



Projet POCTEFA MAREA (2016-2019)

Modélisation et Aide à la décision face aux Risques côtiers en Euskal Atlantique (Pays Basque)



RAPPORT DE SYNTHÈSE DES TRAVAUX MENÉS PAR RIVAGES PRO TECH

*Tom Somdecoste, Nikola Danglade, Matthias Delpy
Centre Rivages Pro Tech de SUEZ*



Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	3
1.1	Le projet MAREA : rappel du contexte et des objectifs.....	3
1.2	Contributions de RPT aux actions et livrables du projet	3
1.3	Synthèse des jeux de données livrés	4
1.4	Objectif et organisation du présent document	5
2.	METHODE.....	6
2.1	Composantes de la démarche sur le risque vagues-submersion	6
2.2	Campagne de mesures sur le site pilote de Biarritz (Action 3).....	6
2.3	Modélisation de l'aléa vagues-submersion (Actions 3 et 4).....	12
2.4	Applications et démonstration (Action 4)	14
3.	RESULTATS	16
3.1	Campagne de mesures sur le site pilote de Biarritz (Action 3).....	16
3.2	Modélisation de l'aléa Vagues-Submersion (Actions 3 et 4).....	21
3.3	Applications et démonstration (Action 4)	32
4.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	35
	Références.....	36

1. INTRODUCTION

1.1 Le projet MAREA : rappel du contexte et des objectifs

Le projet MAREA (2016-2019) a été coordonné par la Communauté d'Agglomération Pays Basque (CAPB, chef de file) avec l'appui du Groupement d'Intérêt Scientifique Littoral Basque, et a rassemblé les partenaires suivants : le Gouvernement Basque (DAEM, Direction de la Sécurité Civile ; Euskalmet, Agence météorologique), l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), AZTI Tecnalia et Rivages Pro Tech (SUEZ).

Les objectifs principaux du projet MAREA étaient (i) d'améliorer la connaissance des risques liés aux tempêtes sur le littoral basque transfrontalier, (ii) de déployer des systèmes locaux de surveillance continue des risques côtiers, (iii) de mettre en place des outils de modélisation opérationnelle à haute résolution pour la prévision des risques littoraux à l'échelle locale, et enfin (iv) de développer la culture du risque et les pratiques associées sur la bande côtière basque.

Dans le cadre du projet, 4 typologies de risque ont été ciblées à travers un ensemble de 7 sites pilotes. Les typologies de risque et sites pilotes associés ont été les suivants :

- 1/ Risque vagues-submersion marine sur plages urbaines : sites pilotes Biarritz et Zarautz ;
- 2/ Risque d'érosion sur plages sableuses et mixtes : sites pilotes Anglet, Bidart-Guéthary, San Sebastian, Zarautz ;
- 3/ Risque lié aux impacts des vagues sur les ouvrages de protection : Saint-Jean-de-Luz, San Sebastian ;
- 4/ Risque lié à l'agitation en zone portuaire et chenaux de navigation : Bermeo.

Pour chacune de ces typologies de risque, des outils d'observation et/ou de modélisation ont été développés, évalués et mis en œuvre, pour produire un ensemble d'indicateurs d'aide à la décision à destination des collectivités gestionnaires.

Afin d'atteindre ces objectifs, les réalisations du projet ont été décomposées en 5 actions complémentaires :

- Action 1 : Gestion de projet ;
- Action 2 : Activités de communications ;
- Action 3 : Caractérisation des phénomènes naturels côtiers observés le long de la côte basque sous l'effet d'événements tempétueux ;
- Action 4 : Développement et démonstration d'outils transfrontaliers d'aide à la décision pour une gestion opérationnelle des risques côtiers
- Action 5 : Initier une réflexion transfrontalière sur la culture du risque.

1.2 Contributions de RPT aux actions et livrables du projet

Durant le projet MAREA, RPT a été le partenaire coordinateur de l'Action 4, et a également contribué activement à l'Action 3. Dans une moindre mesure, RPT a également contribué de manière transverse aux Actions 2 et 5.

Les travaux menés par RPT se sont concentrés sur le risque vagues-submersion, avec pour site d'application principal la Grande Plage de Biarritz. Plus précisément, les contributions de RPT ont porté sur les activités et livrables résumés dans le

Tableau 1 ci-dessous.

Activité	Livrables	Contributions RPT
Activités 3.1 : Caractérisation de l'hydrodynamisme côtier basque et signatures historiques des évènements tempétueux	Livrable 3.1.1 : 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 évènements extrêmes	- Coordination et participations aux campagnes de mesures menées sur le site pilote de la Grande Plage de Biarritz. - Développement d'une modélisation spectrale à haute résolution sur la zone côtière basque - Développement d'une modélisation ultra-locale sur le site pilote de Biarritz.
Activité 3.2 : Identification des stocks et des transits sédimentaires	Livrable 3.2.1 : Réaliser un état zéro des connaissances sur les dynamiques sédimentaires le long de la côte basque	Réalisation, traitement et mise à disposition de simulations d'état de mer pour alimentation des modélisations hydro-sédimentaires sur le site de Bidart-Guéthary.
Activité 3.3 : De l'échange de données scientifiques transfrontalières à la définition d'indicateurs locaux d'aide à la gestion	Livrable 3.3.1 : indicateurs locaux et transfrontaliers d'aide à la gestion des risques côtiers.	Contribution à la définition des indicateurs d'aide à la gestion pour le risque vagues-submersion. Application et évaluation sur le site de Biarritz.
Activité 4.2 : Systèmes de prévision opérationnelle des évènements tempétueux à l'échelle de la plage	Livrable 4.2.1 : Chaîne de modélisation océanographique pour la prévision opérationnelle des phénomènes vagues-submersion à échelle ultra-locale.	Mise en place du système opérationnel vagues (côte basque française) et submersion (pilote Biarritz).
Activité 4.3 : Mise en application et évaluation de dispositifs ultra-locaux d'aide à la gestion opérationnelle des risques côtiers	Livrable 4.3.1 : Evaluation du test d'utilisation du prototype de dispositif ultra-local pour l'aide à la gestion opérationnelle des risques côtiers.	Démonstration du système opérationnel pendant 2 saisons consécutives.
Activité 5.1 : Formation d'un groupe de travail transfrontalier	Livrable 5.1.1 : Actes et rapports des ateliers.	Participation aux ateliers.

Tableau 1 : récapitulatif des contributions de RPT aux activités et livrables du projet

En complément, RPT a contribué aux actions de communication et dissémination des résultats du projet (Action 2) à travers sa participation à des communications scientifiques écrites (revues scientifiques) et orales (conférences), à des conférences de presse, à des articles de presse, et enfin aux vidéos de promotion du projet.

1.3 Synthèse des jeux de données livrés

Un certain nombre de jeux de données a été produit et livré à l'issue du projet. La quasi-totalité de ces données a été produite de manière collaborative par l'ensemble des partenaires de MAREA. Les principaux jeux de données auxquels RPT a contribué sont listés ci-dessous :

- 1/ Mesures des capteurs sous-marins déployés en zone subtidale durant les 3 campagnes MAREA (2017, 2018, 2019) ;
- 2/ Mesures des capteurs de pression déployés sur la Grande Plages de Biarritz (2018, 2019) ;
- 3/ Mesures de pression et de vent de la station météorologique de Biarritz Marbella sur la durée du projet (2016 – 2019) ;

- 4/ Résultats des simulations rétrospectives du modèle d'état de mer RPT sur la durée du projet (hivers de 2016-2017 à 2018-2019) ;
- 5/ Résultats des simulations du modèle de submersion de la Grande Plage de Biarritz sur les campagnes MAREA (2018 et 2019).

1.4 Objectif et organisation du présent document

Le présent rapport a pour objectif de présenter une synthèse des contributions de RPT au projet MAREA. Il convient ici de noter que la quasi-totalité des travaux associés ont été menés en collaboration avec les partenaires du projet, notamment AZTI et UPPA pour les investigations scientifiques et les réalisations techniques. On tentera toutefois dans ce document de mettre en exergue les principaux apports de RPT au sein de l'effort collectif de recherche et d'innovation engagé dans MAREA.

Par ailleurs, une grande quantité de données, simulations de modèles et autres investigations a été produite durant les 3 années du projet, dont l'ensemble ne pourra pas être rapporté de manière exhaustive dans le présent document, destiné à présenter une vue d'ensemble synthétique du projet MAREA. Ainsi, dans un souci de concision, le présent rapport ne fournit pas une description exhaustive des travaux entrepris mais plutôt un résumé des principales réalisations et résultats obtenus. Le lecteur est invité à se référer aux différentes communications et publications réalisées durant le projet pour des compléments d'information.

Dans ce contexte, le présent document est organisé comme suite. La Section 2 fournit une description des méthodologies employées. Les résultats obtenus sont synthétisés en Section 3. Enfin, la Section 4 récapitule les principales conclusions obtenues à l'issue du projet et les perspectives associées.

2. METHODE

2.1 Composantes de la démarche sur le risque vagues-submersion

Les principales contributions de RPT au projet MAREA se sont portées sur le risque vagues-submersion, et le site pilote principal associé de la Grande Plage de Biarritz. Afin d'améliorer la connaissance des processus en jeu sur ce site durant les épisodes de tempête, la méthodologie mise en œuvre s'est appuyée sur la combinaison de

- L'acquisition et l'analyse d'observations locales en conditions de tempêtes ;
- La modélisation numérique des vagues et des submersions à l'échelle de la plage.

Ces deux composantes ont été déclinées dans les tâches du projet relatives à l'analyse de processus et à la définition d'indicateurs pertinents pour l'aide à la gestion (Action 3) et à l'application opérationnelle des solutions implémentées pour la surveillance continue et la prévision à court terme. Les méthodes relatives à ces différents aspects sont présentées aux paragraphes suivants.

2.2 Campagne de mesures sur le site pilote de Biarritz (Action 3)

2.2.1 Périodes couvertes par les campagnes

Trois campagnes de mesures de terrain ont été réalisées sur le littoral de Biarritz durant le projet. Les fenêtres temporelles correspondantes sont les suivantes :

- MAREA 2017 : du 22/02/2017 au 27/04/2017 ;
- MAREA 2018 : du 31/01/2018 au 03/04/2018 ;
- MAREA 2019 : du 16/01/2019 au 29/03/2019.

Sur ces 3 fenêtres, les déploiements effectués ont permis de collecter un ensemble de mesures simultanées de différents paramètres. Une série de capteurs a été déployée et des relevés ont été réalisés sur différentes zones couvrant la zone littorale subtidale, la zone intertidale et le haut de la Grande Plage de Biarritz. Durant les 3 périodes de mesures, plusieurs événements de tempête ont été observés à l'aide de l'instrumentation déployée.

Ces données *in situ* ont apporté des informations sur le niveau d'eau et les vagues dans la zone littorale et sur la Grande Plage de Biarritz, les informations fournies par le système de mesures vidéométrique continue (voir rapport de synthèse UPPA).

2.2.2 Protocole expérimental commun

Mesures bathymétriques

Durant les 3 campagnes MAREA 2017, 2018 et 2019, des levés bathymétriques ont été réalisés dans la zone littorale de la Grande Plage. Une série de levés a été effectuée au début des fenêtres temporelles de chaque campagne, dans la zone allant d'une profondeur de -15m CM jusqu'à approximativement +1 m CM (voir Figure 1).

Lors des campagnes MAREA 2017 et 2018, un second levé a également été effectué dans la même zone à la suite d'un épisode de tempête remarquable, afin d'évaluer les modifications bathymétriques induites par cet épisode.

Les levés bathymétriques ont été coordonnés par le partenaire UPPA. Le lecteur est invité à se référer au rapport de synthèse UPPA pour plus de détails.

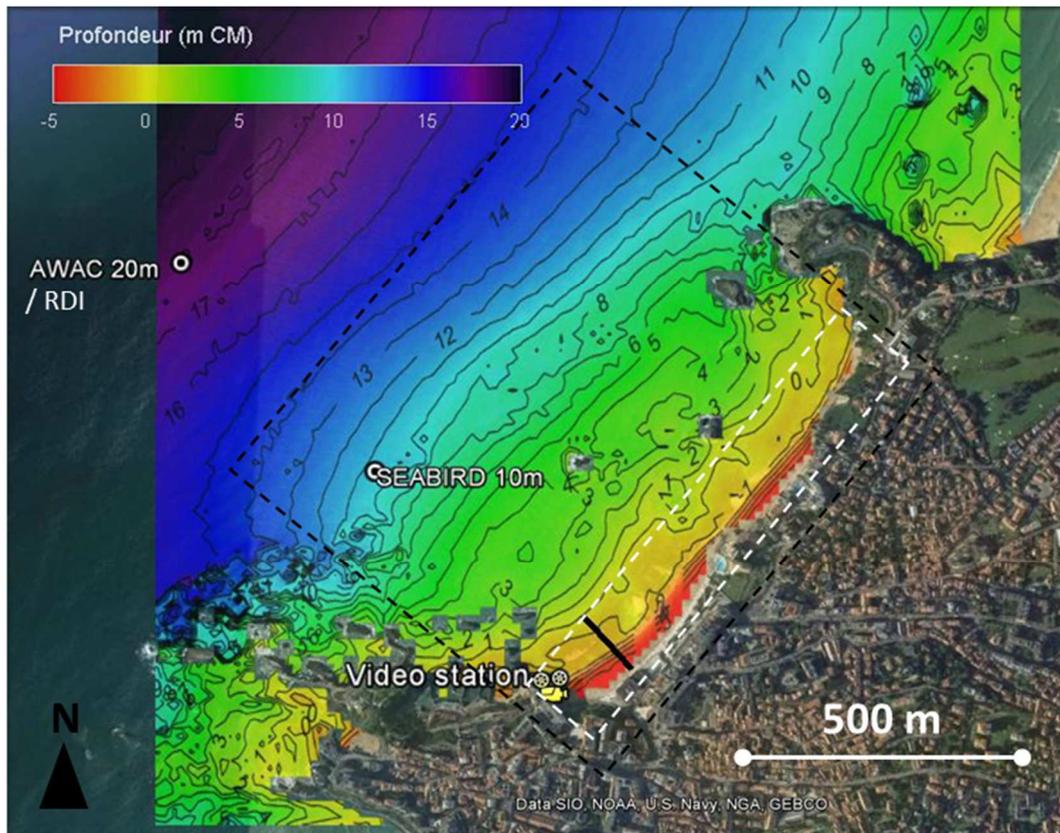


Figure 1 : Schéma du protocole expérimental commun aux 3 campagnes MAREA. Trait pointillé noir : zone de levé bathymétrique. Trait pointillé blanc : zone des mesures topographiques. Points noirs cerclés de blanc : positions des deux capteurs sous-marins en zone subtidale. La localisation de la station vidéométrique de la Grande Plage est également indiquée.

Mesures topographiques

Durant les 3 campagnes MAREA, des mesures topographiques ont été acquises sur la Grande Plage de Biarritz. Ces mesures ont été effectuées sur l'estran en période de grandes marées, courant ainsi la zone située entre environ +0.5 m CM et le haut de plage (~ +8 m CM).

Chaque année, un levé topographique complet de la plage a été réalisé en début de période de mesures, de manière simultanée au levé bathymétrique décrit plus haut. De même, un levé topographique complet a été effectué à la suite des mesures intertidales intensives durant les campagnes MAREA 2017 et MAREA 2018.

Ces levés topographiques ponctuels ont été complétés par une série de levés intensifs avant, pendant, et après les épisodes de tempêtes les plus importantes durant les 3 hivers. Ces levés ont ciblé principalement les profils de mesure vidéométrique, pour permettre une évaluation du runup à partir de la vidéo.

En complément, un levé du quai de la Grande Plage et de l'esplanade au Sud du Casino a également été réalisé durant la première campagne (MAREA 2017).

L'ensemble de ces levés topographiques a été coordonné par le partenaire UPPA. Le lecteur est invité à se référer au rapport de synthèse UPPA pour plus de détails.

Mesures de vagues et niveau d'eau en zone subtidale

Durant les 3 campagnes MAREA, 2 capteurs hydrodynamiques ont été déployés en zone subtidale : un ADCP à une profondeur proche de -20 m CM et un capteur de pression à une profondeur proche de -10 m CM. Les positions correspondantes sont données en Figure 1.

L'ADCP fournit une mesure horaire du spectre directionnel d'état de mer à intervalles réguliers (bursts de 20 min, fréquence 1 Hz), ainsi qu'une mesure du niveau d'eau moyen. Un AWAC Nortek 1 MHz a été déployé lors des campagnes MAREA 2017 et 2018, et a malheureusement été perdu lors du second déploiement. Un RDI Teledyne 600 kHz a été utilisés lors de la campagne MAREA 2019.

Le capteur de pression fournit une mesure de pression continue, à haute fréquence (2 Hz), près du fond marin. A partir de cette mesure, le spectre fréquentiel d'état de mer peut être reconstitué, ainsi que le niveau d'eau moyen.

Le déploiement des capteurs en zone subtidale a été coordonné par le partenaire AZTI. Le lecteur est invité à se référer au rapport de synthèse AZTI pour plus de détails.

2.2.3 Protocole expérimental spécifique : campagne MAREA 2018

Durant la campagne MAREA 2018, un déploiement complémentaire pour l'acquisition de mesures intensives en zone intertidale a été réalisé durant l'épisode de tempête qui s'est déroulé du 31/01/2018 au 02/02/2018. Un ensemble de 7 capteurs de pression a été installé le long d'un profil cross-shore, d'une profondeur proche de 0 CM jusqu'au haut de plage à environ +6.5 CM. En complément, 2 capteurs de pression ont été déployés à deux autres positions longshore, à une profondeur proche de +0.5 CM. La position des capteurs est fournie en Figure 2.

Le long du profil cross-shore, 3 capteurs ont été installés sur la partie plate la plus profonde du profil (« terrasse »), afin d'acquérir des données en zone de déferlement (CP7, CP6, CP5). Puis, 3 autres capteurs ont été installés sur la partie la plus pentue du profil reliant la terrasse au haut de plage (CP4, CP3, CP2) afin d'acquérir des données dans la zone de swash. Enfin, le dernier capteur a été fixé au pied du mur du quai situé tout en haut de la plage (CP1). La position des 7 capteurs relativement aux profils topographiques mesurés durant leur déploiement est donnée en Figure 3.

Afin d'assurer leur maintien dans les conditions très énergétiques de la tempête, les capteurs ont été fixés sur des perches métalliques enfoncées sur une profondeur d'environ 2 m sous le sable. La mise en place des perches a été réalisée à l'aide d'une motopompe injectant de l'eau sous pression pour liquéfier le sédiment (Figure 4).

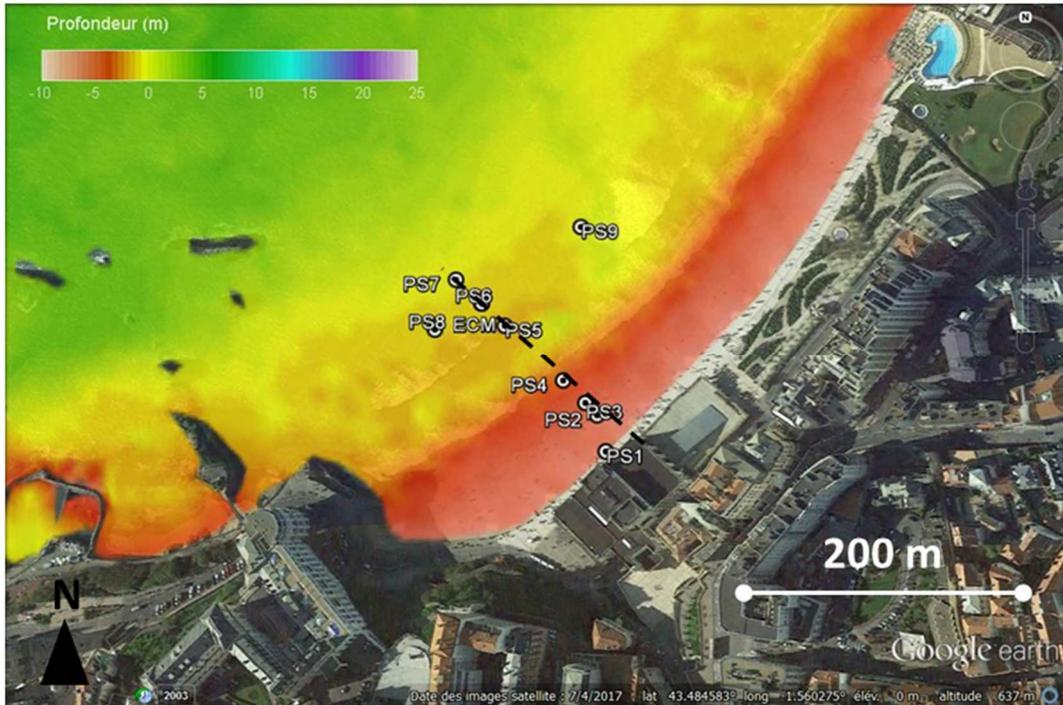


Figure 2 : Position des capteurs de pression déployés sur l'estran durant la campagne MAREA 2018.

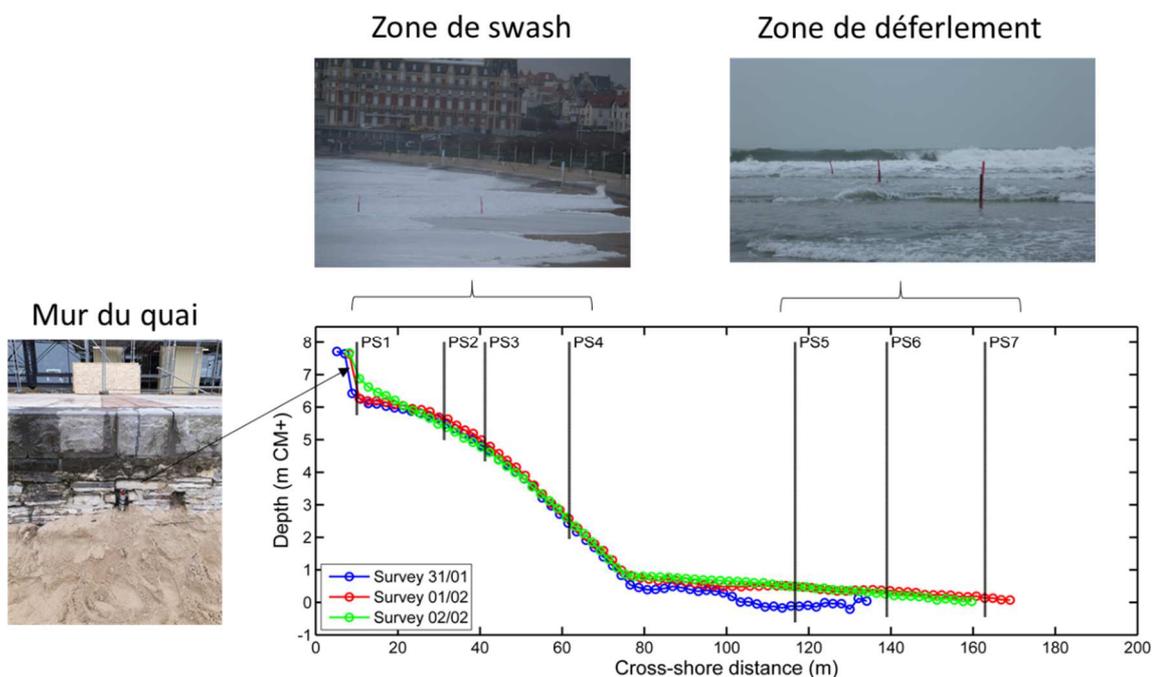


Figure 3 : Profils topographiques mesurés et localisation des capteurs de pression le long du profil cross-shore durant la campagne MAREA 2018.



Figure 4 : Photographies prises durant le déploiement MAREA 2018. Gauche : forage pour les perches de fixation. Centre : installation d'un capteur sur la perche. Droite : installation finalisée.

Les capteurs de pression déployés fournissent une mesure de pression à haute fréquence (2 à 16 Hz) à proximité du fond. A partir de cette mesure, l'élévation de la surface libre a pu être reconstituée pour l'ensemble des capteurs. Pour les capteurs installés en zone de déferlement, le spectre fréquentiel d'état de mer a également été reconstitué.

En complément, un courantomètre électromagnétique (ECM) a été co-localisé avec le capteur CP6 afin d'obtenir une mesure de vitesse du courant. Toutefois, en raison d'un problème de fonctionnement du courantomètre, il n'a pas été possible d'exploiter les données correspondantes.

Afin d'être mené à bien, ce déploiement a nécessité une logistique exigeante et une large mobilisation. Ainsi, l'ensemble des partenaires de MAREA s'est impliquée sur cette tâche collaborative. De plus, il faut rappeler que le déploiement des capteurs *in situ* a été complété par les mesures topographiques intensives (UPPA) décrites au paragraphe précédent, et par les données vidéométriques de la station de la Grande Plage de Biarritz.

2.2.4 Protocole expérimental spécifique : campagne MAREA 2019

Durant la campagne MAREA 2019, un nouveau protocole a été adopté afin d'acquérir un jeu de données complémentaire de MAREA 2018. Les déploiements effectués ont ciblé le quai en haut de plage, dans le but de compléter l'information fournie par la vidéométrie concernant les franchissements de l'ouvrage.

Ainsi, 3 capteurs de pression ont été déployés au pied du quai de la Grande Plage durant une série d'épisodes de tempête. La position des capteurs est donnée en Figure 5 et l'installation correspondante est illustrée en Figure 6. Le déploiement a été effectué durant 4 épisodes de tempêtes majeurs de l'hiver 2018-2019 :

- Le 10/12/2018,
- Du 22 au 24/01/2019,
- Le 02/02/2019,
- Du 18 au 22/02/2019.

Pour ce déploiement, le signal de pression à haute fréquence fourni par les capteurs a été exploité pour obtenir une information sur la hauteur d'eau au-dessus du capteur, à partir de laquelle une hauteur d'eau franchissante a pu être déduite.

De plus, pour chacun des épisodes ci-dessous, des mesures topographiques intensives ont également été acquises sur la plage (UPPA), comme décrit précédemment, tandis que la station vidéométrique de la Grande Plage de Biarritz a également collecté des données.

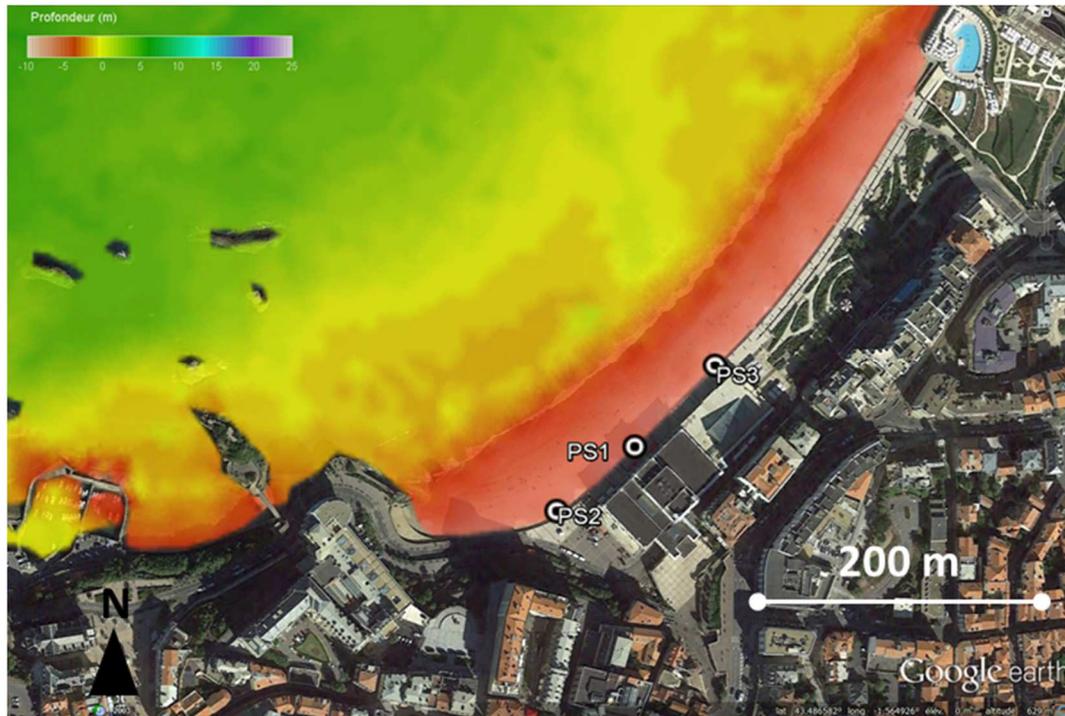


Figure 5 : Position des 3 capteurs de pression déployés au pied du quai de la Grande Plage de Biarritz durant la campagne MAREA 2019.

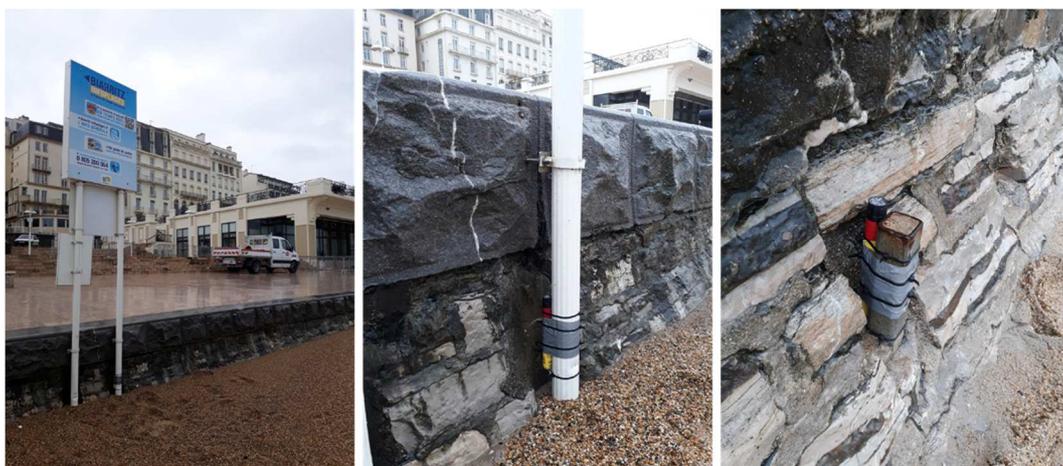


Figure 6 : Photographies prises durant le déploiement MAREA 2019. Capteurs de pression fixés au pied du mur du quai de la Grande Plage de Biarritz.

2.3 Modélisation de l'aléa vagues-submersion (Actions 3 et 4)

2.3.1 Différentes approches de modélisation complémentaires

La seconde composante des investigations menées dans MAREA concernant le risque vagues-submersion sur le site de Biarritz s'est appuyée sur la modélisation numérique. L'objectif du travail de modélisation est (i) de compléter les informations apportées par les campagnes de mesures pour l'analyse des processus en jeu dans la submersion à l'échelle de la plage, et (ii) de fournir une solution opérationnelle pour intégration au sein d'un système opérationnel de prévision (voir paragraphe suivant). La spécificité des modélisations développées dans MAREA est leur représentation des vagues et de l'aléa submersion à l'échelle fine de la plage. Des modélisations à haute résolution ont ainsi été mises en oeuvre et optimisées en se focalisant sur la simulation des vagues et de l'hydrodynamique de la limite de la zone côtière jusqu'au haut de plage.

Afin d'obtenir une représentation de l'ensemble des facteurs déterminant les vagues et la submersion à l'échelle de la plage, différentes approches de modélisation complémentaires ont été mises en oeuvre :

- Modélisation de la propagation des états de mer dans la zone côtière par une approche spectrale ;
- Modélisation de la marée et de la surcote atmosphérique par une approche hydrostatique à phase-moyennée ;
- Modélisation des vagues et de la submersion à l'échelle de la plage par des approches paramétriques et par un modèle Boussinesq à phase-résolue.

2.3.2 Modélisation des états de mer en zone côtière

Pour représenter la propagation des vagues dans la zone côtière, un modèle spectral a été mis en oeuvre. Ce modèle est basé sur le code SWAN® (Booij et al. 2004; Booij, Ris, and Holthuijsen 1999) dans sa version non-structurée (Dietrich et al. 2012; Zijlema 2010). Il offre une représentation de l'évolution de l'état de mer à travers la zone côtière jusqu'aux plages, sous l'effet des systèmes de vagues incidents au large, de la génération locale par le vent et des variations de niveau d'eau engendrées par la marée.

Afin d'intégrer les effets de la bathymétrie locale très hétérogène sur la propagation des vagues, une stratégie de maillage non-structuré à résolution adaptative est employée dans cette modélisation. Le calcul intègre les principaux processus physiques affectant les vagues en zone côtière, notamment la génération locale par le vent, la dissipation par frottement au fond, la réfraction, le levage et le déferlement bathymétrique.

Ce modèle a fait l'objet d'un effort continu de développement par RPT au cours de ces dernières années, en particulier dernièrement durant le projet Eurorégion WAKE (2014-2015). Cet effort a été poursuivi dans MAREA, en s'appuyant notamment sur les jeux d'observations collectés lors des campagnes MAREA.

2.3.3 Modélisation de la marée et de la surcote atmosphérique

Afin de représenter l'hydrodynamique dans la zone côtière étudiée, un modèle hydrostatique à phase-moyennée a été mise en place et testé. Cette modélisation avait pour objectif de représenter la propagation de l'onde de marée à travers la zone côtière, ainsi que la surcote atmosphérique locale, et possiblement une partie de la surcote due aux vagues (*wave setup*).

Dans ce but, un modèle a été mis en place avec la code MOHID Water (Braunschweig et al. 2004; Martins et al. 2001). MOHID est un code 3D hydrostatique, faisant l'approximation de Boussinesq pour la densité, mettant en œuvre une procédure par volumes finis sur grilles structurées pour résoudre un ensemble d'équations primitives formulées pour les principales variables caractéristiques de l'hydrodynamique (notamment élévation de la surface libre, composantes de la vitesse du courant dans les 3 directions, température, salinité). Le modèle s'appuie sur un procédé de descente d'échelle pour permettre une représentation de l'hydrodynamique à travers la zone côtière jusqu'à la plage, avec une résolution fine au niveau de la plage. Le calcul prend en compte les effets de la marée, du vent, des vagues et du débit du fleuve Adour. Les interactions vagues-courant en particulier sont représentées par une approche en phase-moyennée, qui a fait l'objet de développements spécifiques au sein du code MOHID Water ces dernières années, avec des applications le long du littoral basque (Delpey et al. 2014, 2016).

2.3.4 Modélisation des vagues et du runup à l'échelle de la plage

Modèles paramétriques

Afin de représenter les différentes contributions des forçages météo-océaniques au niveau d'eau à la côte, notamment le runup local induit par les vagues, différentes formulations paramétriques ont été développées et testées par les partenaires de MAREA. L'objectif de cette approche de modélisation (dans l'application faite ici du moins) est de fournir une estimation du niveau d'eau total à la côte à partir de paramètres « macroscopiques », sans résoudre explicitement l'hydrodynamique de la zone de déferlement et de la zone de swash. Les paramètres macroscopiques à fournir en entrée de la formulation peuvent être donnés par des observations ou des modèles, comme par exemple les deux modélisations décrites aux paragraphes précédents (e.g. amplitude de la marée, hauteurs de vagues, etc.).

Dans le cadre de MAREA, différentes formulations ont pu être testées : certaines formulations ont été directement tirées de la littérature scientifique (e.g. Longuet-Higgins and Stewart 1964; Stockdon et al. 2006) puis adaptées localement, ou bien totalement redéfinies spécifiquement pour le site d'étude dans le cadre du projet (formulation MAREA Btz, voir rapport de synthèse UPPA).

Ces formulations paramétriques présentent l'avantage d'être généralement « faciles » à appliquer une fois établies, c'est-à-dire sans requérir à une ressource de calcul significative. En revanche, elles ont l'inconvénient (i) de ne pas (ou peu) fournir d'information sur les processus en jeu et (ii) en conséquence d'être hautement site-spécifiques. En conséquence, des approches alternatives, dites de modélisation à phase-résolue, ont également été explorées pour modéliser les vagues et la submersion à l'échelle de la plage.

Modèle hydrodynamique à phase-résolue

Deux codes de calcul ont été mis en œuvre pour simuler les vagues et l'hydrodynamique à l'échelle de la vague ou des groupes de vagues. A l'échelle des groupes, la code X-Beach a été mis en œuvre et testé par UPPA (voir rapport de synthèse UPPA). A l'échelle des vagues individuelles, le modèle à phase-résolue BOSZ (*Boussinesq Ocean and Surf Zone*) a été mis en œuvre par RPT.

Le modèle BOSZ (Roeber and Cheung 2012; Roeber, Cheung, and Kobayashi 2010) est un modèle de type Boussinesq basé sur les équations de Nwogu (1993). Il propose une représentation de l'hydrodynamique à phase-résolue, intégrée sur la verticale, en profondeur limitée, faiblement dispersive et faiblement non-linéaire. Ce code a été employé avec succès pour la représentation de processus de type tsunamis (Roeber and Bricker 2015), pour l'étude des vagues et des ondes infragravitaires en zone de déferlement (Li et al. 2014), et enfin pour la simulation du runup (Roeber et al. 2019).

Ce type d'approche est complexe à mettre en œuvre, et relativement couteux en termes de ressource de calcul. Néanmoins, elle offre une vision unique des processus non-linéaires affectant les vagues en très faible profondeur, et a ainsi constitué une importante composante des travaux menés dans MAREA, en complémentarité avec les autres approches déployées.

2.4 Applications et démonstration (Action 4)

2.4.1 Indicateurs d'aide à la gestion et démonstrations

Comme mentionné précédemment, le projet MAREA avait pour double objectif de (i) caractériser les processus déterminant l'impact local des tempêtes à la côte, puis (ii) de transférer cette caractérisation dans un contexte opérationnel pour l'aide à la décision, à destination des collectivités gestionnaires des stratégies de protection.

La caractérisation des processus déterminants a été établie à l'aide des outils d'observation et de modélisation présentés aux paragraphes précédents. Puis, en s'appuyant sur cette caractérisation, des indicateurs d'aide à la gestion ont été définis. Ces indicateurs synthétisent le niveau d'aléa associé à une tempête, à l'échelle locale d'une plage ou d'un ouvrage particulier. Ils sont alimentés par des données issues des systèmes d'observation ou de modélisation. Chaque indicateur est propre à une typologie de risque et à un site d'application donnés, et intègre les spécificités locales du site concerné. RPT a travaillé à la définition d'un indicateur d'aide à la gestion du risque vagues-submersion sur la Grande Plage de Biarritz, site pilote représentatif d'une plage urbanisée largement exposée aux vagues.

Enfin, les solutions d'observation et de modélisation retenues, ainsi que les indicateurs d'aide à la gestion, ont été mis en œuvre pour démonstration dans deux types d'applications :

- 1/ Application diagnostique en configuration réaliste : pour l'analyse d'épisodes de tempêtes remarquables dans le passé, ou encore pour l'évaluation de l'aléa associé à des tempêtes de période de retour remarquable ;
- 2/ Application opérationnelle : pour la surveillance continue et la prévision à court terme (quelques jours), en temps réel, des niveaux d'aléa à l'échelle locale d'une plage ou d'un ouvrage.

Dans le cas du risque vagues-submersion sur la Grande Plage de Biarritz, ces deux types d'application ont été effectuées pour démonstration des capacités des outils développés dans le projet MAREA.

2.4.2 Applications diagnostiques en configuration réaliste

Les outils développés ont été mis en œuvre pour l'étude d'épisodes de vagues-submersion passés sur la Grande Plage de Biarritz, ainsi que pour l'analyse de l'impact de tempêtes types associées à des périodes

de retour remarquables. Une démonstration de l'utilisation des outils de modélisation et des indicateurs d'aide à la gestion a ainsi pu être effectuée dans une gamme de configurations réalistes.

2.4.3 Démonstration opérationnelle pour la surveillance et la prévision

Des démonstrations d'un système opérationnel de surveillance et de prévision du risque vagues-submersion sur la Grande Plage de Biarritz ont été conduites au cours des hivers 2017-2018 et 2018-2019. Ces démonstrations ont porté sur les composantes suivantes :

- Des observations continues sur l'aléa ont été collectées, notamment les mesures d'état de mer de houlographes (dont la bouée Donostia, voir rapport de synthèse AZTI), et les données vidéométriques produites par la station vidéo de Biarritz (voir rapport de synthèse UPPA) ;
- Une chaîne de modélisation a été mise en œuvre en temps réel, pour produire des prévisions quotidiennes à court terme, et fournir notamment les indicateurs de gestion mis en place en anticipation des différentes tempêtes prévues.

Les capacités du système opérationnel ont finalement pu être évaluées à l'issue des démonstrations.

Dans le cadre de cette application, les modélisations prévisionnelles développées n'ont pas vocation à se substituer aux systèmes de modélisation et d'alerte nationaux ou régionaux, mais plutôt à compléter ces derniers en ciblant un site particulièrement vulnérable pour y affiner le niveau d'information sur l'aléa. Ces informations additionnelles sont produites en intégrant dans la modélisation les spécificités locales du site et la gamme de processus associés à fine échelle, qui ne peuvent à l'heure actuelle pas être incluses dans les systèmes nationaux à plus basse résolution. Les nouvelles informations ainsi obtenues sur l'aléa pour une plage spécifique ont été utilisées pour alimenter des indicateurs d'aide à la gestion locale et opérationnelle du risque vagues-submersion sur la Grande Plage de Biarritz.

3. RESULTATS

3.1 Campagne de mesures sur le site pilote de Biarritz (Action 3)

3.1.1 Vue d'ensemble des conditions des 3 campagnes MAREA 2017, 2018 et 2019

Les Figure 7, Figure 8 et Figure 9 ci-après fournissent les variations temporelles des principaux forçages du niveau d'eau à la côte durant les campagnes MAREA 2017, 2018 et 2019 respectivement.

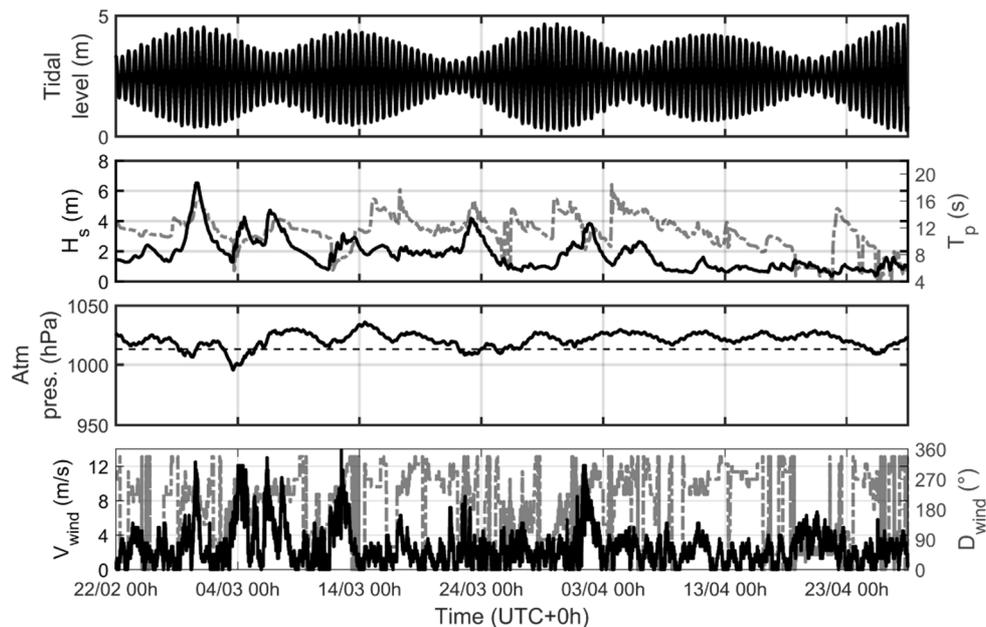


Figure 7 : Séries temporelles des principaux forçages du niveau d'eau côtier durant la campagne MAREA 2017. Du haut en bas : signal de marée prédit (SHOM), hauteur significative H_s et période de pic T_p (bouée Anglet), pression atmosphérique, vitesse et direction du vent (station Marbella).

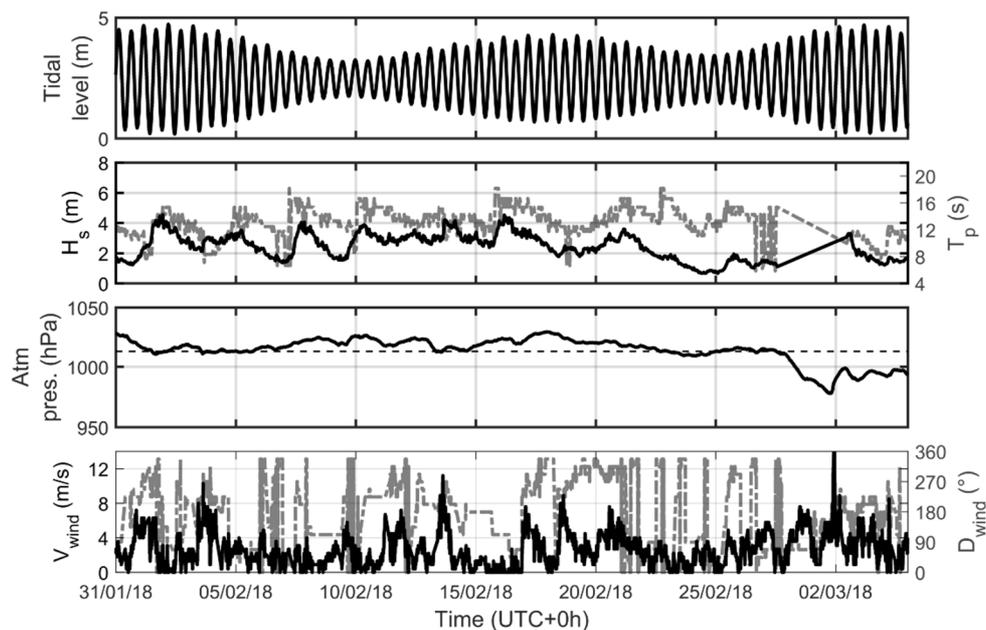


Figure 8 : Séries temporelles des principaux forçages du niveau d'eau côtier durant la campagne MAREA 2018. Mêmes conventions qu'en Figure 7.

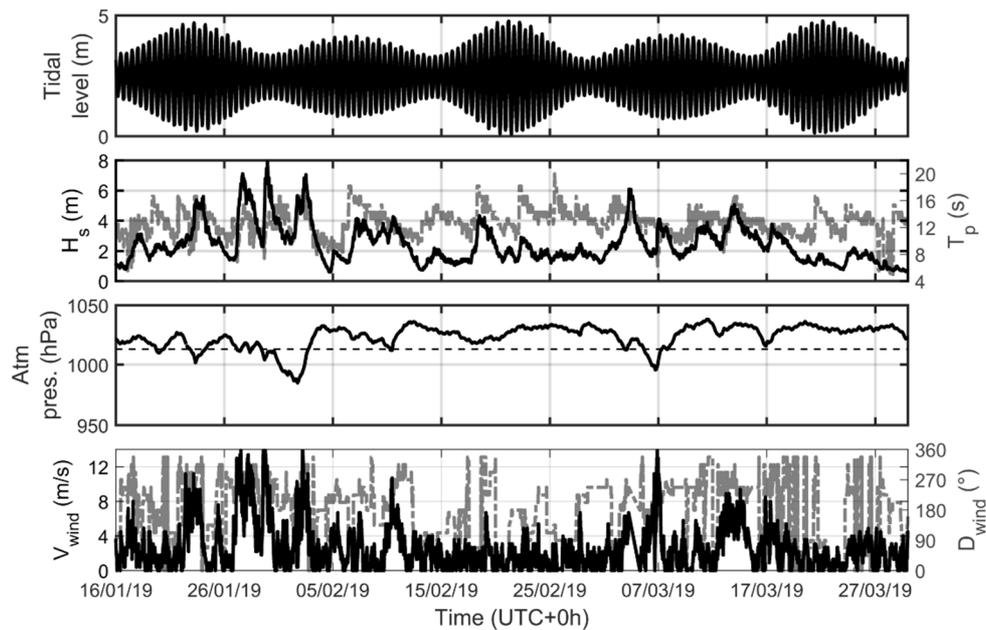


Figure 9 : Séries temporelles des principaux forçages du niveau d'eau côtier durant la campagne MAREA 2019. Mêmes conventions qu'en Figure 7.

3.1.2 Focus sur les mesures intensives de la campagne MAREA 2018

Dans ce paragraphe, une description plus détaillée est fournie concernant les mesures intensives collectées sur la Grande Plage durant la campagne MAREA 2018. Ce déploiement a permis de rassembler un important ensemble de mesures simultanées dans la zone subtidale, la zone de déferlement, la zone intertidale, et jusqu'au quai en haut de plage, durant un épisode de vagues très énergétiques. L'acquisition de ce jeu de données compte parmi les réalisations majeures de MAREA sur le volet vagues-submersion. Les principales observations et conclusions associées sont résumées dans ce paragraphe.

La Figure 10 fournit tout d'abord les séries temporelles des principaux forçages du niveau d'eau à la côte durant le déploiement. L'examen des conditions de vagues au niveau de la bouée Anglet (profondeur 50 m) mettent en évidence les deux phases du déploiement : une première phase faiblement énergétique jusqu'au 01/02/2018, puis un épisode de houle longue énergétique les 01 et 02/02/2018, avec une hauteur incidente H_s ayant dépassé les 4 m pour une période de pic d'environ 15 s. L'amplitude de marée était importante sur la fenêtre temporelle du déploiement, avec un marnage de plus de 4 m et un niveau d'eau à marée haute d'environ +4.5 m CM. Durant l'épisode de vagues énergétiques, la pression atmosphérique a été proche de sa valeur moyenne (~ 1013 hPa), tandis que l'intensité du vent était faible (< 6 m/s). Dans ce contexte, une contribution dominante des vagues sur le niveau d'eau est attendue sur la Grande Plage, tandis que la surcote atmosphérique attendue est limitée.

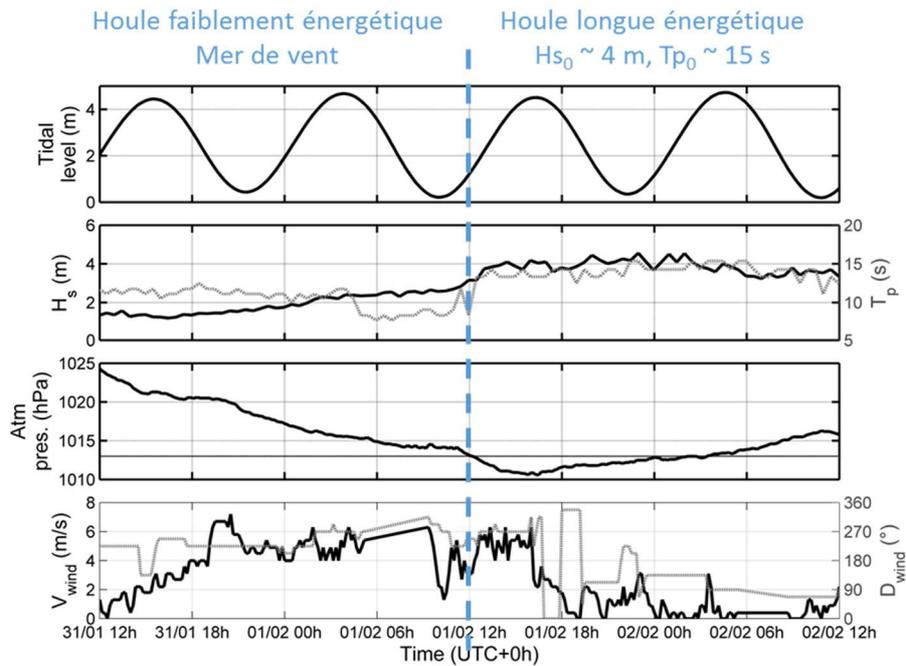


Figure 10 : Séries temporelles des principaux forçages du niveau d'eau côtier durant la campagne intensive MAREA 2018. Mêmes conventions qu'en Figure 7.

La Figure 11 fournit les séries temporelles des hauteurs significatives des vagues courtes et des ondes infragravitaires (IG) au cours de l'épisode instrumenté, obtenues à partir des capteurs de pression déployés dans la zone de levage (SEABIRD) et dans la zone de déferlement (PS7,6,5,4).

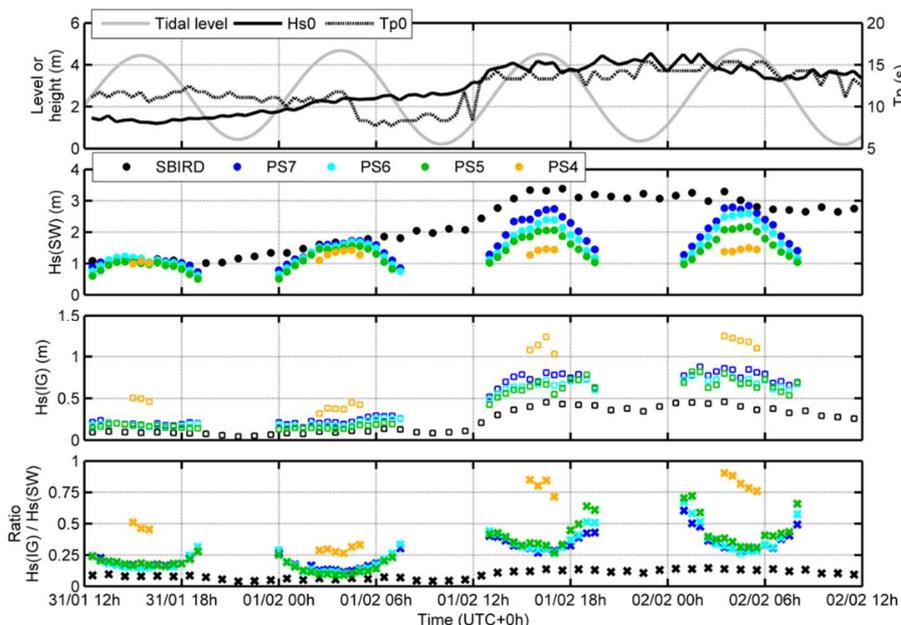


Figure 11 : Hauteurs significatives des vagues mesurées durant la campagne intensive MAREA 2018. En haut : rappel des conditions de marée (gris) et de vagues incidentes. Puis de haut en bas : hauteur Hs(SW) des vagues courtes, hauteur Hs(IG) des ondes infragravitaires, et ratio Hs(IG)/Hs(SW) sur les capteurs déployés en zone de levage et de déferlement.

Ces données permettent tout d’abord de caractériser l’augmentation globale de l’énergie des vagues au niveau les différents capteurs durant l’épisode de tempête, et la décroissance des hauteurs H_s du large vers la plage (liée principalement au déferlement). De plus, les résultats obtenus mettent en évidence une très nette augmentation de l’énergie dans la bande IG durant l’épisode de houle longue à partir du 01/02/2018. Cette augmentation est visible à la position du SEABIRD ($H_s(IG) \sim 0.4$ m), puis s’amplifie vers la plage pour atteindre une valeur maximale $H_s(IG) \sim 1.3$ m sur le capteur le moins profond (PS4). Par ailleurs, le ratio $H_s(IG)/H_s(SW)$ augmente très significativement durant la tempête, d’environ 0.5 à 0.9 au maximum sur le PS4. Enfin, une modulation tidale remarquable du ratio est mise en évidence, principalement liée à la modulation du déferlement des vagues courtes au cours du cycle de marée.

A partir du signal de pression des capteurs, les spectres fréquentiels d’état de mer ont pu être calculés pour caractériser plus en détail la distribution fréquentielle de l’énergie dans les zones de levage et de déferlement. Un exemple de résultat est fourni en Figure 12 pour la pleine mer du 01/02/2018 à 16h30. On retrouve sur ces spectres l’augmentation de l’énergie dans la bande IG du large vers la plage, parallèlement à la diminution de l’énergie des vagues courtes. Deux pics d’énergie apparaissent dans la bande IG, et se retrouvent dans diverses proportions tout au long de l’épisode de tempête :

- Un premier pic de plus haute fréquence dans la bande [30 s, 60 s],
- Un second pic de plus basse fréquence dans la bande [60 s, 300 s].

Sur le capteur le moins profond (PS4), une domination des pics d’énergie IG est visible, tandis que la distinction des deux pics tend à s’estomper.

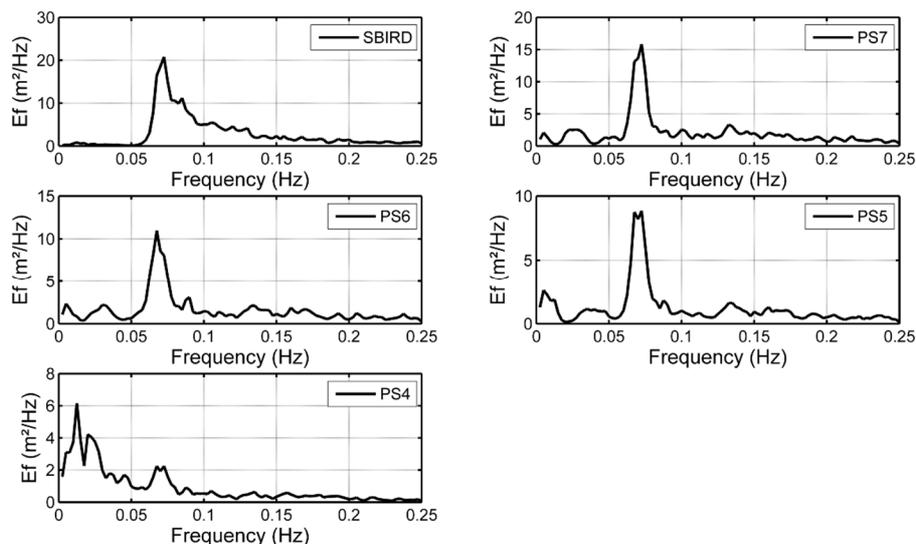


Figure 12 : Spectres fréquentiels d’état de mer calculés sur les capteurs de pression. Exemple de la pleine mer du 01/02/2018 à 16h30.

On examine à présent la zone de swash sur la plage à l’aide des données vidéométriques. La Figure 13 ci-dessous fournit les séries temporelles du niveau d’eau total $\eta_{2\%}$ ($= \eta + R_{2\%}$, avec $R_{2\%}$ le runup dépassé 2% du temps), du setup et du swash $S_{2\%}$ calculés à partir des images vidéo (voir rapports de synthèse UPPA et AZTI pour le procédé associé). Le calcul a été effectué pour deux profils cross-shore : le premier en face du Casino (points noirs) et le second de l’esplanade au Sud du Casino (points gris).

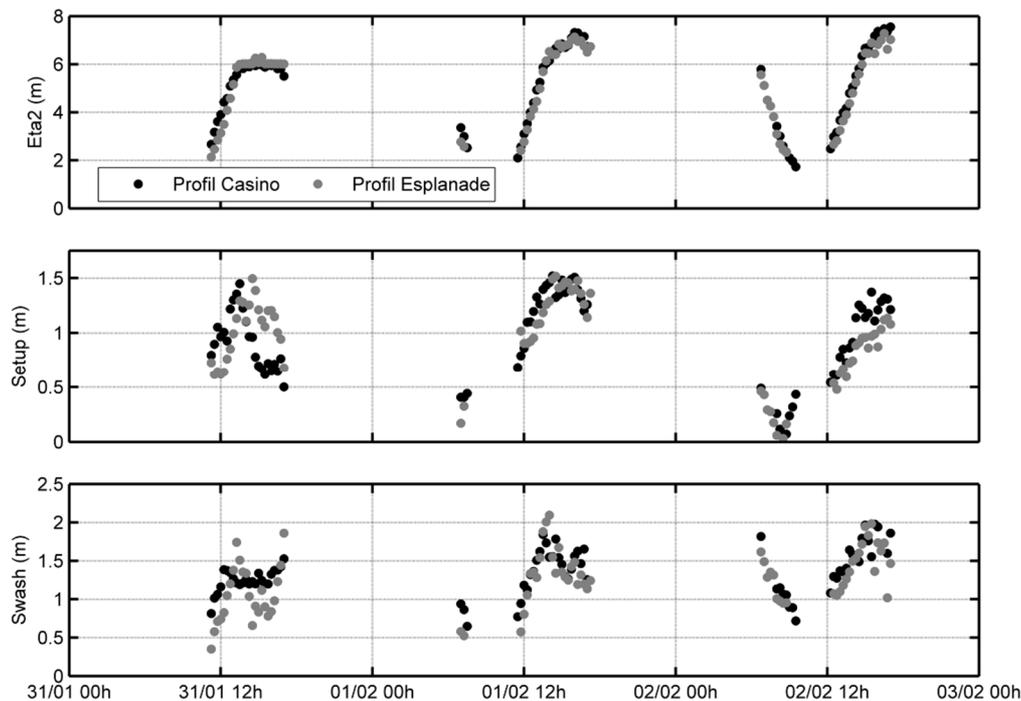


Figure 13 : Séries temporelles du niveau d'eau total (haut), et contributions respectives du setup (centre) et du swash (bas), obtenues à partir de la vidéométrie durant la campagne intensive MAREA 2018.

Ces résultats mettent tout d'abord en évidence une contribution très importante de la surcote et du swash dans la détermination du niveau d'eau sur la plage. Comme présenté plus haut (voir Figure 10), compte tenu des conditions atmosphériques, la principale contribution à la surcote est ici le setup induit par les vagues. Sa contribution varie en 0 et +1.5 m au cours du cycle de marée, soit au maximum une contribution d'environ +31% à la surélévation momentanée du niveau d'eau au-dessus du niveau annuel moyen. Une variabilité remarquable du setup est mise en évidence au cours du cycle de marée, ce qui peut être attribué aux variations de la pente du profil de plage actif, du fait de la modulation de la position de la zone de déferlement par la marée. En revanche, le setup à marée haute apparaît peu variable au cours de la campagne.

De plus, la Figure 13 met en évidence une large contribution du swash au niveau total instantané sur la plage. Le swash maximal dépasse les +2 m pendant l'épisode de tempête, soit une contribution maximale de près de +44% à la surélévation momentanée du niveau d'eau au-dessus du niveau annuel moyen. La contribution maximale du runup (=setup+swash) à la surélévation du niveau d'eau est donc proche de 75%. Elle est donc très clairement dominante par rapport aux autres contributions au niveau d'eau sur la plage. Le swash présente également une forte variabilité au cours du cycle de marée, avec les valeurs minimales observées autour des basses mers (S2% ~ 0.5 m) et les maximales atteintes autour des pleines mers (S2% ~ 2 m). Enfin, on observe une augmentation très significative des valeurs maximales de S2% (autour des pleines mers), de l'ordre de 1.25 m durant la période peu énergétique du 31/01, à 2 m durant l'épisode de tempête du 02/02.

Enfin, la Figure 14 fournit la distribution spectrale du swash calculée à partir des données vidéométriques, pour 3 pleines mers réparties durant la phase faiblement énergétique (31/01) et durant l'épisode de tempête (01/02 et 02/02). En cohérence avec l'évolution des spectres d'état de mer dans la zone de

déferlement, on retrouve dans les spectres de swash la présence d'énergie dans la bande IG. De plus, on observe une différence notable entre la forme des spectres obtenue durant la tempête et celle obtenue le jour d'avant : le 31/01, l'énergie dominante est associée à la période des vagues courtes, tandis que durant l'épisode de tempête des 01/02 et 02/02, le swash est dominé par la composante infragravitaire. Dans cette deuxième configuration, il semble qu'on retrouve les 2 pics IG présents dans les spectres de vagues incidentes, bien que la distinction soit moins nette.

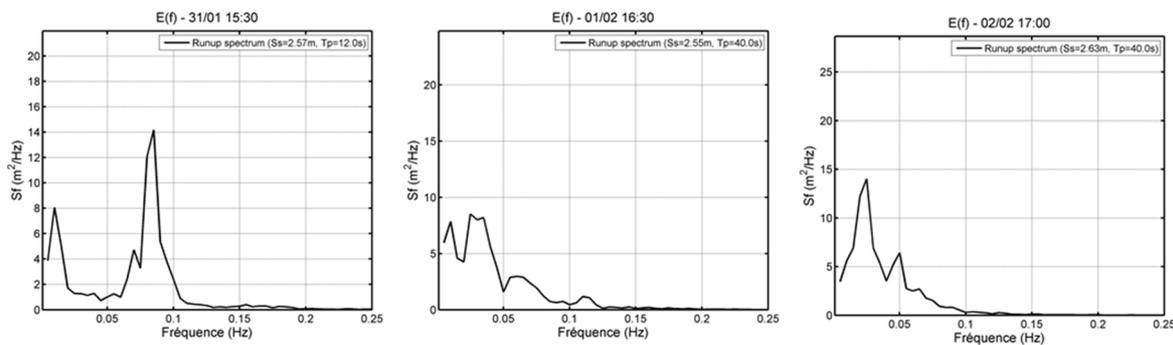


Figure 14 : Spectres fréquentiels du swash calculés à partir des données vidéométriques durant la campagne intensive MAREA 2018. Exemples des pleines mers du 31/01 à 16h30, du 01/02 à 16h30 et du 02/02 à 17h.

3.2 Modélisation de l'aléa Vagues-Submersion (Actions 3 et 4)

3.2.1 Modélisation des états de mer en zone côtière

Le modèle spectral d'état de mer côtier a été confronté aux observations collectées durant les 3 saisons hivernales incluses dans le projet MAREA, afin d'évaluer sa capacité à représenter la propagation des vagues à travers la zone côtière basque jusqu'à la zone littorale, en particulier pour les conditions extrêmes. Pour cela, des simulations rétrospectives (ou *hindcasts*) ont été réalisées sur les saisons hivernales 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019. Les fenêtres temporelles correspondantes, qui s'étendent du mois de septembre au mois de mai, couvrent les périodes l'année durant lesquelles se concentrent la majorité des épisodes de tempêtes. Différents forçages et paramétrages ont pu être testés lors de ce travail, en fonction de la disponibilité des données sur chaque période. La validation détaillée des différentes simulations a ensuite permis d'identifier les configurations qui donnaient les meilleurs résultats. Ces dernières ont été sélectionnées pour alimenter ensuite les outils de modélisation vagues-submersion locale sur la Grande Plage de Biarritz (voir paragraphes suivants).

Pour chaque saison hivernale, les validations suivantes ont été effectuées :

- Validation en zone côtière sur l'hiver entier (septembre-mai), par comparaison aux données des houlographes d'Anglet et de Saint-Jean-de-Luz ;
- Validation en zone littorale sur la fenêtre temporelle des campagnes MAREA (2 à 3 mois), par comparaison aux mesures des capteurs déployés en zone subtidale.

En complément, un focus a été réalisé sur l'épisode de la campagne MAREA 2018 durant lequel le déploiement intensif a été réalisé sur l'estran de la Grande Plage de Biarritz. Au cours de cet épisode, les résultats du modèle ont également pu être évalués en zone de déferlement.

A titre d'exemple, on décrit ci-après les résultats obtenus sur la campagne MAREA 2018. Un récapitulatif des performances obtenues sur l'ensemble des 3 campagnes est également fourni à la fin du paragraphe.

Validation en zones côtière et littorale durant la campagne MAREA 2018

Durant la campagne MAREA 2018, un ADCP AWAC et un capteur de pression SEABIRD ont été déployés aux profondeurs de 20 m et 12 m respectivement, du 31/01/2018 au 03/04/2018 (voir paragraphe 2.2). L'AWAC n'a malheureusement pas été retrouvé à l'issue de la campagne, ne permettant pas de validation à 20 m. La Figure 15 ci-dessous présente les performances du modèle obtenues sur fenêtres temporelles de la campagne, pour les 3 mêmes paramètres Hs, Tp et Dp. Les comparaisons incluent les deux houlographes côtiers et le SEABIRD (12 m) dans la zone littorale de Biarritz.

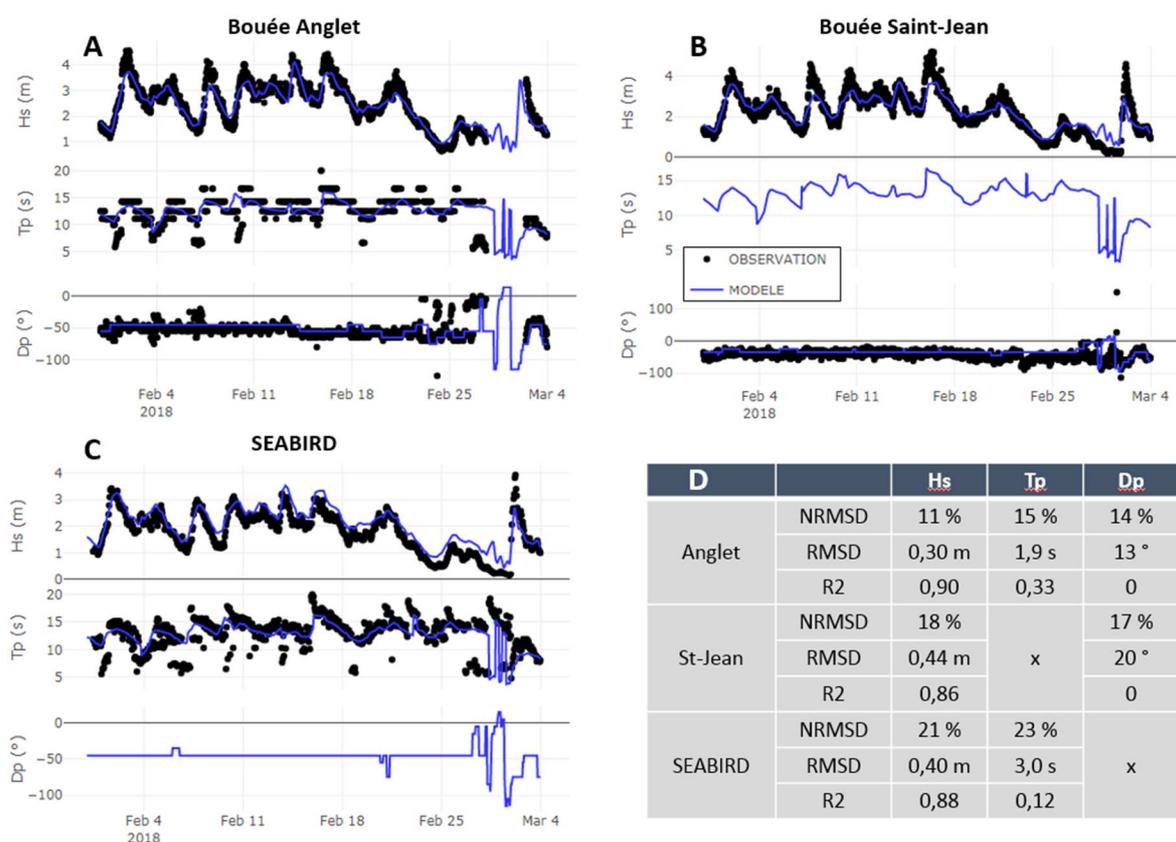


Figure 15 : A), B) et C) Evolutions temporelles des paramètres Hs/Tp/Dp modélisés vs observés aux bouées Anglet et Saint-Jean et au SEABIRD pendant la campagne MAREA 2018. D) Erreurs et corrélations du modèle avec les observations aux bouées Anglet et Saint-Jean et à la SEABIRD sur la même période.

Les performances obtenues en Figure 15 sont plutôt bonnes. La propagation des différents systèmes de vagues de tempête à travers la zone côtière apparaît raisonnablement représentée jusqu'au SEABIRD, implanté aux environs de la limite offshore de la zone de déferlement de la Grande Plage de Biarritz. On note cependant une tendance nette à la sous-estimation des pics de hauteur significatives les plus importants sur les bouées Anglet et St-Jean. Ces sous-estimations contribuent pour une grande partie aux erreurs RMS obtenues. Elle se retrouve également durant les autres campagnes et sur le reste des hivers, et semblent donc relativement systématiques. L'analyse de ces configurations a montré que ces sous-estimations sont déjà présentes dans le modèle régional utilisé en forçage au large du modèle côtier, et sont ensuite propagées dans le domaine côtier. Cette tendance a également été retrouvée par UPPA lors

de l'examen de différentes simulations rétrospectives couvrant les 50 dernières années, pourtant construites avec des modèles indépendants (voir rapport de synthèse UPPA). La réduction de ces biais constituera un axe d'amélioration à poursuivre dans le cadre de futurs travaux.

En faible profondeur, sur le SEABIRD, un accord également raisonnable est obtenu. La série temporelle de Hs suggère une surestimation durant la seconde partie de la campagne, limitée mais visible. Dans cette zone, l'écart obtenu avec la mesure semble cette fois-ci plus directement lié à la dynamique locale, notamment à la réfraction complexe au large de la Grande Plage.

Validation à l'échelle d'un épisode de tempête : le déploiement intensif MAREA 2018

Si les performances du modèle de vagues sont satisfaisantes à l'échelle de la saison entière ou de plusieurs mois, il convient d'évaluer également la capacité du modèle à représenter la dynamique à l'échelle d'un épisode de tempête spécifique. L'enjeu est particulièrement important pour l'épisode de tempête correspondant au déploiement intensif MAREA 2018 parce que les sorties du modèles spectrales ont été utilisées pour alimenter ensuite les modèles vagues-submersion à l'échelle de la plage. De plus, les mesures collectées en zone de déferlement lors de cette campagne permettent également d'évaluer les capacités et les limitations du modèle spectral en zone de déferlement.

La Figure 16 présente les comparaisons des évolutions temporelles des paramètres Hs, Tp, et Dp observés et modélisés au niveau des différents instruments de mesures en place pendant la campagne intensive. Le Tableau 2 regroupe quant à lui les erreurs RMS absolues (RMSD) et normalisées (NRMSD) du modèle en ces mêmes points. Les résultats présentés révèlent des performances satisfaisantes du modèle en zone côtière et littorale. On note tout de même une sous-estimation globale de la mer de vent observée durant la matinée du 01/02, ainsi qu'un léger biais de direction sur la bouée StJean. Dans la zone de déferlement, l'accord est raisonnable mais la dissipation des vagues est reproduite de manière plus approximative durant l'épisode énergétique. Ce résultat était plutôt attendu avec l'approche spectrale, dans laquelle le déferlement et les interactions non-linéaires en proche plage sont généralement difficilement représentés.

	Hs		Tp		Dp	
	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD
Anglet	10 %	0,31 m	16 %	2,0 s	24 %	9 °
Saint-Jean	9 %	0,24 m	26 %	2,7 s	30 %	12 °
SEABIRD	10 %	0,24 m	19 %	2,3 s	X	X
CP09	11 %	0,19 m	6 %	0.8 s	X	X
CP08	13 %	0,22 m	15 %	1.9 s	X	X
CP07	15 %	0,30 m	13 %	1,7 s	X	X
CP06	13 %	0,24 m	14 %	1.8 s	X	X
CP05	14 %	0,23 m	14 %	1.8 s	X	X

Tableau 2 : Performance du modèle sur les paramètres intégraux Hs/Tp/Dp au cours de la campagne intensive de 2018 (31/01 au 02/02).

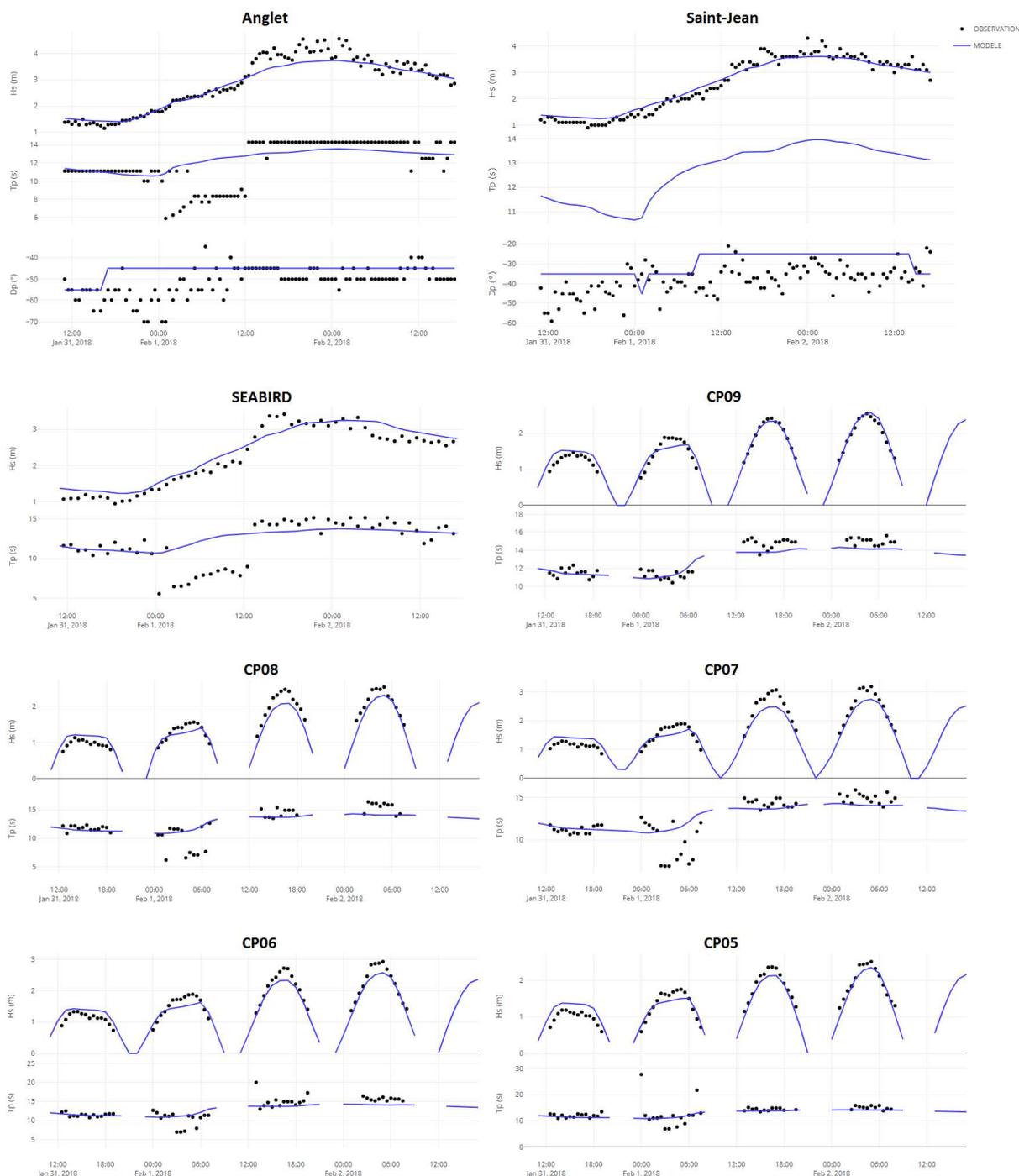


Figure 16 : Evolutions temporelles des paramètres Hs/Tp/Dp modélisés vs observés aux bouées Anglet et Saint-Jean, à la SEABIRD, et aux capteurs de pression installés dans la zone de surf pendant la campagne intensive MAREA 2018 (31/01 au 02/02).

Récapitulatif de la validation sur les 3 campagnes MAREA

Le tableau ci-dessous synthétise les performances des meilleures simulations effectuées sur les 3 campagnes MAREA.

Campagne	Paramètre	Bouée Anglet (50 m)		Bouée St-Jean (20 m)		AWAC/RDI (20 m)		SEABIRD (12 m)	
		NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD
MAREA 2017	Hs	13 %	0,26 m	12 %	0,23 m	14 %	0,24 m	16 %	0,26 m
	Tp	9 %	1,1 s	-	-	16 %	1,8 s	13 %	1,6 s
	Dp	11 %	14 °	16 %	19 °	14 %	12 °	-	-
MAREA 2018	Hs	11 %	0,30 m	18 %	0,44 m	-	-	21 %	0,4 m
	Tp	14 %	1,9 s	-	-	-	-	23 %	3,0 s
	Dp	14 %	13 °	17 %	20 °	-	-	-	-
MAREA 2019	Hs	14 %	0,40 m	15 %	0,35 m	15 %	0,33 m	19 %	0,37 m
	Tp	11 %	1,4 s	-	-	15 %	1,8 s	12 %	1,6 s
	Dp	17 %	11 °	20 %	13 °	15 %	19 °	-	-

Tableau 3 : Récapitulatif des performances du modèle spectral côtier sur les 3 campagnes MAREA.

3.2.2 Modélisation de la marée et de la surcote atmosphérique

Dans le cadre de MAREA, un modèle côtier hydrostatique à phase-moyennée a été mis en œuvre afin de simuler les effets de la marée locale, de la surcote atmosphérique et possiblement du setup. Des expérimentations ont été conduites afin d'évaluer la capacité de la modélisation à reproduire ces contributions au niveau d'eau local. Là encore, la modélisation a été confrontée à la mesure afin de valider la représentation mise en place.

Le modèle côtier met en œuvre une descente d'échelle via une série de grilles de calcul emboîtées (*nesting*), afin de propager l'onde de marée jusqu'à la côte à partir des harmoniques disponibles en différents points au large. Le modèle intègre une représentation de la surcote atmosphérique à travers le forçage de la pression atmosphérique et du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau.

Comparaison aux observations des marégraphes

Une simulation sur une durée d'un an a été réalisée avec le modèle hydrodynamique côtier. Les séries temporelles de niveau d'eau obtenues sur les marégraphes de Boucau et de Socoa (SHOM) ont été confrontés à la mesure. Les résultats obtenus sont représentés ci-dessous en Figure 17. Ces résultats sont satisfaisants et confirment la bonne représentation globale du niveau d'eau à la côte, notamment du signal de marée.

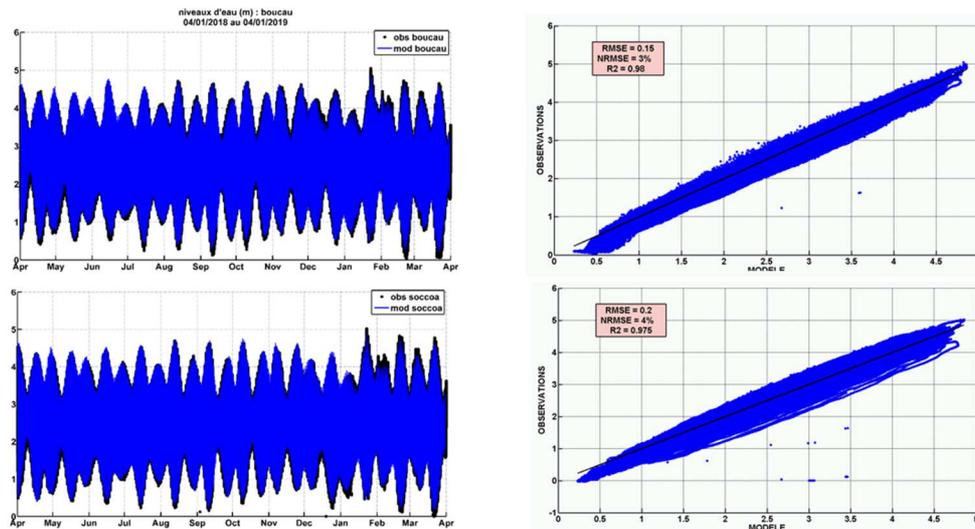


Figure 17 : Comparaison du niveau d'eau observé et modélisé au niveau des marégraphes de Boucau et Socoa.

Modélisation de la surcote atmosphérique au large du site pilote de Biarritz

Un focus a été réalisé sur la simulation de la surcote atmosphérique au niveau du SEABIRD déployé durant les campagnes MAREA. La surcote atmosphérique a été calculée sur le capteur à partir du niveau mesuré et du signal de marée obtenu par analyse harmonique. La surcote atmosphérique modélisée a quant à elle été obtenue à partir de deux simulations du modèle hydrodynamique, l'une intégrant l'ensemble des forçages météo-océaniques et l'autre n'intégrant que le forçage de la marée. Les résultats correspondants sont représentés ci-après en Figure 18, et les performances correspondantes sont données par le Tableau 4. La représentation de la surcote atmosphérique par le modèle apparaît ainsi satisfaisante.

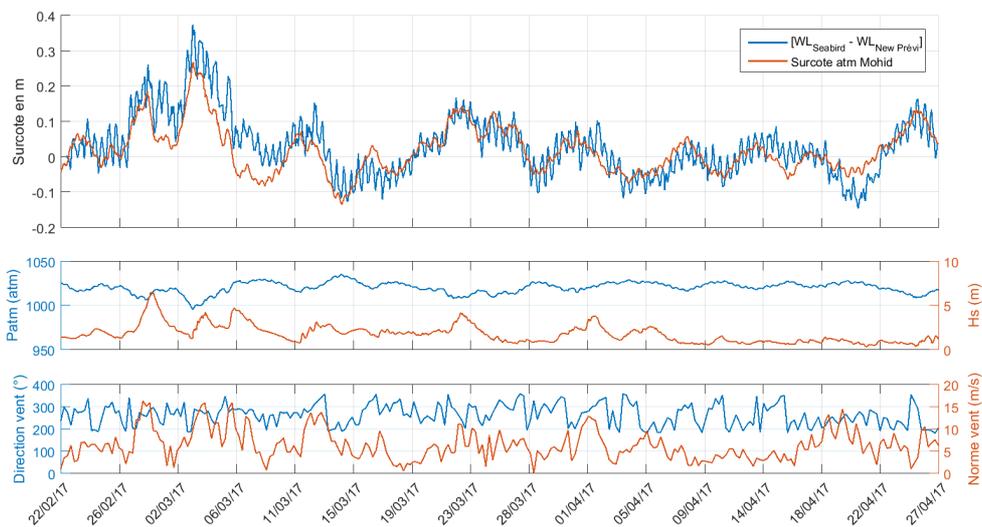


Figure 18 : Haut : comparaison de la surcote atmosphérique observée et modélisée au niveau du SEABIRD durant la campagne MAREA 2017. Bas : séries temporelle de pression, Hs et vent.

RMSD (cm)	NRMDS (%)	R2	Biais moyen (cm)	Ecart min (cm)	Ecart max (cm)
5,2	10	0,66	-1,2	-16,6	11,5

Tableau 4 : Indicateurs de performance calculés pour la surcote atmosphérique sur la campagne MAREA 2017.

3.2.3 Modélisation des vagues et du runup à l'échelle de la plage

Deux approches de modélisation ont été étudiées pour représenter les effets des vagues et la submersion de la plage à fine échelle : des modélisations paramétriques et des modélisations hydrodynamiques à phase-résolue.

Modèles paramétriques

Afin de représenter la contribution du runup induit par les vagues, associé à des processus très locaux en proche plage, différentes formulations paramétriques ont tout d'abord été développées et testées par les partenaires de MAREA. Cette approche consiste à estimer le runup à partir des paramètres caractéristiques des vagues incidentes et de certains paramètres macroscopiques de la plage, sans résoudre explicitement l'hydrodynamique de la zone de déferlement ou de la zone de swash. Les paramètres à fournir en entrée de la formulation peuvent être donnés par des observations ou des modèles, comme par exemple les deux modélisations décrites aux paragraphes précédents (e.g. amplitude de la marée, hauteurs de vagues, etc.).

Dans le cadre de MAREA, différentes formulations ont pu être testées : certaines formulations ont été (i) directement tirées de la littérature scientifique (e.g. Longuet-Higgins and Stewart 1964; Stockdon et al. 2006) puis adaptées localement, ou bien (ii) totalement redéfinies spécifiquement pour le site d'étude dans le cadre du projet (formulation MAREA Btz).

Dans le premier cas, la forme générale des relations proposées dans la littérature a été reprise, et une calibration spécifique à la plage considérée a été effectuée grâce aux données collectées durant les campagnes MAREA et les périodes de démonstration. Ce travail de calibration permet d'intégrer dans le paramétrage les spécificités locales de la plage, et finalement d'aboutir à une formulation originale dédiée au site d'étude. Ce travail a été réalisé par RPT sur la Grande Plage de Biarritz et par AZTI sur la plage de Zarautz (voir rapport de synthèse AZTI).

Dans le second cas, une relation statistique entre les caractéristiques des vagues incidentes et le runup a été déterminée en analysant une base de données regroupant des mesures vidéométriques du runup et les paramètres d'état de mer au large enregistrés durant une série d'épisodes survenus durant les campagnes MAREA. La relation obtenue est spécialement adaptée à la Grande Plage de Biarritz, et inclut à travers le paramétrage établi les spécificités locales du site. Ce travail a été réalisé par UPPA et est décrit dans le rapport de synthèse correspondant.

Modèle hydrodynamique à phase-résolue

Alternativement aux modélisations paramétriques décrites plus haut, une autre approche a été explorée pour représenter l'évolution des vagues en proche plage et le runup, en s'appuyant sur des modèles à phase-résolue, à l'échelle des vagues individuelles ou des groupes de vagues. Le modèle X-Beach a été mis en œuvre par AZTI et par UPPA sur les plages de Zarautz et Biarritz/Anglet respectivement (voir rapport de synthèse correspondants). L'équipe de RPT a quant à elle travaillé à la mise en place d'un modèle à phase-résolue de type Boussinesq : le modèle BOSZ. Ce type de modèle propose une représentation de l'hydrodynamique vague-à-vague, en incluant les effets de la dispersion et des non-linéarités. Il doit ainsi permettre en particulier de simuler les transferts entre les vagues courtes et la bande IG dans la zone de déferlement, tels que ceux mis en évidence par l'analyse des observations présentées au paragraphe 3.1.

Dans le cadre du projet MAREA, RPT a travaillé en collaboration avec la chaire HPC Waves de UPPA à la mise en place d'une modélisation s'appuyant sur le code BOSZ. Les capacités du modèle ont tout d'abord été évaluées sur plusieurs cas tests en laboratoire, dans des configurations idéalisées mais relativement proches de celle de Biarritz (non présenté ici). Puis, le modèle a été mis en place en configuration réaliste sur la Grande Plage de Biarritz. Pour cette application, le modèle à phase-résolue est forcé par les conditions de vagues incidentes calculées par le modèle spectral (paragraphe 3.2.1) d'une part, et par les signaux de marée et de surcote atmosphérique issus du travail décrit aux paragraphes précédents d'autres part. Les résultats de la modélisation à phase-résolue ont été confrontés aux observations collectées durant les campagnes MAREA pour évaluer les capacités du modèle à simuler l'évolution des vagues en zone littorale et le runup sur la Grande Plage. Une validation détaillée a notamment été établie sur le jeu de données acquis par le déploiement intensif de la campagne MAREA 2018. Les principaux résultats obtenus et conclusions associées sont présentés ici.

La Figure 19 fournit tout d'abord la comparaison entre les séries temporelles de hauteurs Hs, Hsw et Hig observées et modélisées durant le déploiement intensif MAREA 2018, pour les capteurs SEABIRD, PS06 et PS04. En complément, deux exemples de comparaisons des mêmes variables le long du profil cross-shore instrumenté sont fournis en Figure 20, sur les pleines mers du 01/02/2018 à 16h30 et du 02/02/2018 à 05h. Ces résultats mettent en évidence une représentation très encourageante du modèle Boussinesq. En particulier, la décroissance de l'énergie associée aux vagues courtes du large à travers la zone de déferlement, et parallèlement l'amplification des ondes IG, semblent raisonnablement capturées par la modélisation. On note que les hauteurs Hsw semblent quelque peu sous-estimées dans la zone de déferlement, tandis que Hig est à l'inverse un peu surestimé par le modèle sur le capteur le moins profond (PS04). Ces tendances se retrouvent sur les graphes de corrélation modèle-mesures donnés en Figure 21. Les erreurs RMS restent néanmoins modérées, avec des valeurs de 27 cm (14%), 33 cm (18%) et 16 cm (30%) pour Hs, Hsw et Hig respectivement.

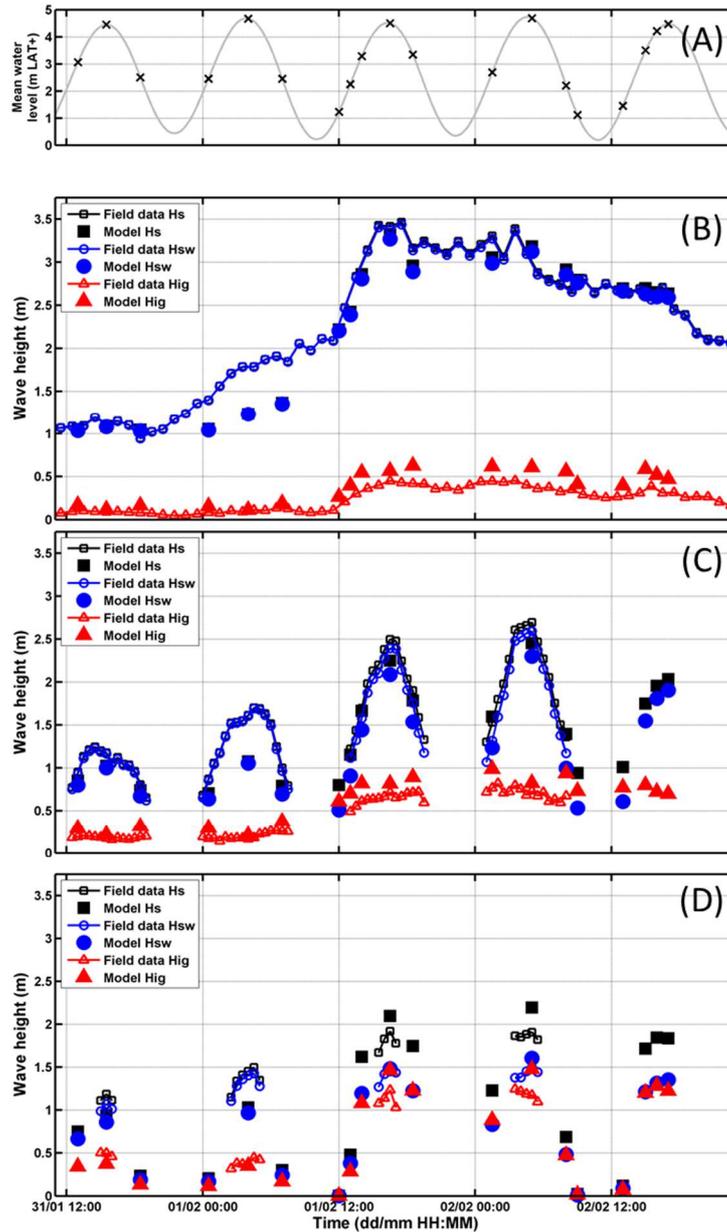


Figure 19 : (A) Signal de marée (gris) et instants simulés avec BOSZ (croix noires). (B) à (D) Comparaison des hauteurs Hs totale (noir), associée aux vagues courtes Hsw (bleu) et aux Hig (rouge) observées et modélisées sur le SEABIRD (B), le PS06 (C) et le PS04 (D).

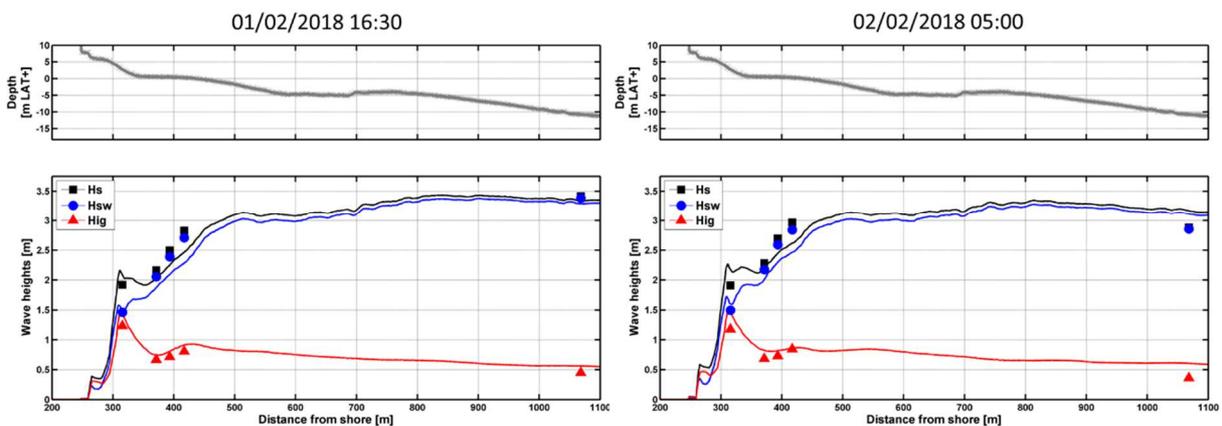


Figure 20 : Profils cross-shore de Hs, Hsw et Hig observés (points) et modélisés (traits). Exemples des pleines mers du 01/02/2018 à 16h30 et du 02/02/2018 à 05h.

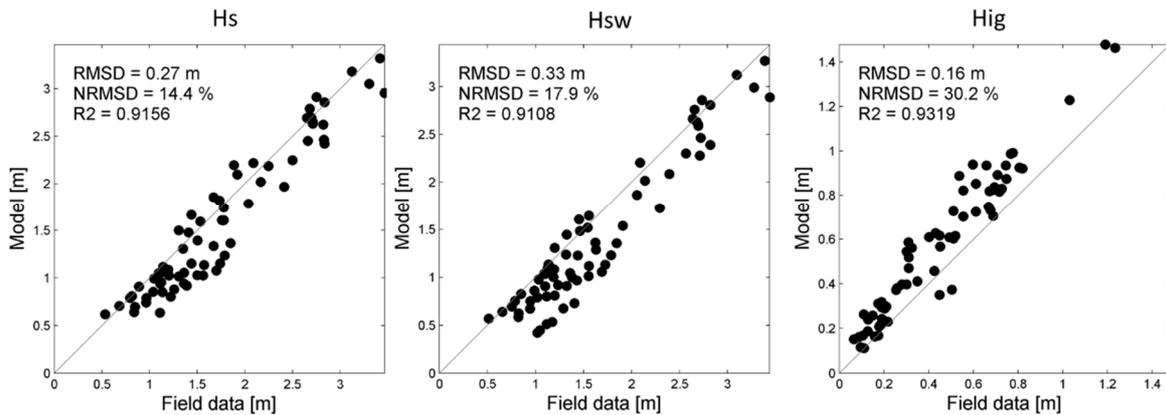


Figure 21 : Graphes de corrélation modèle-mesures pour Hs, Hsw et Hig. Les erreurs RMS (RMSD), erreurs RMS normalisées (NRMSD) et coefficients de corrélation (R2) sont également indiqués.

En examinant les comparaisons spectrales en Figure 22, donnée pour l'exemple de la pleine mer du 01/02/2018 à 16h30, on retrouve notamment la sous-estimation de l'énergie des vagues courtes sur les différents capteurs. Néanmoins, de manière intéressante, le développement des deux pics d'énergie IG semble bien reproduit par le modèle sur les capteurs déployés en zone de déferlement. De plus, le spectre mesuré sur le capteur le moins profond (PS04), dominé par la contribution des IG, est très raisonnablement reproduit par le modèle.

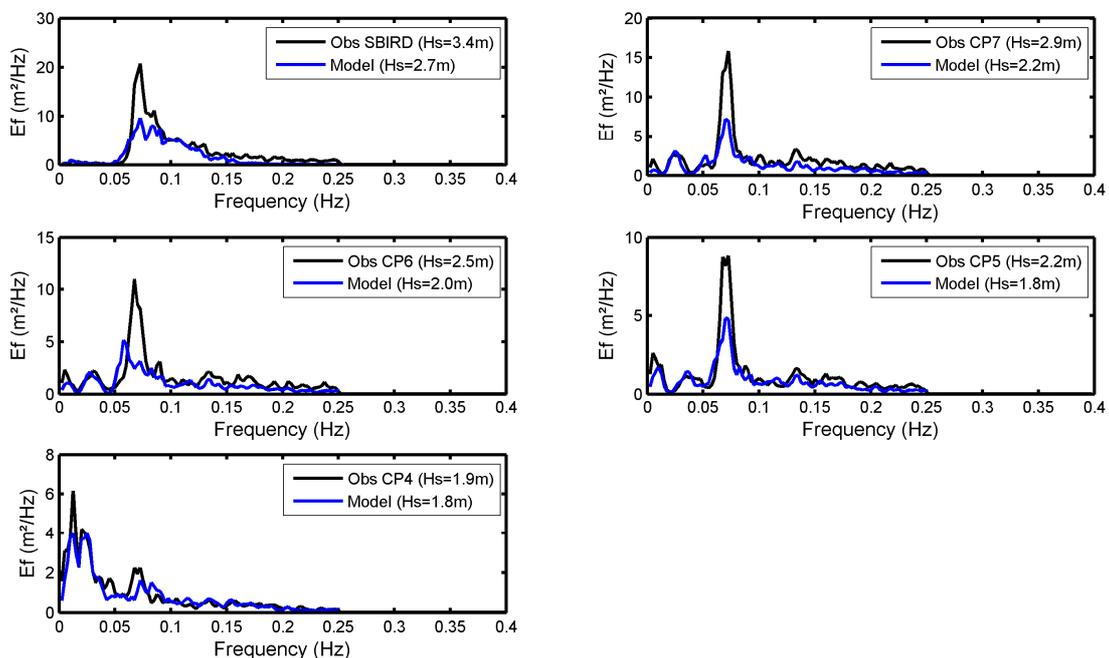


Figure 22 : Comparaison des spectres d'état de mer observés et modélisés sur le SEABIRD et sur les capteurs PS7 à PS4. Exemple de la pleine mer du 01/02/2018 à 16h30.

Enfin, les Figure 23 et Figure 24 fournissent le résultat des comparaisons modèle-mesures pour le runup R2%. On observe que durant l'épisode de tempête, les variations de R2% sont plutôt bien reproduites par le modèle. De plus, les valeurs maximales modélisées, autour des pleines mers, sont proches des maximums observés. On observe toutefois un déphasage dans les variations du R2% le 02/02, avec une évolution

présentant un léger retard dans le modèle. Une erreur de 54 cm, soit 27%, est obtenue durant l'épisode de tempête. La comparaison spectrale fournie en Figure 24 est également encourageante. La domination du swash par la bande IG est obtenue dans le modèle, avec toutefois des écarts dans le détail de la distribution fréquentielle.

En revanche, durant la phase peu énergétique de la campagne, le 31/01 et au cours de la matinée du 01/02, le modèle sous-estime fortement les valeurs de R2% observées. Une hypothèse pour expliquer cet écart est la résolution spatiale du modèle, qui pourrait être encore trop limitée pour bien représenter les oscillations du jet de rive induites par des vagues de faible amplitude. Cette hypothèse devra néanmoins être confirmée par des travaux ultérieurs, en mettant en œuvre une version affinée du maillage. Toutefois, on anticipe que cette augmentation de la résolution pourrait engendrer des instabilités du modèle dans certaines configurations.

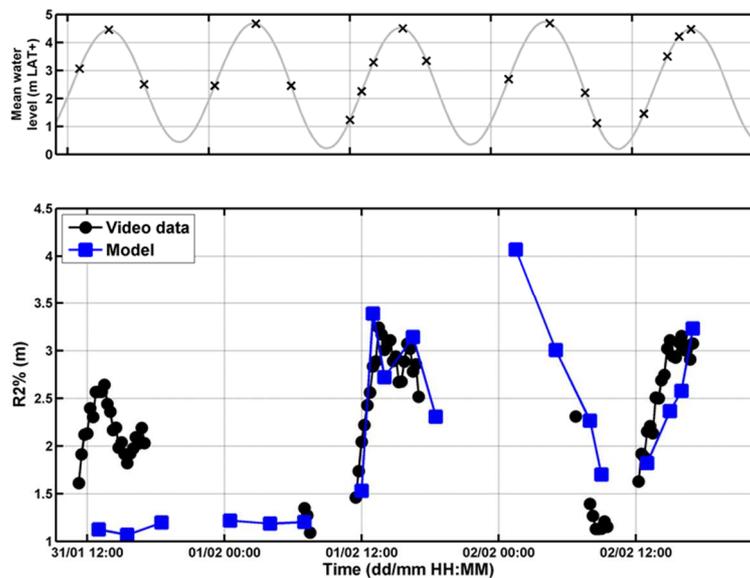


Figure 23 : Comparaison des séries temporelles du runup R2% observé (noir) et modélisé (bleu).

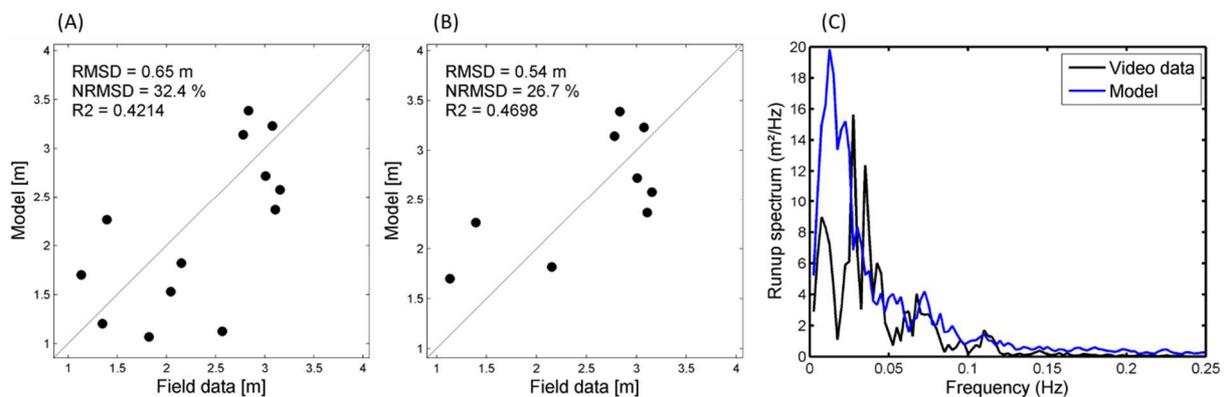


Figure 24 : Graphes de corrélation, erreurs et corrélation sur R2% pour l'ensemble du déploiement (A) et pour l'épisode de tempête uniquement (B). En (C), un exemple de comparaison des spectres de swash observé et modélisé est fourni pour la pleine mer du 01/02/2018 à 16h30.

3.3 Applications et démonstration (Action 4)

3.3.1 Applications diagnostiques

Base de données rétrospectives

Les modélisations décrites aux paragraphes précédents ont été mises en œuvre pour construire une base de données rassemblant toutes les tempêtes répertoriées sur le littoral basque depuis fin 2013. Des simulations rétrospectives ont ainsi été effectuées sur les saisons hivernales 2013-2014 à 2018-2019 incluses, ce qui représente au total 6 périodes de 8 mois de simulation. Pour chaque hiver, les résultats de la simulation rétrospective ont été confrontés aux observations des deux bouées côtières Anglet et StJean, afin de caractériser les performances de l'hindcast.

Cette base de données a pu être mobilisée au cours du projet MAREA pour alimenter différentes investigations des partenaires, notamment UPPA sur le site de Biarritz (voir plus bas), ou encore l'étude réalisée par le BRGM sur le site de Guéthary-Bidart.

Analyse des régimes d'impact sur la Grande Plage de Biarritz

En collaboration avec le partenaire UPPA (voir aussi rapport de synthèse UPPA), les outils de modélisation développés ont été mis en œuvre pour étudier l'impact des tempêtes de période de retour remarquable sur la Grande Plage de Biarritz. Pour cette étude, le modèle spectral d'état de mer a été utilisé en combinaison avec le modèle X-Beach mis en place par UPPA. Ce travail a donné lieu à une publication dans *Journal of Coastal Research* (Morichon et al. 2018). Une illustration des résultats obtenus est fournie par la figure ci-dessous.

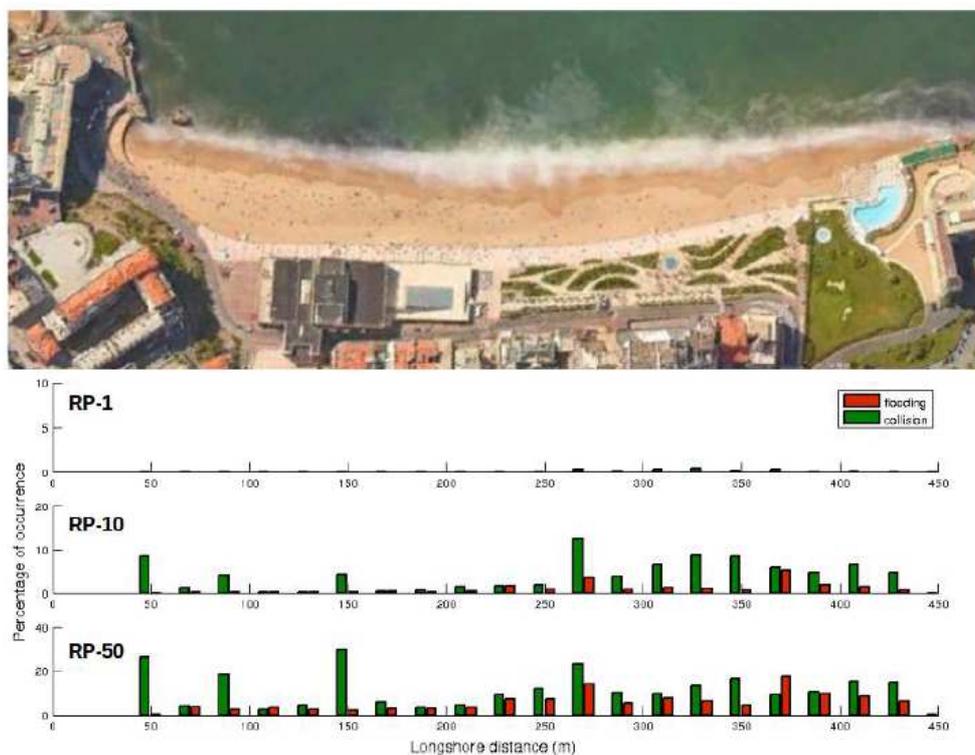


Figure 25 : Pourcentage d'occurrence des régimes de collision et de franchissement calculés pour 3 tempêtes caractéristiques de période de retour 1 an, 10 ans et 50 ans, le long de la moitié Sud de la Grande Plage de Biarritz (extrait de Morichon et al. 2018).

3.3.2 Démonstrations opérationnelles pour la surveillance et la prévision du risque vagues-submersion

Les outils d’observation et de modélisation développés dans MAREA ont été opérés en temps réel dans le cadre de démonstrations opérationnelles. Deux périodes de démonstration ont été effectuées : l’hiver 2017-2018 et l’hiver 2018-2019 (septembre à mai). Durant ces deux démonstrations :

- Un ensemble d’observations a été collecté en temps réel, afin de surveiller les épisodes de tempête et leur impact à la côte. Ces observations incluent en particulier le système vidéométrique de la Grande Plage de Biarritz, opéré par UPPA et mis à disposition via le site UPPA Sirena (<http://sirena.univ-pau.fr/>) ; ainsi que les mesures de la bouée Donostia opérée par Euskalmet et AZTI, visibles notamment sur le site du réseau Euskoos, (<http://www.euskoos.eus/en/>), et les mesures des houlographes côtiers d’Anglet (CEREMA \ UPPA) et StJean et (CEREMA \ CG64).
- Une chaîne de modélisation a été opérée en temps réel pour produire des prévisions quotidiennes du risque vagues-submersion sur la Grande Plage de Biarritz. Cette opération inclut la collecte de toutes les données d’entrée nécessaires à la chaîne de modélisation, les simulations prédictives des modèles, et le calcul des indicateurs de risque locaux alimentés par les prévisions. Les prévisions ont été produites quotidiennement sur un horizon de 5 j.

Durant la démonstration sur l’hiver 2017-2018, un total de 22 épisodes de tempête a été prévu et surveillé par le système. Les épisodes ont été classés selon l’échelle de risque de submersion croissant suivante : VERT, JAUNE, ORANGE et ROUGE. Un niveau BLEU a été ajouté à cette échelle, correspondant aux épisodes où le risque est lié aux fortes vagues uniquement, sans risque de submersion. Pour les 22 épisodes de tempête enregistrés, la classe de risque prévue a été confrontée aux observations (vidéo notamment) ainsi qu’au retour terrain des services municipaux. Cette évaluation a mis en évidence un bon accord entre les prévisions et les observations dans 86% des cas, tandis que le niveau de risque a été surestimé d’une classe dans les 14% des cas restants. De plus, la totalité des erreurs de classe est associée à des épisodes de risque faible et modéré (VERT et JAUNE), tandis que 100% des épisodes de risque supérieur (ORANGE et ROUGE) ont été correctement prévus. La Figure 26 ci-dessous fournit la distribution des classes de risques pour les épisodes répertoriés durant l’hiver 2017-2018, ainsi que les valeurs moyennes des principaux forçages et contributions au niveau d’eau à la côte, pour chaque classe de risque sur la période de démonstration.

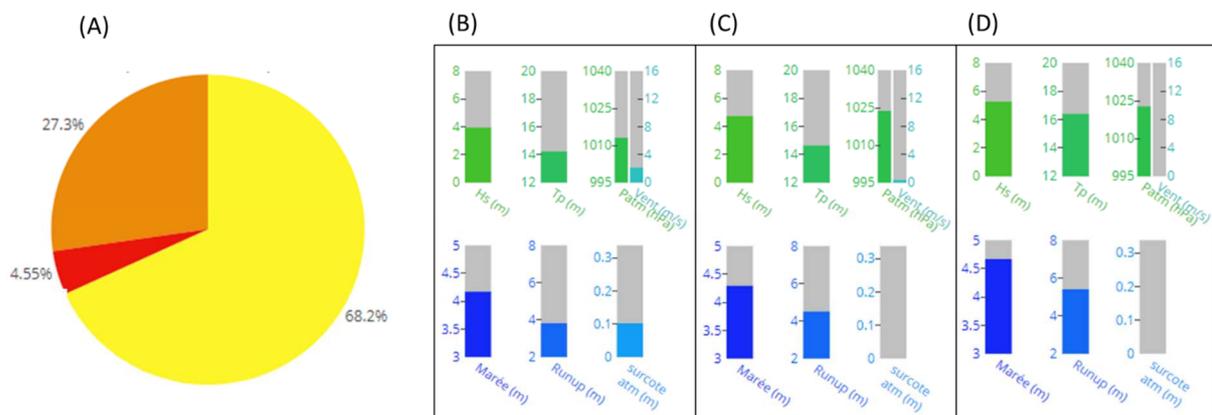


Figure 26 : (A) Distribution d’occurrence des classes de risque des épisodes prévus durant la période de démonstration 2017-2018. (B), (C), (D) Moyenne des forçages et contributions au niveau d’eau pour les classes de risque JAUNE (B), ORANGE (C) et ROUGE (D) sur la même période.

Durant la démonstration sur l'hiver 2018-2019, un total de 38 épisodes de tempête a été prévu et surveillé par le système. Une échelle de risque similaire à celle de la démonstration précédente a été appliquée. Pour les 38 épisodes répertoriés, la classe de risque prévue a été confrontée aux observations (vidéo notamment) ainsi qu'au retour terrain des services municipaux. Cette évaluation a mis en évidence un bon accord entre les prévisions et les observations dans 81% des cas, tandis que le niveau de risque a été surestimé ou sous-estimé d'une classe dans les 19% des cas restants. De plus, comme lors de la démonstration précédente, la totalité des erreurs de classe est associée à des épisodes de risque faible et modéré (VERT, BLEU et JAUNE), tandis que 100% des épisodes de risque supérieur (ORANGE) ont été correctement prévus. La Figure 27 ci-dessous fournit la distribution des classes de risques pour les épisodes répertoriés durant l'hiver 2018-2019, ainsi que les valeurs moyennes des principaux forçages et contributions au niveau d'eau à la côte, pour chaque classe de risque sur la période de démonstration.

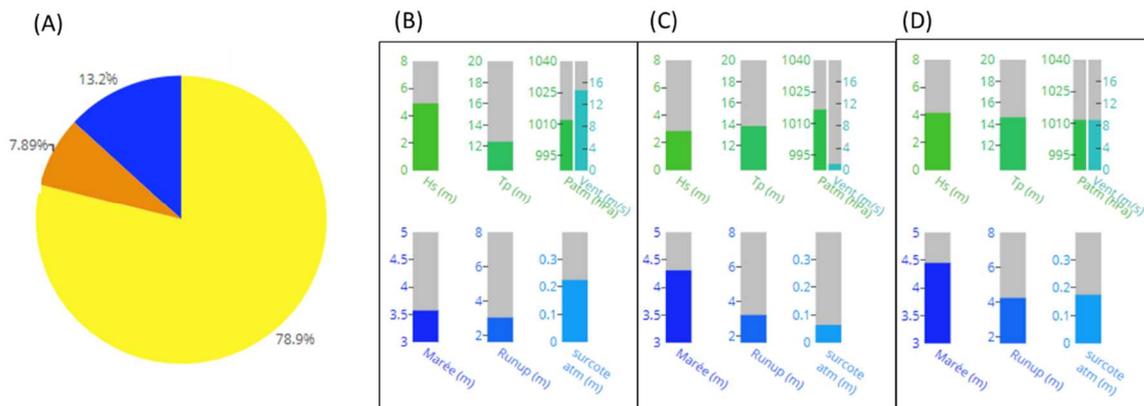


Figure 27 : (A) Distribution d'occurrence des classes de risque des épisodes prévus durant la période de démonstration 2017-2018. (B), (C), (D) Moyenne des forçages et contributions au niveau d'eau pour les classes de risque BLEU (B), JAUNE (C) et ORANGE (D) sur la même période.

Le bilan des deux démonstrations est ainsi très positif. Il a confirmé les capacités et la pertinence des informations produites par le système opérationnel sur le site pilote de Biarritz. En particulier, au-delà des statistiques présentées plus haut, le retour d'expérience de la municipalité à l'issue de ces démonstrations a confirmé l'intérêt du système local à haute résolution. L'outil MAREA a apporté une aide à la décision complémentaire aux systèmes d'alerte nationaux, intégrant toutes les spécificités du littoral biarrot, qui a ainsi contribué à une gestion optimisée des épisodes à risque.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Durant le projet MAREA, RPT a travaillé en collaboration avec les partenaires du projet afin de développer des outils d'observation et de modélisation destinés à améliorer la compréhension et la prévision de l'impact local des tempêtes sur la Côte Basque. Les contributions de RPT ont porté principalement sur la modélisation des états de mer en zone côtière, puis sur l'étude du risque vagues-submersion avec pour site pilote la Grande Plage de Biarritz.

Au cours du projet, un large effort de mesure a été engagé pour acquérir des données sur le littoral en période de tempête. Une stratégie de mesures associant une technologie vidéométrique et des déploiements *in situ* a été mise en œuvre, pour compléter les informations apportées par les réseaux de surveillance existants. Trois campagnes de mesures ont été ainsi menées en 2017, 2018 et 2019, et ont permis d'obtenir un jeu de données conséquent, qui a été exploité pour caractériser les processus déterminant l'impact des vagues et la submersion à l'échelle locale durant les tempêtes.

Le volet d'observation a été complété par un important travail de modélisation. Ce travail a permis de mettre en place et de valider plusieurs approches de modélisation complémentaires. L'association de ces approches a permis de simuler les principaux phénomènes déterminant les vagues et le niveau d'eau, du large jusqu'à la plage, en intégrant les spécificités locales et les processus à fine échelle. Une validation détaillée des différents outils de modélisation a été effectuée en s'appuyant sur les données issues des campagnes d'observations. Cette validation a permis d'optimiser le paramétrage des modélisations, de garantir leur adéquation avec les sites ciblés, et de caractériser les niveaux d'incertitude finalement obtenus.

Enfin, les outils d'observation et de modélisation développés ont été mis en œuvre dans le cadre d'applications diagnostiques pour l'étude d'épisodes à risque, ainsi que dans le cadre de démonstrations opérationnelles. Pour ces dernières, les solutions d'observation mises en place ont été opérées en continue, et une chaîne de modélisation a été mise en œuvre en temps réel pour produire des prévisions quotidiennes de l'aléa vagues-submersion à l'échelle locale de la Grande Plage de Biarritz. Deux démonstrations ont été effectuées en conditions réelles, durant les hivers 2017-2018 et 2018-2019. Le bilan de ces expérimentations a confirmé les capacités et la pertinence des informations produites par le système opérationnel sur la Grande Plage de Biarritz. En particulier, le retour d'expérience de la municipalité a confirmé l'intérêt du système local et sa complémentarité avec les systèmes nationaux, l'outil MAREA ayant apporté une aide à la décision plus fine et spécifiquement adaptée au site vulnérable du littoral biarrot.

Enfin, au-delà de cette évaluation positive sur le site pilote de Biarritz, les technologies et méthodologies développées dans MAREA sont aujourd'hui transposables et reproductibles sur d'autres sites à risque. Elles constituent ainsi un outil à disposition des collectivités pour accompagner les stratégies de gestion à venir face aux risques côtiers engendrés par les épisodes de tempêtes.

Références

- Booij, N., I. J. G. Haagsma, L. H. Holthuijsen, A. T. M. M. Kieftenburg, R. C. Ris, A. J. van der Westhuysen, and M. Zijlema. 2004. *SWAN Cycle III Version 40.41 User Manual*.
- Booij, N., R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen. 1999. "A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions 1. Model Description and Validation." *Journal of Geophysical Research* 104(C4):7649–66.
- Braunschweig, F., P. C. Leitao, L. Fernandes, P. Pina, R. J. J. Neves, and Nucleo Central. 2004. "The Object Oriented Design of the Integrated Water Modelling System MOHID." Pp. 1–12 in *Computational Methods in Water Resources International Conference*.
- Delpey, M. T., F. Ardhuin, P. Otheguy, and A. Jouon. 2014. "Effects of Waves on Coastal Water Dispersion in a Small Estuarine Bay." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(1):70–86.
- Delpey, M. T., P. Royer-Gaspard, P. J. Pouyssegur, and P. Otheguy. 2016. "Étude de La Surcote à l'échelle Locale Sur Le Littoral de Biarritz." in *Congres UHINAK 2016*. Irun, Spain.
- Dietrich, J. C., M. Zijlema, P. E. Allier, L. H. Holthuijsen, N. Booij, J. D. Meixner, J. K. Proft, C. N. Dawson, C. J. Bender, A. Naimaster, J. M. Smith, and J. J. Westerink. 2012. "Limiters for Spectral Propagation Velocities in SWAN." *Ocean Modelling* 70:85–102.
- Li, N., V. Roeber, Y. Yamazaki, T. W. Heitmann, Y. Bai, and K. F. Cheung. 2014. "Integration of Coastal Inundation Modeling from Storm Tides to Individual Waves." *Ocean Modelling* 83:26–42.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart. 1964. "Radiation Stresses in Water Waves ; a Physical Discussion with Applications." *Deep Sea Research* 11:529–62.
- Martins, F., P. Leitão, A. Silva, and R. Neves. 2001. "3D Modelling in the Sado Estuary Using a New Generic Vertical Discretization Approach." *Oceanologica Acta* 24(1):1–12.
- Morichon, D., I. de Santiago, M. Delpey, T. Somdecoste, and A. Callens. 2018. "Assessment of Flooding Hazards at an Engineered Beach during Extreme Events : Biarritz, SW France." *Journal of Coastal Research* 85:1–5.
- Roeber, V. and J. D. Bricker. 2015. "Destructive Tsunami-like Wave Generated by Surf Beat over a Coral Reef during Typhoon Haiyan." *Nature Communications* 6:7854.
- Roeber, V. and K. F. Cheung. 2012. "Boussinesq-Type Model for Energetic Breaking Waves in Fringing Reef Environments." *Coastal Engineering* 70(February):1–20.
- Roeber, V., K. F. Cheung, and M. H. Kobayashi. 2010. "Shock-Capturing Boussinesq-Type Model for Nearshore Wave Processes." *Coastal Engineering* 57(4):407–23.
- Roeber, V., J. Pinault, D. Morichon, S. Abadie, A. Azouri, M. Guiles, D. S. Luther, M. Delpey, and N. Danglade. 2019. "Improving Wave Run-up Forecasts – Benefits from Phase-Resolving Models." in *Coastal Structures*. Hannover, Germany.
- Stockdon, H. F., R. A. Holman, P. A. Howd, and A. H. Jr. Sallenger. 2006. "Empirical Parameterization of Setup , Swash , and Runup." *Coastal Engineering* 53:573–88.
- Zijlema, M. 2010. "Computation of Wind-Wave Spectra in Coastal Waters with SWAN on Unstructured Grids." *Coastal Engineering*.

FIN DU DOCUMENT