/12/1999	31/12/1999	4	0	1	0	1
St16	06/11/2000	10/11/2000	4	0	0	0	1
St17	07/12/2000	09/12/2000	2	0	1	0	1
St18	14/08/2008	16/08/2008	2	0	0	0	1
Klaus	23/01/2009	25/01/2009	2	0	0	0	1
St20	09/11/2010	11/11/2010	2	1	1	2	1
Quirin	15/02/2011	17/02/2011	2	0	0	0	1
St22	18/02/2011	23/02/2011	5	1	1	0	1
St23	13/12/2011	18/12/2011	5	0	0	0	1
St24	26/01/2013	31/01/2013	5	0	1	0	1
St25	09/02/2013	14/02/2013	5	0	0	0	1
Dirk	23/12/2013	26/12/2013	3	0	0	0	1
Hercules	04/01/2014	08/01/2014	4	1	1	2	1
Nadja	01/02/2014	03/02/2014	2	1	1	2	1
Andrea	26/02/2014	03/03/2014	5	0	0	0	1
Christine	03/03/2014	06/03/2014	3	1	1	2	1

Table 1: Base de données synthétiques des dommages par tempête entre 1950 et 2015 pour la Grande Plage de Biarritz

3 Résultats

3.1 Analyse statistique (3.1)

3.1.1 Base de données historiques des dommages liés aux tempêtes sur la côte Basque.

Le tableau 1 apporte une vision très synthétique de la base de données constituée lors de ce travail et que l'on focalise ici sur Biarritz. Nous nous sommes attaché à réduire les données en conservant l'information qui nous semblait pertinente pour permettre une analyse statistique ultérieure. Entre 1950 et 2015, période sur laquelle l'analyse a été effectuée, le nombre de tempêtes, pour lesquelles seule Biarritz a été citée, est de 30 et le nombre de submersion à la Grande plage est de 13, ce qui représente un tiers des tempêtes observées sur la période d'étude. Parmi ces submersions, seules 2 sont considérées comme non fiables. En ce qui concerne les événements de non-submersion, l'information est la plupart du temps considérée comme non fiable. Dans 2 événements seulement, la submersion est exclue avec confiance. Ces deux événements sont aussi importants que ceux impliquant la submersion puisqu'ils peuvent servir de référence pour tester des combinaisons de paramètres d'aléa pour lesquelles il n'y a pas submersion alors que l'on pourrait s'attendre au contraire. Ainsi, ce genre de cas peut aider à situer la limite entre submersion et non-submersion. En ce qui concerne les dommages causés par la submersion, 5 événements ont généré des dommages de niveau 2 avec une bonne fiabilité et 4 ont causé des dommages modérés avec une seule évaluation jugée non fiable dans cette catégorie. Les

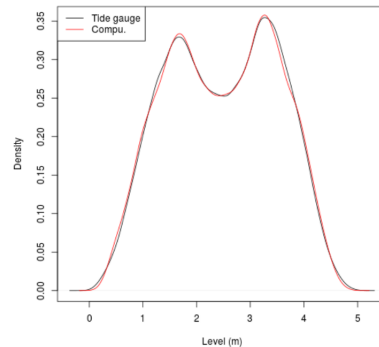


Figure 10: Fonctions de densité pour le niveau d'eau au Socoa le marégraphe. La ligne noire est la fonction estimée d'après les mesures, le rouge est l'estimation à partir des valeurs calculées

tempêtes restantes n'ont pas causé de dégâts avec un bon niveau de confiance. Les tempêtes qui ont causé les principaux dommages (niveau 2) suite à une submersion sont les tempêtes du 28-29 décembre 1951, du 9-10 novembre 2010 et les récents événements de l'hiver 2013-2014: c'est à dire les tempêtes Hercules (4-7 janvier), Nadja (1-2 février) et Christine (3-5 mars). Il faut enfin souligner que la base de données constituée est bien plus large que l'information très synthétique contenue dans le tableau 1. En effet cette dernière répertorie la source de l'information, les observations éventuelles de l'aléa, des citations numérisées, la mention de la zone géographique, l'information sur la nature (classée par type) et l'intensité des dégâts lorsqu'elle est disponible, la présence d'ouvrages temporaires de protection, la reconnaissance CatNat, etc.

3.1.2 Base de données historiques des forçages intervenant dans le risque tempête (niveau d'eau, vagues)

La base de données constituée permet d'obtenir l'information de l'état de mer (hauteur de vague, période, direction) toutes les 3h entre 1950 et 2015 et le niveau d'eau associé en prenant en compte la marée, l'élévation lente du niveau d'eau et la surcote atmosphérique. La comparaison du niveau d'eau modélisé aux observations montre que la précision de ce paramètre est excellente (Figure 10).

Pour ce qui est des vagues, les données du modèle WWMII sont comparées aux mesures du houlographe directionnel qui se trouve à environ 6 km au large de Biarritz sur la période de mesure (à partir de 2009). On trouve globalement une erreur RMSE de 48cm, un coefficient de détermination R^2 de 0.73 et un biais de 6.98%. L'analyse des graphes quantile/quantile montre une sous-estimation du modèle systématique (Figure 11) pour les états de mer extrêmes, préjudiciable pour ce type d'étude justement focalisé sur ce type d'événement. Dans [2], une correction quantile empirique est appliquée aux données pour tenter de corriger ce biais. Cette transformation force le jeu de données à avoir la même distribution que l'observation. Compte tenu du nombre important de variables, c'est le flux d'énergie qui a été considéré comme variable de référence.

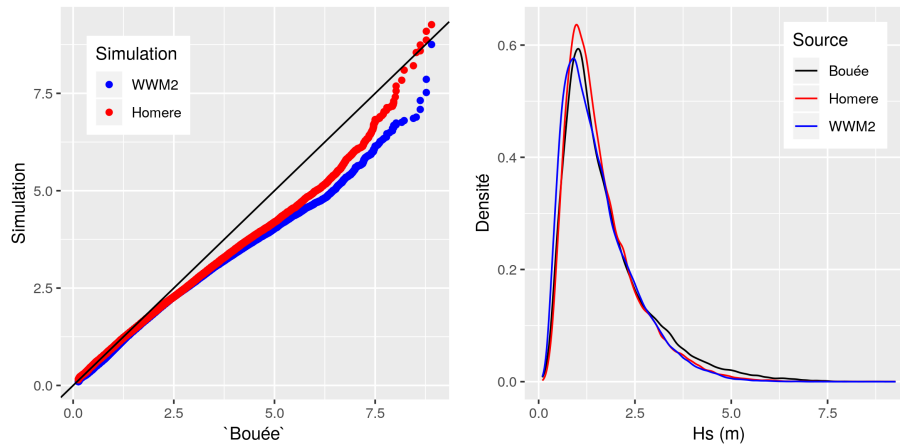


Figure 11: Diagramme quantile-quantile pour H_s (en mètres) entre les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et tracées des fonctions de densité pour les trois jeux de données (à droite).

3.2 Indicateurs de danger (3.3.1)

3.2.1 Submersion : Analyse statistique du lien entre les variables d'aléas et les dommages par submersion

Les graphes de la figure 12 présentent les résultats obtenus en considérant la première variable non agrégée (H_s). Dans cette figure, les valeurs maximales, moyennes et cumulatives sont calculées pour chaque durée de tempête. Notons que la valeur maximale de variables séparées (comme H_s et η) peut survenir à différents moments. Nous recherchons la variable pour laquelle les tempêtes de dommages 0, 1 et 2 sont bien discriminées (séparées). Par exemple un bon indicateur semble être la hauteur de houle significative maximale combinée au niveau d'eau maximal pendant la période de tempête. Ainsi, un critère tel que $H_{s_{max}} > 7m$ et $\eta_{max} > 4.5m$ prédit correctement la plupart des tempêtes générant des dommages sur le site (2 exceptées, y compris celle avec une faible confiance). Il serait un peu plus délicat de distinguer les tempêtes de niveau 2 des tempêtes de niveau 1. La hauteur moyenne des vagues n'améliore pas la discrimination, au contraire, les tempêtes de niveau 0 commencent à être mélangées avec les tempêtes de niveau 2 et 1. Le pire résultat est obtenu avec la hauteur de houle significative cumulative et le niveau d'eau pour lesquels il n'y a aucune discrimination entre les dommages.

Des graphes similaires (non fournis dans ce rapport) montrent que La période pic maximale ainsi que le niveau d'eau maximal constituent également une solution de rechange possible pour classer les dommages causés par les tempêtes. Par exemple $T_{p_{max}} > 16s$ et $\eta_{max} > 4.4m$ permettrait de regrouper toutes les tempêtes qui ont généré des dommages (à l'exception de celle avec une faible confiance), alors que la période de pointe moyenne est moins discriminante et la période de pointe cumulative n'a aucune pertinence. Les mêmes résultats sont obtenus avec la période énergétique moyenne T_{m10} , mais cette dernière variable semble un peu moins discriminante que la période de pointe.

Les figures 13 et 14 présentent les résultats obtenus avec des variables agrégées, à savoir le flux d'énergie des vagues et run-up. On obtient de très bons résultats en combinant le flux maximal d'énergie des vagues et le niveau maximal de l'eau. Avec ces variables, il est possible de différencier clairement les tempêtes avec dommages et les tempêtes sans dommages

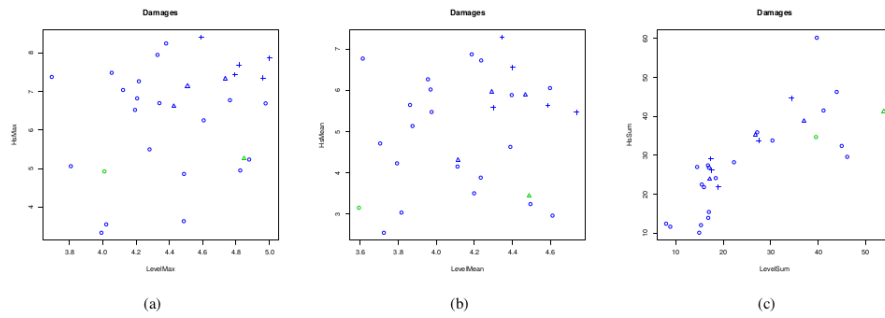


Figure 12: Hauteur de houle significative en fonction du niveau d'eau a) valeurs maximales calculées pendant la tempête, b) valeurs moyennes, c) valeurs cumulatives. Niveau de dommage : 0 (○), 1 (△), 2 (+), (dans les données rouges de faible confiance voir tableau1)

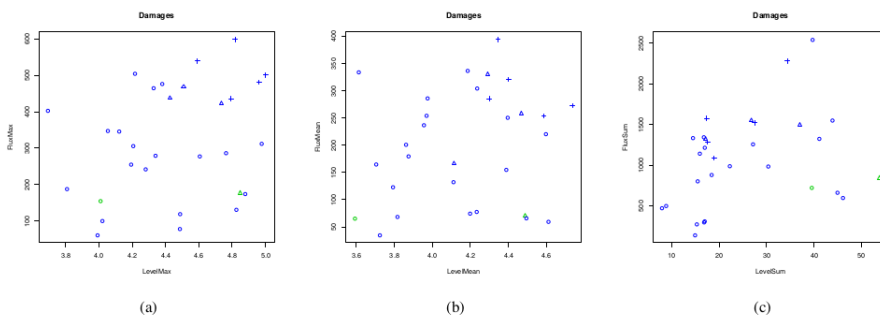


Figure 13: Identique à la Figure 12 remplaçant H_s par le flux d'énergie des vagues

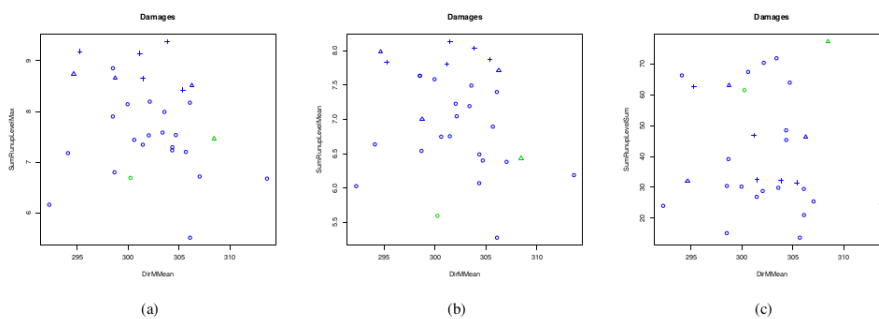


Figure 14: Niveau d'eau total par rapport à la direction moyenne des vagues pendant la durée de la tempête. a) valeur maximale du niveau d'eau total, b) valeur moyenne du niveau d'eau total, c) valeur cumulative du niveau d'eau total

($P_{max} > 400 J/m/s$ et $\eta_{max} > 4.42m$), à l'exclusion de celles avec une faible confiance. Il peut également être possible de distinguer le niveau de dommage du niveau de dommage 1 en augmentant ces deux valeurs. La prise en compte du flux moyen d'énergie des vagues et du niveau d'eau n'est pas aussi précise que la prise en compte des valeurs maximales, car les tempêtes de dommages différents commencent à être mélangées dans le graphique 2D alors que les variables cumulées semblent toujours inappropriées. L'utilisation de l'accélération maximale des vagues et du niveau d'eau maximal est également une bonne combinaison pour expliquer les dommages causés par les tempêtes, bien qu'elle soit légèrement moins discriminante que le flux de vagues et le niveau d'eau, avec toujours les mêmes conclusions concernant les variables moyenne et cumulative.

Enfin, nous avons également construit le niveau d'eau total en ajoutant le run-up au niveau de l'eau, qui, rappelons-le, ne comprenait que le signal des marées et des ondes atmosphériques. Le niveau d'eau total est couramment utilisé comme prédicteur de l'ampleur des inondations causées par les tempêtes. Cette fois-ci, un graphe 1D est en théorie suffisant pour explorer la pertinence de cet indicateur. Il est ici tracé en fonction de la direction moyenne pour avoir également un aperçu du rôle de cette dernière variable. Si l'on considère le niveau d'eau total maximum, un critère simple comme $\eta_{tot,max} > 8.3m$ permet de prédire toutes les tempêtes avec dommages (mais aussi celles sans dommages). Là encore, la variable moyenne est moins précise et la variable cumulative n'est pas pertinente. La distribution des directions des tempêtes semble très étroite avec toutes les tempêtes dans un secteur d'angle de 15° et sans direction préférentielle associée à un dommage spécifique.

Jusqu'à présent, seules les informations sur les dommages ont été utilisées sans tenir compte des colonnes 5 et 6 du tableau 1 pour recueillir les données sur les inondations et la confiance associée. En fait, les nouvelles informations apportées par ces deux colonnes sont peu intéressantes car tous les événements avec dommages ont été considérés comme des inondations et finalement seulement 5 nouveaux événements sont associés à une bonne confiance (3 inondations et 2 sans inondations). Ces cinq événements n'ont pas semblé suffisants pour délimiter la séparation entre les inondations et l'absence d'inondation et n'ont donc pas été pris en compte de façon définitive dans l'étude.

3.2.2 Estimation du niveau d'eau à la côte à partir des paramètres globaux de vagues au large

Plusieurs campagnes de mesure de run-up ont été réalisées entre décembre 2017 et janvier 2019 pour différentes conditions de vagues incidentes. Les données de ces campagnes sont synthétisées dans la figure 15. Un total de 1 220 mesures de run-up ont été effectuées sur cette période. L'événement le plus énergétique a été enregistré au cours de la campagne de mesures de 2019 pendant laquelle la hauteur significative des vagues mesurées par le houlographe d'Anglet a atteint une valeur maximale de 5.2 m et une période pic de 18.2 s. On remarque que la pente moyenne du haut de plage varie peu de 8 à 13% sur la période d'étude. Les valeurs du nombre d'Iribarren sont toujours supérieures à 0.3 ce qui indique que cette partie de plage se comporte comme une plage réfléchive.

Le nombre N de run-up $R_{2\%}$ est très variable d'une campagne de mesures à l'autre (de 12 à 54). Ces différences sont dues à la difficulté de détecter de manière précise la position de la ligne d'eau sur certaines images timestacks. Ces difficultés sont liées à des problèmes d'exposition des images qui varient au cours d'une journée mais aussi de l'exfiltration d'eau qui empêche de distinguer précisément la ligne d'eau.

Date	\overline{Hs} (Hs_{max}) [m]	\overline{Tp} (Tp_{max}) [s]	$\overline{\beta}$	$\overline{\xi}$	N
4 – 5 Dec 2017	0.5 (0.6)	7.4 (10.5)	0.11	1.4	12
30 Jan – 2 Feb 2018	1.9 (4.1)	12.2 (14.3)	0.08	0.9	42
3 – 4 Mar 2018	1.5 (1.8)	10.1 (12.5)	0.13	1.3	44
23 Mar 2018	1.1 (1.4)	12.5 (13.3)	0.11	1.6	27
2 Apr 2018	0.8 (1.2)	10.2 (11.8)	0.11	1.6	30
8 Nov 2018	3.3 (3.6)	14.9 (15.4)	0.11	1.1	11
21 – 24 Jan 2019	3.2 (5.2)	13.4 (18.2)	0.08	0.7	54

N – Nombre de runup estimés durant la campagne

Figure 15: Synthèse des campagnes de mesure de run-up sur la Grande Plage de Biarritz

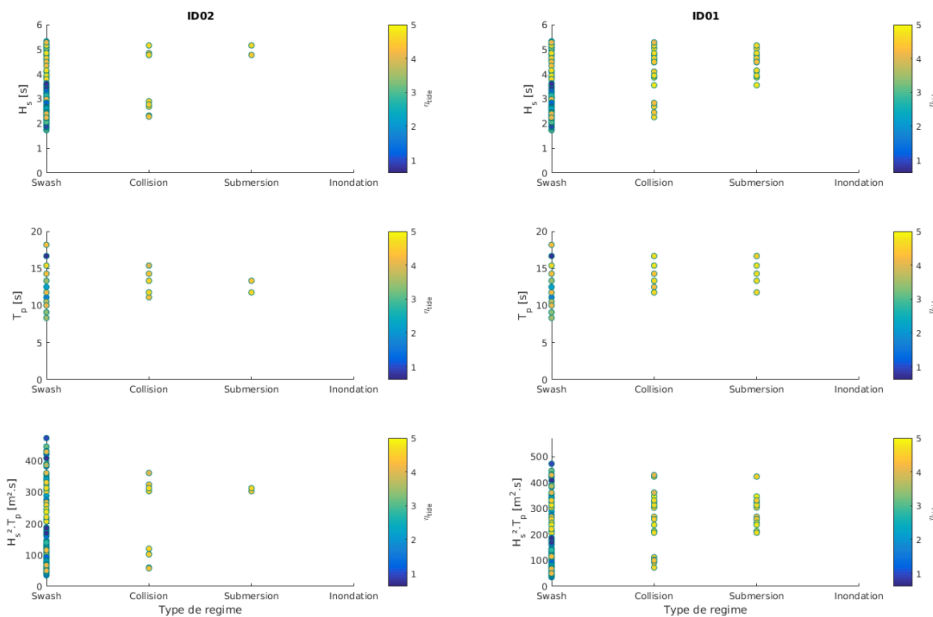


Figure 16: Régime d'impact en fonction de la marée et des caractéristiques des vagues incidentes pour les transects ID01 et ID02

L'analyse des images timestacks sur les deux profils de plage étudiés (figure 3) a tout d'abord permis de constituer une base de données de régime d'impact basée sur l'échelle de Sallenger [18]. Cette échelle, adaptée au cas d'une plage aménagée, permet de distinguer 4 types de régime en fonction du niveau d'eau maximum atteint. Par ordre croissant d'intensité, on distingue :

- régime de swash qui correspond à l'inondation de la plage par le jet de rive sans atteindre le pied de la digue
- régime de collision lorsque le jet de rive atteint le pied de la digue
- régime de submersion lorsque le jet de rive dépasse la côte supérieure de la digue
- régime d'inondation lorsque la digue est submergée durablement

La figure 16 présente les différents régimes détectés en fonction de la marée et des caractéristiques des vagues au large. La couleur fait référence au niveau d'eau de marée associé au moment de chaque impact. On remarque que le régime le plus présent est le swash. Ce

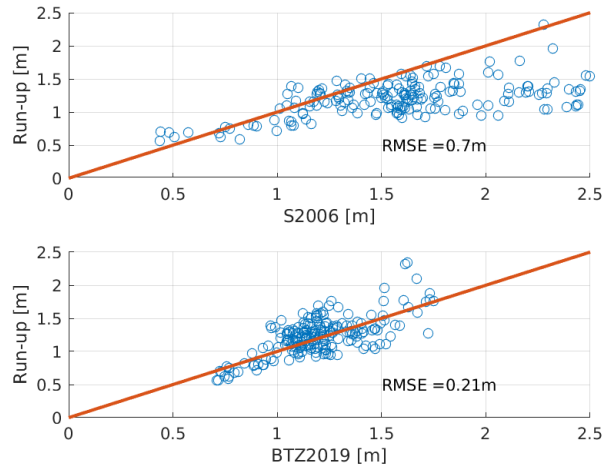


Figure 17: Comparaison entre $R_{2\%}$ mesurées et calculés avec S2006 (haut) et BTZ2019 (bas)

type de régime est observé quelle que soit l'énergie de la houle. Il se peut qu'une houle soit très énergétique, cependant si le niveau de la marée est faible à moyen ($< 3 m$), il n'y aura que des impacts de type swash. L'intensité des impacts est plus importante sur le profil ID01 avec des impacts de type collision et submersion plus nombreux. Cette différence se fait lors d'évènements avec un niveau de marée exceptionnellement haut ($\geq 4 m$). Cette différence peut être due à la géométrie complexe de la plage à cet endroit ou à des phénomènes d'interactions entre les vagues. Ces résultats mettent en évidence le rôle de filtre de la marée sur les régimes d'impacts. Les impacts de type collision ou submersion ne peuvent avoir lieu que pour des niveaux d'eau de marée élevés. De plus, quelle que soit l'énergie de la houle au large, si le niveau d'eau de marée est faible, le seul type d'impact observé au cours de la période d'étude est le swash.

Les valeurs de run-up $R_{2\%}$, calculées à partir des mesures des niveaux d'eau maximum, ont ensuite été analysées en appliquant une méthode de régression linéaire afin de déterminer la corrélation entre $R_{2\%}$ et les différents paramètres des vagues incidentes. Cette étude a permis d'obtenir la formulation BTZ2019 suivante:

$$R_{2\%} = 1.896 H_s^{0.22} s^{0.25} T_p^{0.31} \beta^{0.24} \quad (8)$$

Cette formule empirique permet de mettre en évidence le rôle de la période pic, de la hauteur significative et de la pente du haut de plage sur les valeurs de $R_{2\%}$, conformément aux travaux de Stockdon (2006). Toutefois, contrairement à S2006 (Rmse = 0.7 m) qui tend à surestimer $R_{2\%}$ pour les valeurs les plus élevées (Figure 17), BTZ2019 permet d'améliorer les prévisions de $R_{2\%}$ en prenant en compte l'étalement directionnel (Rmse = 21 cm).

3.2.3 Influence de la morphologie d'une plage sur l'impact d'une tempête

Cas 1: Grande Plage de Biarritz

Le modèle Xbeach de la GPB a été validé à partir des mesures de niveau d'eau réalisées entre le 29 mars et le 4 avril 2017. Au cours de cette période, deux régimes distincts de vague ont été observés: un régime de swell avec une période maximale de 17 s et un H_s de 2m, suivi d'une mer de vent plus énergétique $H_s = 3.5 m$ et de période plus courte de 6 à 10 s. Les

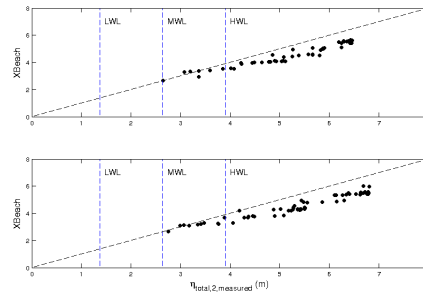


Figure 18: Comparaisons entre niveaux d'eau mesurés et calculés avec Xbeach sur deux transects (ID01 et ID02)

Return period	Hs[m]	Tp [s]	Dir [°]
1	3.9	12.6	315
10	6.7	18	315
50	7.5	19	315

Figure 19: Caractéristiques des tempêtes pour plusieurs périodes de retour

comparaisons entre les niveau d'eau mesurés et simulés le long de deux transects montrent que le modèle XBeach reproduit bien la variation globale des niveaux d'eau.

Toutefois, on remarque que le modèle a tendance à sous-estimer les niveaux d'eau sur les deux profils avec des erreurs de 0,68 m et 0,85 m respectivement pour ID01 et ID02 (figure 18). Les différences sont plus marquées à marée haute ($Rmse = 0.78m$ à ID01 et $Rmse = 0.97m$ à ID02).

Afin d'étudier la variabilité spatiale de la réponse de la Grande Plage de Biarritz à une tempête, 3 scénarios de tempête ont été considérés. Ces scénarios ont été choisis en fonction des résultats de l'analyse bivariée de la base de données de rejou d'état de mer. Les caractéristiques des vagues à 15 m de profondeur pour chaque scénario sont indiquées sur la figure 19. Chaque tempête a été simulée pendant 2 heures et seule la dernière heure a été analysée pour calculer l'occurrence des régimes d'impact de type collision et inondation. Pour toutes les simulations, le niveau d'eau a été fixé à une valeur constante égale à un niveau d'eau maximal moyen de 4,7 m. Cette situation est censée représenter les pires conditions lorsqu'une tempête frappe la plage. La tempête de période de retour de 1 an représente un scénario de référence dont la probabilité d'occurrence est assez élevée. Les simulations montrent que pour ce type de tempête, aucune inondation n'est attendue.

L'hydrodynamique est dominée par les régimes de swash (non illustrés sur la figure) et très peu de collisions se produisent, principalement sur la partie nord de la plage, à gauche du casino (0.4% d'occurrence). Les deux autres scénarios, plus énergétiques, présentent des répartitions de régimes d'impact similaires. L'ensemble de la plage connaîtrait des régimes de collision et des risques d'inondation, avec toujours plus d'événements sur la partie nord de la plage. Le pourcentage d'occurrence d'inondation simulé pour une tempête de période de retour 50 ans atteint 40%, soit le double de l'occurrence maximale qui est calculée pour la tempête de période de retour de 10 ans. La variation de la largeur de la plage sèche, visible sur l'image satellite (figure 20), coïncide avec la distribution des régimes d'impact. Ce résultat suggère que la largeur de la plage sèche pourrait être un bon indicateur de la vulnérabilité de la plage.

Cas 2: Plages sud d'Anglet

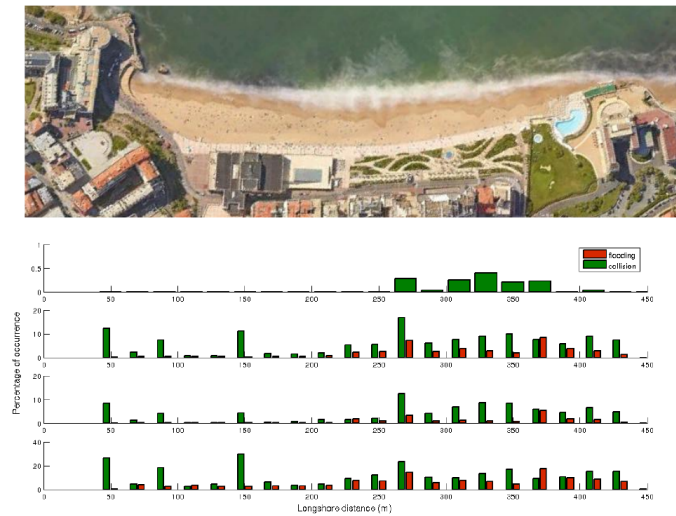


Figure 20: Exemple de carte de risque de submersion sur la GPB

Storm	Power [kW/m]	Duration [h]	Hs[m]	Tp [s]	Σ Power [kW/m]
S1	137.9	9	4.6	15.3	1241.1
S2	151.1	21	4.9	15.4	3173.1
S3	172.6	30	5.2	15.6	5178
S4	172.1	69	5.2	15.4	11874.9
S5	204.4	33	5.6	16.3	6745.2
S6	248.9	36	6.2	15.9	8960.4

Figure 21: Classification des tempêtes au large d'Anglet

Au total, six classes de tempêtes ont été définies comme étant représentatives du site d'étude (figure 21). Les tempêtes de type 4 (S4) et de type 6 (S6) sont les deux plus énergiques en terme de puissance cumulée mais diffèrent dans leur durée moyenne (3 jours contre 1,5 respectivement). Elles ne se produisent que pendant les saisons d'hiver et d'automne, par conséquent, elles peuvent coïncider avec les marées de vives-eaux d'équinoxe d'hiver et d'automne ainsi qu'avec des régimes de vent d'ouest dominant pendant ces périodes. Les types 2-3 et 5 (S2-S3-S5) sont des événements d'intensité moyenne d'une durée d'environ 1 jour. Ils sont présents à l'automne, en hiver et au printemps. La tempête de type 1 (S1), correspond à la tempête la moins énergétique avec une durée moyenne de 9 heures. C'est le seul type de tempête présent pendant la période estivale où le climat des vagues de l'Atlantique Nord est dominé par des conditions calmes. La direction de propagation des vagues pour chaque classe de tempête varie peu et présente une direction principale de 300° (étalement directionnel moyen de 15°).

Les résultats des simulations réalisées pour chaque classe de tempête ont été analysés afin de déterminer des indicateurs de risques. Ces indicateurs ont été classés en 2 catégories :

- indicateurs hydrodynamiques (puissance moyenne d'une tempête, puissance cumulée, niveau d'eau)
- indicateurs morphodynamiques (volume et largeur de plage sèche)

Les analyses des résultats numériques montrent que le niveau d'eau agit comme un filtre entre les régimes d'impact de type swash et collision sur la plage d'Anglet. La valeur seuil au-dessus de laquelle le régime de collision peut se produire est $\geq 3.5 m$. C'est-à-dire 0,86 m

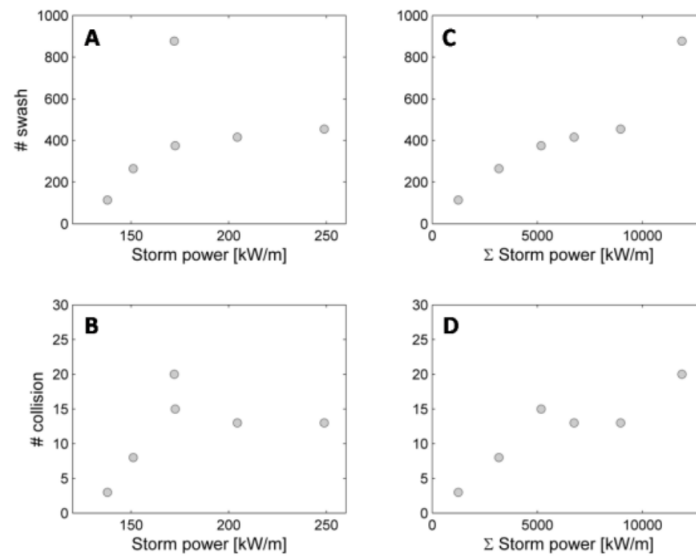


Figure 22: A-B) Puissance moyenne et C-D) puissance cumulée d'une tempête pour différents régimes d'impact

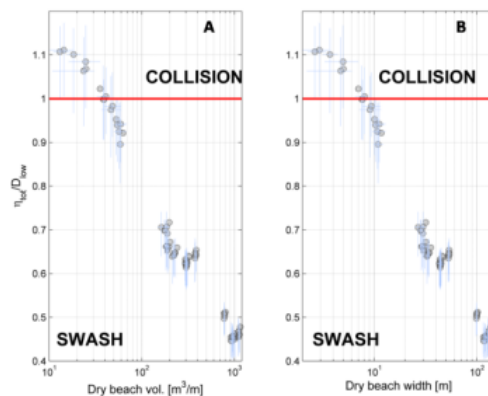


Figure 23: A) Volume et B) largeur de plage sèche en fonction des régimes d'impact (swash et collision)

au-dessus du niveau moyen de l'eau et 1,2 m sous le niveau d'eau à marée haute en période de vives-eaux.

La figure 22 représente le régime d'impact (swash, collision) en fonction de la puissance moyenne d'une tempête et de la puissance cumulée. On n'observe aucune relation linéaire entre le nombre d'événements de swash/collisions et la puissance moyenne des tempêtes ($R = 0.31$ régime swash, $R = 0.42$ régime de collision). Ceci indique que la puissance moyenne d'une tempête n'est pas un indicateur d'impact adapté au site d'Anglet. Cependant, on obtient un meilleur indicateur si l'on tient compte de la durée de la tempête (puissance cumulée d'une tempête). Dans ce cas, on trouve une relation quasi linéaire entre le régime d'impact et la puissance totale de la tempête ($R = 0.94$ régime de swash, $R = 0.90$ régime de collision).

Le rôle du volume et de la largeur de plage sèche est illustré sur la figure 23. Seuls les cas où le régime de collision est possible ont été retenus pour cette étude (niveau d'eau ≥ 3.5 m). La plage sèche est définie par la partie de la plage située au-dessus de la côte 4,7 m (correspondant au

quantile 0,99 du niveau d'eau mesuré par le marégraphe). Les régimes d'impact sont présentés en fonction du volume et de la largeur de plage sèche qui sont calculés en prenant en compte l'évolution de la morphologie de la plage au cours d'une tempête. On remarque une relation logarithmique entre le niveau d'eau normalisé par la côte du pied des enrochements (D_{low}) et le volume/largeur de la plage sèche. Alors que les régimes de swash se produisent lorsque que le volume/largeur de plage sèche est important, les secteurs où le volume de plage sèche est inférieur à $54.5 m^3/m$ ou la largeur de plage sèche est d'environ $11 m$, des régimes d'impact de type collision sont susceptibles de se produire.

3.3 Indicateurs de danger pour la digue de l'Artha

Le prototype de système de surveillance de la digue de l'Artha, qui est encore en développement, propose actuellement différentes informations sous forme de bulletin en prenant comme données d'entrée les données observées (pour l'instant uniquement les pressions d'impact) et les données simulées (pour l'instant vagues et hauteur d'eau provenant du site du SHOM). Dès qu'une tempête est détectée sur les 4 prochains jours, le bulletin est émis. Il contient des informations sur les 3 risques identifiés (déplacement des blocs, maçonnerie, stabilité globale). Le dernier risque étant comme déjà évoqué précédemment, purement indicatif, car une rupture globale signifierai la ruine de l'ouvrage et cela n'a heureusement jamais été observé.

Différents texte et graphes sont disponibles dans le bulletin. Les figures 24, 25, 27 et 26 montrent quelques exemples dans la configuration actuelle du système.

Ainsi, pour une tempête prévue, le bulletin propose un évaluation du risque associé au déplacement des blocs (trait rouge, Figure 24) sur une échelle à 4 niveaux symbolisée par des couleurs différentes. Le graphe contient également les dommages prédits par le modèle pour l'ensemble des tempêtes historiques pour permettre au gestionnaire de situer l'évènement en cours vis à vis d'événements de référence.

Le risque endommagement local de la maçonnerie de la muraille est évalué par la pression maximale enregistré durant la tempête sur un des capteurs du réseau. Le risque est gradué en 3 niveaux (Figure 25). La pression maximale mesurée durant la tempête en cours est données par le point le plus à droite du graphe et est à comparer aux événements précédents qui apparaissent aussi sur le graphe. A noter que la pression maximale enregistrée à ce jour à recalculée à chaque tempête.

Enfin, le Figure 26 montre un exemple de sortie du système pour un jour donné en ce qui concerne le risque de glissement ou retournement de la muraille). Ce risque est à comparer aux événements historiques qui sont disponibles Figure 27.

3.4 Système de mesures temps réel (4.4.1)

3.4.1 Système temps réel de mesures des pression d'impact sur la digue d'Artha

Les résultats de mesures nous ont permis de mettre en évidence certaines topologies d'impact semblables à certaines études réalisées en laboratoire ou sur des structures côtières. Par défaut, à chaque début d'heure, la station de mesure lance automatiquement une acquisition à 10kHz pendant 10 minutes. La figure 28 montre le signal capté sur 10 minutes le 9/02/2016. on peut voir les impacts périodiques des vagues sur la digue. En s'intéressant à un seul impact les topologies les plus fréquemment constatées sont disponibles en figure 29 et en figure 30.

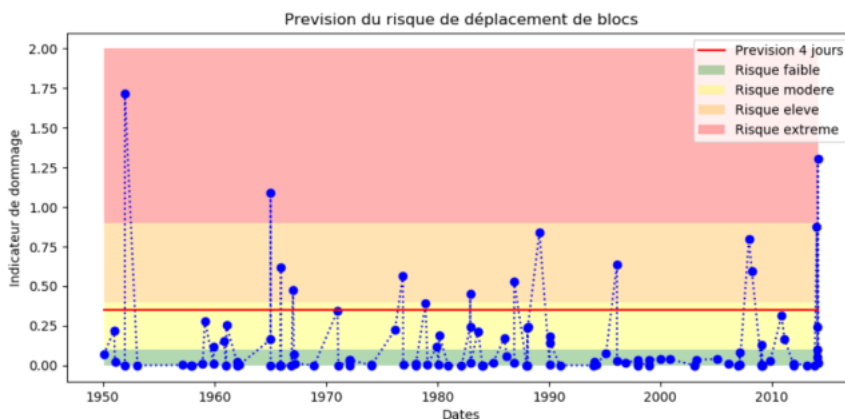


Figure 24: Classement par le système automatique de surveillance de l'ouvrage d'une tempête détectée (trait rouge) typiquement 4 jours à l'avance pour le risque déplacement de blocs sur un graphe contenant le niveau de dommage attendu pour les tempêtes ayant frappé la côte basque entre 1950 et 2015.

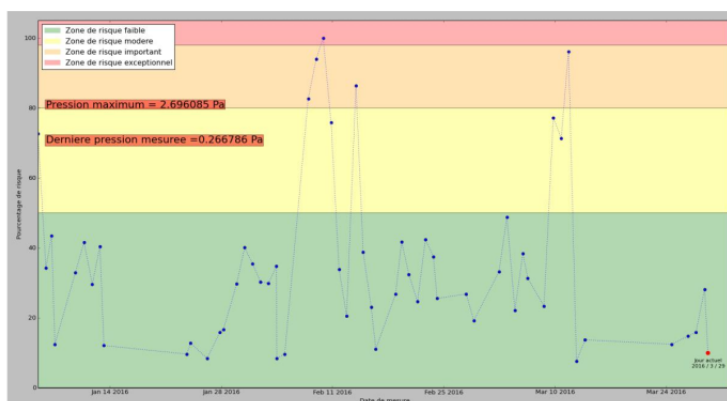


Figure 25: Endommagement local de la maçonnerie : exemple de sortie du système automatique de surveillance pour une période test de mesure en 2016

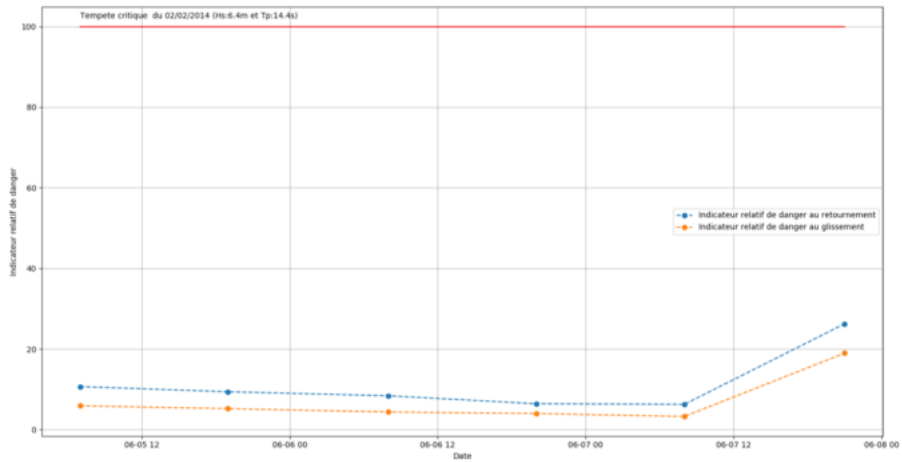


Figure 26: Exemple de prévision à 3 jour au mois de juin 2019 pour le risque de stabilité globale (glissement de la muraille et retournement)

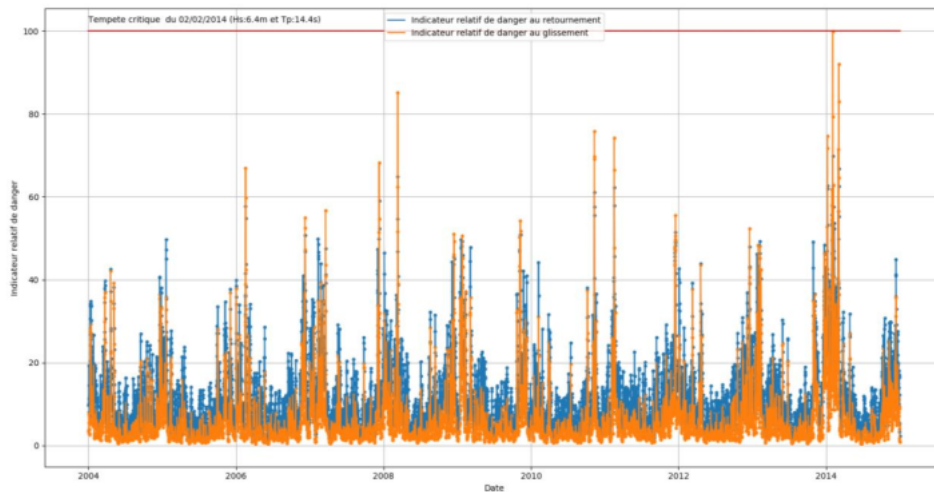


Figure 27: Évolution du risque de stabilité globale de la muraille de la digue de l'Artha depuis 1950 tel que calculé par le prototype de système automatique de surveillance

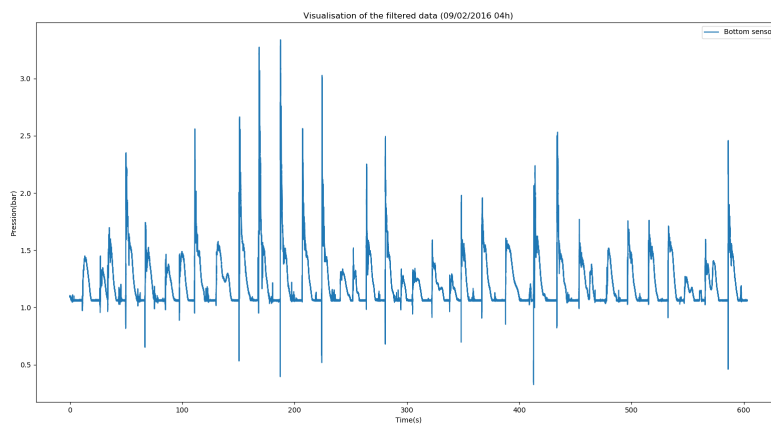


Figure 28: Signal enregistré pendant 10 minutes le 9/02/2016 à 4h.

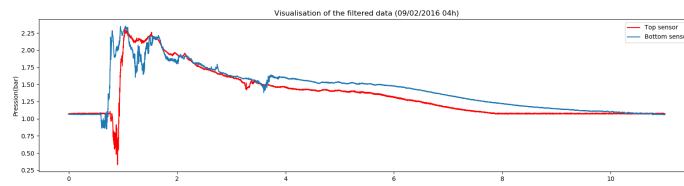


Figure 29: Signal d'impact d'une vague capté le 9/02/2016

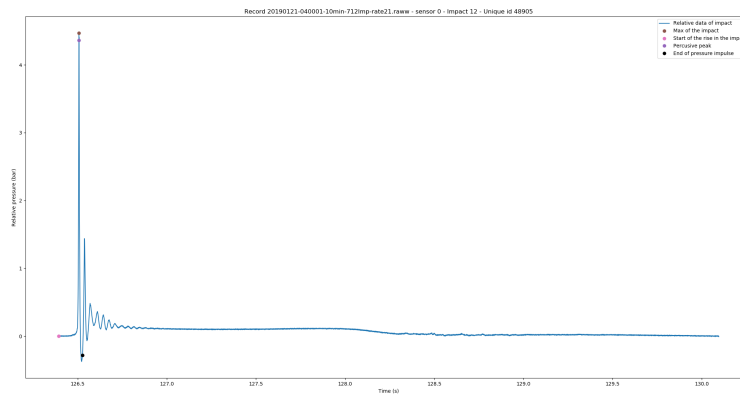


Figure 30: Signal d'impact d'une vague capté le 21/01/2019

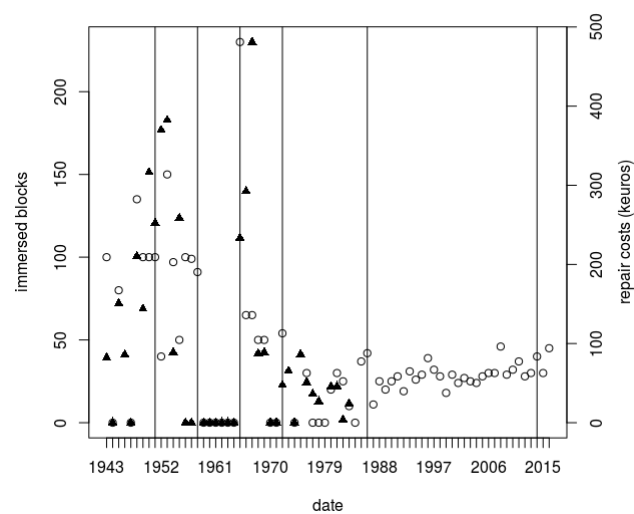


Figure 31: Evolution temporelle des (o) blocs immergés annuels et (Δ) les coûts de réparation de la maçonnerie du brise-lames d'Artha et de Socoa. Marque de lignes verticales : années de tempêtes exceptionnelles.

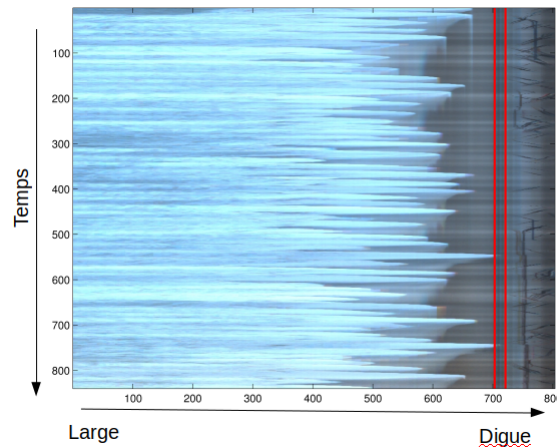


Figure 32: Collision du jet de rive avec la digue située en haut de plage (GPB)

3.4.2 Système de mesures par caméras vidéo des phénomènes de submersion

Les dispositifs de mesure vidéométriques autonomes mis en place sur les sites de la Grande Plage de Biarritz et des plages sud d'Anglet permettent de suivre les événements de tempête en quasi temps réel. Toutes les images sont accessibles via un site internet dédié, hébergé par l'université de Pau et des Pays de l'Adour. Ce site est accessible à l'adresse suivante : <http://sirena.univ-pau.fr/>.

Sur les images timestack enregistrées par la station de Biarritz, il est possible de déterminer précisément le nombre d'événements de collision et/ou franchissement qui se sont produits toutes les 15 minutes en comparant la position de la ligne d'eau avec celles de la base et du sommet de la digue matérialisées par des lignes rouges (exemple sur la figure 32).

References

- [1] Stéphane Abadie, Marion Beauvivre, Estelle Egurrola, Christine Bouisset, Isabelle Degremont, and Florian Arnoux. A database of recent historical storm impact on the french basque coast. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1):721–725, 2018.
- [2] Florian Arnoux, Stéphane Abadie, Xavier Bertin, and Ivan Kojadinovic. A database to study storm impact statistics along the basque coast. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1):806–810, 2018.
- [3] Xavier Bertin, Kai Li, Aron Roland, and Jean-Raymond Bidlot. The contribution of short-waves in storm surges: Two case studies in the bay of biscay. *Continental Shelf Research*, 96:1–15, 2015.
- [4] Sam. Cox. pytides. <https://github.com/sam-cox/pytides>, 2013.
- [5] Iñaki de Santiago, Denis Morichon, Florian Arnoux, Matthias Delphey, and Irati Epelde. Risk mapping assessment by means of probabilistic storm scenarios in a partially engineered beach: Anglet, france. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1):796–800, 2018.

- [6] Arnaud Dejeans. Bloc de 50 tonnes déposé sur une digue à saint-jean- de-luz : j'ai eu une chance incroyable. *Sud Ouest*, 2017.
- [7] Kalnay E., Kanamitsu M., Cistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G. and Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K., Ropelewski C., Wang J., Leetma A., Reynolds R., Jenne R., and Joseph D. The ncep/ near reanalysis project. *Bul. of the American Met. Soc.*, 77:437—471, 1996.
- [8] GINGER. Diagnostic des digues artha et socoa - port de saint jean de luz / ciboure. Technical report, 2011.
- [9] Yoshimi Goda. New wave pressure formulae for composite breakwaters. In *Coastal Engineering 1974*, pages 1702–1720. 1975.
- [10] Alain Hénaff. *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines: guide méthodologique*. Équipe Littoral, environnement, télédétection, géomatique, 2014.
- [11] L Rousseeuw Kaufman and P Rousseeuw. Pj (1990) finding groups in data: An introduction to cluster analysis. *Hoboken NJ John Wiley & Sons Inc*, 725.
- [12] B Larroque, P Arnould, F Luthon, PA Poncet, A Rahali, and S Abadie. In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater: Preliminary results. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1):1086–1090, 2018.
- [13] Denis Morichon, Iñaki De Santiago, Matthias Delpy, Tom Somdecoste, Aurélien Callens, Benoit Liquet, Pedro Liria, and Philippe Arnould. Assessment of flooding hazards at an engineered beach during extreme events: Biarritz, sw france. *Journal of Coastal Research*, 85(sp1):801–805, 2018.
- [14] P Poncet, Stéphane Abadie, B Larroque, Benoit Liquet, and Damien Sous. Mesures in-situ d'impacts de vagues sur une digue composite in-situ measurements of wave impacts on a composite breakwater. In *Digues 2019 3ème Colloque sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondation*, 2019.
- [15] Dano Roelvink, Ad Reniers, AP Van Dongeren, Jaap van Thiel de Vries, Robert McCall, and Jamie Lescinski. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12):1133–1152, 2009.
- [16] Aaron Roland. Development of {WWM II}: Spectral wave modelling on unstructured meshes. 2008.
- [17] Takahashi S., Tanimoto K., and Shimosako K. A proposal of impulsive pressure coefficient for design of composite breakwaters. In *Proc. of the International Conference of Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction*, pages 489–504. 1994.
- [18] Asbury H Sallenger Jr et al. Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3), 2000.
- [19] Hilary F Stockdon, Rob A Holman, Peter A Howd, and Asbury H Sallenger. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7):573–588, 2006.

-
- [20] R Core Team et al. R: A language and environment for statistical computing. 2013.
- [21] Jentsje W Van der Meer. Application and stability criteria for rock and artificial units. *Dikes and revetments, Rotterdam/Brookfield: AA Balkema*, pages 191–215, 1998.
- [22] Yinglong Zhang and Antonio M Baptista. Selfe: a semi-implicit eulerian–lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean modelling*, 21(3-4):71–96, 2008.