

**UNIVERSITE BRETAGNE SUD - FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE
L'INGENIEUR**

MASTER mention : Sciences de la Terre, Planètes, Environnement

Parcours : Ingénierie et Gestion des REssources Côtières et Littorales (IGRECL)

2^{ème} ANNEE



Étude hydro-morpho-sédimentaire à cours-terme de la plage du Vougot, Guisseny (France)

Yohan COBAC

Mémoire présenté le 27 juin 2022

Organisme d'accueil :

Laboratoire Géoscience océan à l'institut universitaire européens de la mer

Encadrants de stage : **Floc'h France, Suanez Serge, Le Dantec Nicolas**

Tuteur UBS du stage : **Gensac Erwan**

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Je souhaite remercier vivement dans un premier temps mes encadrants de stage :

Mme France Floc'h pour sa patience en particulier durant mes premiers pas sur Matlab, sa gentillesse et surtout son grand professionnalisme. Ce stage n'aurait pas pu aussi bien être mené sans ton aide donc merci beaucoup.

M. Suanez Serge pour nos longs échanges sur le sujet, sur son travail et le fonctionnement du LETG. J'ai pu acquérir grâce à toi une autre vision de la géographie.

M. Le Dantec Nicolas pour sa grande aide et son écoute dans l'analyse des données de houle et de courant.

M. Gensac Erwan pour sa disponibilité et ces nombreux conseils lors de nos réunions d'avancement de stage.

Je souhaite remercier tous les membres du projet SEA-EU : Yates Marissa, Pushpa Dissanayake, Teddy Chataigner, Anthony Noronha et Clothilde Michelet pour leurs implications dans le projet que ce soit durant le terrain, mais également en réunion. Nos échanges ont été constructifs et m'ont permis de mieux avancer dans mon sujet.

Je voulais remercier Mme. Firtch Noémie, doctorante, pour m'avoir permis de participer aux premiers déploiements de son mouillage et pour avoir répondu à mes questions et aidé sur Matlab quand je n'y arrivais pas.

Je tenais également à remercier le pilote drone M. Ammann Jérôme pour sa passion pour le drone et pour sa disponibilité afin de m'expliquer son travail et le matériel qu'il utilise au sein du pôle image.

Je remercie les plongeurs de l'IUEM, M. Le Bec Thierry et M. Amice Erwan pour leur très grand professionnalisme et disponibilité dans l'installation des mouillages. Le succès de la mission vient en grande partie d'eux.

Je remercie également la société nationale des sauveteurs en mer de Plouguerneau et Guissény pour leur aide et mise à disposition de leur bateau pour l'installation des mouillages.

Enfin, je tenais à remercier toute l'équipe du laboratoire géoscience océan, M. Bertin Stéphane pour nos nombreux échanges, Mme Jaud Marion et M. Augereau Emmanuel pour leur disponibilité à répondre à mes questions. Je remercie également toutes les personnes que j'aurais oubliées ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce stage.

Pour finir, je tiens à remercier ma copine, pour sa grande aide durant nos longues discussions sur mon stage. Le succès de ce stage repose en partie grâce à toi donc merci beaucoup de m'avoir aidé et soutenu.

Mots-clés : Courant longshore, instrumentation, bathymétrie complexe, hydrodynamisme, dérive littorale

Résumé :

Dans le monde, 80% des côtes sont des côtes rocheuses comme des plages à écueils ou promontoires (Trenhaile, 1987). Dans ce type d'environnement, le régime de houle et de courant au large est souvent bien différent de celui à la côte, avec des processus de réfraction/diffraction des houles qui interviennent. Ainsi, la houle déferlante arrivant à la plage peut générer un courant longshore variable dû à divers paramètres comme l'angle d'incidence ou encore la hauteur significative. Seulement, dans le cas de la plage du Vougot qui est une côte macrotidale, le niveau d'eau et les courants de marée jouent un rôle non-négligeable sur la circulation des masses d'eau. L'étude réalisée durant ce stage se place dans la continuité d'un suivi mensuel de la morphologie de la plage du Vougot. Elle a pour objectif de comprendre la propagation des houles du large vers la côte et la circulation hydrodynamique au niveau de la plage. Durant la campagne de mesure in-situ, un courant bi-directionnelle vers l'est à marée montante et vers l'ouest à marée descendante est mesuré sur la plage. En comparant avec les résultats de courant au large, déterminé comme un courant de marée, on remarque que le schéma de direction se retrouve identique. Cependant, même si les vitesses de 0.2m/s se retrouvent identiques au large et à la plage à marée montante, durant la marée descendante et dans des conditions agitations, une augmentation du courant à la plage s'observe. Plusieurs hypothèses s'offrent à nous : a-t-on la présence d'un courant de marée dans la zone de surf ? Le courant de marée oriente-t-il les houles dans la zone de déferlement ? Ces questions seront traitées avec l'aide de formule de calcul de vitesse issue de la littérature et de modèle de prédiction de houles (Homère et RessourceCode).

Abstract:

In the world, 80% of the coasts are rocky coasts such as beaches with reefs or promontories. In this type of environment, the swell and current regime offshore is often quite different from that at the coast, with wave refraction/diffraction processes involved. Thus, the breaking swell arriving at the beach can generate a variable longshore current due to various parameters such as the angle of incidence or the significant height. However, in the case of Vougot beach which is a macrotidal coast, the water level and tidal currents play a significant role on the circulation of water masses. The study carried out during my training course is placed in the continuity of a monthly follow-up of the morphology of the beach of Vougot. It aims to understand the propagation of swells from the open sea to the coast and the hydrodynamic circulation at the beach. During the in-situ measurement campaign, a bi-directional current towards the east at rising tide and towards the west at falling tide is measured on the beach. Comparing with the results of the offshore current, determined as a tidal current, we notice that the direction pattern is identical. However, even if the velocities of 0.2m/s are identical at the open sea and at the

beach at flood tide, during ebb tide and in agitated conditions, an increase of the current at the beach is observed. Several hypotheses are available to us: is there a tidal current in the surf zone? Does the tidal current direct the swell in the surf zone? These questions will be addressed with the help of velocity calculation formula from the literature and swell prediction model (Homer and RessourceCode).

Schéma bilan de la génération du courant longshore

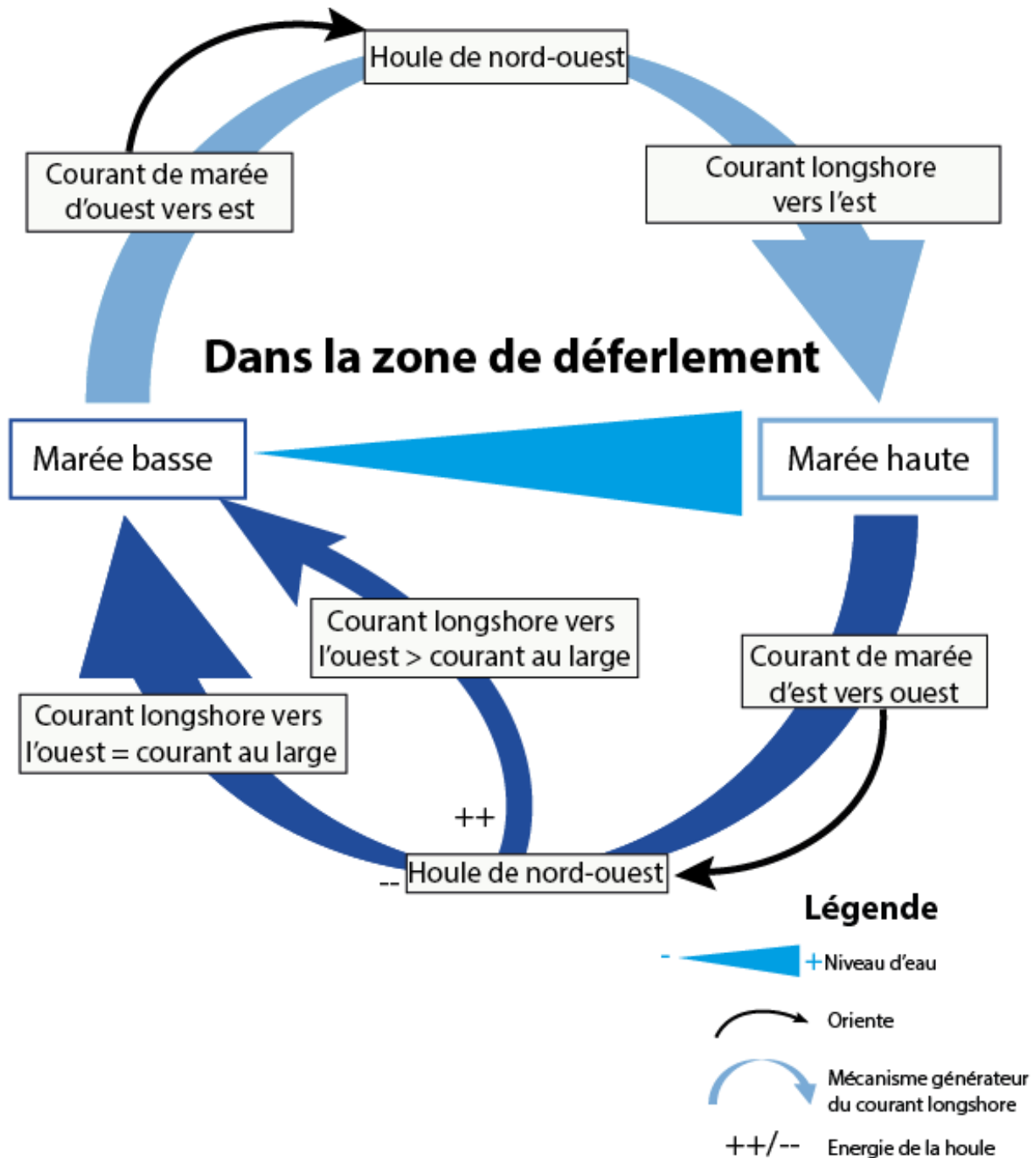


Table des matières

I.	Introduction.....	1
1.	Contexte du stage et déroulement	1
2.	Objectifs et réalisation.....	2
II.	Etat de l’art sur les courants longshore	3
1.	Généralités sur les courants longshore	3
2.	Le transport sédimentaire par le courant longshore	6
3.	Modélisation du courant longshore et du transport sédimentaire	9
III.	Contexte général.....	12
1.	Présentation du site.....	12
2.	Contexte Historique des aménagements anthropiques.....	13
3.	Forçages externes	13
4.	Contexte géomorphologique et sédimentaire	15
IV.	Matériels et méthodes (Tableau I).....	17
1.	Données Hydrodynamiques	19
a.	Hydrodynamisme au Large de la plage : Houles et courants : ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).....	19
i.	Programmation avant déploiement des instruments	19
ii.	Déploiement des instruments sur le terrain.....	20
iii.	Récupération et traitements des données	20
b.	Hydrodynamisme dans la zone de surf : Houles et courants : courantomètre NORTEK AQUADOPP PROFILER 1 et 2 Hz	20
i.	Programmation avant déploiement des instruments	21
ii.	Déploiement des instruments sur le terrain.....	21
iii.	Récupération et traitements des données	21
c.	Houles : Capteur de pression (OSSI et Mastodonte).....	22
i.	Programmation avant déploiement des instruments	22
ii.	Déploiement des instruments sur le terrain.....	23
iii.	Récupération et traitements des données	23
d.	Donnée de Houle extraite de wavewatch3 et RessourceCode.....	23

2.	Calcul de la profondeur de clôture	23
3.	Donnée Photographique prise par drone et satellite	24
a.	Photographie effectuée par drone	24
b.	Image satellite	26
4.	Données topographiques de la plage	26
V.	Résultats	27
1.	Wavewatch3 et images aériennes	27
2.	RessourcesCode et données campagne terrain 2019	27
3.	Vent pour la station de Brignogan	30
4.	Hydrodynamisme au Large	30
a.	Campagne 2022 : Résultats des capteurs de pression	30
b.	Campagne 2022 : Résultats houles et courants	31
5.	Hydrodynamisme sur la plage	33
a.	Campagne 2022 : Résultats des capteurs de pression	33
b.	Campagne 2022 : Résultats des Aquapros	34
6.	Hydrodynamisme du large vers la côte	36
7.	Calcul de la profondeur de clôture	39
8.	Image drone : Photographies des houles	39
9.	Topographie (Annexes 22)	40
VI.	Discussion	42
1.	Identification des forçages impactant le courant longshore	42
2.	Le courant longshore mesuré et prédit	44
3.	Le transport sédimentaire prédit par les formules issues de la littérature	46
4.	Fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de la plage du Vougot	47
5.	Potentiel de prédiction du courant et transport dans la zone de déferlement à partir des conditions au large	51
VII.	Conclusion	52
VIII.	Bibliographie	53
1.	Articles scientifiques et rapports	53
2.	Site internet	61

IX. Annexes	62
1. Etat de l’art	62
2. Programmation des courantomètres	62
3. Présentation du site.....	67
4. Vols drone	67
5. Hydrodynamisme au large.....	71

Liste des figures

Figure 1 : Carte de la répartition des articles à travers le monde	12
Figure 2 : Carte de présentation de la plage du Vougot et du Curnic	12
Figure 3 : A : Carte des roses de houles (Homère) et de vent sur les 20 dernières années (Station de Brignogan). B : Evolution des profils de 2005 à 2022 pour le profil 3 et de 2011 à 2022 pour le profil 6	14
Figure 4 : Carte bathymétrique de la plage du Vougot	15
Figure 5 : Carte sédimentaire de la plage du Vougot	16
Figure 6 : Carte des positions des mouillages	19
Figure 7 : Carte des positions des instruments sur la plage	20
Figure 8 : Procédé de correction de l’orientation des Aquapro.....	22
Figure 9 : Image du logiciel Métashape (à gauche) et d’une orthophoto généré (à droite)	25
Figure 10 : Carte des positions des profils DGPS	26
Figure 11 : Carte montrant la propagation des houles issues de Homère (à gauche) comparée à l’orientation des houles montrée par images satellites Google Earth (à droite). A : 06/10/2010. B : 25/07/2015	27
Figure 12 : Résultats des données de houles mesurés par l’ADCP durant la campagne de 2019 comparés à ceux prédites par Homère ou RessourcesCode	28
Figure 13 : Graphique de la hauteur significative mesurée par l’ADCP de la campagne de mesure de 2019 comparée à la hauteur significative issue de Homère ou Ressources code prédit durant la campagne.....	29
Figure 14 : Graphique de la direction mesurée par l’ADCP de la campagne de mesure de 2019 comparée à la direction issue de Homère ou Ressources code prédit durant la campagne.....	29
Figure 15 : Graphique des résultats de vents mesurés durant les deux semaines de mesure (en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme).....	30

Figure 16 : Graphique des résultats de houles mesurés par le capteur de pression situé avec l'ADCP au point nord-est (en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme)	30
Figure 17 : Graphique des résultats de houles mesurés par les ADCP pour une marée agitée, semi-agitée et calme	31
Figure 18 : Séries temporelles de profils de courant mesuré par les ADCP pour une marée agitée, semi-agitée et calme.....	32
Figure 19 : Résultats de houle issus du capteur de pression placé au niveau du profil 1(en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme).....	33
Figure 20 : Graphique des résultats de houle mesurés par les aquapros pour une marée agitée, semi-agitée et calme	34
Figure 21 : Graphique des courants mesurés par les aquapros pour une marée agitée, semi-agitée et calme	35
Figure 22 : Carte des roses de houle pour tous les aquapros et ADCP durant les 15 jours de terrain	36
Figure 23 : Carte des roses de courant issues des Aquapros et ADCP durant les 15 jours de terrain	37
Figure 24 : Comparaison des résultats issus des Aquapros des profils 5 et 6 et de l'ADCP au sud durant les deux semaines de terrains.....	38
Figure 25 : Carte avec l'orientation des houles issues des vols drones le 23/02/2022 et la mesure du courant associé sur la plage du Vougot	39
Figure 26 : Evolution du profil 6 durant les deux semaines de mesures.....	40
Figure 27 : Evolution du profil 3 durant les deux semaines de mesures.....	41
Figure 28 : Graphique des volumes sédimentaires sur chaque profil durant les deux semaines de mesures	41
Figure 29: Graphique de la comparaison entre la hauteur significative et la vitesse longshore pour les Aquapro des profils 5 et 6 ainsi que de l'ADCP sud	42
Figure 30 : Graphique de la vitesse du courant en fonction de la hauteur significative et de la phase de marée (à gauche l'aquapro P6 et à droite l'ADCP sud)	43
Figure 31: Carte bilan du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de la plage du Vougot durant les mesures	47
Figure 32 : Schéma bilan de la génération du courant longshore sur la plage du Vougot.....	50

Liste des tableaux

Tableau I : Synthèse du matériel et méthode	18
Tableau II: Résultats des calculs de profondeur de clôture pour chaque ADCP	39
Tableau III : Récapitulatifs des résultats issus des vols drones.....	40
Tableau IV : Le R ² de la comparaison du courant de longshore mesuré avec différents facteurs forçant (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1))	42
Tableau V: Le R ² du courant mesuré comparé au courant longshore calculé avec les marées (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1))	44
Tableau VI: Le R ² du courant mesuré comparé avec le courant longshore calculé avec les formules + le courant de marée au large (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1)).....	45
Tableau VII: Résultats du transport sédimentaire (m ³ /h) issue des formules présentes dans la littérature calculée pour chaque profil.....	46

Liste des équations

Équation 1: La formule de Galvin (1967)	4
Équation 2: La formule de Longuet-higgins (1970)	4
Équation 3: La formule de Thorton et Guza (1986)	5
Équation 4: La formule de Kaczmarek (2004)	5
Équation 5: La formule de CERC (1984):	8
Équation 6: La Formule de Kamphuis (2002)	8
Équation 7: La Formule de Kamphuis-MilHommens (2013)	9
Équation 8 : $DoC1=2,28HS-68,5 \times (HS^2gT^2)$	24
Équation 9: $DoC2=(Hs, \bar{t}-0,3\sigma S)Ts, \bar{t}(g5000D50)0,5$	24

Liste des annexes

Annexes 1 : Graphique de répartition des dates de publication des articles sur le courant longshore en fonction des pays	62
Annexes 2: Programmation ADCP Sud	62
Annexes 4: Programmation ADCP Nord	63
Annexes 3 : Programmation ADCP Nord-est	63
Annexes 5: Programmation Aquapro situé au profil 6.....	64
Annexes 6: Programmation Aquapro situé au profil 5.....	65
Annexes 7: Programmation de l'aquapro situé au profil 3	66
Annexes 8 : Carte géologique de la plage du Vougot	67
Annexes 9: vols drone : 23/02/2022 (marée haute).....	67
Annexes 10: Vols drone : 23/02/2022 (fin de marée descendante).....	68
Annexes 11 : vols drone : 23/02/2022 (marée basse).....	68
Annexes 12 : vols drone : 01/03/2022 (marée haute).....	69
Annexes 13 : vols drone : 03/02/2022 (marée montante)	69
Annexes 14 : vols drone : 02/03/2022 (fin de marée montante)	70
Annexes 15 : Résultats des houles ADCP en temporel.....	71
Annexes 16 : Résultats des courants ADCP en temporel.....	72
Annexes 17 : Résultats des houles Aquapro en temporel	73
Annexes 18 : Résultats des courants Aquapro en temporel	74
Annexes 19: Courant de marée au large 24 février	75
Annexes 20 : Courant de marée au large 01 mars	75
Annexes 21 : Courant de marée au large 03 mars	76
Annexes 22: Résultats des profils	78

Liste des abréviations et définitions

TIPE : Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés

Courant longshore : Courant orienté parallèle aux isobathes

Courant Crossshore : Courant orienté perpendiculaire aux isobathes

CEREMA : Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

IUEM : Institut Universitaire Européen de la Mer

Dérive littorale : transport sédimentaire parallèle au rivage

Rip-current : Courant d'arrachement orienté vers le large qui dure que quelques minutes

Bed return flow : Courant de retour orienté vers le large

DGPS : Differential Global Positioning System en anglais ou GPS différentiel

WW3 : Wave Watch 3 (modèle numérique de houle)

QGIS : Quantum GIS (SIG : Système d'Information Géographique) est un logiciel de cartographie

MNE : Modèle numérique d'élévation

MNT : Modèle numérique de terrain

Hs : Hauteur Significative des houles (1/3 supérieur de la houle)

I. Introduction

1. Contexte du stage et déroulement

Cette étude s'inscrit dans un contexte où les littoraux meubles se retrouvent de plus en plus touchés par l'érosion et comprendre leur fonctionnement devient nécessaire. Le fonctionnement des grandes plages de sable avec une bathymétrie linéaire est bien connu. Or, 80% des littoraux à travers le monde sont des côtes rocheuses (Trenhaile, 1987) et aujourd'hui dans la littérature, très peu d'étude s'attache à étudier ces milieux. La compréhension du fonctionnement de ces littoraux est donc indispensable dans un contexte d'adaptation des sociétés face aux aléas auxquels ils peuvent être soumis.

A partir de ce constat, le sujet de stage s'est focalisé sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire du Vougot et son lien avec les changements morphologiques observés sur la zone depuis plusieurs décennies. Les plages du Vougot et du Curnic sont situées sur la partie proximal et distale d'une flèche sédimentaire dunaire. Au niveau géologique, la flèche témoigne d'un transport sédimentaire d'ouest en est. Cependant, depuis les années 2000 et la construction d'une jetée à l'est de la plage du Curnic, une érosion de la dune est observée sur la plage du Curnic, proche de cette jetée. Divers aménagements sont alors construits, mais en vains. En 2005, la municipalité se retourne vers le laboratoire LETG de l'IUEM pour quantifier le recul du trait de côte et comprendre la dynamique érosive de la plage du Curnic. Depuis 2011, le suivi est étendu à la plage du Vougot. Cette fois-ci, une accrétion est observée à l'ouest et au centre de cette plage. Une étude hydrodynamique de la zone est donc préconisée pour comprendre si un courant longshore entre ces deux plages existe et s'il permettrait de transporter du sédiment. Aujourd'hui, plusieurs questions animent ce stage : Comment se propagent les houles du large vers la plage ? Comment un transport sédimentaire peut être en sens contraire à la propagation des houles au large ? Ce transport sédimentaire est-il dû à un courant longshore ? Crossshore ? Quel est l'impact d'une bathymétrie complexe à écueils sur la circulation côtière ?

Pour répondre à toutes ces questions, dans un premier, nous nous sommes intéressés aux données anciennes de houle issues du modèle Homère et d'anciennes campagnes de mesures. Puis dans un second temps, des mesures hydrodynamiques in-situ ont été menées au large et sur la plage. L'ensemble des données ont été traitées et liées entre elles pour expliquer le fonctionnement du site.

En parallèle, un travail de collaboration dans le cadre du projet SEA-EU a été mené entre le CEREMA, l'université de Kiel en Allemagne et les laboratoires géosciences océan (GO) et LETG de l'IUEM. L'objectif de ce projet était de collecter des données hydrodynamiques de la zone pour ensuite réaliser un modèle numérique sous x-beach de la plage du Curnic pour prédire ces évolutions futures.

2. Objectifs et réalisation

Ce stage a réuni plusieurs objectifs, avec dans un premier temps celui de travailler dans une équipe pluridisciplinaire regroupant différents acteurs de divers horizons. Dans un second temps, de pouvoir planifier, programmer et organiser un grand déploiement d'instruments de mesure hydrographique avec plusieurs partenaires. Pour finir, d'acquérir des connaissances plus approfondies en hydrographie avec la conception, le traitement et l'analyse d'une grande base de données issue de plusieurs instruments.

Le travail en équipe s'est articulé autour d'un groupe de 10 personnes composé de 3 stagiaires, 5 chercheurs ou enseignants chercheurs et 1 post-doctorat. Les 3 stagiaires travaillaient en collaboration sur un aspect différent du projet. Par exemple, je travaillais sur l'aspect instrumentation et traitement des données, Clothilde Michelet du CEREMA sur les données d'entrée dans le modèle et Anthony Noronha de l'université de Kiel sur la partie modélisation avec X-beach. Les stagiaires sont encadrés par les 5 chercheurs qui sont France Floc'h, Serge Suanez et Nicolas le Dantec pour l'IUEM ; Pushpa Dissanayake pour l'université de Kiel et Marissa Yates du CEREMA. Les objectifs de ce travail en équipe sont dans un premier temps de pouvoir s'intégrer et travailler dans un groupe de chercheurs pluridisciplinaires au sein d'un projet commun. Ensuite, le second objectif est de pouvoir rendre compte lors de réunion tous les 15 jours de l'avancé de chacun.

La mission d'instrumentation de terrain s'est organisée en deux temps. Le premier est la programmation et la pose de mouillage au large. Le second est la programmation et la pose de mouillage sur la plage. Les objectifs pour ces missions sont d'acquérir des compétences dans la programmation, le montage et la pose d'instruments. Au large, j'ai pu travailler en collaboration avec l'équipe de plongeur de l'IUEM et la Société de sauveteur en mer pour la pose des mouillages et leurs récupérations.

Les derniers objectifs étaient plus du traitement et de l'analyse des données acquises durant ces deux semaines d'instrumentation. Les objectifs étaient de savoir manipuler divers logiciels d'extraction de donnée issue de courantomètre (Win ADCP, Wavemoon, Bin2mat, storm) et ensuite de les analyser sous Matlab. Au niveau des images drones, les mêmes objectifs étaient attendus, c'est-à-dire acquérir des connaissances dans les logiciels de traitement comme Metashape ou QGIS.

Pour finir, un objectif plus secondaire à mon stage était d'encadrer un autre étudiant dans le cadre de son TIPE en classe préparatoire et de l'aider à bien mener son projet. Les objectifs étaient là, d'apprendre à encadrer un autre élève et de lui donner des pistes pour résoudre sa problématique.

II. Etat de l'art sur les courants longshore

Les systèmes côtiers sont soumis à une multitude de forçages externes conduisant à divers processus impliqués dans le transport sédimentaire et la morphologie des littoraux. Parmi ces processus, les courants côtiers et plus particulièrement les courants parallèles au rivage (longshore) ont largement été étudiés par la communauté scientifique depuis plusieurs décennies pour leur importance dans l'ingénierie côtière ou l'étude des formations géologiques (e.g. Putnam et al., 1949 ; Galvin, 1967 ; Komar et Inman, 1970 ; Longuet-higgins 1970 (a) ; Longuet-higgins 1970 (b) ; Thornton et Guza, 1986 ; Putrevu et al., 1995 Kumar et al., 2003 ; Goda, 2006 ; Gomes et al., 2016). Sur les 50 dernières années, les études réalisées démontrent que les Etats-Unis sont l'un des pays ayant le plus étudié le courant longshore suivis par la France et l'Inde (Figure 1, Annexes 1).

Le courant longshore est un courant parallèle au rivage formé par une houle oblique incidente à la côte. L'étude de ce courant est souvent couplée à des études sur le transport de sédiment ou de polluants (Hansen et al., 2013). Ainsi, la compréhension de la propagation des vagues à travers le plateau continental jusqu'à la côte est indispensable pour prédire la morphologie (érosion ou accrétion), le transport sédimentaire, les forces exercées sur les infrastructures côtières avec l'augmentation des niveaux d'eau, les débordements et les inondations induits par les vagues ou encore les courants dangereux (Hopkins et Raubenheimer, 2016). De plus, la relation entre le courant longshore et le transport sédimentaire reste mal connue et doit faire l'objet de mesure sur le terrain (Komar et Inman, 1970). Ainsi, le développement de mesure par fluorescence, optique, acoustique ou marquage radioactif ont permis cette meilleure compréhension de la relation entre le transport sédimentaire et le courant et ont permis également d'avoir des données de calibration pour les modèles numériques (Komar et Inman, 1970 ; Bertin et al., 2008). Dans les années 1980, le transport sédimentaire a pu ainsi être modélisé par des formules empiriques du transport côtier (Bailard, 1984 ; Cerc, 1984 ; Kamphuis, 1991 dans Bertin et al., 2008). Cependant, le rôle des courants longshore restent encore mal connue sur la morphologie de certaines plages avec des conditions de forçages particulières comme les plages à barres macrotidales (Sedrati et Anthony, 2007).

1. Généralités sur les courants longshore

Les courants côtiers sont générés par une houle au large qui à l'approche des côtes se transforment grâce à une bathymétrie qui devient de moins en moins profonde. La houle arrivant à la côte n'est pas de trains réguliers, mais de nature aléatoire. Ainsi, les hauteurs, les périodes et les directions sont toutes différentes (Goda, 2006). Lors de son arrivé à la côte, la hauteur des vagues devient de plus en plus grande dû à ce changement brusque de profondeur (phénomène de shoaling) et à la conservation du flux d'énergie (Hopkins et Raubenheimer,

2016). Ainsi, le creux de l'onde de houle en frottant sur le fond ralentit alors que la crête de houle reste à la même vitesse. Cette différence entre la vitesse de la crête et du creux de l'onde de houle provoque son déferlement. Dans la zone de surf, l'ensemble des vagues déferlent et dissipent l'énergie dans la colonne d'eau tout en augmentant le niveau d'eau près du rivage. Due au déferlement, l'énergie a une intensité croissante en direction de la plage et produit ainsi des courants variables (Thornton et Guza, 1986). De nombreux processus côtiers vont alors se créer comme les rip-current, les courants longshore, le bed return flow, la dérive littorale (flux sédimentaire longshore), induisant alors des changements morpho-dynamiques (Gomes et al., 2016).

Pour le cas d'une onde de houle oblique incidente au rivage, elle conduit à la formation d'un courant longshore (Putnam et al., 1949 ; Galvin, 1967 ; Longuet-higgins 1970 (a) ; Longuet-higgins 1970 (b) ; O'Rourke et leblond 1972 ; Thornton et Guza, 1986 ; Sherman, 1988 ; Bryan et Bowen, 1998 ; Kumar et al., 2000 ; Kumar et al., 2001 ; Kumar et al., 2003 ; Kumar et al., 2003 ; Özkan-Haller et Li, 2003 ; Siswanto, 2015 ; Hopkins et Raubenheimer, 2016 ; Gomes et al., 2016). Le courant longshore qui s'écoule parallèlement à la côte, est généré par l'action combinée des mouvements des ondes primaires et secondaire, des courants (vents, marées, déferlement des vagues) sur le fond marin qui est composé de différents types de matériaux et d'une topographie variable (Cooper et pilkey, 2004). Ce courant est présent dans la zone intertidale et subtidal des plages, dans la zone de surf, de swash et du nearshore (Cooper et pilkey, 2004). Il a sa vitesse maximale qui est atteinte entre le point de rupture des vagues au déferlement et décroît au rivage (Galvin, 1967).

La littérature décrit plusieurs formules pour calculer la vitesse du courant longshore. Cependant, 4 formules sont majoritairement utilisées par la communauté scientifique.

Équation 1: La formule de Galvin (1967)

L'équation est basée sur la théorie de la conservation de masse et assimile le courant longshore a un écoulement côtier crée par l'onde de houle.

$$V = KgmT\sin2\alpha_b$$

Avec : V=vitesse moyenne dans la zone de surf (m/s) ; g= accélération dû à la gravité (m/s) ; T= période de Houle (s) ; α_b = angle de la houle déferlante par rapport à la côte ; m= pente de la plage ; K= est un coefficient sans dimension dépendant uniquement de la géométrie de la rupture d'onde qui est prise comme 1

Équation 2: La formule de Longuet-higgins (1970)

L'équation est construite sur des preuves empiriques et des hypothèses sur la nature des constantes décrivant l'écoulement des masses d'eau dans la zone de surf (Sherman, 1988).

$$V = 20.7m(gH_b)^{1/2}\sin 2\alpha_b$$

Avec : V=vitesse moyenne dans la zone de surf (m/s) ; g= accélération dû à la gravité (m/s);
H_b= hauteur de la houle déferlante (m) ; α_b= angle de la houle déferlante par rapport à la côte ;
m= pente de la plage

Équation 3: La formule de Thorton et Guza (1986)

L'équation est construite sur des données mesurées sur le site de Santa Barbara en Californie. La mesure est réalisée au large de la plage plane, à 8 mètres de profondeur. L'angle d'incidence des vagues est de 5° pour des courants mesurés supérieur à 0.5m/s. Sur ce site l'équation avait une bonne comparaison avec les résultats mesurés.

$$V = \frac{\frac{5}{16} * \pi * 0.3 * \sqrt{g * h_b} * \sin \alpha_b * \tan m}{\frac{9 * n^2}{h_b^{1/3}}}$$

Avec : V=vitesse moyenne dans la zone de surf (m/s) ; g= accélération dû à la gravité (m/s);
H_b= hauteur de la houle déferlante (m) ; α_b= angle de la houle déferlante par rapport à la côte ;
m= pente de la plage ; n=0.02^{1/3} s/m

Équation 4: La formule de Kaczmarek (2004)

L'équation se base sur une description du climat faible à moyen des vagues qui génère un faible niveau d'énergie, de la pente de plage et de la friction de l'eau sur le fond.

$$V = 0.25 * K * \sqrt{\frac{h_b}{2} * g * h_b * \sin 2 * \alpha_b}$$

Avec : V=vitesse moyenne dans la zone de surf (m/s) ; g= accélération dû à la gravité (m/s);
H_b= hauteur de la houle déferlante (m) ; α_b= angle de la houle déferlante par rapport à la côte ;
K= facteur régional de 2.7 pour la côte américaine et 0.9 pour la côte de la mer baltique

La propagation de l'onde de houle n'est pas linéaire sur le plateau continental et est fortement affectée par la bathymétrie et les courants qui créent des hauts fonds et une réfraction transformant la houle (Sonu et al., 1967 ; Noda, 1974 ; Mei et Liu, 1977 ; Siegle et Asp, 2007) ; Apotsos et al., 2008 ; Gomes et al., 2016 ; Hopkins et Raubenheimer, 2016). La réfraction des houles par la bathymétrie redirige les crêtes de vagues pour s'aligner sur les isobathes et diminue ainsi la fréquence de la houle (Hopkins et Raubenheimer, 2016). L'énergie des vagues

va alors augmenter par les hauts-fonds et diminuer par des processus dissipatifs comme les frottements. L'intensité du déferlement varie donc dans l'espace en raison de la forte dépendance à la pente de la plage, à la hauteur des vagues, mais aussi de la profondeur (Thornton et Guza, 1986). La forme du littoral, la présence de banc de sable ou de haut-fond exercent une influence significative sur la distribution du courant longshore sur la côte (Kumar et al., 2000). Les promontoires rocheux sont connus pour influencer les courants côtiers (George et al., 2018). Ils peuvent servir de points de convergence des vagues, d'obstruction ou de points de convergence pour les courants. Du côté exposé, les courants sont plus importants et la contrainte de cisaillement du lit est plus importante. La remise en suspension des sédiments est plus grande. A l'inverse, du côté protégé, les sédiments sont plus fins, il y a moins de remises en suspension et les courants sont moins forts (George et al., 2018). Les mécanismes de contournement des éperons rocheux sont des éléments cruciaux pour comprendre les changements hydro-morpho-dynamiques des plages, mais il existe encore trop peu d'étude pour comprendre ce phénomène (Goodwin et al., 2013).

La bathymétrie ou la morphologie de la plage n'est pas le seul facteur influençant le courant longshore. Une étude de Özkan-Haller et Li en 2003 indique que les courants transversaux dirigés vers le large, du fait du faible angle d'incidence des vagues en eaux peu profondes, peuvent modifier considérablement le champ de vagues incidentes par des processus de réfraction, diffraction ou de shoaling induit par les courants. Ainsi, « dans le cas où le champ de houle serait fortement modifié par les courants transversaux, un mécanisme de rétroaction peut être établi avec des changements importants dans le champ de houle qui modifie à leur tour la circulation littorale » (Özkan-Haller et Li, 2003). De plus, le courant longshore est impacté également par le vent, la marée ou la pression atmosphérique (Hubertz, 1986 ; Sokolov et Chubarenko, 2012). Par exemple, sur les plages peu profondes macrotidales, les courants de marée induisent des variations de niveau d'eau qui impactent fortement la circulation des courants littoraux (Sedrati et Anthony, 2006, 2007).

2. Le transport sédimentaire par le courant longshore

Les aspects quantitatifs du transport sédimentaire côtier appelés « *Longshore sediment transport* » (LST) sur les plages sont étudiés par les ingénieurs du littoral, les géologues et les océanographes depuis des décennies (Blanc, 1996 ; Bougis, 2000 ; Zviely, 2007 ; Zhang et al., 2013). Le LST est devenu un indicateur important dans les études sédimentaires des plages (Siswanto, 2015) et est l'un des principaux facteurs influençant la géomorphologie côtière (Shanas et al., 2014). En 1943, Grant suggérait que le courant côtier combiné à l'action agitatrice des vagues déferlantes fournit la force motrice nécessaire pour déplacer le sable le long de la plage. En effet, la contrainte de cisaillement induite par l'action des vagues remet en suspension le matériel qui est ensuite transporté le long de la côte par le courant longshore

(Bruun, 1963 ; Chaibi et al., 2009). Aujourd'hui, la communauté scientifique est unanime sur le fait que le courant longshore dans la zone de surf joue un rôle important dans le transport de sédiments (Kumar et al., 2003). Le transport sédimentaire est donc proportionnel à l'énergie des vagues au point de déferlement (Komar et Inman, 1970). Les résultats des études montrent que le transport sédimentaire augmente proportionnellement avec la hauteur et la puissance des vagues, la vitesse moyenne du courant, la taille des grains et la pente de plage (Cartier et Héquette, 2011a, 2011b ; van Rijn, 2014).

Une étude de Cartier et Héquette (2011b) concluent que le transport de sédiment dépend à la fois de la hauteur significative des vagues, mais également de la vitesse moyenne du courant et semble également être contrôlé par le flux moyen. Cependant, dans l'article, ils ne trouvent pas de relation entre le LST et l'angle des vagues sur une plage à barre et bêche macrotidal du nord de la France. Ils expliquent par le fait que l'approche d'étudier uniquement l'énergie des vagues n'est pas adaptée pour estimer le transport sédimentaire longshore sur une plage macrotidal ou les courants de marée impacte fortement ce transit. Ainsi, de nombreuses études admettent que le transport sédimentaire le long de ces plages est contrôlé par un courant de marée parallèle au rivage (Sedrati et Anthony, 2007). Ils concluent que le transport des sédiments est donc impacté par les marées dans la zone de hauts-fonds et est principalement induit par les vagues dans la zone de surf (Cartier et Héquette, 2011). L'inclinaison de la côte serait un facteur plus important que l'angle de déferlement de la houle (Chempalayil et al., 2014) en étroite relation avec le climat de houle entrante (Jaramillo et al., 2021). Van Rijn (2014) précise que des vagues de houles régulières produisent des taux de transport côtier plus important que des vagues irrégulières dues au vent. Il démontre aussi que la forme d'un profil de plage relativement pentu conditionne des hauteurs de vagues plus grandes au point de déferlement et donc à des vitesses de courant et de transport côtier plus important. A l'inverse, un profil de plage plat conduit à de petites hauteurs de vague au point de déferlement et donc à des courants et transports sédimentaires plus faibles. Le promontoire rocheux impose aussi des contraintes physiques créant des limites aux cellules sédimentaires. Sur ces plages avec des promontoires, les courants peuvent être diminués et réduire ou empêcher le transport sédimentaire le long des plages (George et al., 2018). Le flux sédimentaire contourne alors les obstacles qui interrompent ce transport côtier tel que les récifs, épis, brises lames, deltas de marée... (Goodwin et al., 2013). Dans cette étude, 80% du transport côtier se produit à des profondeurs inférieures à 4 mètres. L'énergie des vagues obliques (modérée à élevée) fait contourner le sable autour du promontoire pour former un banc de sable en-arrière. Ce banc de sable forme ensuite une flèche de sable allongée qui peut se coller éventuellement au rivage (Goodwin et al., 2013).

Le rôle du transport sédimentaire est très important dans les différentes morphologies de plage (Sherman, 1988). Dans certains cas, il joue un rôle dans la rotation des plages avec

l'érosion d'un côté et une accrétion de l'autre. Cette rotation a été observée sur différentes plages de sable ou gravier soumis à différents marnages (de micro à macrotidale), sur différentes échelles de temps allant de la journée à plusieurs années (Jaramillo et al., 2021). Elle se manifeste de façon importante sur les plages de poches ou de baies (Tran et Barthelemy, 2020). Ainsi, des estimations du transport sédimentaire sont obtenues à partir de formules empiriques, de théories analytiques, de jugements techniques, de modèles physiques, de modèles numériques ou de mesures directes. Les formules, les théories et les jugements sont peu fiables par rapport à la réalité et ne fournissent au mieux que la direction. Les formules entraînent très souvent des erreurs importantes dans le taux calculé par rapport aux taux mesurés (White, 1998).

En théorie, le courant longshore mesuré dans la zone de surf est suffisant pour estimer le taux de transport du sédiment (Kumar et al., 2003). Cependant, en règle générale, le taux de sédiment transporté par ce courant longshore est calculé majoritairement à partir de la formule de CERC (Bayram et al., 2007). Les formules de Kamphuis ou la formule adaptée de Kamphuis-MilHomens sont aussi fréquemment utilisées et offre de meilleures prédictions pour le transport sédimentaire (Bayram et al., 2001 ; Fernández et al., 2016 ; Mil-hommens, 2016 ; Gholami et al., 2021).

*Équation 5: **La formule de CERC (1984):***

Elle permet de calculer le transport sédimentaire longshore (Q), proportionnel à l'énergie des vagues par unité de longueur sur la plage (Bayram et al., 2007). La formule s'exprime par :

$$Q = \frac{KA\rho g H_b^2 T \sin 2\theta b}{64\pi}$$

Avec : Q=LST (m³/ans) ; K= coefficient sans dimension dépendant uniquement de la géométrie de la rupture d'onde qui est prise comme 1; ρ = masse volumique de l'eau (Kg/m³); g= accélération dû à la gravité (m/s); H_b= hauteur de la houle déferlante (m) ; T= période de houle (s) ; θ_b = angle de la houle déferlante par rapport à la côte ; $A = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1 - \rho)}$; ρ_s = masse volumique du sédiment (Kg/m³) ; ρ = masse volumique de l'eau (Kg/m³)

*Équation 6: **La Formule de Kamphuis (2002)***

Kamphuis s'est basé sur des modèles physiques expérimentaux, mais également des données issues d'expériences en laboratoire pour construire ces formules (Bayram et al., 2007). La formule s'exprime avec :

$$Q = \frac{2.27 H_b^2 T_p^{1.5} m^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin \theta_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \rho)}$$

Avec : $Q=LST$ (m^3/ans) ; ρ_s = masse volumique du sédiment (Kg/m^3) ; ρ = masse volumique de l'eau (Kg/m^3) ; g = accélération dû à la gravité (m/s) ; H_b = hauteur de la houle déferlante (m) ; T_p = période de houle (s) ; θ_b = angle de la houle déferlante par rapport à la côte ; m = pente de la plage ; D_{50} = diamètre médian du sédiment

Équation 7: La Formule de Kamphuis-MilHommens (2013)

Une forme améliorée de la formule ci-dessus de Kamphuis, plus précise dans la prédiction du LST.

$$Q_{ans} = C \frac{H_b^{2.75} T_p^{0.89} m^{0.86} D_{50}^{-0.69} \sin^{0.5}(2\theta_b)}{(\rho_s - \rho)(1 - a)}$$

Avec : $Q_{ans}=LST$ (m^3/ans) ; ρ_s = masse volumique du sédiment (Kg/m^3) ; ρ = masse volumique de l'eau (Kg/m^3) ; H_b = hauteur de la houle déferlante (m) ; T_p = période de houle (s) ; θ_b = angle de la houle déferlante par rapport à la côte ; m = pente de la plage (entre la ligne de déferlement et le rivage) ; D_{50} = diamètre médian du sédiment ; $C=0.15\rho_s^a$; a = index de porosité

Dans certaines études, la formule de kamphuis donne une meilleure estimation du transport sédimentaire par rapport à CERC (Chempalayil et al., 2014) ; c'est d'ailleurs le cas pour les plages microtidales de faibles longueurs (environ 6 km).

Le transport côtier annuel implique une bonne connaissance du climat annuel de houle. Ces faiblesses dans la prédiction du transport côtier sont problématiques pour les environnements à haute énergie. L'acquisition de données de terrain précises est indispensable pour comprendre le fonctionnement des plages et calibrer les modèles numériques (Bertin et al., 2008).

3. Modélisation du courant longshore et du transport sédimentaire

La modélisation de la circulation côtière et plus particulièrement du courant longshore est indispensable pour prédire son impact sur nos littoraux. Les courants longshore ont été modélisés principalement en supposant une uniformité des fonds le long du littoral (Putrevu et al., 1995). Les scientifiques ont développé 4 approches sur la modélisation de ce courant. La première est l'approche basée sur l'énergie et le momentum de Putnam de 1949. S'en suit, l'équation de Brunn en 1963, se basant sur des équations de la continuité de masse. En 1964, Harrison décrit ensuite des équations empiriques basées sur des approches statistiques et c'est enfin en 1970, que la dernière approche est exposée par Komar et Inman avec des équations de

tenseur de radiation. Les modélisations numériques basées sur ces équations se révèlent être un moyen efficace de décrire l'hydrodynamisme côtier et de fournir les informations indispensables pour résoudre divers problèmes d'ingénierie.

Les modèles numériques les plus simples sont les modèles en 1 dimension basée sur l'équilibre des flux de quantité de mouvement dans la direction le long du rivage sur une plage plane avec des contours de fond droits et parallèles sous l'impact d'onde monochromatique (Zhang et al., 2018 ; Thornton et Guza, 1986). Dans les modèles d'onde monochromatique, les vagues en-dehors de la zone de surf ne se casse pas et donc toutes les vagues se brisent au même endroit. Le courant côtier généré est alors nul en dehors de la zone de surf, maximum au point de rupture et diminue en direction de la plage (Thornton et Guza, 1986). Des modèles de transformation d'onde aléatoire sont ensuite apparus pour décrire la transformation spatiale de l'onde dans la génération du courant côtier (Thornton et Guza, 1986).

Les modèles numériques conventionnels à la forme d'un modèle de circulation nearshore utilisent les ondes pour évaluer le tenseur de radiation. Il existe plusieurs modèles de circulations nearshore comme le modèle SHORECIRC qui utilise la réfraction/diffraction ou encore le modèle SWAN qui simule les vagues près du rivage. Récemment, des modèles de type BOUSSINESQ sont apparus (Chen et al., 2003). Ils s'appuient sur la simulation des mouvements induits par les ondes et de la transformation d'onde à résolution de phase. Ces modèles prennent en compte les effets des interactions onde-onde, mais également onde-courant (Choi et al., 2015). D'autres modèles comme le modèle SWASH permettent de calculer le courant côtier induit par les vagues. Ce modèle prédit assez bien le courant côtier généré par les vagues sur les plages planes et barrées (Zhang et al., 2018).

Il est important de noter que l'utilisation de telles formules entraîne souvent des erreurs qui peuvent différer de plusieurs ordres de grandeur avec les mesures (White, 1998 ; Bertin et al., 2008). Ainsi, il est important de bien calibrer les modèles avec des données terrains (Bertin et al., 2008). Dans cette même étude, Xavier Bertin détermine une bonne qualité des données WaveWatch3 ainsi que celle obtenue par le modèle SWAN pour des points au large des plages. Il a obtenu d'assez bonnes corrélations entre les courants côtiers mesurés et ceux obtenus par le modèle. Une autre étude trouve une mauvaise corrélation entre les données issues de son modèle et les données de terrain. La raison serait due à la non prise en compte de la morphologie de la plage (Wu et al., 1985).

Le maillage du modèle est également important à prendre en compte. Une étude en mer de Wadden le démontre avec une corrélation très bonne aux valeurs mesurées du modèle dans

le cas d'un grand maillage au large de la plage, puis une moins bonne corrélation de ce modèle proche des côtes. A l'inverse, un même type de modèle avec un maillage étroit obtiendra une meilleure corrélation avec les données mesurées in-situ proche des côtes et donc une meilleure prédiction des courants longshore induis par les vagues (Grashorn et al., 2015). Ainsi, dans ce processus de modélisation, le gradient bathymétrique est déterminant dans la distribution des vagues et des courants longshore à la côte (Cui et al., 2011). Les modèles sont donc limités et doivent être validés par des données de terrain pour coller au mieux à la réalité (Cui et al., 2011).

La complexité des courants longshore est-elle qu'il rend impossible une approche purement théorique. La nécessité d'aller sur le terrain pour récupérer des données afin de rendre les calculs fiables est clairement démontrée. Dans la littérature, pour calculer ce courant longshore, les variables les plus importantes à mesurer vont être l'angle d'incidence des vagues à la plage et la hauteur significative de la houle déferlante (Lanfred et al., 1986). Ensuite, les données nécessaires seront une connaissance détaillée de la bathymétrie et topographie, du spectre de vagues et de ses changements lorsqu'il passe d'une eau profonde à peu profonde et du frottement des masses d'eau sur le fond. Des mesures de terrain et des expériences en laboratoire permettent de mieux comprendre et de calibrer les modèles (Bruun, 1963). Le forçage dû au niveau d'eau joue aussi un rôle dans les courants côtiers au même titre que la bathymétrie et doit être pris en compte notamment en zone macrotidale (Putrevu et al., 1995 ; Sedrati et Anthony, 2007). Une étude affirme également qu'il est important de rajouter l'impulsion du rouleau dans les équations de mouvements des courants longshore proche du rivage (Osiecki et Dally, 1997). Aujourd'hui, peu d'étude scientifique ont travaillé sur la composante longshore du courant sur une plage à écueils soumis à une bathymétrie complexe. La plupart des études sont réalisées sur de grandes plages ouvertes comme le site de Narrabeen (Côte est de l'Australie) (Turner et al., 2016). Ainsi la nécessité d'approfondir nos connaissances sur le courant longshore des plages avec une bathymétrie complexe est nécessaire (George et al., 2018). Le projet Sea-eu s'inscrit dans cette perspective de comprendre la propagation de la houle du large à la côte et ses impacts sur l'hydrodynamisme au niveau d'une plage à bathymétrie complexe. Pour ce faire des mesures de houles et de courants seront effectué sur la plage pour connaitre les valeurs de hauteurs de houles et la vitesse et direction des courants. Cest même mesures seront effectuées au large. Pour compléter ces données, des photographies prises par drone viendront nous donner des indications sur l'orientation des vagues à différents points sur la plage. Grâce à ces mesures, nous pourrons prédire et comparé le courant longshore calculée et mesurée sur la plage et déterminée la propagation de la houle. Le transport sédimentaire longshore théorique pourra également est déterminé.

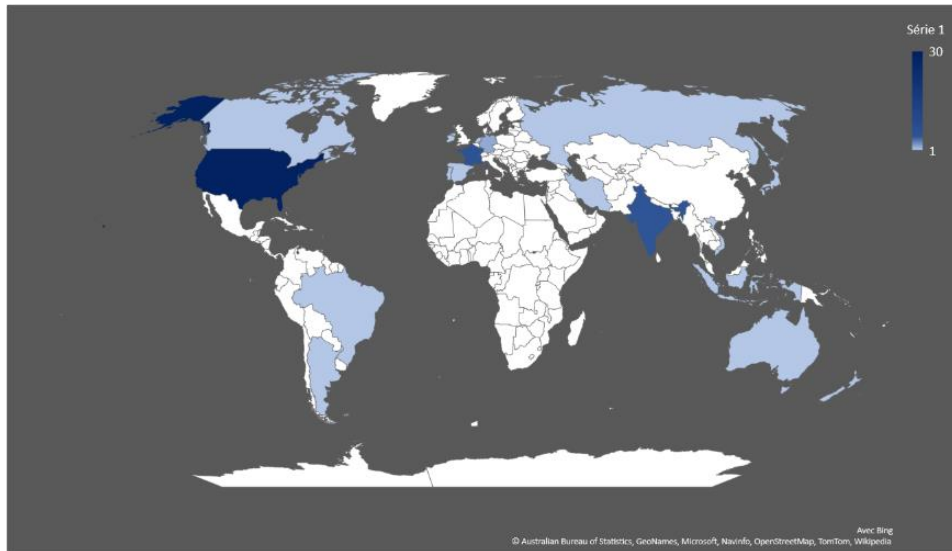


Figure 1 : Carte de la répartition des articles à travers le monde

III. Contexte général

De nombreuses études ont été réalisées sur le site depuis l'année 2004 à la demande de la commune puis dans le cadre du réseau SNO DYNALIT. Ainsi, le contexte général est une compilation d'informations issues de divers rapports (Suanez et Sparfel, 2004 ; Suanez et Sparfel, 2005 ; Suanez et sparfel al, 2006 ; Sparfel et Suanez, 2007; Suanez et al, 2008; Suanez et al, 2009; Suanez et Carriolet, 2010 ; Suanez et al, 2010; Suanez et al, 2011; Suanez et al, 2012; Suanez et al, 2013; Suanez et al, 2014; Suanez et al, 2015; Suanez et al, 2016; Suanez et al,2017; Suanez et al, 2018).

1. Présentation du site

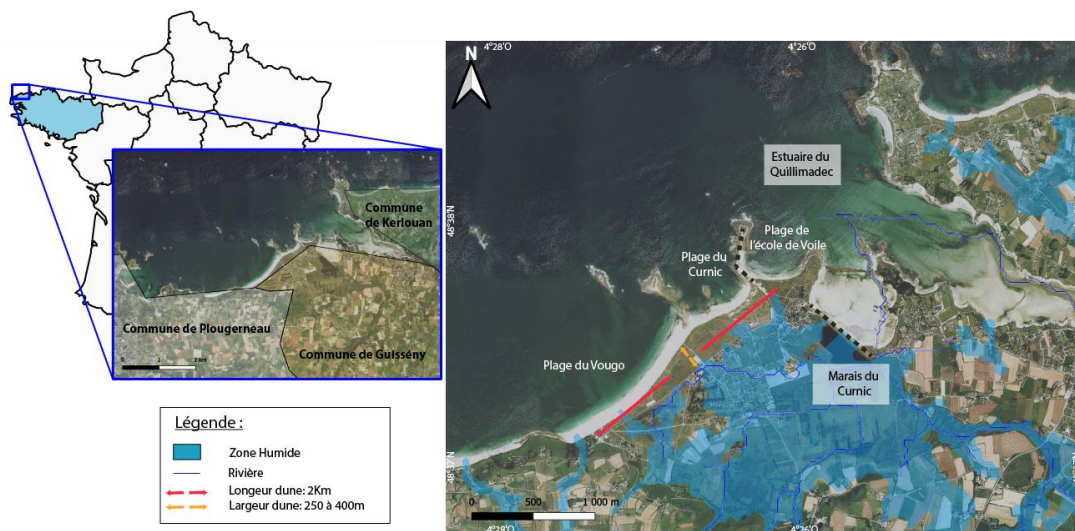


Figure 2 : Carte de présentation de la plage du Vougot et du Curnic

La zone d'étude se situe dans le Finistère nord, sur les communes de Plouguerneau et Guissény. Elle s'étend de la plage du Vougot à l'ouest jusqu'au Curnic à l'est (Figure 2). La Sècherie, nom donné au cordon dunaire en arrière de la plage du Vougot, est remarquable par sa taille et sa massivité (Suanez et Sparfel, 2005). Il s'étire sur 2 km de la falaise morte du Zorn à l'est, en direction de sud-ouest/nord-est, s'élevant à une hauteur de 13 m d'altitude NGF pour une largeur de 250 à 400 m (Suanez et al, 2006). Un polder aménagé par l'homme au 19^{ème} siècle abrite aujourd'hui un marais protégé pour sa biodiversité appelée marais du Curnic. Cependant, du fait de son altitude proche de zéro une grande partie est vulnérable aux inondations ou submersions marines et est protégée seulement par le massif dunaire. Enfin, à l'est de la zone d'étude se situe l'estuaire du Quillimadec avec un débit moyen de 2812 m³/h (Syndicat Mixte des eaux du Bas-Léon – Diagnostic de territoire de l'Anse de Guissény, 2019).

2. Contexte Historique des aménagements anthropiques

Au 19^{ème} siècle, l'Homme aménage un polder en arrière de la dune afin d'augmenter la surface des terres agricoles. Une digue est alors construite en 1834 après plusieurs tentatives infructueuses permettant ainsi l'assèchement des terres. Aujourd'hui, le polder abrite un marais qui est la propriété de Conservatoire du Littoral et abrite une faune et flore riche et variées. Le polder est une zone très vulnérable, car son altitude est proche ou en dessous de zéro (Suanez et al., 2006). En 1974, une digue de protection des mouillages est construite à l'est de l'îlot d'énez croas hent (Suanez et Sparfel, 2005). Le fonctionnement hydro-morphosédimentaire a alors été modifié en bloquant le transit sédimentaire d'est à ouest (Suanez et al., 2006). Depuis la construction de cette digue, une érosion de la dune s'est ressentie surtout à l'ouest de celle-ci. Dans l'hiver 1990, pour pallier l'érosion de la partie orientale de la plage, un enrochement est construit. Cependant, sa mauvaise conception pose aujourd'hui des problèmes avec un ouvrage déconnecté de la dune qui favorise l'érosion sur son extrémité ouest (Sparfel et Suanez, 2007). Aujourd'hui des pistes de rechargement de plage sont à l'étude. La plage du centre nautique constituant une réserve sédimentaire importante, pourrait servir à recharger par by-passing la plage du Curnic et ainsi compenser le blocage de la dérive littorale par la jetée (Suanez et al., 2018).

3. Forçages externes

Le site d'étude est fortement soumis aux houles et aux tempêtes hivernales. Les houles arrivant sur cette dernière ont une direction principale d'ouest à nord-ouest (Figure 3). Les hauteurs significatives médianes sur 25 ans sont de 1.3m au nord, 1.2m au nord-est et 0.2m proche de la plage pour des directions médianes de 310°, 309° et 323° respectivement. Durant les tempêtes, les hauteurs significatives maximum sont de 9 mètres au nord, 7m au nord-est et 2 au sud. Toutefois, les tempêtes n'ont pas toute un impact érosif sur la dune. Le rapport de Suanez et al. (2011) évoque une forte tempête qui n'a pas eu d'impact sur la morphologie du

site dû à de faibles niveaux d'eau par bas coefficients. La houle n'a pas donc pas atteint la dune et les platiers ont joué un rôle de brise-lame (Suanez et al., 2011). Ainsi, le niveau d'eau induit par la marée joue un rôle important dans les changements morphologiques de la plage et de la dune. Le marnage de la zone moyen est de 7.10m (moyenne entre le marnage de l'Aber Wrac'h et de Roscoff) (Suanez et Carriole, 2010). Pendant le printemps, l'énergie marine arrivant sur la plage diminue jusqu'à l'été où la plage est soumise à de très faibles conditions hydrodynamiques. En automne, les conditions énergétiques ré-augmentent. Les vents dominants sont orientés du nord-ouest accentuant ainsi l'agitation de la houle surtout en hiver où les vents de vitesse supérieure à 8 m/s représente 30% du vent arrivant sur la plage (Suanez et al., 2012).

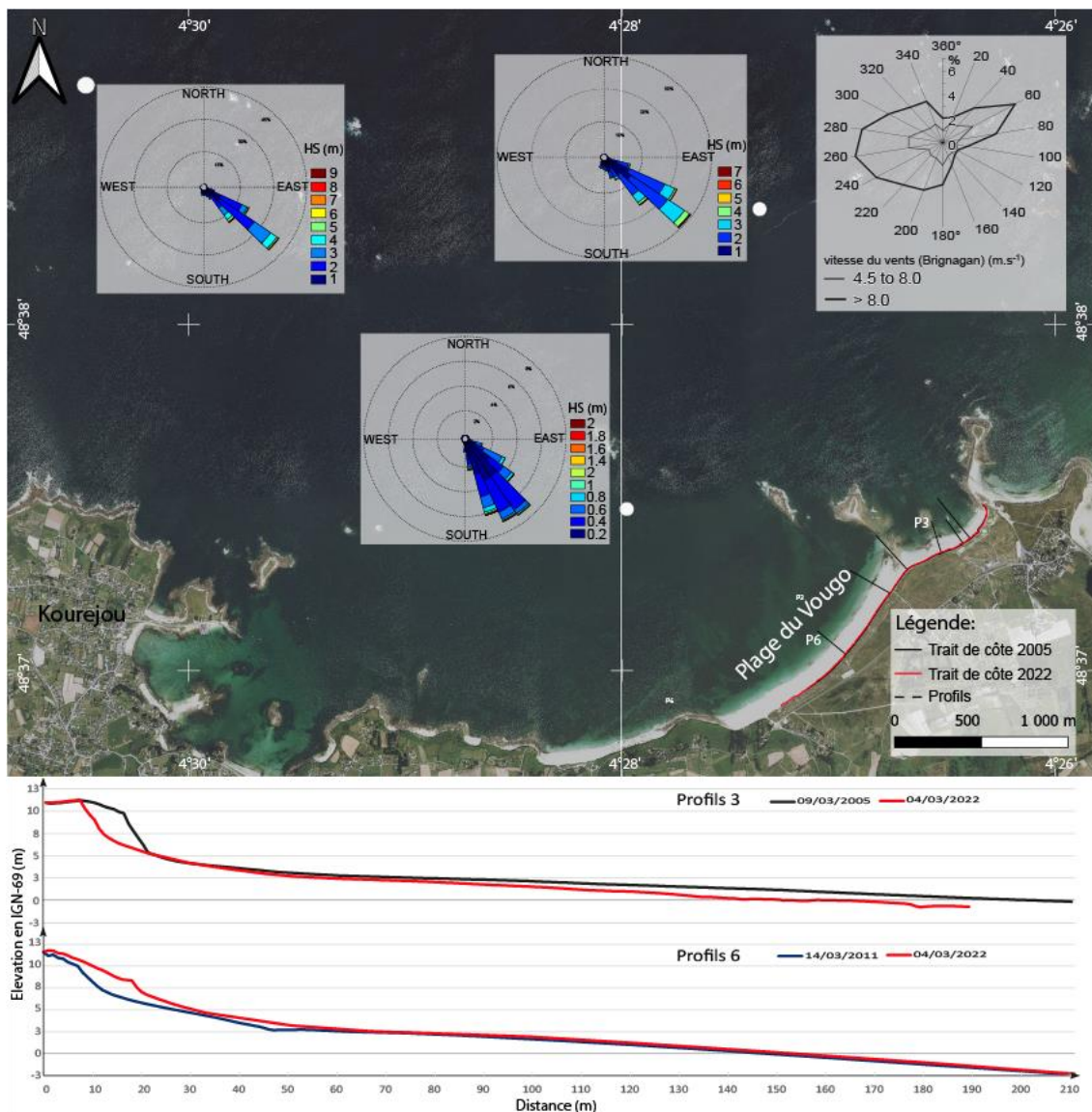


Figure 3 : A : Carte des roses de houles (Homère) et de vent sur les 20 dernières années (Station de Brignogan). B : Evolution des profils de 2005 à 2022 pour le profil 3 et de 2011 à 2022 pour le profil 6

4. Contexte géomorphologique et sédimentaire

Le littoral qui s'étend de Plouguerneau à la baie de Goulven est constitué d'une large plateforme à écueil (Suanez et Carriole, 2010). La jonction entre la plateforme littorale et la partie continentale se fait par un escarpement d'origine tectonique de 30 à 50 mètres au-dessus de l'isobathe 0 en noire (Figure 4). Cet escarpement prend l'allure de falaises mortes déconnectées de la mer par une plaine sédimentaire et des cordons littoraux construit durant la dernière transgression holocène (Suanez et Carriole, 2010). Cette plateforme littorale permet de protéger la plage du Vougot des houles induisant le déferlement des plus grosses vagues. Ces écueils engendrent une circulation hydrodynamique complexe avec de nombreuses réfractions et diffractions, induisant une morphologie particulière avec la présence de tombolo et queue de comète. Ainsi, dans ses rapports, Serge Suanez préconise une étude approfondie de l'hydrodynamisme de la plage pour mieux comprendre son fonctionnement.

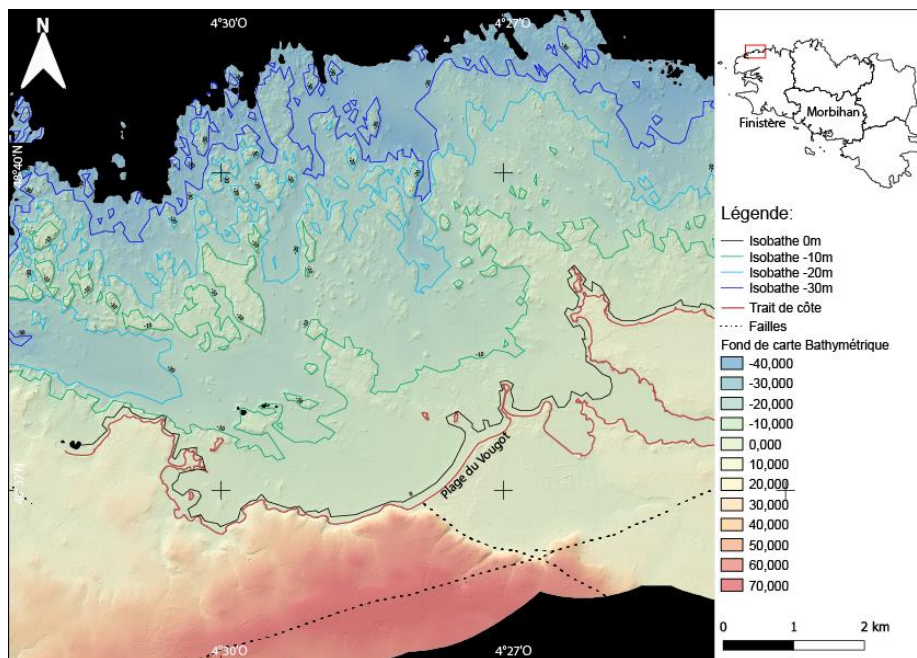


Figure 4 : Carte bathymétrique de la plage du Vougot

Des relevés topographiques sont réalisés tous les mois sur la plage du Curnic et depuis 2011, sur sa partie Ouest. Le recul de la plage est relativement faible de l'ordre de 0.70 à 1 m/an dans le secteur où l'érosion est le plus important (Figure 5, Figure 10, Annexes 8). L'érosion du cordon dunaire est modeste durant les hivers peu tempétueux (Suanez et al., 2008). Cependant, lors d'hivers tempétueux comme celui de 2008, l'érosion observée peut atteindre 6 m par ans. A posteriori de cet événement érosif, au niveau des profils à l'est de la plage, un ré-engraissement du haut de plage a été observé à partir du matériel érodé en bas de plage (Suanez et al., 2009). Ce sédiment a été remonté par la houle et le vent à hauteur de 13.9 m³/m en une année. L'érosion de la partie basse de la plage et la perte de cette fine pellicule de sable fait apparaître régulièrement depuis 2010 des affleurements tourbeux (Suanez et al., 2010). Le retour d'hivers moins tempétueux permet la construction d'un bourrelet sédimentaire ou d'une

dune embryonnaire en bas de dune consolidante celle-ci. Comme le montre les rapports annuels sur la plage du Curnic et du Vougot, la dune embryonnaire durant un certain nombre d'années d'hiver calme, va grossir pour devenir une dune bordière qui jouera un rôle de protection de la dune en arrière contre de futures tempêtes (Suanez et al., 2012). La partie intertidale basse de la plage a engraisé également durant ces années de répit, via un transport sédimentaire a priori venu du large. Cependant, il était observé que la limite de végétation ne revient jamais à sa position avant tempête. Un déplacement de sédiment vers l'ouest est observé avec un engraissement plus important à l'ouest de la plage du Vougot (profil 6) avec du matériel provenant a priori de l'est (Suanez et al., 2009). Ainsi, on suppose la présence d'une dérive littorale d'est en ouest avec un transport sédiment associé. La jetée bloquerait cette dérive et on observerait une érosion en aval de celle-ci. La plage fonctionnerait par cycle avec lors de conditions hydrodynamiques agitées principalement en hiver, une érosion à l'est et une progradation à l'ouest de la plage du Vougot. A l'inverse, lors de conditions hydrodynamiques moins énergétiques, le recul de la limite de végétation serait moindre voire se stabiliserait. Une étude hydrodynamique poussée de la zone a donc été préconisée depuis 2010.

La pente moyenne de la plage est de 0.025° et catégorisé comme plage dissipative (Wright et Short, 1984). Le sable est majoritairement de diamètre moyen (entre 160 et $250\mu\text{m}$) sur la plage du Curnic (Figure 5). Sur la plage du Vougot, surtout en arrière du Tombolo, la proportion de sédiment fin (160 à $250\mu\text{m}$) augmente par rapport à la plage du Curnic. En bas de plage, le sédiment est caractérisé par la présence de sable très très fin (83 à $125\mu\text{m}$) sur la plage du Vougot et Curnic. La présence de Gravier ($>2\text{mm}$) est observée également en bas de plage du Curnic.

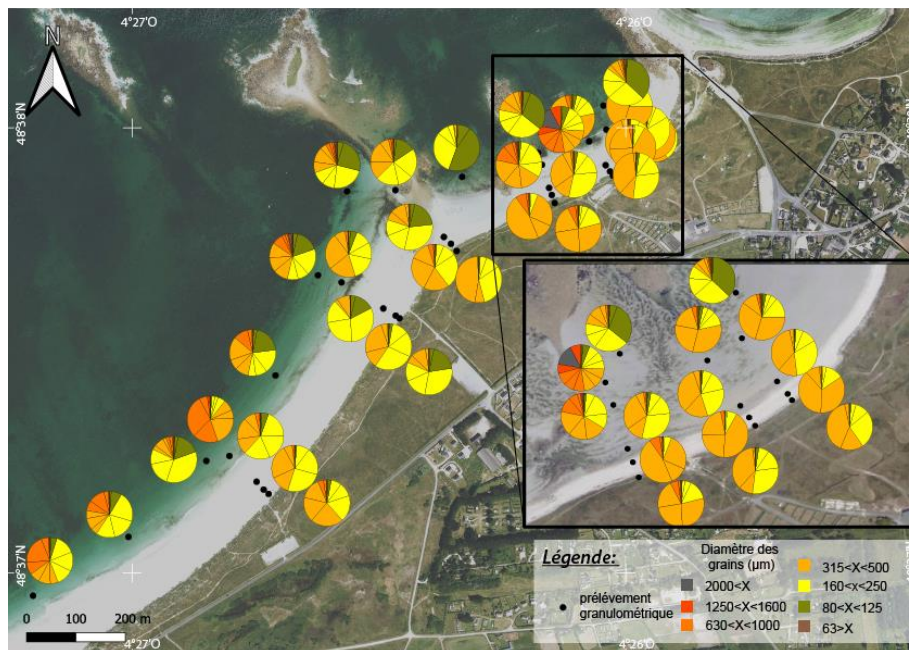


Figure 5 : Carte sédimentaire de la plage du Vougot

IV. Matériels et méthodes (Tableau I)

L'étude s'articule sur 3 approches qu'il est nécessaire de lier pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la plage en lien avec ces changements morphologiques observés depuis plusieurs années.

- Le traitement de donnée d'ancienne campagne de mesure hydrodynamique
- Le traitement de donnée issue de la campagne de terrain 2022 (février à mars)
- Le traitement de donnée hydrodynamique prédite par les modèles de Wavewatch3 et RessourceCode

Ces trois approches prennent en compte des données anciennes et récentes couplées à des données issues de modèles numériques. Ainsi, les données utilisées dans ces études sont :

Les données hydrodynamiques :

- Mesure de courant (ADCP) au large de septembre à novembre 2019 et de février à avril 2022
- Mesure de pression (OSSI) au large de septembre à novembre 2019 et de février à avril 2022
- Mesure de courant (Aquapro) sur la plage de fin février à début mars 2022
- Mesure de pression (ADCP) sur la plage de février à avril 2022

Les données satellites et drones :

- Images satellites Google Earth (2010 et 2012)
- Images drones (fin février/début mars)

Les données Wavewach3 et RessourceCode

- Wavewatch3 : Donnée de houle de 1984 à 2019
- RessourceCode : Donnée de houle pour l'année 2019

Les données topographiques

- Profils depuis 2004 sur la plage du Curnic et 2010 sur la plage du Vougot
- Profils réalisés régulièrement durant la campagne de terrain 2022

Tableau I : Synthèse du matériel et méthode

<u>Type de données</u>	<u>Instruments</u>	<u>Programmation</u>		<u>Logiciel d'extraction et de traitement</u>	<u>Objectifs</u>	
Hydrodynamisme au Large Du 07/02 au 06/05/22	ADCP RDI 600 kHz et 1200 kHz	Burst	1108 où 1390/h	WaveMoon : extraction houles + Fichier courant WinADCP WinADCP : extraction courant Matlab : Traitement	Observer la vitesse et direction du courant Longshore au large Comparer avec les HS, Tp, Dir, angle d'incidence de la houle Observer la propagation des houles du large vers la côte	
		Mesures	2400 (2HZ)/bursts			
cellules		35 de 0.75cm				
Blanking		1.86 m où 0.81m				
Courants		50 pings/3600s				
	OSSI + Mastodonte	Matlab : Traitement			Comparer avec les HS, Tp, Dir, angle d'incidence de la houle mesurer avec ADCP au large et capteur de pression / Comparer les mesures OSSI et Mastodonte (réalisé par l'Ifremer)	
Hydrodynamisme plage Du 23/02 au 04/03/22	Aquapro Nortek	1 MH z	Coordonnée	XYZ	Bin2map : extraction courants Storm (Nortek) : extraction houle Matlab : traitement	Observer la vitesse et direction du courant Longshore sur la plage Comparer avec les HS, Tp, Dir, angle d'incidence de la houle Observer la propagation des houles du large vers la côte
			Mesures	1024/3600s		
			cellule	25 de 25cm		
			Blanking	0.40m		
		2 MH z	Coordonnée	XYZ		
			Mesures	1024/3600s		
			cellule	30 de 20cm		
			Blanking	0.20m		
	OSSI + Mastodonte	Matlab: traitement			Comparer avec les HS, Tp, Dir, angle d'incidence de la houle mesurer avec ADCP à la côte et capteur de pression / Comparer les mesures OSSI et Mastodonte (réalisé par l'Ifremer)	
Imageries aériennes 23/02 01 et 02/03/22	Google Earth+ Géoportail	QGIS: traitement			Comparer les directions de houles observées avec les directions de houles prédites par Wavewatch3	
	Phantom 4 DJI	Métashape + QGIS: traitement			Comparer l'orientation des houles à la plage avec l'orientation mesuré par l'instrument et Création d'un MNT	
Modèles houles	Wavewatch3	Matlab: traitement			Comparer l'orientation des houles avec les images aériennes (satellites et aériennes) Observer où sont diffractés les houles du large vers la côte	
	Ressources codes	Matlab: traitement			Comparer les donnée Ressources codes avec les données mesurées en 2019	
Topographie 23,24/02 et du 01 à 04/03/22	DGPS : Topcon Hiper V	Excel : traitement par Profiler			Observer l'évolution de la pente de plage durant les 15 jours de campagne terrain	
Granulométrie 24/02/22	Prélèvements	Excel : traitement par Gradistats			Observer la répartition des fractions granulométriques sur la plage	

1. Données Hydrodynamiques

- a. Hydrodynamisme au Large de la plage : Houles et courants : ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

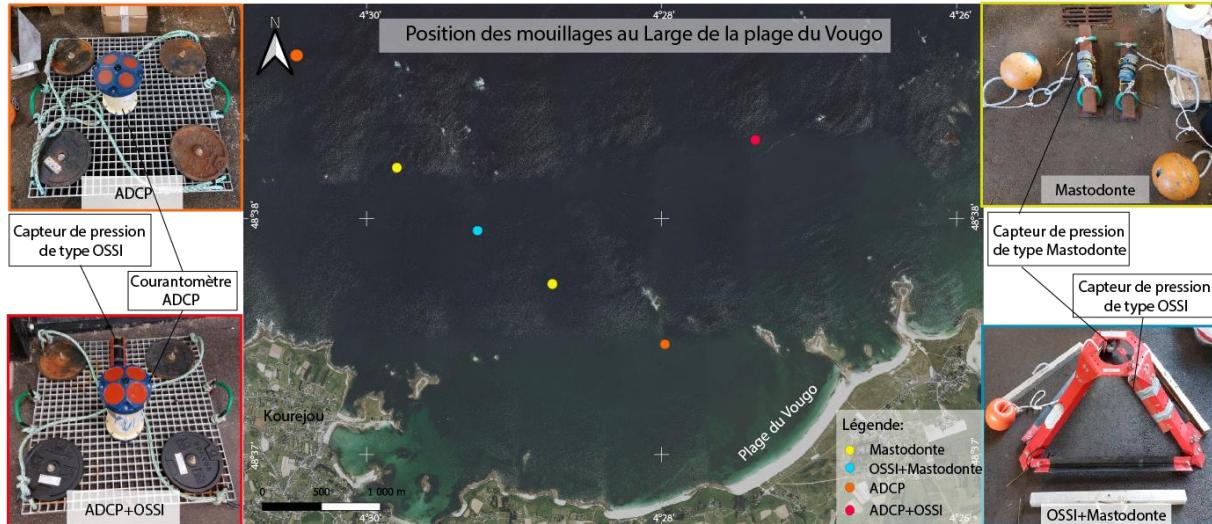


Figure 6 : Carte des positions des mouillages

L'ADCP est un instrument comprenant un capteur de pression et un courantomètre composé de 4 transducteurs émettant des signaux acoustiques dans la colonne d'eau. La houle est mesurée grâce aux vitesses orbitales des vagues mesurées sous les vagues par mesure acoustique. Le courantomètre fonctionne en émettant une onde acoustique qui va se réfléchir sur les particules/bulles d'air présentes dans la colonne d'eau et revenir à son point d'émission. Ainsi, en considérant que la fréquence de l'onde réfléchie est soumise à l'effet Doppler et en faisant l'hypothèse que les particules sont uniquement mises en mouvement par le courant, l'appareil va pouvoir mesurer la vitesse le long de chaque faisceau. Les faisceaux étant orientés différemment, l'instrument en déduit un profil de vitesse en 3D, et donc calcule la direction du courant. L'instrument possède une zone proche de l'appareil appelé Blanking où il ne peut pas mesurer de données (champ proche acoustique). Trois ADCP ont été installés au large de la plage du Vougot (Figure 6).

i. Programmation avant déploiement des instruments

Les instruments ont été programmés via les logiciels BBTalk pour communiquer avec l'instrument et Plan ADCP pour le programmer. Dans le logiciel, les données de profondeur où sera immergé l'instrument, la fréquence d'acquisition, le nombre de burst et de pings ainsi que le début des mesures sont paramétrés (Annexes 2, Annexes 3, Annexes 4).

ii. Déploiement des instruments sur le terrain

Les ADCP sont installés sur un caillebotis (Figure 6) à l'aide d'écrous puis lestés avec 4 poids de 10kg. Une encre servira à encre le mouillage sur le fond et un Nokalon (petite bouée émergée) sera installé à 3 m environ de hauteur au-dessus du mouillage. Le Nokalon a été préféré à une bouée standard émergée à cause de la présence de nombreux pêcheurs sur le site qui auraient pu tirer sur le mouillage. Les mouillages ont été installés par les plongeurs CNRS-UBO de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM). La Société National de Sauvetage en Mer (SNSM) de Plougerneau et Guissény a été sollicité pour transporter les mouillages et plongeurs sur les points d'installation.

iii. Récupération et traitements des données

Les instruments une fois récupérés par les plongeurs sont démontés de leurs mouillages et les données récupérées. Dans un premier temps, les données issues des ADCP sont extraites à l'aide du logiciel constructeur WaveMoon. Ces dernières sont traitées par le logiciel qui exporte ensuite un fichier texte avec les données correspondantes aux vagues et un autre fichier avec les données correspondantes aux courants. Le fichier des données de courants passe par un second logiciel constructeur appelé WinADCP qui va extraire ces données de courant en un fichier .mat. Le fichier texte de la houle et le fichier .mat des courants sont ensuite traités et analysés sous Matlab.

b. Hydrodynamisme dans la zone de surf : Houles et courants : courantomètre NORTEK AQUADOPP PROFILER 1 et 2 Hz

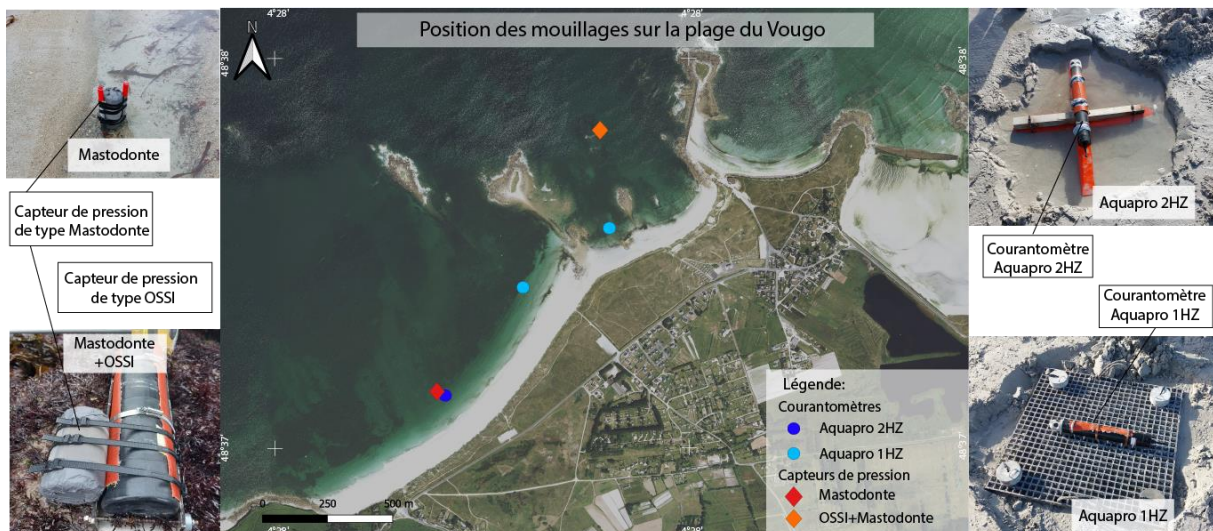


Figure 7 : Carte des positions des instruments sur la plage

L'Aquapro est un instrument au fonctionnement similaire à l'ADCP comprenant un capteur de pression et un courantomètre composé de 3 au lieu de 4 transducteurs. Trois Aquapro seront installées sur la plage du Vougot. Deux de ces trois instruments seront en 1 MHz et le second en 2 MHz (Figure 7)

i. Programmation avant déploiement des instruments

Les Aquapro de 1 MHz sont programmés pour mesurer le courant sur 20 cellules de 25 cm tous les 600 s. Pour les vagues, ils mesurent des cellules de 1 m avec un nombre d'échantillons de 1024 à un intervalle de 3600 s. La distance de blanking pour ces instruments est de 40 cm. Pour l'Aquapro de 2 HZ, il mesure le courant sur 20 cellules de 20 cm tous les 600 s. Pour les vagues, ils mesurent des cellules de 50 cm avec un nombre d'échantillon de 1024 à un intervalle de 600 s. La distance de blanking pour cet instrument est de 20 cm. Le nombre de cellules varie selon la hauteur d'eau due à la marée et donc fluctuera pour tous les Aquapro entre 20 et 30 cellules. Le système de coordonnées est programmé pour mesurer en XYZ pour tous les Aquapro (i.e. selon l'orientation des instruments) (Annexes 5, Annexes 6, Annexes 7).

ii. Déploiement des instruments sur le terrain

Les instruments sont fixés sur des supports en caillebotis ou en forme de croix en acier (Figure 7). Ce support est installé au niveau de l'isobathe zéro et enterré de façon que l'instrument soit au ras du sable. L'instrument est positionné parallèle au rivage afin que l'axe X de l'instrument soit longshore vers l'Ouest. Une encre et vis à sable viennent fixer le support à l'aide d'une chaîne, sur la plage et une bouée vient matérialiser le mouillage. Les données sont récupérées tous les jours durant les deux semaines de terrain et l'instrument est reprogrammé directement sur la plage.

iii. Récupération et traitements des données

Les données récupérées de l'instrument ont été extraites en format *.PRF. Les valeurs de courants ont été extraites de ce fichier grâce à la routine et l'exécutable Matlab Bintomap qui a permis d'obtenir un fichier *.mat. Les valeurs mesurées hors de l'eau ont ensuite été nettoyées et l'orientation de l'Aquapro corrigée. Pour cette correction, on a pris l'orientation du capteur, soit le heading mesuré par l'appareil, soit par l'orientation mesurée à l'aide de deux points pris par le DGPS sur le terrain. Puis par trigonométrie, les Aquapro sont recalés parallèlement aux isobathes à l'aide d'un facteur de correction correspondant à + ou - l'angle de l'Aquapro par rapport à celui des isobathes (θ). Attention, les données récupérées de l'Aquapro situé sur le profil 6 le 2 mars ont été programmées en ENU. Ainsi le facteur de correction correspondant à 360° moins l'orientation de la plage. Le facteur de correction est donc de $+122^\circ$ (Figure 8).

Les formules utilisées pour appliquer l'angle de correction sont les suivantes :

$$V_x = \text{variable } x * \cos(\theta) + \text{variable } y * \sin(\theta)$$

$$V_y = \text{variable } x * \sin(\theta) + \text{variable } y * \cos(\theta)$$

Avec V_x =la vitesse du courant dans le sens longshore de la plage, V_y = la vitesse du courant cross-shore à la plage, θ =l'angle entre l'orientation longshore de la plage et l'orientation de l'instrument.

Les données une fois corrigées, sont traitées et analysées sous Matlab. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par les formules de prédiction de courant longshore trouvées dans la littérature (Galvin, 1967 ; Longuet-higgins 1970 (a) ; Longuet-higgins 1970 (b) ; Thornton et Guza, 1986 ; Kaczmarek et al., 2004 ; Équation 1 ; Équation 2 ; Équation 3 ; Équation 4)

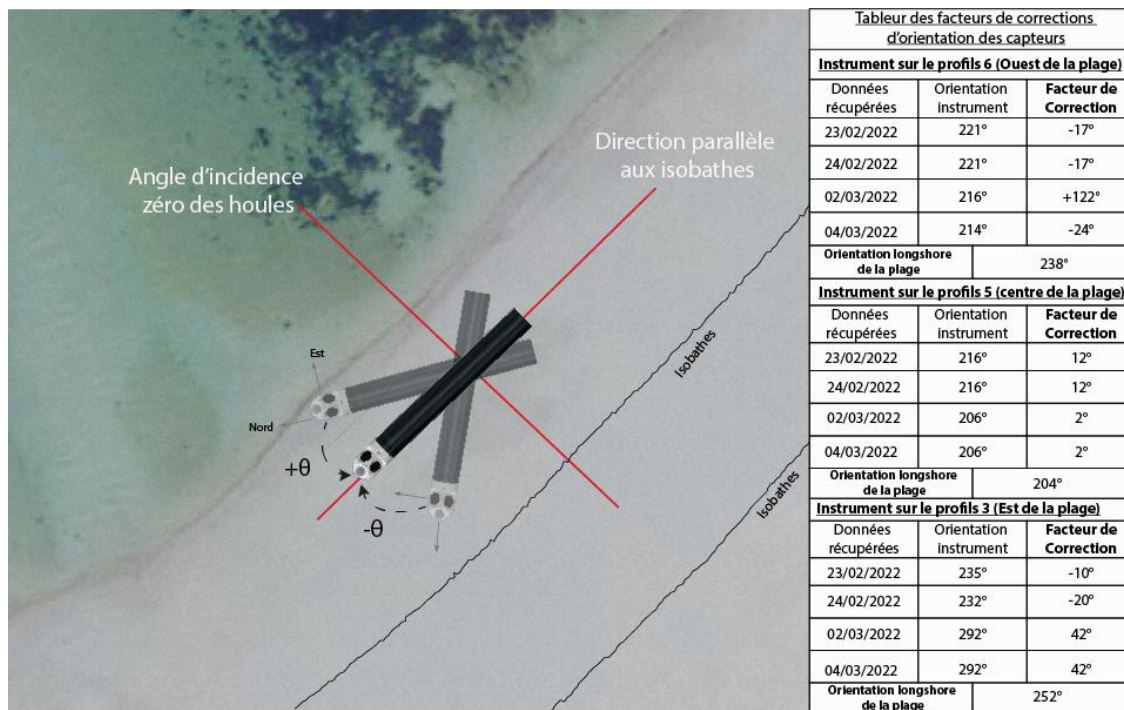


Figure 8 : Procédé de correction de l'orientation des Aquapro

Pour les mesures de houle, les données ont été récupérées à l'aide du logiciel Storm de Nortek. Les données sont importées dans le logiciel, puis traitées avant d'être exportées sous un fichier texte (*.Wap). Ce fichier texte est importé dans Matlab, puis les données sont nettoyées, traitées et analysées.

c. Houles : Capteur de pression (OSSI et Mastodonte)

Les instruments OSSI et Mastodonte sont composés d'un capteur de pression mesurant la hauteur d'eau au-dessus d'eux. Les instruments OSSI sont des capteurs de pression standard alors que les Mastodontes sont des capteurs de pression low-cost fabriqués par l'IFREMER. Deux capteurs de pression OSSI et trois capteurs de pression Mastodonte sont installés au large. A la plage, deux Mastodontes et un OSSI sont installés.

i. Programmation avant déploiement des instruments

Les capteurs de pression ne nécessitent pas de programmation avant le déploiement. La préparation de l'instrument consiste uniquement à installer d'une batterie et une carte d'enregistrement CompactFlash.

ii. Déploiement des instruments sur le terrain

Le premier capteur de pression OSSI sera installé sur la même structure qu'un ADCP et le second sera installé sur un tripode en acier qui nous a été prêté par le SHOM. Un premier Mastodonte viendra compléter le tripode. Ensuite, celui-ci sera lesté au fond par des barres en plomb fixées sur la structure, visibles grâce à un Nokalon et installé par les plongeurs de l'IUEM. Les deux autres Mastodontes seront fixés sur des poids qui seront visibles également par un Nokalon. Les poids sont jetés par-dessus le bateau en prenant soin qu'ils tombent droit et au bon emplacement.

iii. Récupération et traitements des données

Les données issues des capteurs de pression sont importées sur Matlab et corrigées avec la pression atmosphérique mesurée par Météo France à la station météorologique de Guipavas pour conserver uniquement la pression due à la hauteur des vagues. Ensuite, les données sont traitées et analysées sous Matlab.

d. Donnée de Houle extraite de wavewatch3 et RessourceCode

Les données de houles issues de Wavewatch3 ont été extraites sur tous les points de la grille du modèle dans un espace partant de la côte jusqu'au point où les houles ne sont plus diffractées par la bathymétrie. Ces données ont été importées sur Matlab et une carte des directions de la houle pour l'ensemble des points est créée pour chaque jour où on a une image satellite avec des trains de houle bien visible. Ainsi, l'objectif ici est de voir où la direction des houles change, mais également si le modèle correspond bien à ce que l'on observe avec les images satellites.

Pour les données de ressourcesCodes, seuls les points de la grille les plus proches des appareils installés en 2019 ont été extraits. Ces données sont ensuite traitées sous Matlab et comparées avec les données mesurées par les capteurs de pression et ADCP en 2019.

2. Calcule de la profondeur de clôture

Pour définir la profondeur de clôture, qui est la limite marine du prisme sédimentaire actif, une méthode prédictive, basée sur l'approche empirique d'Hallermeier élaborée en 1978 est utilisée (Valiente et al., 2017 ; Cherfils, 2020). Deux profondeurs de clôture (Inner et Outer) sont calculées à l'aide des mesures hydrodynamiques in-situ des trois ADCP et des données RessourcesCodes annuelles pris au même point que les ADCP.

La première limite, appelée Inner depth of closure se définit comme la limite au-delà de laquelle il n'y a plus de changements significatifs de morphologie, se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Équation 8 : } DoC1 = 2,28HS - 68,5 \times (HS^2 g T^2)$$

Avec : HS=la hauteur significative maximale des houles se répercutant sur la côte pendant au moins 12 heures au cours d'une année, T=la période associée à HS, g=accélération du champ de pesanteur terrestre

La seconde profondeur, appelée Outer depth of closure sépare la zone dynamique de la zone statique de la côte. Elle est calculée par

$$\text{Équation 9: } DoC2 = (H_{s,t} - 0,3\sigma_s) T_{s,t} (g/5000 D^{50})^{0,5}$$

Avec : $H_{s,t}$ la hauteur significative moyenne des houles au cours d'une année en enlevant les 13 valeurs les plus grandes, $T_{s,t}$ la période moyenne des houles au cours d'une année, g= l'accélération du champ de pesanteur terrestre

Ces formules sont utilisées sur des côtes micro-tidal, sableuses et dominées par les houles (Nicholls et al., 1996 ; Cherfils, 2020). La zone du Vougot est une plage macro-tidale, avec une bathymétrie complexe et dominée par les houles. Les formules doivent donc être utilisées et validées avec des données mesurées in-situ pour affiner les profondeurs de clôtures calculées.

3. Donnée Photographique prise par drone et satellite

a. Photographie effectuée par drone

Des vols drone ont été effectués le 23 mars, le 1 et le 2 mars. L'objectif de ces vols drones est de photographier la direction des vagues dans la zone de surf. Pour ce faire, des photographies de la plage avec un recouvrement de 30% sont réalisées grâce à un drone (Phantom 4 de chez DJI). Des cibles sont positionnées et relevées à l'aide d'un DGPS pour avoir des repères et donc un meilleur géoréférencement de la mosaïque. Les photos une fois extraites du drone sont importées dans le logiciel Metashape (Figure 9). Les photographies importées sont dans un premier temps alignée puis les cibles et sont relevées manuellement et nommées en fonction du nom du point pris au DGPS sur le terrain. Le même nom permettra au logiciel, après importation du fichier des coordonnées des cibles, d'appliquer les mêmes coordonnées du fichier de mesure sur le terrain à celui des cibles relevées dans le logiciel. Une fois les repères associés aux bonnes coordonnées DGPS, on peut générer un nuage de points dense, un MNT et une orthomosaïque.

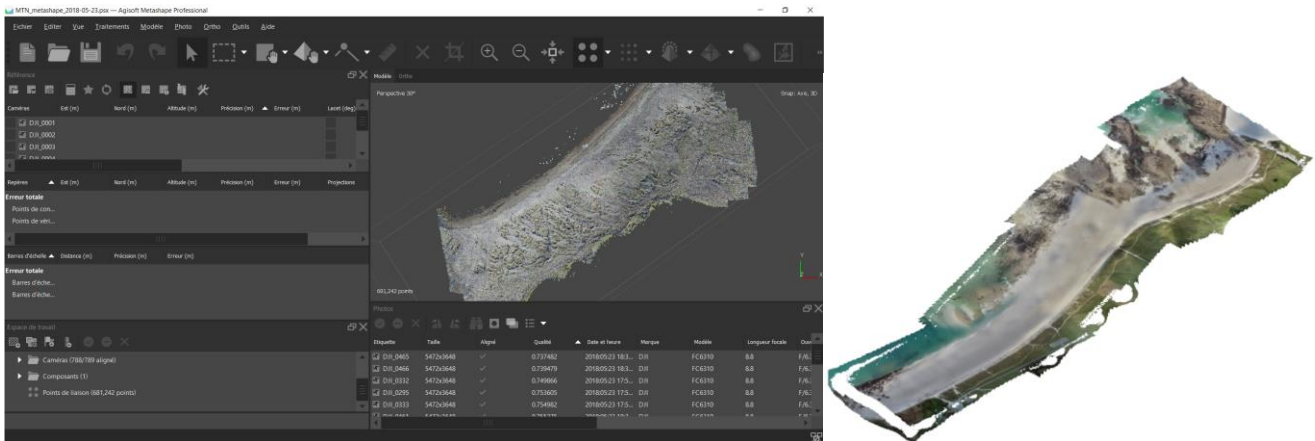


Figure 9 : Image du logiciel Métashape (à gauche) et d'une orthophoto générée (à droite)

Pour certaines images, le logiciel Metashape et Photoshop n'ont pas réussi à aligner les photographies. La raison probable est un manque de recouvrement des photographies et donc un manque de points commun entre les photos pour les aligner. La solution trouvée a été sur QGIS, d'utiliser l'extension Frechand, qui permet de créer des mosaïques de photos en alignant les photos manuellement. Pour ce faire, les photographies sont importées une à une sur QGIS. Ensuite à l'aide d'une vieille orthophoto, la première photo avec une zone non immergée est placée de façon qu'elle corresponde le mieux possible avec l'orthophoto. Puis, une à une les photographies sont importées et placées de façon que la partie en commun corresponde le mieux possible à la précédente. Finalement, une mosaïque de photographies est créée et peut être exportée sous forme d'orthophotographie.

Une fois l'orthomosaïque créée, les photographies de houles vont pouvoir être géoréférencées grâce à des points de repère correspondant aux algues entre l'orthophoto et la photographie. Les photographies de houles ont été réalisées à des points fixes le long de la plage afin que l'on ait bien la propagation de la houle tout le long de la plage. Ensuite, une fois la photographie géoréférencée, les crêtes de houles vont être relevées manuellement sur QGIS et comparées à l'orientation de la plage pour avoir l'angle d'incidence (mesuré par Adobe Illustrator : outil mesure d'angle).

Un dernier vol drone est effectué le 4 mars pour faire une topographie de la plage. Pour ce faire, on réalise les mêmes étapes que ci-dessus à l'aide du logiciel Metashape. A la différence que plus de cibles sont installées et mesurées au DGPS. Le taux de recouvrement des photographies est plus élevé (de 70%) et le drone est relié à une base GPS RTK mise en station pour une meilleure précision des photographies. Cette technique appelée photogrammétrie consiste à déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques.

b. Image satellite

Le but des images satellites est de pouvoir ensuite les comparer aux directions de vagues prédites par WaveWatch3 durant la prise de vue. Des images satellites et aériennes sont récupérées sur Géoportail et Google Earth pour visualiser l'orientation des houles sur les écueils et la plage de 1984 à aujourd'hui (date qui correspond à la plage de temps des modèles Wavewatch3 et Ressources codes). Seules deux images permettent de correctement visualiser les lignes de crêtes des houles : 06/10/2010 et 25/07/2012. Une fois les images téléchargées, elles ont été géoréférencées sur QGIS et les limites des crêtes de houle ont été dessinées.

4. Données topographiques de la plage

La topographie de la plage a été réalisée grâce à des mesures DGPS le 22, 24 février et les 1,2 et 4 mars. Le DGPS utilisé pour effectuer ses mesures est un DGPS Topcon Hiper V relié à une base mobile (Figure 10). Pour ce faire, une station fixe est installée sur son point de mise en station où les coordonnées sont connues (clou topographique). Le DGPS avec la base mobile est donc relié à la base fixe et aux satellites. L'intérêt de cette méthode bien que contraignante dans sa mise en place est d'avoir des données plus précises et qui ne nécessite pas de poste traitement. Les mesures le long des 6 profils de plage matérialisés par une tête de profil et un gisement sont réalisés. Ainsi, l'opérateur effectue des mesures à intervalles différents selon la morphologie de plage (une plage rectiligne entrainera des mesures plus éloignées qu'une plage avec un fort changement morphologique). Les données topographiques seront ensuite traitées sur la macro Excel nommée Profileur et permettront de voir si des changements morphologiques de la plage ont été observés durant nos 15 jours de mesures sur la plage.

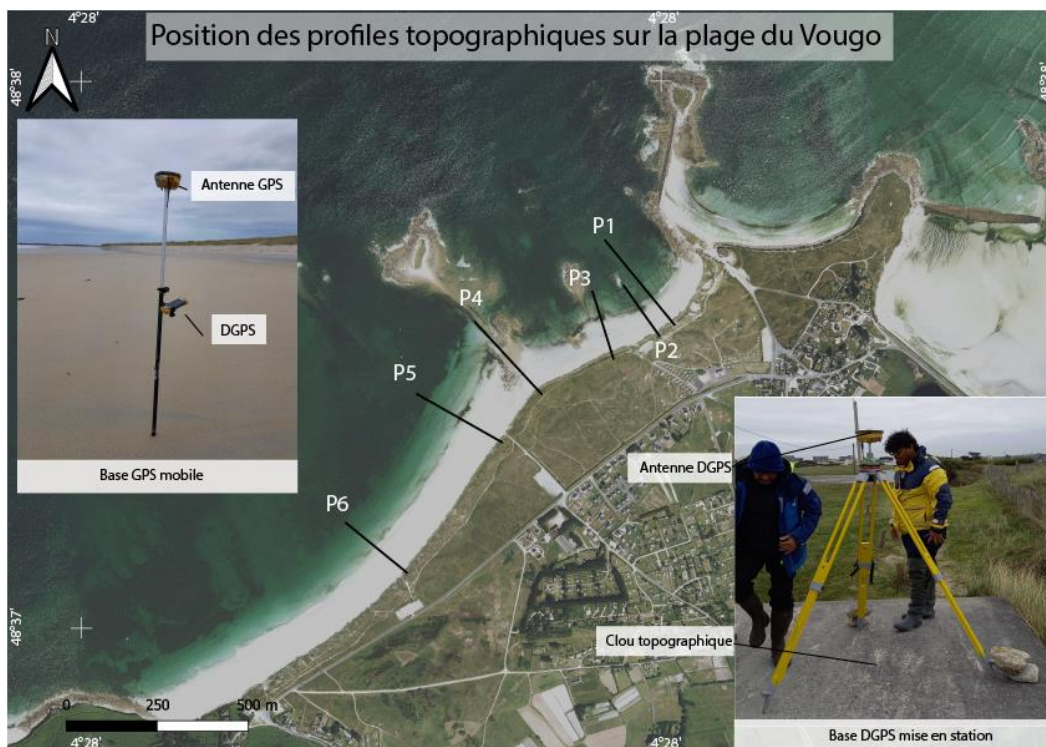


Figure 10 : Carte des positions des profils DGPS

V. Résultats

1. Wavewatch3 et images aériennes

Dans un premier temps, l'étude s'est portée sur l'observation de l'orientation des houles du large vers la plage avec l'aide du modèle WaveWatch3 et d'anciennes images aériennes. Le but est de mieux visualiser l'orientation de la houle au large et sur la plage tous en observant s'il y a de la réfraction/diffraction des houles et où cela se passe (Figure 11).



Figure 11 : Carte montrant la propagation des houles issues de Homère (à gauche) comparée à l'orientation des houles montrée par images satellites Google Earth (à droite). A : 06/10/2010. B : 25/07/2015

Les houles issues du modèle wavewatch3 ont une orientation au large dirigée plus vers l'ouest puis elle tourne pour arriver avec une direction de nord à nord-ouest. Le modèle indique ainsi que l'on a deux orientations distinctes de houle qui arrivent à la plage, des houles orientées nord-ouest et des houles orientées plus nord-est dû à sa réfraction sur les platiers des houles de nord-ouest. Les directions de houles observées sur les images satellites semblent correspondre avec les directions prédites avec le modèle sauf en bord de plage.

2. RessourcesCode et données campagne terrain 2019

L'orientation et la hauteur des houles sont ensuite comparé entre les résultats du modèle et les observations réalisées sur le terrain. En parallèle, l'étude a donc cherché à comparés les résultats issus des

modèles WaveWatch3 et RessourcesCode avec d'anciennes donnée de mesure in-situ effectué en 2019 par la pose d'un courantomètre au large.

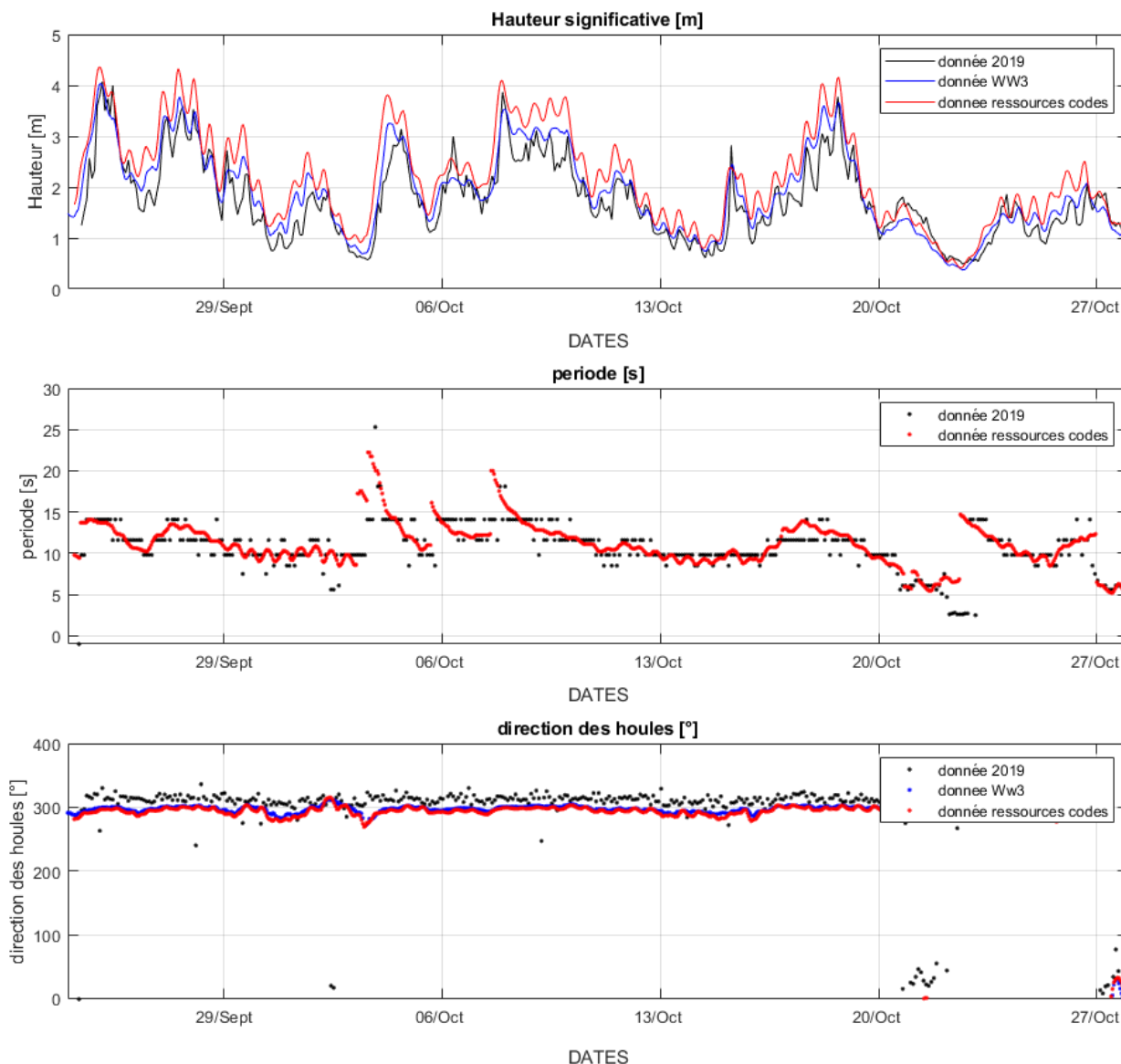


Figure 12 : Résultats des données de houles mesurés par l'ADCP durant la campagne de 2019 comparés à ceux prédites par Homère ou RessourcesCode

Les mesures issues de la campagne de 2019 donnent des hauteurs significatives au large comprises entre 1m et 4 m pour les pics d'énergie (Figure 12). Pour les périodes, elles sont comprises entre 5 s et 20 s et une direction moyenne de 330°.

Pour la hauteur significative de houle issue des modèles, elles suivent la même tendance que les valeurs mesurées durant l'année 2019 au large, avant les écueils. Cependant, les valeurs issues de Homère (Ww3) semblent moins surévaluées que les valeurs issues de RessourcesCodes.

Pour la direction, les valeurs issues des deux modèles se suivent et ont un biais d'orientation d'environ 30° plus au sud que les données mesurées.

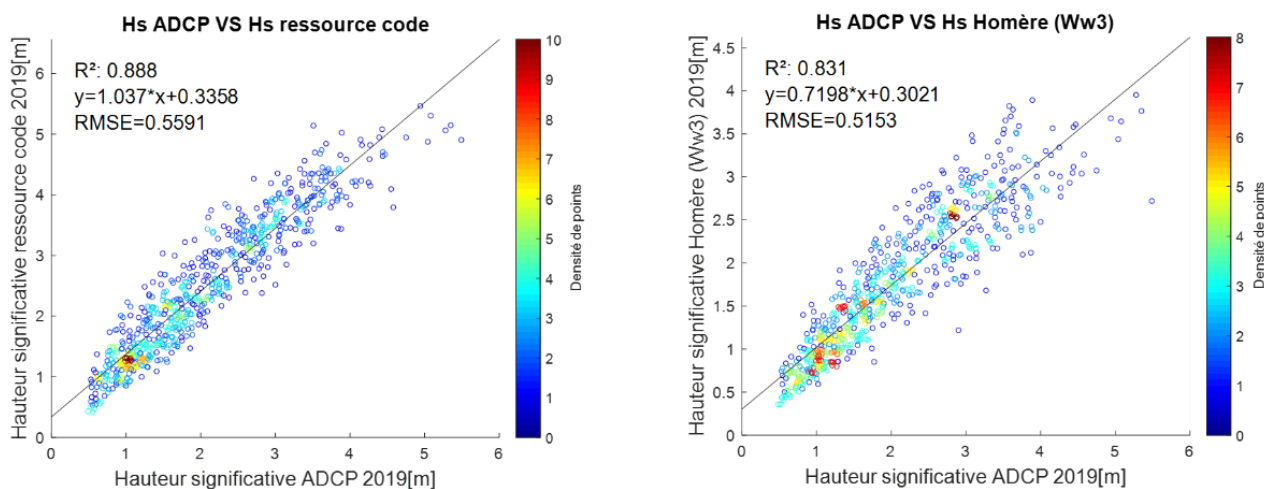


Figure 13 : Graphique de la hauteur significative mesurée par l'ADCP de la campagne de mesure de 2019 comparée à la hauteur significative issue de Homère ou Ressources code prédit durant la campagne

Les résultats de comparaison entre les hauteurs significatives issues des modèles et celles mesurées par l'ADCP au large sont comparées (Figure 13). Le R² est de 0.88 pour ressource code et 0.831 pour Homère. L'écart quadratique moyen est lui de 0.55 m pour ressource code et 0.51 m pour Homère.

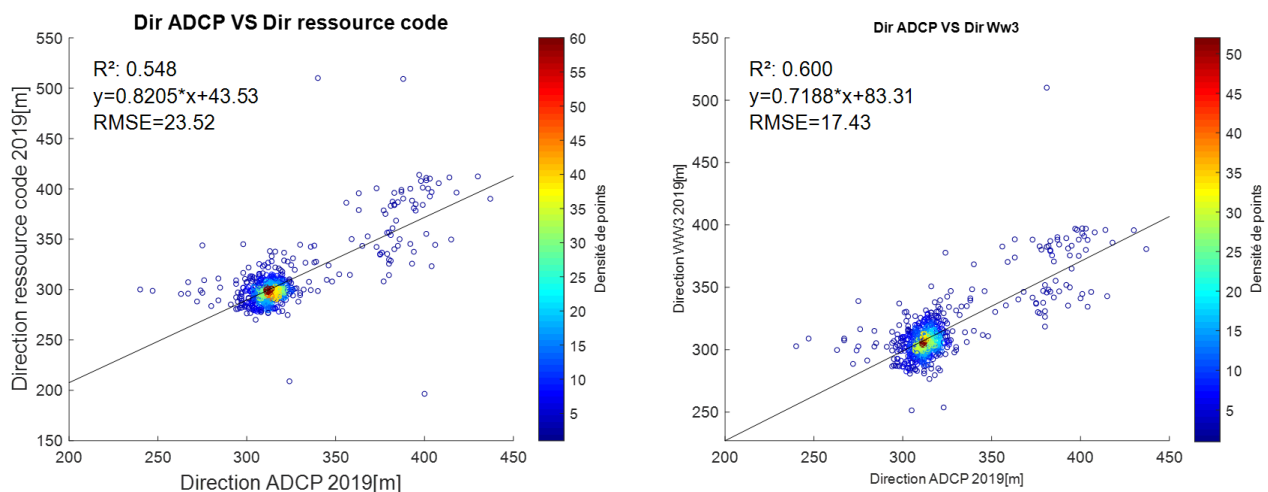


Figure 14 : Graphique de la direction mesurée par l'ADCP de la campagne de mesure de 2019 comparée à la direction issue de Homère ou Ressources code prédit durant la campagne

Pour les directions, les résultats sont de 0.54 pour le R² de ressource code et 0.6 pour le R² de Homère (Figure 14). L'écart quadratique moyen est lui de 23.52° pour ressource code et de 17.43° pour Homère.

3. Vent pour la station de Brignogan

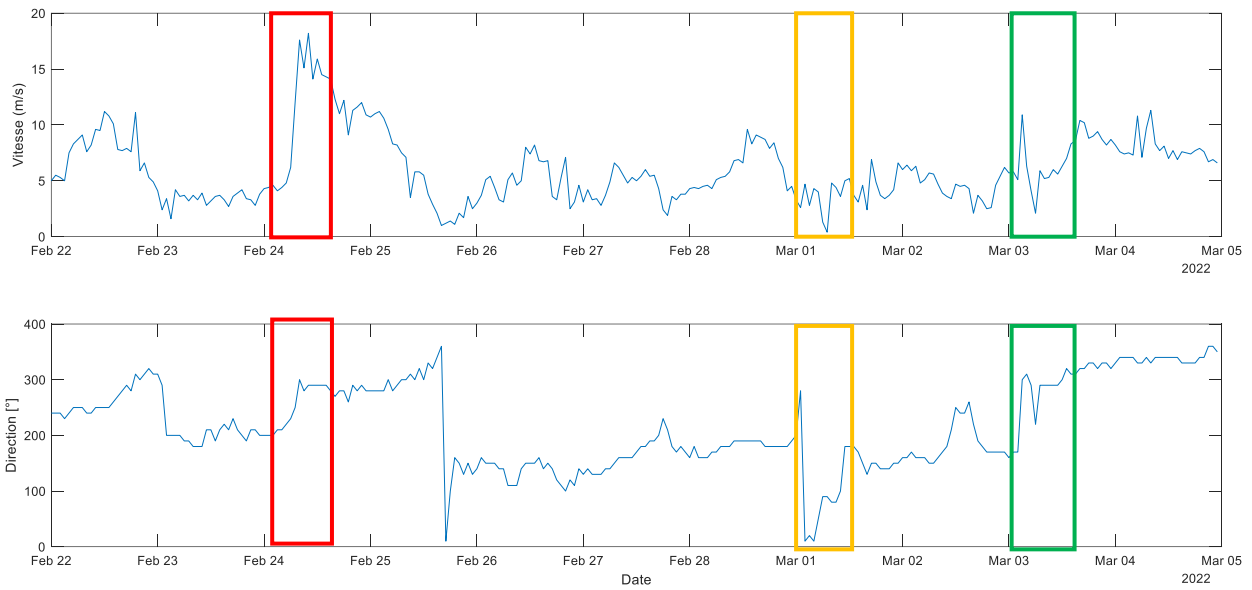


Figure 15 : Graphique des résultats de vents mesurés durant les deux semaines de mesure (en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme)

L'étude s'est ensuite intéressée aux mesures effectuées sur le terrain. Pour le vent, durant les 15 jours de terrain, il est resté entre 0 et 10 m/s sauf pour la journée du 24 et 25 février où un pic de vitesse à 19 m/s a été observé (Figure 15). Pour la direction, le vent fluctue entre le sud-ouest et le nord. Pour la journée de vent fort (24 février), la direction du vent venait du nord. Le vent sera ensuite analysé avec les houles.

4. Hydrodynamisme au Large

a. Campagne 2022 : Résultats des capteurs de pression

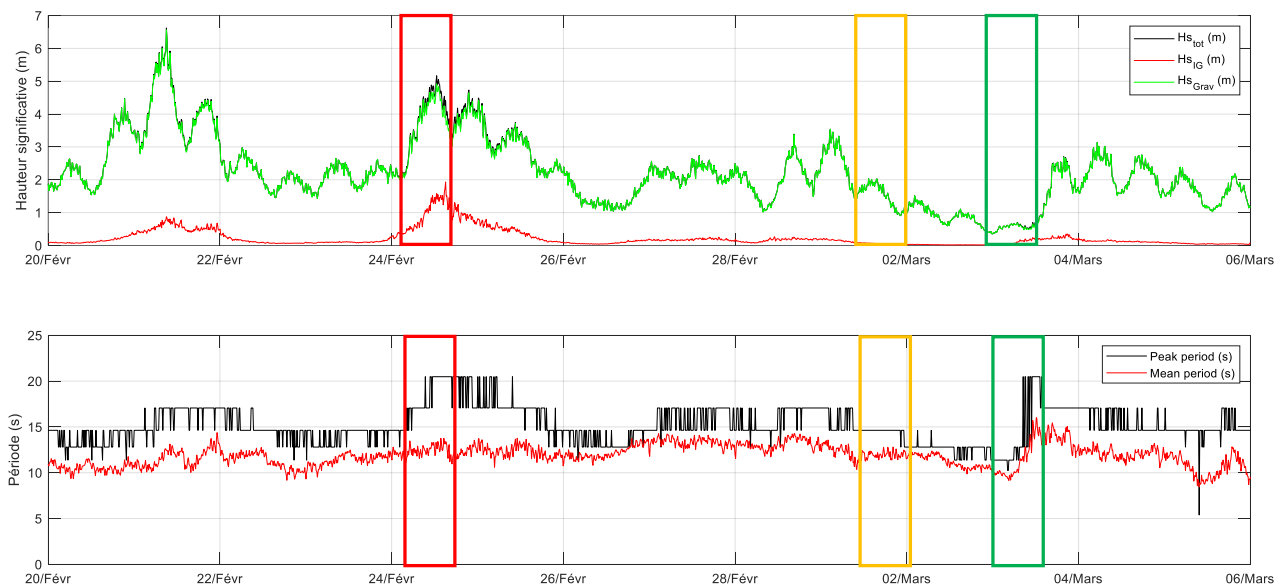


Figure 16 : Graphique des résultats de houles mesurés par le capteur de pression situé avec l'ADCP au point nord-est (en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme)

Pour les capteurs de pression, sur les deux OSSI installés, seul l'instrument situé au nord-est a fonctionné (Figure 16). Les résultats de hauteurs significatives mesurées par le capteur de pression confirment les résultats mesurés par l'ADCP avec un pic à 5 m le 24 février. De plus, les résultats du capteur de pression montrent un pic d'infra-gravitaire à 2 m le 24 février puis des infra-gravitaires à 0 m le reste de la semaine.

Les résultats du capteur de pression au large permettent d'identifier 3 marées avec des conditions énergétiques différentes. La marée du 24 février est considérée comme une marée agitée avec un pic de hauteurs significative de 5m et un pic d'infragravitaire de 2m au large. Cette marée est la seule avec autant d'agitation au large, mesuré durant nos 15 jours de terrain du 22 février au 4 mars. La deuxième marée établit comme semi-agitée est la deuxième marée du 1 mars et correspond à un niveau d'énergie intermédiaire avec des hauteurs significative de 2m au large et aucune onde infragravitaire. Pour finir, la marée calme est mesurée le 3 mars avec des hauteurs significatives inférieur à 1m et aucune onde infragravitaire. Les coefficients sont respectivement de 52 pour le 24 février, 88 pour le 1 mars et 100 pour le 3 mars. Ces 3 type d'agitation durant une marée permettront d'analyser les données de courantomètres

b. Campagne 2022 : Résultats houles et courants

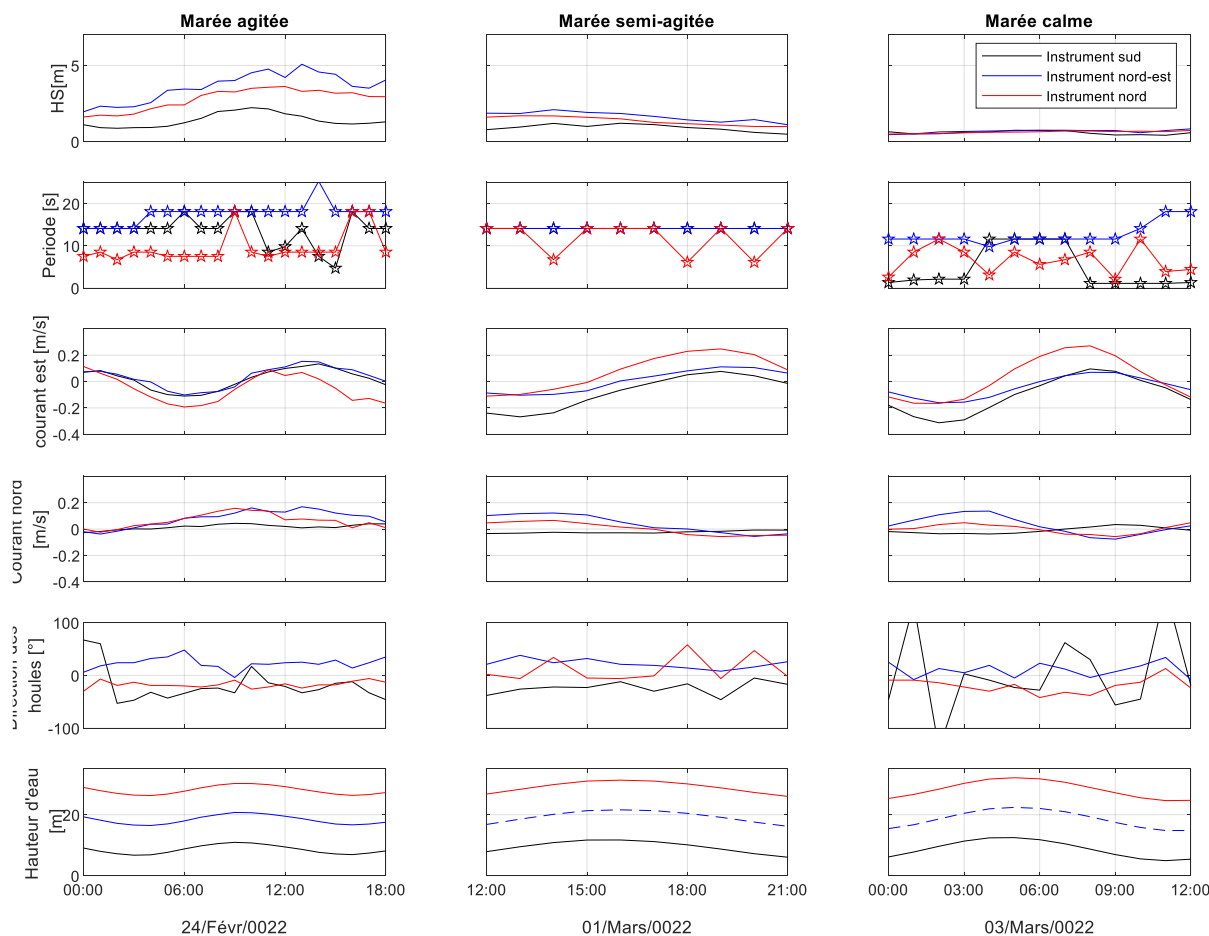


Figure 17 : Graphique des résultats de houles mesurés par les ADCP pour une marée agitée, semi-agitée et calme

En marée agitée, les résultats mesurés par les ADCP ont des hauteurs significatives de 4 m au nord, 5 m au nord-est et 2 m au sud (Figure 17, Annexes 15). Les périodes sont de 9 s au nord, 20 s au nord-est et 15 s au sud. Pour finir, au niveau des angles d'incidence, il est en moyenne de $+10^\circ$ pour le nord-est, de -5° pour le nord et de -20° avec des pics avec des angles positifs pour l'ADCP sud.

En marée semi-agitée, les hauteurs de houles sont d'environ 1 m pour les trois instruments avec des hauteurs significatives légèrement plus élevées pour l'instrument nord-est et l'instrument nord. Les périodes sont de 15 s pour les 3 appareils. Pour les angles d'incidence, ils sont similaires à ceux observés en marée agitée sauf pour le nord où ils se retrouvent plus proches de zéro et fluctuent entre le positif et le négatif.

Pour finir, en marée calme, les hauteurs significatives de houles sont de 0.1 à 0.2 m pour l'ensemble des instruments avec des périodes comprises entre 0 et 10 s. Pour les angles d'incidence, ils sont positifs pour l'instrument nord-est et négatif pour l'instrument nord avec des valeurs de 10° . Pour l'instrument sud, l'angle varie beaucoup entre le positif et le négatif avec des angles majoritairement compris entre 0° et 50° .

Ces résultats permettent de quantifier les conditions de houles au large pour les comparer aux courants mesurés à ces mêmes point, mais également aux conditions de houle et courant mesuré plus proche sur la plage.

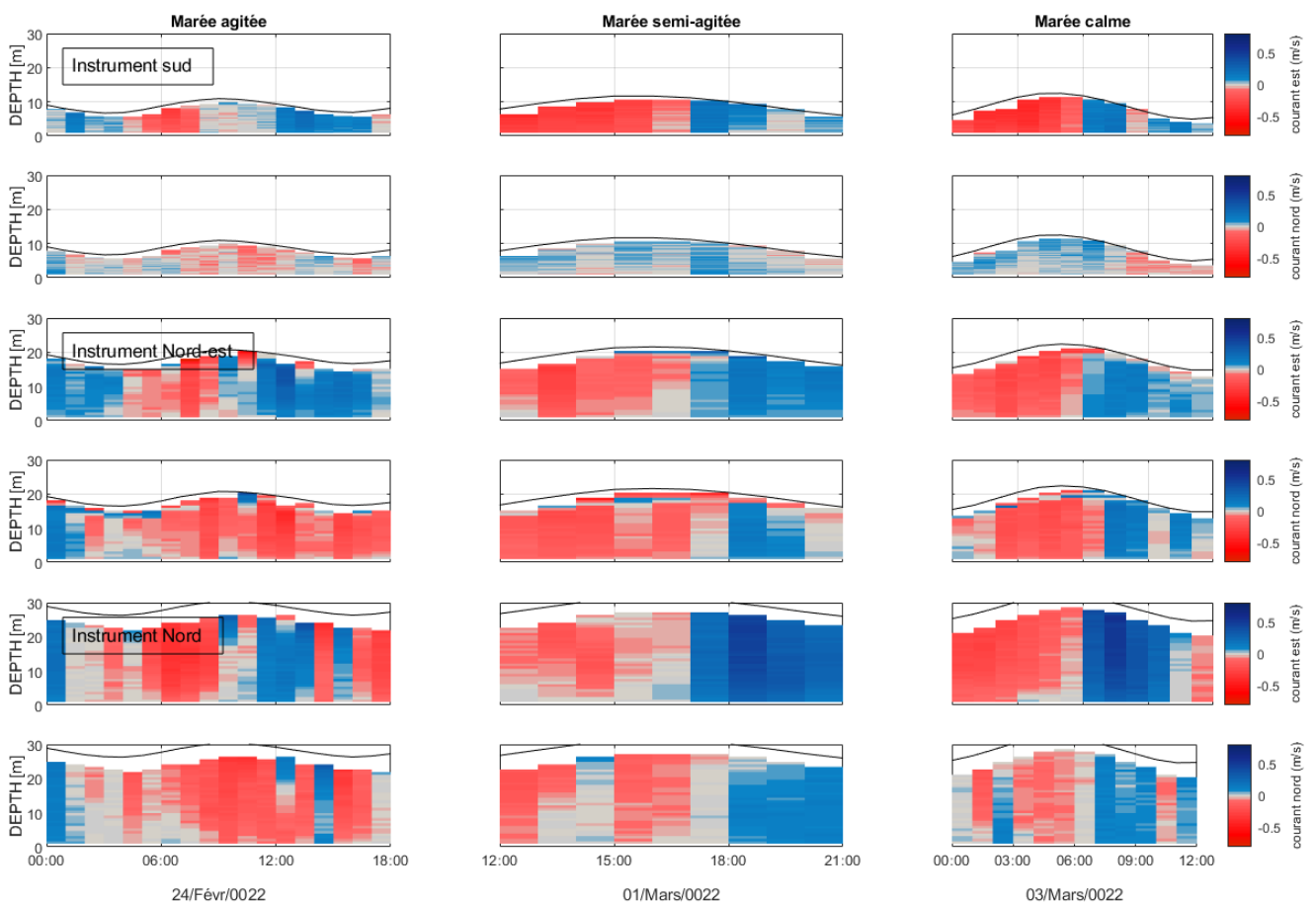


Figure 18 : Séries temporelles de profils de courant mesuré par les ADCP pour une marée agitée, semi-agitée et calme

Pour la marée agitée, les courants, pour l'orientation nord-sud, sont compris entre 0 et 0.2 m/s avec des courants mesurés plus élevés pour les ADCP au nord et nord-est (Figure 18, Annexes 16). A l'inverse, pour les courants orientés est-ouest, une courbe sinusoïdale s'observe avec un pic de 0.2 m/s vers l'est en marée montante pour l'instrument au nord. Pour les instruments nord-est et sud, ils sont de 0.1 m/s vers l'est. A marée descendante, un pic de courant vers l'ouest s'observe avec des vitesses de 0 m/s pour l'instrument nord et 0.2m/s pour les instruments localisés au nord-est et sud. Les courants de marée aux larges données par le modèle MARC de l'Ifremer sont de 1 à 2m/s pour un coefficient de 52 (Annexes 19).

Pour la semi-agitée, le courant observe les mêmes tendances que pour une marée agitée cependant les vitesses changent pour l'orientation nord-sud, avec 0.1 m/s pour l'instrument nord, 0.05 m/s pour l'instrument nord-est et proche de 0 pour l'instrument sud. Pour la composante est-ouest, les vitesses sont de 0.2 m/s et 0.1 m/s vers l'est pour le sud et les deux instruments les plus au large en marée montante. Ils sont de 0.2 m/s et proche de 0 m/s pour l'instrument au nord et les deux instruments au nord-est et au sud à marée descendante. Au large, les courants de marées données par le modèle sont de 2m/s environ pour un coefficient de 88 (Annexes 20).

En marée calme, les courants sont identiques à ceux mesurés en marée semi-agitée. Au large, les courants de marée issue du modèle sont de 2.5m/s environ pour un coefficient de 100 (Annexes 21).

Ainsi, les résultats de courants permettent de montrer qu'au large, le courant mesuré est principalement un courant de marée au vu des directions et vitesses. Maintenant, il est nécessaire de comparer tous les résultats d'hydrodynamisme au large avec ceux mesuré sur la plage.

5. Hydrodynamisme sur la plage

a. Campagne 2022 : Résultats des capteurs de pression

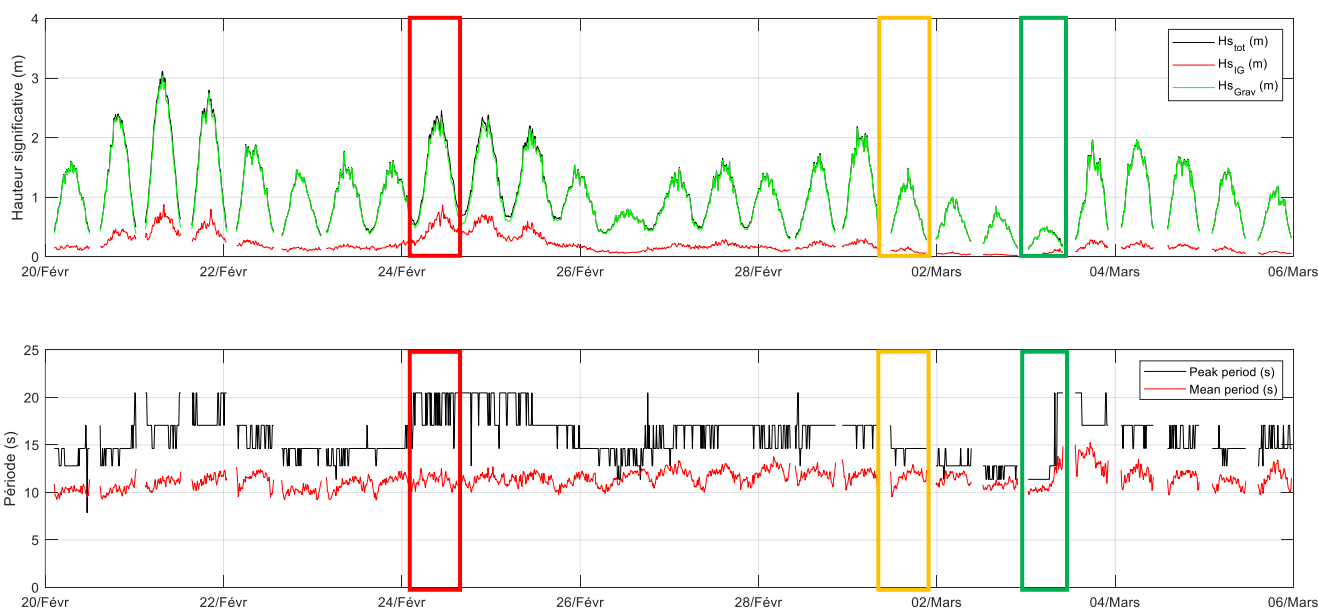


Figure 19 : Résultats de houle issus du capteur de pression placé au niveau du profil 1 (en rouge la marée agitée, en jaune la marée semi-agitée, en vert la marée calme)

Le capteur de pression installé sur la plage, au niveau de la jetée du Curnic montre un pic de hauteur significatif à 2.5 m le 24 février et des ondes infra-gravitaires de 1 m (Figure 19). La période pic mesuré ce jour-là était de 15 s. La hauteur significative mesurée est de 0.5 m, la hauteur significative des ondes infra-gravitaires était de 0 m et le 3 mars avec une période pics à 10 s.

Ces résultats témoignent de la perte d'énergie de la houle du large vers la plage avec une différence de 2.5m de hauteurs significatives et de 1m pour les hauteurs significatives de la houle infragravitaire. Ils confirment également le choix dans les 3 marées de condition agité, semi-agité et calme pour les mesures effectuées sur la plage qui sont les mêmes que celles prises au large.

b. Campagne 2022 : Résultats des Aquapros

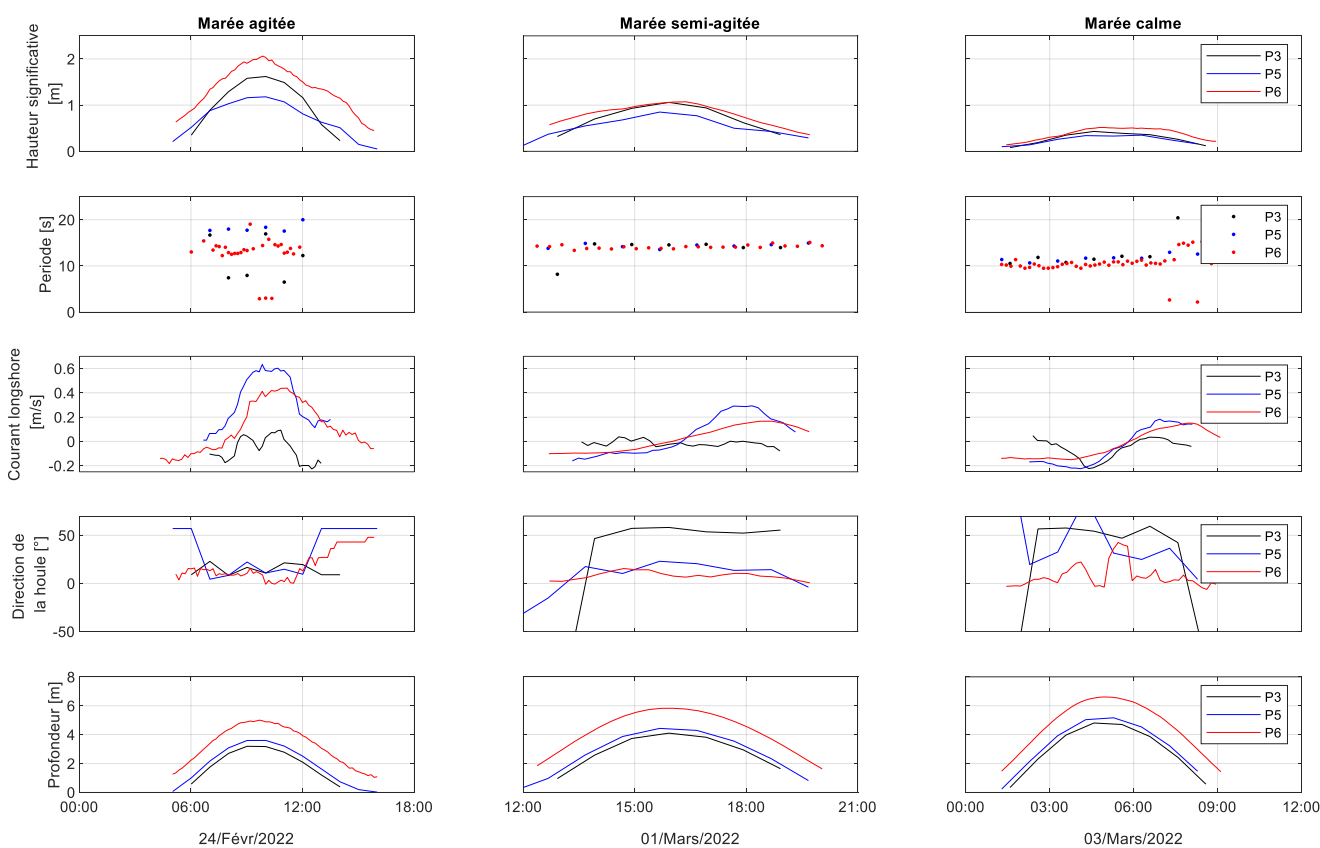


Figure 20 : Graphique des résultats de houle mesurés par les aquapros pour une marée agitée, semi-agitée et calme

Les résultats obtenus durant la campagne de mesure sur la plage sont résumés en 3 cycles de marée représentant les conditions majoritairement observées avec une marée agitée, semi-agitée et calme (Figure 20, Annexes 17). Globalement, les résultats montrent que les hauteurs significatives (H_s) de houles sont plus élevées au niveau du profil 6 puis décroissant du profil 3 vers le profil 5. En marée agitée, la hauteur significative au niveau du profil 6 a été mesurée à 2 m maximum alors que pour le profil 3, elle était à 1,5 m et pour le profil 5, 1 m. Pour les marées avec des conditions plus calmes, la hauteur significative de houle diminue de 1 m en temps semi-agitée jusqu'à 0.5 m en temps calme. La différence observée entre les hauteurs significatives mesurées sur chaque profil est plus faible lorsque l'on tend vers des H_s plus petites.

Au niveau des périodes, elles présentent des valeurs similaires entre les 3 profils. En condition agitée, les périodes augmentent vers 20 s puis diminuent en condition plus calme vers 10 s. L'angle d'incidence des houles est majoritairement positif pour les profils 3 et 5 et 6 qui témoigne de direction de houle de nord-ouest. Pour finir, l'instrument au niveau du profil 6 mesure des hauteurs d'eau plus important que les instruments placés au niveau du profil 5 et 3 du fait qu'ils soient installés plus en bas de plage.

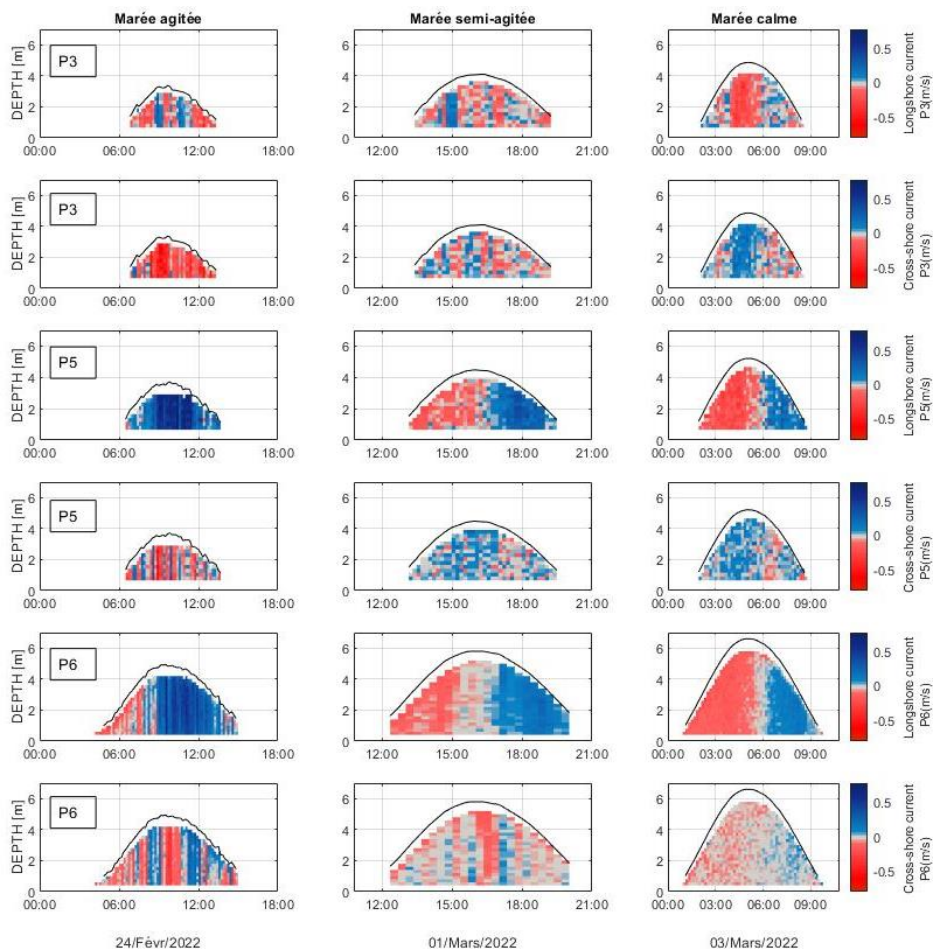


Figure 21 : Graphique des courants mesurés par les aquapros pour une marée agitée, semi-agitée et calme

Pour les résultats de courants dans le sens longshore à la plage, au niveau des profils 5 et 6, l'orientation du courant change en fonction du moment de la marée (Figure 21, Annexes 18). En marée montante, le courant longshore est orienté vers l'est et en marée descendante, il est orienté vers l'ouest. Au niveau du profil 3, le courant longshore ne suit pas une orientation bien définie. Durant la marée agitée, le courant longshore présente une orientation vers l'ouest pendant la totalité de la marée mesurée sur le profil 5 et le 3/4 de la marée mesurée sur le profil 6. La vitesse en marée agitée est de 0.6 m/s sur les profils 5 et 6 pour diminuer en marée semi-agitée et calme à 0.2/0.3 m/s. Cependant, le courant reste plus fort au niveau du profil 5 qu'au niveau du profil 6.

Pour le courant cross-shore, l'orientation et la vitesse n'est pas clair pour l'ensemble des profils. Cependant, sur certaines marées, des orientations peuvent être observées. En marée agitée, un courant cross-shore avec une vitesse de 0.5 m/s au niveau du profil 3 est orienté vers la plage. Une orientation qui

peut être observée légèrement sur le profil 5 et 6 (même si à la marée descendante du profil 6, le courant est plutôt orienté vers le large) pour des vitesses plus faibles de 0.3 à 0.4 m/s. Pour la marée semi-agitée et calme, au niveau du profil 6, le courant est très faible avec des vitesses proches de 0 m/s. Cependant au niveau des profils 3 et 5, à marée montante, un courant cross-shore de 0.1 à 0.2 m/s dirigé vers le large est mesuré. En marée descendante, la vitesse du courant diminue pour atteindre les 0.05 m/s.

L'étude s'intéresse à l'impact des houles sur la plage. Il est donc nécessaire de comparer ces résultats pour identifier les processus physiques impliqués dans l'hydrodynamisme de la plage.

6. Hydrodynamisme du large vers la côte

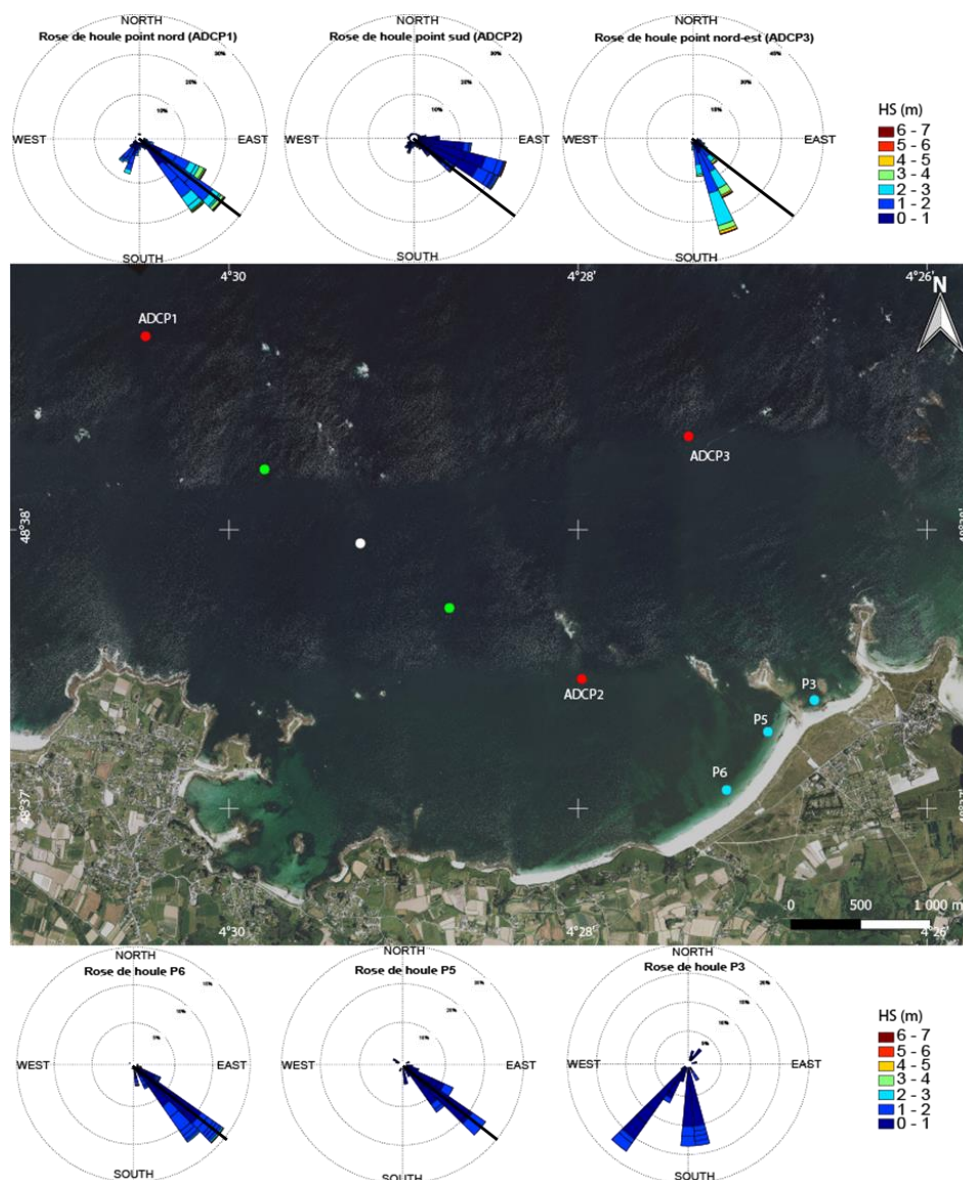


Figure 22 : Carte des roses de houle pour tous les aquapros et ADCP durant les 15 jours de terrain

Les directions de houles du large vers la plage montrent qu'au large, la houle au nord est bien orientée vers l'incidence zéro de la plage avec une direction médiane de 306° pour une hauteur

significative médiane de 1.25 m (Figure 22). Pour l'ADCP au nord-est, les houles sont orientées plus au sud avec une direction médiane de 336° pour une hauteur significative de houle médiane de 1.76 m. Pour l'ADCP au sud, la houle est orientée plus à l'est avec une direction médiane de 292° pour une hauteur significative médiane de 0.7 m. Arrivée à la plage, les houles s'orientent pour être parallèles aux isobathes. Pour les Aquapros profils 5 et 6, la direction médiane est de 308.3° et de 304.4° pour des hauteurs significatives de 0.55 m et 0.77 m. Pour le profil 3, la direction médiane est de 40° pour une hauteur de houle de 0.96 m.

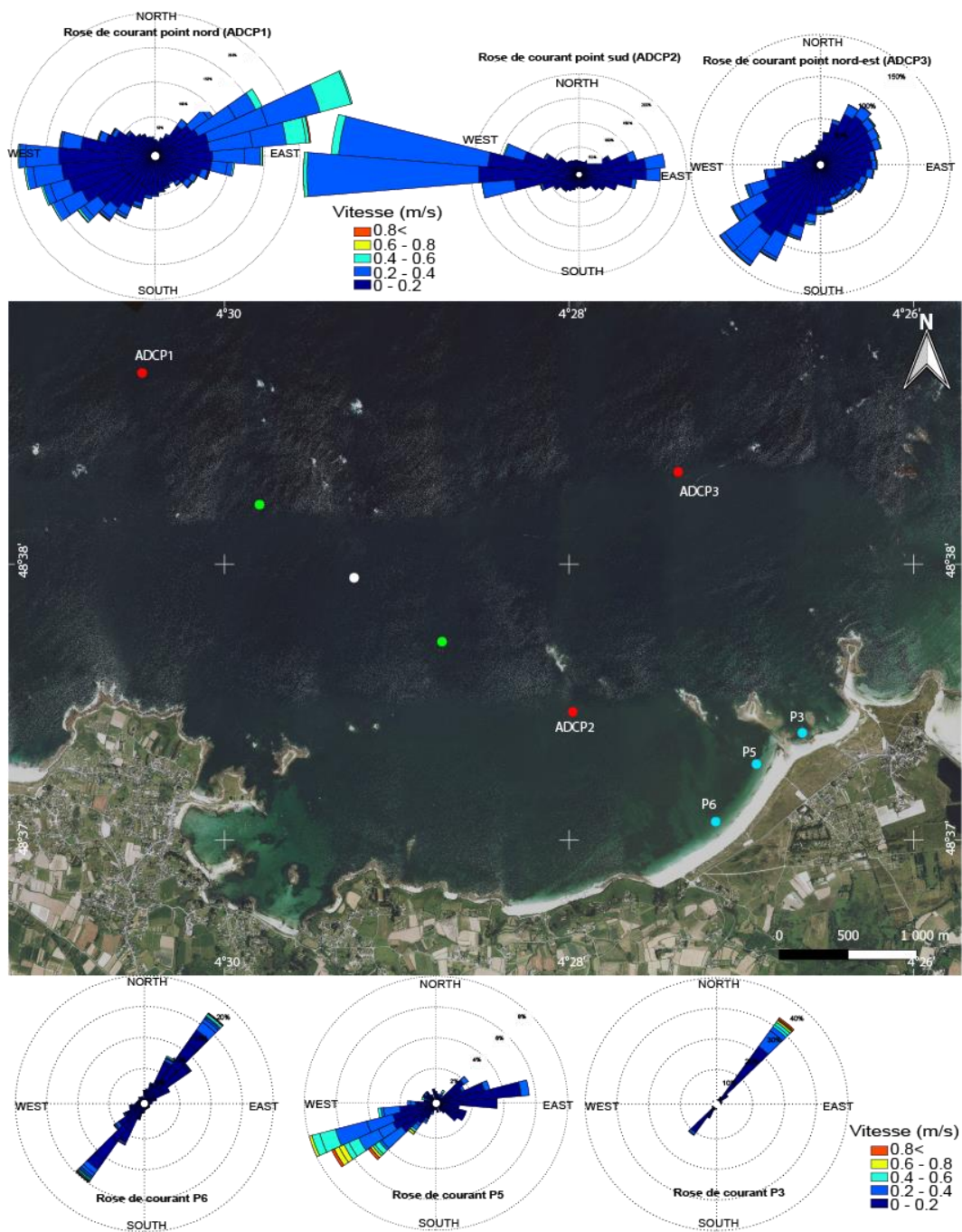


Figure 23 : Carte des roses de courant issues des Aquapros et ADCP durant les 15 jours de terrain

Les directions de courants du large vers la plage montrent un courant au large orienté vers l'est en marée montante avec des vitesses maximales de 0.8 m/s pour le nord, 0.4 m/s pour le sud et 0.4 m/s pour

le nord-est (Figure 23). En marée descendante, le courant est orienté vers l'ouest avec des vitesses maximales de 0.6 m/s au nord, 0.6 m/s au sud et 0.4 m/s au nord-est. Au niveau de la plage, le courant suit le même schéma qu'au large avec un courant parallèle à la plage, orienté plus nord-est à marée montante et sud-ouest à marée descendante. Les vitesses maximales sont de 0.6 m/s pour le profil 6, 0.4 m/s pour le profil nord et 0.8 m/s pour le profil 3 à marée montante ; et de 0.4 m/s, 0.8 m/s et 0.4 m/s pour les profils 3,5 et 6 à marée descendante.

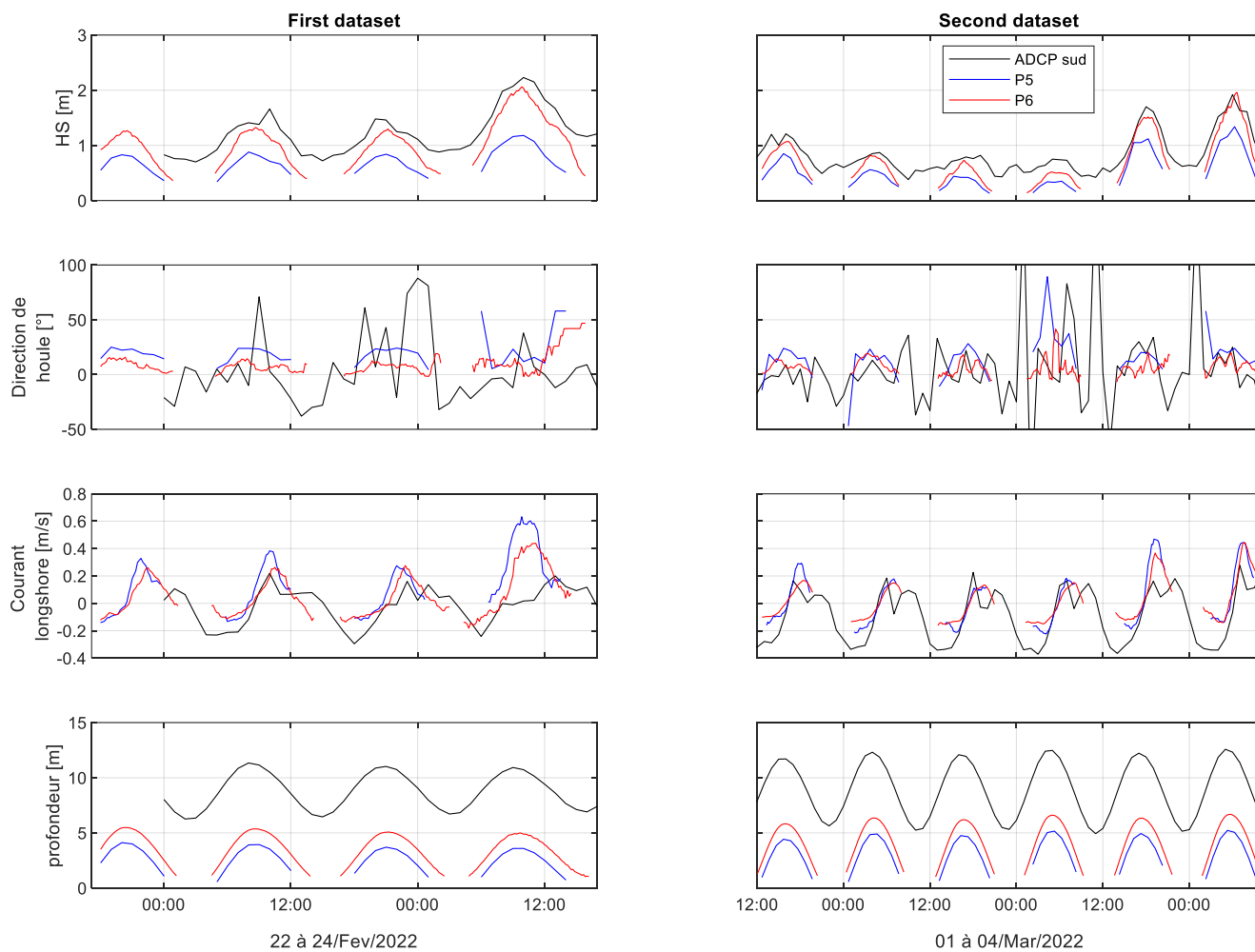


Figure 24 : Comparaison des résultats issus des Aquapros des profils 5 et 6 et de l'ADCP au sud durant les deux semaines de terrains

La comparaison des valeurs mesurées au niveau de l'ADCP sud et des aquapros profils 5 et 6, montre des valeurs de HS similaires entre l'ADCP sud et l'aquapro profil 6 (Figure 24). Les hauteurs sont plus petites pour le profil 5 de l'ordre de 1 m en condition agitée. Pour les directions des houles, elles arrivent avec un angle d'incidence positif pour les profils 5 et 6. Pour l'ADCP, elles fluctuent entre le positif et négatif. Le courant longshore suit le même schéma pour les 3 instruments avec un courant dirigé vers l'est en marée montante et vers l'ouest en marée descendante. Cependant, lorsque les hauteurs de houles dépassent les 1.5 m, le courant longshore est plus élevé en profils 5 et 6.

7. Calcul de la profondeur de clôture

Tableau II: Résultats des calculs de profondeur de clôture pour chaque ADCP

	ADCP Sud	ADCP Nord	ADCP Nord-est
DOC1	8.19m	14.76m	13.24m
DOC2	12.93m	18.87m	17.84m

Pour comprendre l'impact des houles sur la côte, il est important d'identifier la profondeur maximale où les houles ont un impact sur le fond. Ainsi, les profondeurs de clôture sont calculées à l'aide des deux formules de calcul de la inner et outer depth of closure (Tableau II). Les résultats sont pour la inner depth of closure de 8m pour l'ADCP au sud, 13m et 15m pour l'ADCP au nord-est et nord. Pour la outer depth of closure les résultats sont de 13m, 18m et 19m pour les ADCP sud, nord-est et nord.

8. Image drone : Photographies des houles

Le courant longshore est principalement dû à l'angle de la houle déferlante à la plage. Dans cette étude, on a donc expérimenté l'utilisation du drone pour photographier les houles et déterminer les angles d'incidence des houles. Les résultats des photographies des houles montrent que leur orientation est assez proche de celle de la plage (Figure 25, Tableau III, Annexes 9, Annexes 10, Annexes 11, Annexes 12, Annexes 13, Annexes 14). Cependant, on observe des petites variations d'orientation qui sont couplées à la direction des courants mesurés par le courantomètre sur la plage. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

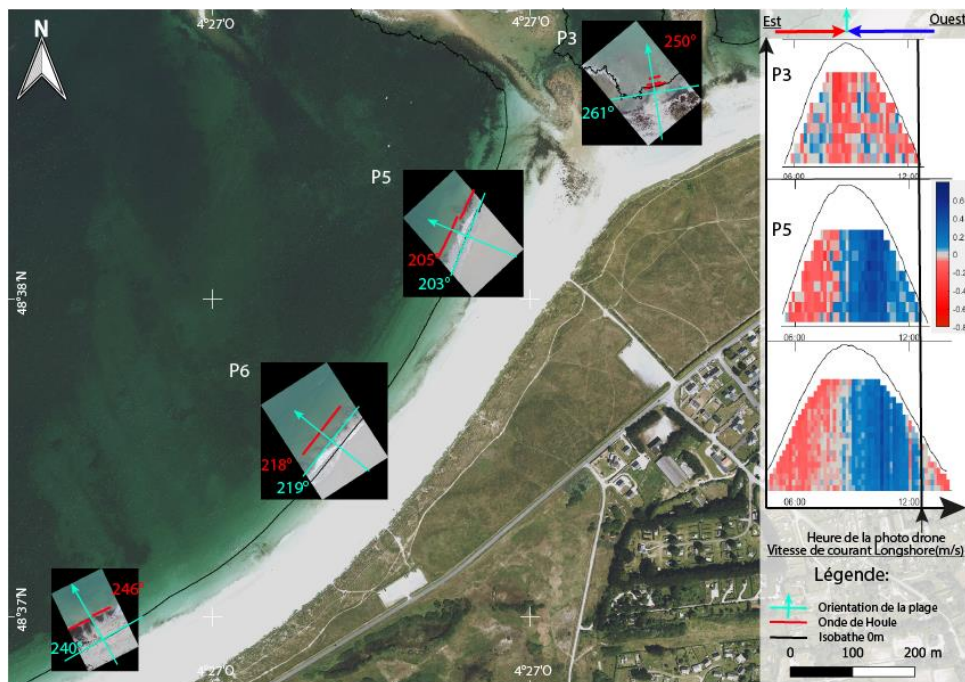


Figure 25 : Carte avec l'orientation des houles issues des vols drones le 23/02/2022 et la mesure du courant associé sur la plage du Vougot

Tableau III : Récapitulatifs des résultats issus des vols drones

Date et numéros de vols	Angle d'incidence P3	Direction courant P3	Angle d'incidence P5	Direction courant P5	Angle d'incidence P6	Direction courant P6	Moment de la marée
23/02/22 Vol1	+15°	Est	-4°	Ouest	-1°	Ouest	Descendante
23/02/22 Vol2	+11°	Est	-2°	Ouest	+1°	Vitesse courant Faible	Descendante
23/02/22 Vol3	Pas de valeur	Pas de valeur	+6°	Est	+4°	Est	Marée basse
01/03/22 Vol1	+13°	Est	-6°	Est	+9°	Est	Fin Montante
02/03/22 Vol1	Pas de valeur	Pas de valeur	+2°	Est	+8°	Est	Montante
02/03/22 Vol2	+18°	Est	-3°	Est	+4°	Est	Montante

Durant la marée montante, l'angle d'incidence des houles à la plage est globalement positif au niveau des profils 5 et 6 (Tableau III). Les aquapros présents sur ces profils mesure alors un courant longshore orienté vers l'est. Deux exceptions sont à noter au niveau du profil 5 à mi- et fin de marée montante avec des angles d'incidence qui deviennent négatifs. Cependant, l'instrument continue à mesurer un courant orienté vers l'Est.

Durant la marée descendante, l'angle d'incidence des houles à la plage est tout le temps négatif au niveau des profils 5 et 6. Les instruments mesurent un courant longshore orienté vers l'ouest.

Au niveau du profil 3, peu importe le moment de la marée, l'angle d'incidence reste positif et les aquapros continuent de mesurer un courant dirigé vers l'est.

9. Topographie (Annexes 22)

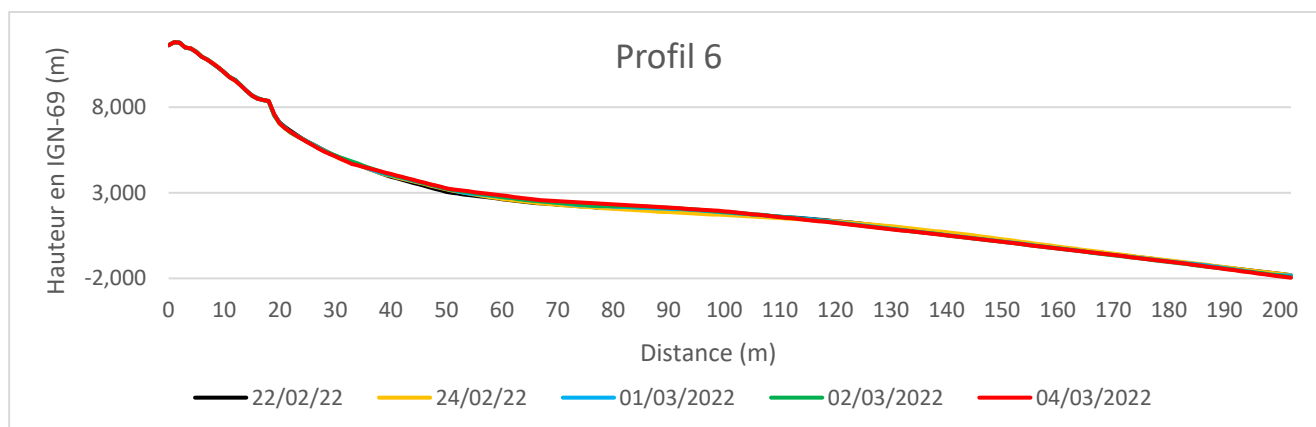


Figure 26 : Evolution du profil 6 durant les deux semaines de mesures

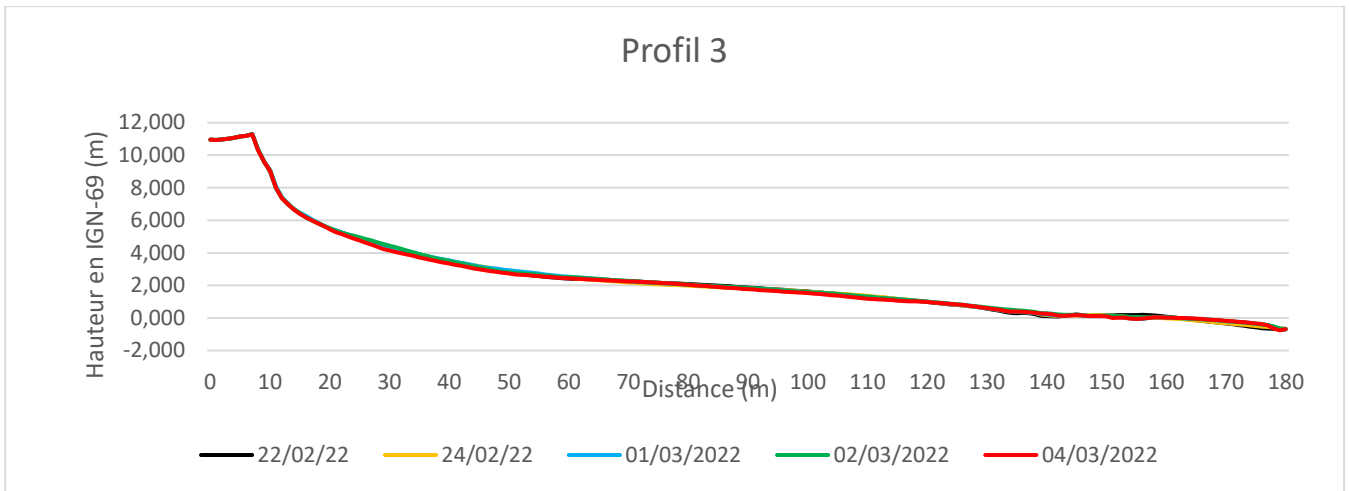


Figure 27 : Evolution du profil 3 durant les deux semaines de mesures

Des mesures topographiques ont été réalisées pour identifier la réponse morphologique de la plage pour des conditions hydrodynamique différentes mesuré au large.

Les résultats des relevés topographiques montrent qu’au niveau des profils 1 à 3, la plage à une pente de type dissipative très plane de 2.6 % (Figure 27). On a la présence en haut de plage d’une falaise dunaire de 12 m. Pour les profils 5 à 6, la plage possède une pente plus raide de 4 % (Figure 26). Un léger plateau s’observe aux alentours des 100 m de distance à une hauteur de 2 m. En haut de plage, on n’observe pas de falaise dunaire, mais une dune assez pentue de 20 %. Durant la semaine de terrain, aucun grand changement morphologique de la plage n’est observé.

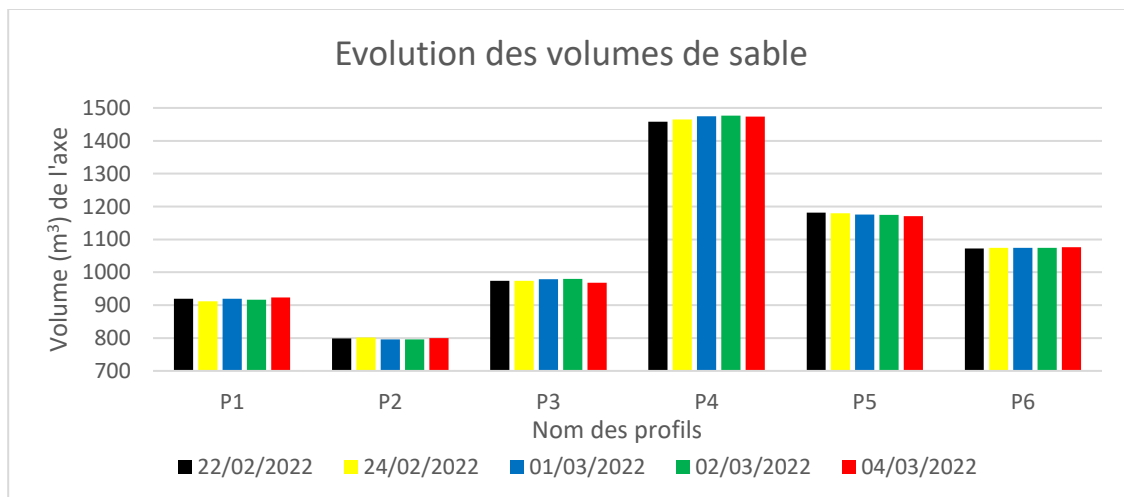


Figure 28 : Graphique des volumes sédimentaires sur chaque profil durant les deux semaines de mesures

Les volumes au niveau des profils 1 à 3 sont restés stables durant les 15 jours de mesures (Figure 28). Le profil 4 a gagné 17 m^3 du 22/02 au 02/03 puis a perdu 4 m^3 du 02/03 au 04/03. Le profil 6 a gagné 4 m^3 . A l’inverse, seul le profil 5 a perdu avec 10 m^3 durant les 2 semaines de mesures.

VI. Discussion

1. Identification des forçages impactant le courant longshore

L'étude s'intéresse principalement à expliquer la présence de ce courant bidirectionnel en phase avec la marée. Dans ce travail, la hauteur d'eau, la hauteur significative, l'angle d'incidence et la période sont corrélés avec le courant mesuré pour expliquer ce courant bidirectionnel. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV, Figure 29).

Tableau IV : Le R^2 de la comparaison du courant de longshore mesuré avec différents facteurs forçant (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1))

R^2 par instrument	P6M	P5M	ADCPM	P6D	P5D	ADCPD
Hauteur d'eau	0.10	0.38	0.36	0.48	0.089	0.092
Période	0.29	0.17	0.22	0.14	0.82	0.017
Angle d'incidence	0.11	0.012	0.40	0.10	0.03	0.14
Hauteur significative	0.015	0.15	0.15	0.90	0.71	0.013

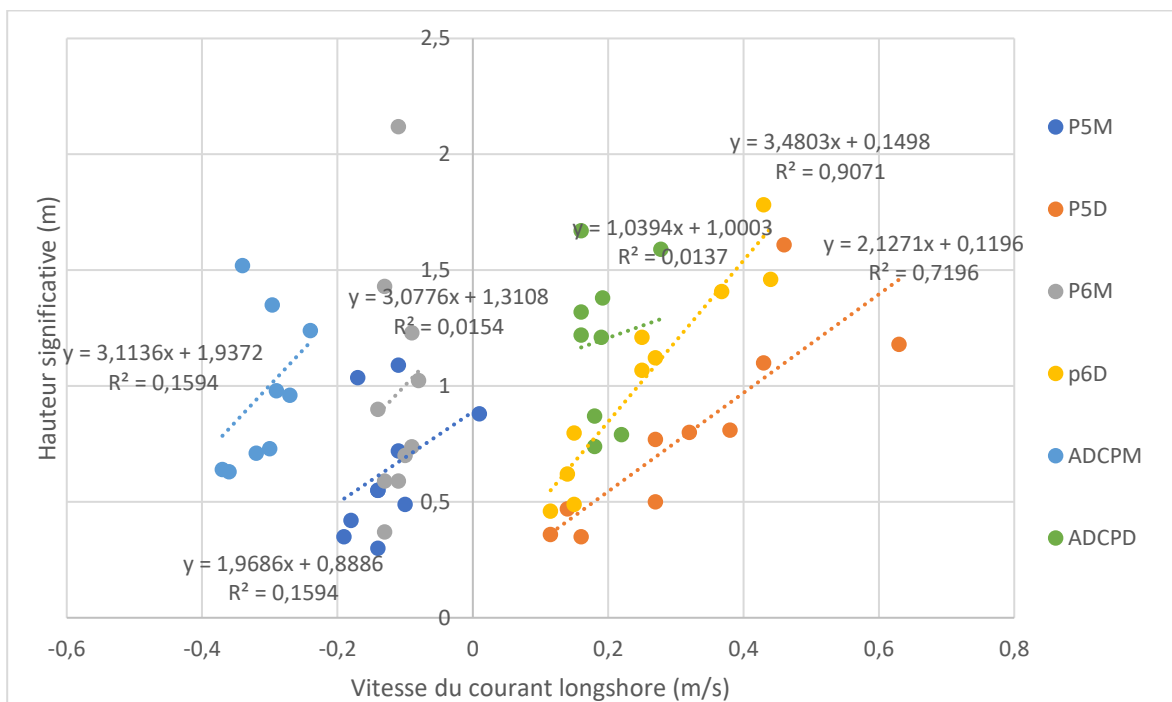


Figure 29: Graphique de la comparaison entre la hauteur significative et la vitesse longshore pour les Aquapros des profils 5 et 6 ainsi que de l'ADCP sud

L'angle d'incidence des houles n'est jamais bien lié avec la vitesse du courant longshore sauf pour de l'ADCP à marée montante où il est moyennement bien. Une piste d'explication est que les Aquapros

ne mesurent pas correctement l'orientation des houles dans la zone de surf. En parallèle, les résultats du drone montrent bien des angles d'incidence négatifs de houle à marée montante et positifs à marée descendante pour les profils 5 et 6. En fin de marée montante, on note un angle d'incidence négatif des houles au profil 5 qui témoigne du changement d'orientation du courant de marée au large et de l'orientation des houles à la plage. Cependant, le manque d'image ne permet pas d'affirmer ce phénomène. L'étude n'a donc pas permis de lier l'angle d'incidence des houles mesuré au drone avec la direction du courant longshore.

Pour la hauteur d'eau, aucun lien avec la vitesse n'est bien établi. Le R^2 est moyen pour l'aquapro au profil 5 et l'ADCP à marée montante et au profil 6 à marée descendante. Le R^2 mauvais pour les restes des valeurs. La raison est sans doute due à la bathymétrie et la présence d'écueils rocheux qui lorsque l'eau se retire, laisse apparaître les hauts-fonds qui bloquent les houles et qui sont absents lorsque l'eau monte ou que la marée est haute. Néanmoins, en marée haute, l'arrivée de houle très énergique du nord-est peut également entraîner des vitesses plus élevées au niveau du profil 5. La hauteur d'eau impacterait donc le courant longshore sur la plage du Vougot. Un article de Thornton et Kim de 1993, observait ce phénomène avec un courant longshore fortement modulé avec la hauteur d'eau due à la marée. Un second article de Sedrati et Anthony en 2007 décrit également l'impact de la hauteur d'eau sur les courants littoraux sur une plage peu profonde, macrotidale et à bar et bêche.

Pour les hauteurs significatives, celles-ci sont bien corrélées pour les Aquapros en marée descendante. La hauteur de houle forcerait alors les courants longshore au niveau des profils 5 et 6. A l'inverse, en marée montante, elles ne sont pas bien corrélées aux vitesses de courant longshore pour les Aquapros. Elles n'impacteraient donc peu le courant longshore dans la zone de déferlement. La période qui témoigne de conditions énergétiques plus ou moins fortes suit la même tendance que les hauteurs significatives pour l'instrument au profil 6 à marée descendante, mais pas pour le profil 5.

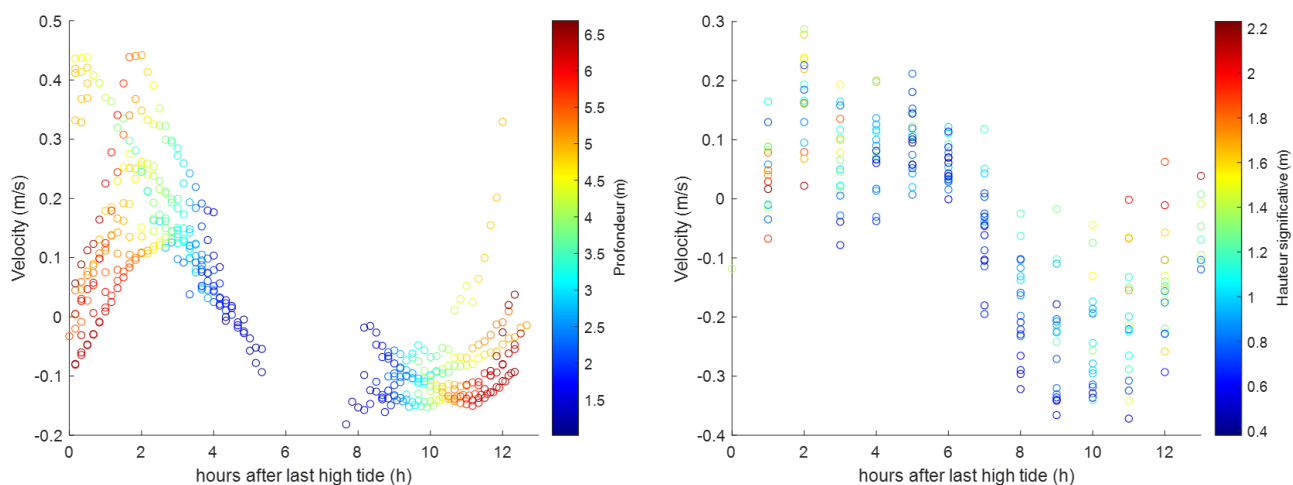


Figure 30 : Graphique de la vitesse du courant en fonction de la hauteur significative et de la phase de marée (à gauche l'aquapro P6 et à droite l'ADCP sud)

Lorsque les hauteurs significatives sont représentées en fonction de la phase de marée et de la vitesse du courant longshore, on observe une modulation de la vitesse du courant en fonction de la hauteur significatif au niveau des Aquapros (Figure 30). Ainsi, en faible niveau de hauteurs significatives, le courant reste entre 0.2 et -0.2m/s au niveau de la plage et correspond aux mêmes valeurs qu’au large comme en témoigne les valeurs de l’ADCP sud. A l’inverse, lorsque les hauteurs significatives sont élevées, le courant longshore au niveau de la plage augmente pour atteindre des vitesses supérieures à 0.4m/s à marée haute alors que à marée basse, la vitesse reste à 0.2m/s (même valeur que l’ADCP sud).

Pour conclure, il est difficile d’identifier les forçages qui impactent ce courant longshore bi-directionnelle. A marée montant, aucun forçage n’explique le courant orienté vers l’est sauf peut-être la hauteur d’eau au niveau de l’ADCP sud et de l’instrument au profil 5. Un mécanisme pas très marqué dans le cas de la plage du Vougot, mais très bien documenté dans la littérature (Thornton et Kim,1993 ; Sedrati et Anthony, 2007). En marée descendante, la hauteur significative est le seul forçage qui impacte ce courant longshore au niveau des instruments situés au profil 5 et 6. La très bonne corrélation avec le courant longshore permet d’identifier la hauteur significative comme un facteur forçant le courant longshore à marée descendante. Cependant, les mauvaises corrélations de tous ces facteurs laissent penser qu’un autre forçage joue un rôle surtout à marée montante. Ainsi, le fait que le courant longshore mesuré suit le courant mesuré au large laisse penser que l’on aurait la présence d’un courant de marée qui impacterait la zone de déferlement de la plage du Vougot.

2. Le courant longshore mesuré et prédit

Tableau V: Le R² du courant mesuré comparé au courant longshore calculé avec les marées (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1))

R ²	Longuet Higgins	Galvin	Kraczmarek K=2.7	Kraczmarek K=0.9	Thronton et guza
P5M	0.13	0.33	0.024	0.022	0.30
P5D	0.56	0.48	0.26	0.26	0.006
P6M	0.14	0.033	0.03	0.03	0.13
P6D	0.26	0.02	0.46	0.46	0.03
P5M (ADCP)	0.015	0.18	0.032	0.032	0.10
P5D(ADCP)	0.046	0.09	0.12	0.12	0.45
P6M(ADCP)	0.18	0.05	0.05	0.05	0.36
P6D(ADCP)	0.04	0.06	0.11	0.11	0.35

Une fois l’identification des forçages du courant longshore effectué, l’étude s’est intéressée à retrouver la vitesse du courant mesuré par l’intermédiaire de formule de prédiction de ce courant présent dans la littérature. Le courant longshore est calculé à l’aide des 4 formules présentées dans l’état de l’art (Galvin, 1967 ; Longuet-higgins 1970 (a) ; Longuet-higgins 1970 (b) ; Thornton et Guza, 1986 ; Kaczmarek et al., 2004 ; Équation 1 ; Équation 2 ; Équation 3 ; Équation 4). Pour les profils 5 et 6, les

valeurs rentrées dans la formule sont celles mesurées par l’Aquapro ou par l’ADCP sud (Tableau V). Les résultats des calculs sont ensuite corrélés avec les valeurs de courants mesurés.

Ainsi, le R^2 est le meilleur pour la formule de Longuet Higgins et pour les valeurs de houles mesurées par l’aquapro au niveau du profil 5 à marée descendante. Les résultats obtenus pour les autres formules ou instruments ne se lient pas avec celles mesurées. Les résultats témoignent donc de la relativement mauvaise corrélation entre les vitesses mesurées in-situ et calculées ; et témoignent que ces formules ne sont pas adéquates pour un environnement soumis à une bathymétrie complexe.

Les hypothèses énoncées plus haut indiquent la possible présence d’un courant de marée dans la zone de déferlement. Or les formules de prédiction de courant longshore ne prennent pas en compte ce forçage. Ainsi, le courant mesuré par l’ADCP sud que l’on identifie comme celui de la marée est additionné aux résultats du courant longshore donné par les formules.

Tableau VI: Le R^2 du courant mesuré comparé avec le courant longshore calculé avec les formules + le courant de marée au large (en rouge mal corrélé (de 0 à 0.2), en jaune moyennement bien corrélé (de 0.2 à 0.5) et en vert bien corrélé (de 0.5 à 1))

R^2	Longuet Higgins	Galvin	Kraczamarek	Kraczamarek	Thronton et guza
P5M	0.28	0.49	0.049	0.082	0.40
P5D	0.6	0.54	0.25	0.22	0.008
P6M	0.11	0.00001	0.04	0.006	0.15
P6D	0.24	0.02	0.48	0.48	0.05
P5M (ADCP)	0.015	0.18	0.025	0.013	0.79
P5D(ADCP)	0.049	0.09	0.11	0.11	0.42
P6M(ADCP)	0.18	0.05	0.06	0.09	0.25
P6D(ADCP)	0.04	0.06	0.12	0.11	0.36

Les résultats obtenus semblent meilleurs avec l’addition du courant de marée au niveau de l’instrument au profil 5. Les valeurs prédites sont un peu mieux corrélées avec les valeurs mesurées (Tableau VI). Si l’on compare avec les corrélations sans ajout de la marée, le R^2 est meilleur de 0.1 pour le courant prédit additionné avec la marée par rapport à celui prédit sans marée. Les corrélations sont meilleures pour les formules de Thronton et Guza lorsque les paramètres d’entrée des formules sont les valeurs mesurées par l’ADCP. Cependant, la corrélation reste mauvaise pour les autres formules et témoigne une nouvelle fois qu’elles ne sont pas adéquates pour un environnement complexe.

Les meilleurs résultats des corrélations obtenues avec ajout de la marée suggèrent la présence de celui-ci dans la zone de déferlement. L’étude permet donc de mettre en évidence la complexité de la zone de déferlement et les lacunes de la littérature sur l’impact du courant de marée dans celle-ci. Elle met

également en lumière la possible présence du courant de marée dans la zone de surf même s'il manque des clés pour l'affirmer. Des études plus approfondies de la zone de surf doivent donc être menées afin de quantifier l'impact de la marée dans celle-ci sur la plage du Vougot, mais également sur d'autres sites aux caractéristiques bathymétriques et hydrodynamiques différentes.

3. Le transport sédimentaire prédit par les formules issues de la littérature

Tableau VII: Résultats du transport sédimentaire (m³/h) issue des formules présentes dans la littérature calculée pour chaque profil.

Profil et condition énergétique	Résultats : Formule CERC (m ³ /h)	Résultats : Formule Kamphuis (m ³ /h)	Résultats : Formule mil-hommens (m ³ /h)
P6 : agité	22.75	1.76	12.5
P5 : agité	-13.85	0.39	3.68
P3 : agité	-29.32	0.60	7.13
P6 : semi-agité	5.68	0.44	1.86
P5 : semi-agité	-7.73	0.20	1.80
P3 : semi-agité	5.29	0.08	Pas de résultats
P6 : calme	2.29	0.04	0.4
P5 : calme	1.21	-0.03	Pas de résultats
P3 : calme	0.97	0.013	Pas de résultats

Dans la littérature, le courant généré par la houle est déterminé comme le seul pouvant impacter la plage et le transport de sédiment dans la zone de surf (Héquette, 2001). Le transport sédimentaire est calculé à l'aide de trois formules présentes dans la littérature (Kumar et al., 2003 ; Bertin et al., 2008 ; Mil-Homens, 2016 ; Équation 5 ; Équation 6 ; Équation 7). Les valeurs issues des formules sont bien en adéquation avec les conditions énergétiques de la marée avec un transport sédimentaire plus important en haute condition d'énergie et plus faible en basse (Tableau VII).

Les résultats des valeurs issues de la formule de CERC semblent surévalués. En parallèle, les valeurs obtenues avec les formules de Kamphuis et Mil-Hommens semblent plus possibles au vue de l'ordre de grandeur. La différence entre les formules est l'utilisation de la pente de plage et du diamètre médian du sédiment dans les formules de Kamphuis et Mil-Hommens alors que seule la période, la hauteur significative de houle et l'angle d'incidence sont utilisés dans la formule de CERC. Néanmoins, les formules de Kamphuis et Mil-Hommens indique qu'aucun profil ne perd du sédiment peu importe l'énergie de la marée alors que la formule de CERC indique que le profil 5 perd du sédiment en marée agité et semi-agité. Pour finir, les résultats montrent qu'il est important de noter que ce transport sédimentaire n'est donné qu'à titre indicatif et que les valeurs ne reflètent pas et n'explique pas les évolutions de volume sédimentaire mesuré au niveau des profils durant la campagne de terrain. Des mesures in-situ de transport sédimentaire à l'aide de piège à sédiment permettrais de comparer avec les valeurs issues des formules.

4. Fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de la plage du Vougot



Figure 31: Carte bilan du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de la plage du Vougot durant les mesures

A la plage, les houles et courants sont fortement impactés par les changements bathymétriques de la zone. En effet, la houle se retrouve diffractée et réfractée par la bathymétrie et les courants, l'orientant alors parallèlement aux isobathes (Sonu et al., 1967 ; Noda, 1974 ; Mei et Liu, 1977 ; Apotsos et al., 2008 ; Gomes et al., 2016 ; Hopkins et Raubenheimer, 2016). Ensuite, la houle en arrivant dans la zone de surf déferle en raison de la diminution de la profondeur et arrive avec un certain angle d'incidence à la plage. Cet angle est responsable d'un courant longshore orienté d'un côté ou l'autre de la plage (Putnam et al., 1949 ; Galvin, 1967 ; Longuet-higgins 1970 (a) ; Longuet-higgins 1970 (b) ; O'Rourke et leblond 1972 ; Thornton et Guza, 1986 ; Sherman, 1988 ; Kumar et al., 2000 ; Kumar et al., 2003 ; Siswanto, 2015 ; Hopkins et Raubenheimer, 2016 ; Gomes et al., 2016). Si l'on suit purement l'angle d'incidence mesuré par les 3 Aquapros (Figure 20), le courant longshore sur la plage est en direction de l'est, car les houles viennent d'ouest. Cependant, l'orientation du courant, à marée descendante, mesuré par les instruments est opposée à l'angle de la houle déferlante avec un courant orienté vers l'ouest alors que la houle vient de l'ouest. Sur la plage, le courant suit la même orientation que le courant de marée au large et possède les mêmes vitesses en condition de houle calme et sont plus élevée lorsque les houles sont agitées (Figure 24).

Ainsi, on peut suggérer deux hypothèses, la première est la présence d'un courant de marée dans la zone de déferlement qui orienterait les houles. Cette hypothèse est la plus plausible, car elle explique le fait que le courant longshore suit la même direction que le courant de marée. Elle explique également

la vitesse du courant longshore qui est identique à celui de la marée lorsque les hauteurs significatives de houles sont faibles. Elles sont supérieures au courant de marée lorsque les hauteurs de houles sont élevées. Pour finir, au niveau des directions de houle mesurées par l'aquapro, l'angle est positif à marée montante et témoigne donc d'une houle de direction ouest. Alors qu'en marée descendante, on voit l'orientation des houles qui a tendance à passer sous le zéro et peut témoigner d'une houle de nord-est (Figure 24). Néanmoins, Ce changement de direction n'est pas flagrant et montrent la difficulté des aquapro à mesurer l'orientation dans la zone de déferlement surtout pour ceux à 1hz. Ce changement de direction est observé sur les vols drone. Cependant, le manque d'images et les erreurs qui peuvent être importantes ne fournissent pas de conclusion claire. Dans la littérature, les publications spécialisées en modélisation des processus hydrodynamiques agissant sur l'avant-côte confirme que seules les houles agissent sur le courant au niveau des plages (Larson et Kraus, 1989 ; Dean, 1991 ; Kriebel et al, 1991 ; Martinez et Harbaugh, 1993). Pourtant, d'autres études parlent de l'impact d'autres facteurs comme les courants de marée qui dans certains environnements comme les estuaires ou baies, jouent un rôle prépondérant dans la circulation des masses d'eau à la côte (Paskoff, 1998). Dans la baie de Katama, un courant de marée mesuré entre 2 et 7m de profondeur atteignait des vitesses supérieures à 2m/s (Paskoff, 1998). Dans le cas du Vougot, les vitesses mesurées pouvait atteindre au maximum moins de 1m/s. Les courants de marée bien qu'ils aient généralement une action limitée le long des côtes sableuses, peuvent donc avoir dans les milieux macrotidaux, une action conjointe avec les houles pour impacter les plages (Voulgaris et al, 1998 ; Corbeau et al, 1999; Levoy et al, 1998 dans Héquette, 2001).

La seconde hypothèse est la hauteur d'eau qui modulerait l'incidence des houles au large. Elle est également réaliste, car l'ADCP au sud montre un changement d'orientation à marée basse durant les marées du 1 et 2 mars où l'on voit un angle positif à marée haute et négatif à marée basse (Figure 24). D'autres études évoquent le niveau d'eau comme un autre facteur influençant le courant longshore (Thornton et Kim, 1993 ; Sedrati et Anthony, 2007). Cependant, les résultats ne permettent pas d'affirmer si une hypothèse ou l'autre est la bonne. Néanmoins, sans doute qu'elles impactent toutes les deux la génération du courant longshore à la plage.

Le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de la plage du Vougot est principalement impacté par la propagation des houles et courant du large vers la plage (Figure 31). Les houles au large orientées ouest sont réfractées/diffractées par les écueils et hauts fonds. Ceci est particulièrement vrai à marée basse ou début montante, atténuant fortement les houles et permettant une houle moins haute d'arriver à la plage. Ainsi, sur la plage, deux régimes de houles s'observent avec une houle de nord-est provenant de la réfraction/diffraction des houles d'ouest et une houle de nord-ouest qui a déferlé sur les hauts-fonds au large (Figure 32). Les mécanismes de contournement des éperons rocheux sont un élément important pour comprendre le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire d'une plage surtout dans le cas de la plage du Vougot. En 2013, dans un article de Goodwin, il témoignait du manque d'étude sur les mécanismes de contournement des éperons rocheux dans le monde malgré le fait qu'elle représente 80% des côtes mondiales (Trenhaile, 1987).

A marée montante, un courant de marée d'ouest en est circule au large et proche de la plage. Le site d'étude se trouve en zone macrotidale, le courant de marée peut donc être très important au large (2m/s pour un coefficient de 100) (Figure 32). Celui-ci va augmenter le niveau d'eau et va permettre aux houles de mieux passer les hauts-fonds et déferlées au niveau de la plage du Vougot. Le courant de marée permet également d'orienter les houles provenant du nord-ouest dans la zone de déferlement. En effet, dans l'article de Hopkins en 2016, il évoque que les ondes de houles ont des directions modulées de plus ou moins 35° en fonction de la réfraction induite par les courants de marée. De plus, il précise que ceci est particulièrement vrai dans le cas de site soumis à des bathymétries complexes et de fort courant de marée (Hopkins et al., 2016). Une autre étude plus récente a déterminé que le forçage de marée est plus important autour des promontoires et des îles, car la constriction de l'onde de marée produit de fort courant de marée (King et al., 2019).

Ainsi, dans le cas de la plage du Vougot, un courant longshore issue de l'interaction entre l'onde de marée et la houle déferlante est généré et orienté vers l'est. Ce courant se retrouve freiné à l'est de la plage du Vougot à cause des houles de nord-est et de la bathymétrie. En condition de fortes hauteurs significatives au large, un courant longshore généré par la houle déferlante de nord-est (plus forte que la houle de nord-ouest), est dirigé vers l'ouest de la plage du Vougot. Un phénomène observé durant la marée du 24 février. Dans la littérature, un article de 2021 observait qu'au niveau d'un promontoire rocheux sur une grande plage sableuse, les courants de marée ont un effet mineur pendant les vagues énergétiques sur l'orientation du courant (King et al., 2021). Il écrit également que lors des marées avec des vagues modérées à faiblement énergétique, le contournement induit par les courants de marée s'opposait à celui induit par la houle. La direction du forçage combiné vague-marée a donc tendance à suivre l'orientation de la marée lors de faible hauteur de houle et à suivre l'orientation des houles lors de haute hauteur de houle. Un phénomène observé sur la plage du Vougot. Dans leurs études le courant de marée oscillait entre 0.02m/s et 1m/s (King et al., 2021).

A marée descendante, la hauteur d'eau est élevée sur la plage. Les houles ne déferlent plus sur les hauts-fonds, mais déferlent sur la plage. Dans la littérature, il est régulièrement écrit que le courant longshore est impacté par la hauteur d'eau (Thornton et Kim, 1993 ; Sedrati et Anthony, 2007). En parallèle, le courant de marée s'est inversé et est maintenant dirigé vers l'ouest. Ce courant interagit donc plus fortement avec les houles de nord-est et réoriente les houles de direction nord-ouest dans sa direction. Ce mécanisme continuera jusqu'à que la hauteur d'eau fasse déferler les houles sur le platier au large diminuant la vitesse du courant.

Il est important de noter que des fortes hauteurs significatives sont observées sur la plage du Vougot en particulier le 24 février. Le facteur forçant serait le vent en plus de la houle du large, qui en soufflant sur la masse d'eau génère une mer de vent locale avec de plus fortes hauteurs significatives de houle (le 24 février, une période de 7s est mesurée à l'ADCP sud). Dans la littérature, ce phénomène est

bien décrit depuis les années 80 (Hubertz, 1986 ; Sokolov et Chubarenko, 2012). Un article de Paskoff de 1998 détermine que le vent génère la houle à partir des vitesses de 3 à 4 m/s. En effet, au vue de la bathymétrie de la zone, la présence d'une zone assez grande, protégée par une barre de haut-fond, crée ainsi une grande étendue d'eau protégée des houles du large. Le vent du nord, d'orientation dominante sur la plage, impacterait donc les houles arrivent sur la plage et expliquerait des hauteurs significatives de houles de 2 à 4 mètres mesurés à l'aquapro.

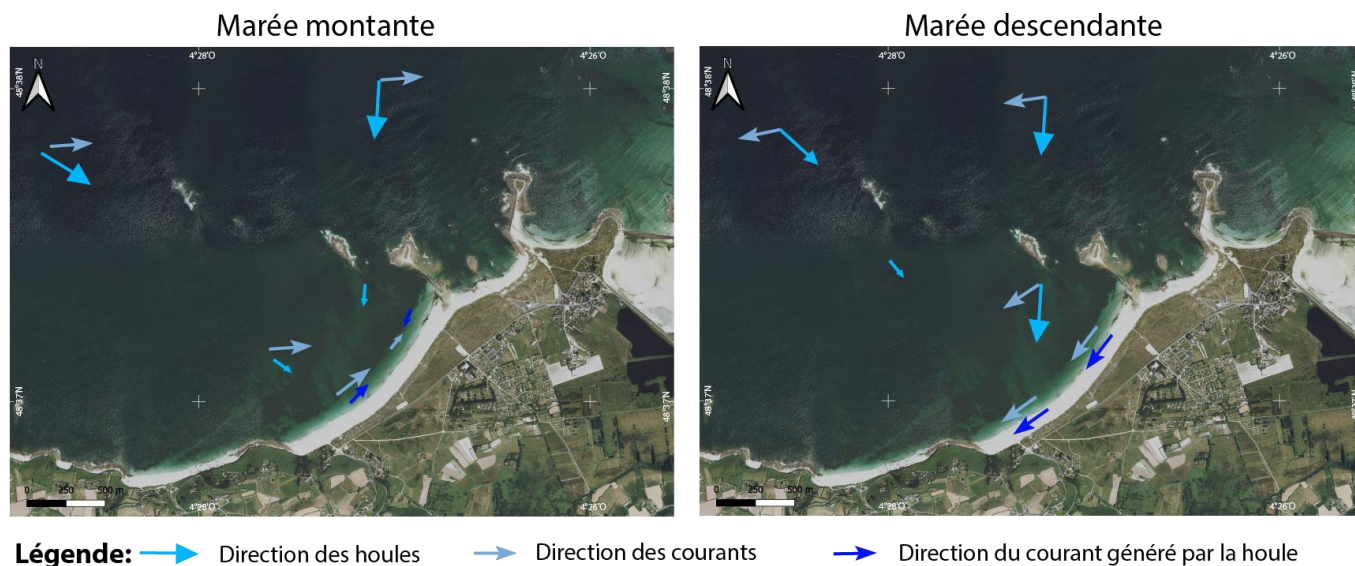


Figure 32 : Schéma bilan de la génération du courant longshore sur la plage du Vougot

La circulation hydrodynamique avec ce courant bidirectionnelle permet donc d'expliquer le transfert sédimentaire observé entre l'est et l'ouest avec de l'érosion et de l'accrétion. En effet, même si un courant à marée montante est orienté vers l'est, celui-ci se retrouve avec des vitesses plus faibles et pas tout le temps présent surtout durant de forte condition d'énergie. A l'inverse, le courant dirigé vers l'ouest à marée descendante se retrouve tout le temps présent et peut être fortement accéléré par des hauteurs significatives élevées permettant un meilleur transport sédimentaire.

L'instrument situé au profil 3, au niveau de la plage du Curnic témoigne de la complexité de cette plage et n'a pas permis de comprendre la circulation hydrodynamique au niveau des platiers. Cette partie de la plage est très complexe avec la présence de nombreux écueils qui forment en arrière des queues de comète et tombolos. La houle venant du large avec une orientation nord, nord-est est diffractée et réfractée par la digue à l'est et les hauts-fonds à l'ouest. Cette dernière, lorsqu'elle arrive sur la plage, génère un courant longshore à la limite du cross-shore le long de la digue. Cependant, une connexion avec la plage du Vougot par un courant longshore vers l'ouest est observée lors des marées hautes entre le profil 3 et le profil 5. Aucun lien avec la marée n'est observé entre les données mesurées par cet instrument et les ADCP au large. Une instrumentation plus précise de la zone avec un ADCP au large de la plage et

plusieurs aquapro dans la zone de déferlement pourrais permettre une meilleure compréhension de la circulation hydrodynamique.

5. Potentiel de prédiction du courant et transport dans la zone de déferlement à partir des conditions au large

La comparaison entre les données de houles mesurées et les données de houles prédites par les modèles Homère ou Ressources code montrent des différences marquées dans l'orientation des houles et leurs hauteurs au large. Une surévaluation des hauteurs significatives de houle prédites est observée par rapport à celle mesurée. La direction de houle est également surévaluée vers l'ouest pour les directions issues des deux modèles. Ainsi, les modèles au large possèdent des petites erreurs qui pour des points de maillage plus proche des côtes vont donner des valeurs très erronées de la réalité. Les principales causes sont les changements bathymétriques importants qui ne sont pas bien pris en compte par les modèles à cause de maillages de point généralement trop grand (Grashorn et al., 2015). Dans le cas du Vougot, les valeurs issues des modèles ne sont pas exploitables proches de la côte.

Les erreurs importantes de ces deux modèles proches de la côte font qu'ils ne peuvent pas être exploités pour prédire le courant longshore dans la zone de déferlement. Les données hydrodynamiques issue de ces deux modèles ne peuvent donc pas bien expliquer le courant longshore sur la plage du Vougot, car l'angle d'incidence des houles à la plage possède trop d'incertitude. Or, dans la littérature, l'angle d'incidence suivi de la vitesse du vent sont des facteurs importants pour prédire le courant longshore (Lanfredi et Framinan, 1986). Le fait qu'ils ne peuvent pas expliquer ce courant longshore ne permet pas de les utiliser pour prédire le transport sédimentaire associé, car les incertitudes des résultats seront trop importantes. Or dans un contexte où les littoraux meubles sont plus que vulnérable et qu'il est nécessaire de comprendre les processus liés à l'érosion et au transport, fait que ces deux modèles ne peuvent pas aider à la compréhension morphologique du site.

Les modèles Wavewatch3 et RessourcesCode, dans le cas de la zone du Vougot, sont intéressants pour prédire les conditions hydrodynamiques au large. Cependant, à la côte, les données ne sont plus exploitables. Il est donc nécessaire de construire d'autre modèle comme DELft3D ou Xbeach plus réaliste. Ce stage avait pour objectif de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la plage du Vougot et de récolter des données in-situ qui dans le cadre du projet Sea-EU permettra en collaboration avec l'université de Kiel. Cette collaboration a pour objectif de construire un modèle réaliste et fiable de prédiction de la réponse morphologique de la plage face aux conditions hydrodynamiques au large.

VII. Conclusion

La plage du Vougot est un environnement complexe soumis à une bathymétrie composée d'écueils et de hauts-fonds impactant fortement la propagation de la houle. Deux directions de houle sont observées. La première est des houles du large qui arrive de l'ouest et se retrouvent freinées et réfractées par les hauts-fonds et écueils. La houle se propage alors après le platier du nord vers le sud. Les crêtes de houle s'alignent sur les isobathes et déferlent sur la plage du Vougot. La seconde direction de houle est du nord-est vers le sud-ouest due à la réfraction/diffraction des houles d'ouest. Cette houle se retrouve réfractée par le tombolo et les écueils situés entre la plage du Vougot et celle du Curnic et déferlent sur celle-ci.

Au niveau du courant de marée, il se retrouve orienté vers l'est à marée montante et orienté vers l'ouest à marée descendante. Sur la plage, un courant bidirectionnel est mesuré avec le même schéma que celui qui s'observe au large. Cependant, la vitesse du courant est plus forte lorsque les conditions énergétiques sont plus élevées. La présence de ce schéma d'orientation du courant interroge sur la possible présence d'un courant de marée dans la zone de déferlement. Dans la littérature, peu d'articles étudient l'impact du courant de marée en domaine macrotidal. Cependant, certains articles écrivent observés un courant de marée proche des côtes impactant les houles et donc le courant longshore généré par celle-ci.

Le courant bi-directionnel à la plage s'explique, à marée montante, par un courant de marée orienté vers l'est qui réoriente la houle en provenance du nord-ouest pauvre en énergie dû à son déferlement sur les platiers au large. Cette interaction houle-courant crée un courant longshore orienté vers l'est. Celui-ci se retrouve freiné par la houle en provenance du nord-est. En condition de marée énergétique, le courant lonshore généré par la houle déferlante de nord-est se retrouve plus important que le courant de marée et donc réoriente vers l'ouest les courants. A marée descendante, le courant de marée orienté vers l'ouest s'additionne avec le courant longshore généré par la houle déferlante en provenance du nord-est.

Au niveau morphologique, la zone est érodée à l'ouest de la digue du Curnic et en accrétion à l'ouest de la plage du Vougot, en cause, un courant longshore orienté vers l'ouest qui se retrouve plus fort que celui orienté vers l'est.

Les formules utilisées dans la littérature ont montré leur faiblesse dans la prédiction du courant longshore. La meilleure formule de prédiction de courant longshore est celle de longuet higgins qui se retrouve être une des plus anciennes. Cependant, les résultats obtenus sont tous surévalués par rapport aux vitesses mesurées et suggèrent qu'aucune formule de prédiction du courant longshore n'est adaptée aux plages avec des bathymétries complexes en domaine macrotidale.

Pour finir, les modèles de prédiction des houles Homère et Ressources Code ont montré eux aussi des faiblesses dans la prédiction de la direction et de la hauteur significative des houles pour une plage à bathymétrie complexe. Dans le cadre de la plage du Vougot, le modèle Homère reste tout de même meilleur que celui de Ressources code pour prédire les hauteurs et directions de houle. Cependant, ils ne permettent pas d'expliquer la circulation hydrodynamique proche de la plage et doivent être couplés à un modèle plus réaliste (DELft3D, Xbeach).

VIII. Bibliographie

1. Articles scientifiques et rapports

- Army, U. S. Coastal Engineering Research Center (CERC), 1984. Shore protection manual, 1.
- Apotsos, A., Raubenheimer, B., Elgar, S., & Guza, R. T. (2008). Wave-driven setup and alongshore flows observed onshore of a submarine canyon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7).
- Bailard, J. A. (1984). A simplified model for longshore sediment transport. *Coastal Engineering Proceedings*, (19), 99-99.
- Bayram, A., Larson, M., Miller, H. C., & Kraus, N. C. (2001). Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. *Coastal Engineering*, 44(2), 79-99.
- Bayram, A., Larson, M., & Hanson, H. (2007). A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, 54(9), 700-710.
- Bertin, X., Castelle, B., Chaumillon, E., Butel, R., & Quique, R. (2008). Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy dissipative beach: St. Trojan beach, SW Oléron Island, France. *Continental Shelf Research*, 28(10-11), 1316-1332
- Blanc, J. J. (1996). Plages en recul et dynamique des profils littoraux à Faraman (Camargue, delta du Rhône), méthodes d'études ; essai d'analyse prévisionnelle. [Beach erosion rates and shore-profiles changes at Faraman (Camargue, Rhône delta). Evaluation and methods, forecasting essays.]. *Quaternaire*, 7(1), 53-62.
- Bougis, J. (2000). Sédimentologie littoral (No 05-Transport littoral).
http://www.scs-ingenierie.com/pdf/cours/sedimentologie_littorale.pdf
- Bruun, P. (1963). Longshore currents and longshore troughs. *Journal of geophysical Research*, 68(4), 1065-1078.
- Bryan, K. R., & Bowen, A. J. (1998). Bar-trapped edge waves and longshore currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C12), 27867-27884.
- Cartier, A., & Héquette, A. (2011a). Variation in longshore sediment transport under low to moderate

conditions on barred macrotidal beaches. *Journal of Coastal Research*, 45-49.

- Cartier, A., & Héquette, A. (2011b). Estimation of longshore and cross-shore sediment transport on sandy macrotidal beaches of northern France. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011: In 3 Volumes* (pp. 2130-2143).
- Chaibi, M., Sabatier, F., & Maanan, M. (2009). Quantification de transport sédimentaire longshore: application à la baie d'El Haouzia (région d'El Jadida, Maroc). *Bulletins de l'Institut Scientifique*, (31), 21-37.
- Chempalayil, S. P., Kumar, V. S., Dora, G. U., & Johnson, G. (2014). Near shore waves, long-shore currents and sediment transport along micro-tidal beaches, central west coast of India. *International Journal of Sediment Research*, 29(3), 402-413.
- Chen, Q., Kirby, J. T., Dalrymple, R. A., Shi, F., & Thornton, E. B. (2003). Boussinesq modeling of longshore currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C11).
- Cherfils, J.B., (2020). Dynamique des stocks sédimentaires à l'échelle du quaternaire et prédictions d'évolutions futures : L'exemple de la côte Sud-Bretonne. Université Bretagne Occidentale.
- Choi, J., Kirby, J. T., & Yoon, S. B. (2015). Boussinesq modeling of longshore currents in the SandyDuck experiment under directional random wave conditions. *Coastal Engineering*, 101, 17-34.
- Cooper, J. A. G., & Pilkey, O. H. (2004). Longshore drift: trapped in an expected universe. *Journal of Sedimentary Research*, 74(5), 599-606.
- Corbau, C., Tessier, B., & Chamley, H. (1999). Seasonal evolution of shoreface and beach system morphology in a macrotidal environment, Dunkerque area, Northern France. *Journal of Coastal Research*, 97-110.
- Cui, Lei and Tang, Jun (2011) "Numerical study on random waves and wave-induced long-shore currents at leadbetter beach," *Journal of Marine Science and Technology*: Vol. 19 : Iss. 2 , Article 14. DOI: 10.51400/2709-6998.2157
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of coastal research*, 53-84.
- Fernández, S., Baptista, P., Martins, V. A., Silva, P. A., Abreu, T., Pais-Barbosa, J., ... & Rey, D. (2016). Longshore transport estimation on Ofir Beach in northwest Portugal: Sand-tracer experiment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 142(2), 04015017.

- Galvin Jr, C. J. (1967). Longshore current velocity: A review of theory and data. *Reviews of Geophysics*, 5(3), 287-304.
- George, D. A., Largier, J. L., Storlazzi, C. D., Robart, M. J., & Gaylord, B. (2018). Currents, waves and sediment transport around the headland of Pt. Dume, California. *Continental shelf research*, 171, 63-76.
- Gholami, Z., Lari, K., Bidokhti, A. A., & Javid, A. (2021). Revisiting the derivation of bulk longshore sediment transport rates using meta-heuristic algorithms. *Ocean and Coastal Research*, 69.
- Goda, Y. (2006). Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves. *Coastal Engineering*, 53(2-3), 157-170.
- Gomes, E. R., Mulligan, R. P., Brodie, K. L., & McNinch, J. E. (2016). Bathymetric control on the spatial distribution of wave breaking in the surf zone of a natural beach. *Coastal Engineering*, 116, 180-194.
- Goodwin, I. D., Freeman, R., & Blackmore, K. (2013). An insight into headland sand bypassing and wave climate variability from shoreface bathymetric change at Byron Bay, New South Wales, Australia. *Marine Geology*, 341, 29-45.
- Grashorn, S., Lettmann, K. A., Wolff, J. O., Badewien, T. H., & Stanev, E. V. (2015). East Frisian Wadden Sea hydrodynamics and wave effects in an unstructured-grid model. *Ocean Dynamics*, 65(3), 419-434.
- Hansen, J. E., Elias, E., List, J. H., Erikson, L. H., & Barnard, P. L. (2013). Tidally influenced alongshore circulation at an inlet-adjacent shoreline. *Continental Shelf Research*, 56, 26-38.
- Héquette, A. (2001). Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale: le rôle des courants orbitaux et de downwelling/Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 7(1), 5-16.
- HOMERE . Ifremer - Laboratoire Comportement des Structures en Mer - Ifremer - Laboratoire Spatial et Interfaces Air-Mer : <http://dx.doi.org/10.12770/cf47e08d-1455-4254-955e-d66225c9dc90>
- Hopkins, J., Elgar, S., & Raubenheimer, B. (2016). Observations and model simulations of wave-current interaction on the inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1), 198-208.
- Hubertz, J. M. (1986). Observations of local wind effects on longshore currents. *Coastal*

Engineering, 10(3), 275-288.

- Jaramillo, C., González, M., Medina, R., & Turki, I. (2021). An equilibrium-based shoreline rotation model. *Coastal Engineering*, 163, 103789.
- Kaczmarek, L. M., Ostrowski, R., Pruszek, Z., & Rozynski, G. (2005). Selected problems of sediment transport and morphodynamics of a multi-bar nearshore zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(3), 415-425.
- Kamphuis, J. W. (1991). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 117(6), 624-640.
- King, EV, Conley, DC, Masselink, G., Leonardi, N., McCarroll, RJ et Scott, T. (2019). L'impact des vagues et des marées sur le transport de sable résiduel sur un plateau continental pauvre en sédiments, énergétique et macrotidal. *Journal of Geophysical Research : Océans*, 124 (7), 4974-5002.
- King, EV, Conley, DC, Masselink, G., Leonardi, N., McCarroll, RJ, Scott, T. et Valiente, NG (2021). Contrôles des vagues, des marées et de la topographie sur les contournements de sable des promontoires. *Journal of Geophysical Research : Océans*, 126 (8), e2020JC017053.
- Kriebel, D. L., Kraus, N. C., & Larson, M. (1991, June). Engineering methods for predicting beach profile response. In *Coastal Sediments* (pp. 557-571). ASCE.
- Komar, P. D., & Inman, D. L. (1970). Longshore sand transport on beaches. *Journal of geophysical research*, 75(30), 5914-5927.
- Kumar, V. S., Chandramohan, P., Kumar, K. A., Gowthaman, R., & Pednekar, P. (2000). Longshore currents and sediment transport along Kannirajapuram Coast, Tamilnadu, India. *Journal of Coastal Research*, 247-254.
- Kumar, V. S., Kumar, K. A., & Raju, N. S. N. (2001). Nearshore processes along tikkavanipalem beach, Visakhapatnam, India. *Journal of coastal research*, 271-279.
- Kumar, V. S., Anand, N. M., Chandramohan, P., & Naik, G. N. (2003). Longshore sediment transport rate—measurement and estimation, central west coast of India. *Coastal Engineering*, 48(2), 95-109.
- Lanfredi, N. W., & Framiñan, M. B. (1986). Field study and prediction of longshore currents, Argentine coast. *Journal of Coastal Research*, 409-417.

- Larson, M., & Kraus, N. C. (1989). SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1. Empirical foundation and model development. Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.
- Levoy, F., Anthony, E., Barusseau, J. P., Howa, H., & Tessier, B. (1998). Morphodynamique d'une plage macrotidale à barres. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 327(12), 811-818.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. *Journal of geophysical research*, 75(33), 6778-6789.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 2. *Journal of geophysical research*, 75(33), 6778-6789.
- Martinez, P. A., & Harbaugh, J. W. (2013). *Simulating nearshore environments*. Elsevier.
- Mei, C. C., & Liu, P. F. (1977). Effects of topography on the circulation in and near the surf zone—linear theory. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 5(1), 25-37.
- Mil-Homens, J. (2016). Longshore sediment transport: bulk formulas and process based models.
- Nicholls, R. J., Birkemeier, W. A., & Hallermeier, R. J. (1996). Application of the depth of closure concept. *Coastal Engineering Proceedings*, (25).
- Noda, E. K. (1974). Wave-induced nearshore circulation. *Journal of Geophysical Research*, 79(27), 4097-4106.
- Osiecki, D. A., & Dally, W. R. (1997). The influence of rollers on longshore currents. In *Coastal Engineering 1996* (pp. 3419-3430).
- O'Rourke, J. C., & LeBlond, P. H. (1972). Longshore currents in a semicircular bay. *Journal of Geophysical Research*, 77(3), 444-452.
- Özkan-Haller, H. T., & Li, Y. (2003). Effects of wave-current interaction on shear instabilities of longshore currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C5).
- Paskoff, R. (1998). La crise des plages : pénurie de sédiments. *Mappemonde*, 52(4), 11-15.
- Pilkey, O. H., & Cooper, J. A. G. (2002). Longshore transport volumes: a critical view. *Journal of Coastal Research*, (36 (10036)), 572-580.

- Putnam, J. A., Munk, W. H., & Taylor, M. A. (1949). The prediction of longshore currents. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 30(3), 337-345.
- Putrevu, U., Oltman-Shay, J., & Svendsen, I. A. (1995). Effect of alongshore nonuniformities on longshore current predictions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C8), 16119-16130.
- Sedrati, M., & Anthony, E. J. (2006). The role of longshore currents in intertidal bar mobility on a macrotidal beach under high energy wave conditions. In *Coastal Dynamics 2005: State of the Practice* (pp. 1-14).
- Sedrati, M., & Anthony, E. J. (2007). Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach. *Marine geology*, 244(1-4), 209-229.
- Shanas, P. R., & Kumar, V. S. (2014). Coastal processes and longshore sediment transport along Kundapura coast, central west coast of India. *Geomorphology*, 214, 436-451.
- Sherman, D. J. (1988). Empirical evaluation of longshore-current models. *Geographical Review*, 158-168.
- Shi, F., Hanes, D. M., Kirby, J. T., Erikson, L., Barnard, P., & Eshleman, J. (2011). Pressure-gradient-driven nearshore circulation on a beach influenced by a large inlet-tidal shoal system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C4).
- Siegle, E., & Asp, N. E. (2007). Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55(2), 109-120.
- Siswanto, A. D. (2015). Longshore current characteristics in Madura Strait. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 34-38.
- Sokolov, A., & Chubarenko, B. (2012). Wind influence on the formation of nearshore currents in the southern Baltic: numerical modelling results. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 59(1-2), 37-48.
- Sonu, C. J., McCloy, J. M., & McArthur, D. S. (1967). Longshore currents and nearshore topographies. In *Coastal Engineering 1966* (pp. 525-549).
- Suarez, S. (2004). Rapport d'activité sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du

Vougot (Commune de Guissény) (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Suanez, S., & Sparfel, L. (2005). Rapport d'activité sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot (Commune de Guissény) pour l'année 2004-2005 (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Suanez, S., Fichaut, B., Goudédranche, L., & Sparfel, L. (2006). Rapport d'activité sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot (commune de Guissény) pour l'année 2005-2006 et sur l'étude du risque de submersion (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Suanez, S. (2007). Rapport d'activité sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot (commune de Guissény) pour l'année 2006-2007 (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Suanez, S., & Cariolet, J. M. (2008). Rapport final sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot (Commune de Guissény) entre 2004 et 2008 (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Suanez, S., Cariolet, J. M., & Fichaut, B. (2009). Rapport d'activité sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot (Commune de Guissény) pour l'année 2008-2009 (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).

Serge Suanez, Jean-Marie Cariolet. Rapport sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2010. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO). 2010, 15 p. hal-00556417

Serge Suanez, Jean-Marie Cariolet. L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008. *Norois*, Presses universitaires de Rennes, 2010, 215, pp.77-99.10.4000/norois.3212. hal-00487865

Serge Suanez, Emmanuel Blaise, Bernard Fichaut. Rapport sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2011. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO). 2012, 19 p. hal-00671194

Serge Suanez, Emmanuel Blaise, Bernard Fichaut. Rapport sur le suivi morpho-sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2012. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO). 2013, 18 p. hal-00859537

- Suanez, S., Cariolet, J. M., Cancouët, R., Arduin, F., & Delacourt, C. (2012). Dune recovery after storm erosion on a high-energy beach: Vougot Beach, Brittany (France). *Geomorphology*, 139, 16-33.
- Serge Suanez, Emmanuel Blaise. Rapport sur le suivi morphosédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2013. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO). 2013, 18 p. hal-00922577
- Suanez, S., & Blaise, E. (2014). Rapport sur le suivi morphosédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2014 (Doctoral dissertation, LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO)).
- Suanez, S., Cancouët, R., Floc'h, F., Blaise, E., Arduin, F., Filipot, J. F., ... & Delacourt, C. (2015). Observations and predictions of wave runup, extreme water levels, and medium-term dune erosion during storm conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 3(3), 674-698.
- Serge Suanez, Emmanuel Blaise, Jérôme Ammann, Philippe Grandjean. Rapport sur le suivi morpho sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2016. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR6554 CNRS ; Université de Bretagne Occidentale (UBO).2017, 18p.hal-01445180
- Serge Suanez, Emmanuel Blaise. Rapport sur le suivi morpho sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2017. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR6554 CNRS ; Université de Bretagne Occidentale (UBO).2017, 19p.hal-01682837
- Serge Suanez. Rapport sur le suivi morpho sédimentaire du cordon dunaire de la plage du Vougot pour l'année 2018. [Rapport de recherche] LETG-Brest UMR6554 CNRS ; Université de Bretagne Occidentale (UBO).2019, 16p.hal-02085661
- Thornton, E. B., & Guza, R. T. (1986). Surf zone longshore currents and random waves: Field data and models. *Journal of Physical Oceanography*, 16(7), 1165-1178.
- Thornton, E. B., & Kim, C. S. (1993). Longshore current and wave height modulation at tidal frequency inside the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C9), 16509-16519.
- Tran, Y. H., & Barthélemy, E. (2020). Combined longshore and cross-shore shoreline model for closed embayed beaches. *Coastal Engineering*, 158, 103692.
- Trenhaile, A. S. (1987). *The geomorphology of rock coasts*. Oxford University Press, USA.
- Turner, I. L., Harley, M. D., Short, A. D., Simmons, J. A., Bracs, M. A., Phillips, M. S., & Splinter, K. D.

(2016). A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Scientific data*, 3(1), 1-13.

Valiente, N. G., Masselink, G., Scott, T., & Conley, D. (2017). Depth of closure along an embayed, macrotidal and exposed coast: a multi-criteria approach. *Coastal Dynamics 2017*.

Van Rijn, L. C. (2014). A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. *Coastal Engineering*, 90, 23-39.

Voulgaris, G., Simmonds, D., Michel, D., Howa, H., Collins, M. B., & Huntley, D. A. (1998). Measuring and modelling sediment transport on a macrotidal ridge and runnel beach: an intercomparison. *Journal of Coastal Research*, 315-330.

White, T. E. (1998). Status of measurement techniques for coastal sediment transport. *Coastal Engineering*, 35(1-2), 17-45.

Wu, C. S., Thornton, E. B., & Guza, R. T. (1985). Waves and longshore currents: Comparison of a numerical model with field data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C3), 4951-4958.

Zhang, W., Deng, J., Harff, J., Schneider, R., & Dudzinska-Nowak, J. (2013). A coupled modeling scheme for longshore sediment transport of wave-dominated coasts—A case study from the southern Baltic Sea. *Coastal engineering*, 72, 39-55.

Zhang, R., Zijlema, M., & Stive, M. J. (2018). Laboratory validation of SWASH longshore current modelling. *Coastal Engineering*, 142, 95-105.

Zviely, D., Kit, E., & Klein, M. (2007). Longshore sand transport estimates along the Mediterranean coast of Israel in the Holocene. *Marine Geology*, 238(1-4), 61-73.

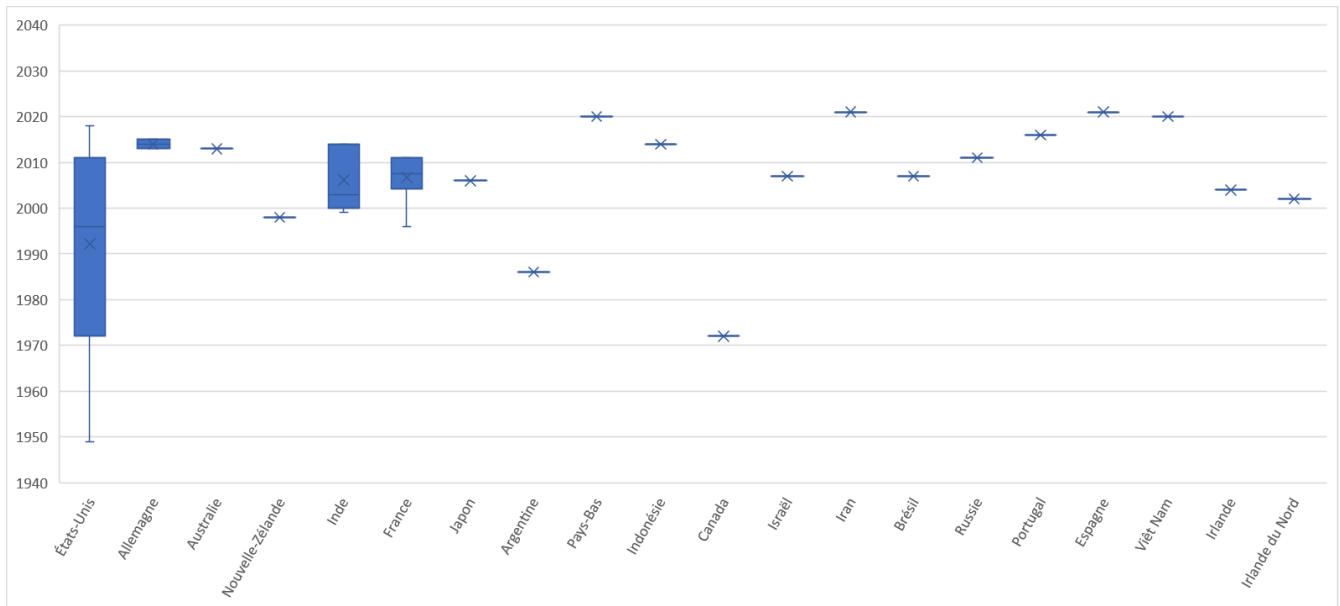
2. Site internet

Syndicat Mixte des eaux du Bas-Léon. (s. d.). Syndicat Mixte des eaux du Bas-Léon-rapport-2019. Consulté le 14 avril 2022, à l'adresse <https://www.syndicateauxbasleon.bzh/>

Courants - MARC - Modélisation et Analyse pour la Recherche Cotière. (s. d.). (c) 2016 MARC. Consulté le 21 juin 2022, à l'adresse <https://marc.ifremer.fr/resultats/courants>

IX. Annexes

1. Etat de l'art



Annexes 1 : Graphique de répartition des dates de publication des articles sur le courant longshore en fonction des pays

2. Programmation des courantomètres

-----Deployment Summary-----

1200 kHz Upward ADCP, Firmware Vers. 51.40 in 7.9 Meters Depth

Start Time 02/23/22 00:00:00.00

End Time 04/21/22 21:00:00.00

1390 Total Bursts Collected 1 Every 60.00 Minutes

Each Burst Contains 2400 Samples Collected at 2.0Hz

60 Depth Cells of 0.25 Meters Width, Starting 0.81 Meters beyond the Transducer.

-----Wave Processing Summary-----

Bins Available For Directional Spectrum 1,12,25,26,27

Bins Available For Height Spectrum 1,12,25,26,27

Maximum cutoff Frq. 0.95 Hz, Minimum Included Wave Period 1.05 s.

Height and Directional Spectrum have 64 Freq Bands from 0 to 1.0 Hz

-----Currents-----

50 Pings Were Averaged Every 3600.00 Seconds

Annexes 2: Programmation ADCP Sud

-----Deployment Summary-----

600 kHz Upward ADCP, Firmware Vers. 51.41 in 28.6 Meters Depth
Start Time 02/21/22 00:00:00.00
End Time 04/02/22 21:00:00.00
981 Total Bursts Collected 1 Every 60.00 Minutes
Each Burst Contains 2400 Samples Collected at 2.0Hz
59 Depth Cells of 0.75 Meters Width, Starting 1.86 Meters beyond the Transducer.

-----Wave Processing Summary-----

Bins Available For Directional Spectrum 1,14,28,29,30
Bins Available For Height Spectrum 1,14,28,29,30
Maximum cutoff Frq. 0.95 Hz, Minimum Included Wave Period 1.05 s.
Height and Directional Spectrum have 64 Freq Bands from 0 to 1.0 Hz

-----Currents-----

50 Pings Were Averaged Every 3600.00 Seconds

Annexes 4: Programmation ADCP Nord

-----Deployment Summary-----

600 kHz Upward ADCP, Firmware Vers. 51.41 in 14.9 Meters Depth
Start Time 02/07/22 08:00:00.00
End Time 03/25/22 12:00:00.00
1108 Total Bursts Collected 1 Every 60.00 Minutes
Each Burst Contains 2400 Samples Collected at 2.0Hz
35 Depth Cells of 0.75 Meters Width, Starting 1.86 Meters beyond the Transducer.

-----Wave Processing Summary-----

Bins Available For Directional Spectrum 1,6,12,13,14
Bins Available For Height Spectrum 1,6,12,13,14
Maximum cutoff Frq. 0.95 Hz, Minimum Included Wave Period 1.05 s.
Height and Directional Spectrum have 64 Freq Bands from 0 to 1.0 Hz

-----Currents-----

50 Pings Were Averaged Every 3600.00 Seconds

Annexes 3 : Programmation ADCP Nord-est

Profile interval (s) : 600
Number of cells : 30
Cell size (m) : 0.20
Blanking distance (m) : 0.20
Measurement load (%) : 78
Average interval (s) : 60
Power level : HIGH
Number of wave samples : 1024
Wave interval (s) : 600
Wave sampling rate (Hz) : 2
Wave cell size (m) : 0.50
Compass upd. rate (s) : 600
Coordinate System : XYZ
Speed of sound (m/s) : MEASURED
Salinity (ppt) : 35
Analog input 1 : NONE
Analog input 2 : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping : OFF
TellTale : OFF
Acoustic modem : OFF
Serial output : OFF
Baud rate : 9600

Assumed duration (days) : 5.0
Battery utilization (%) : 60.0
Battery level (V) : 11.7
Recorder size (MB) : 3773
Recorder free space (MB) : 3748.723
Memory required (MB) : 17.1
Vertical vel. prec (cm/s) : 0.7
Horizon. vel. prec (cm/s) : 2.3

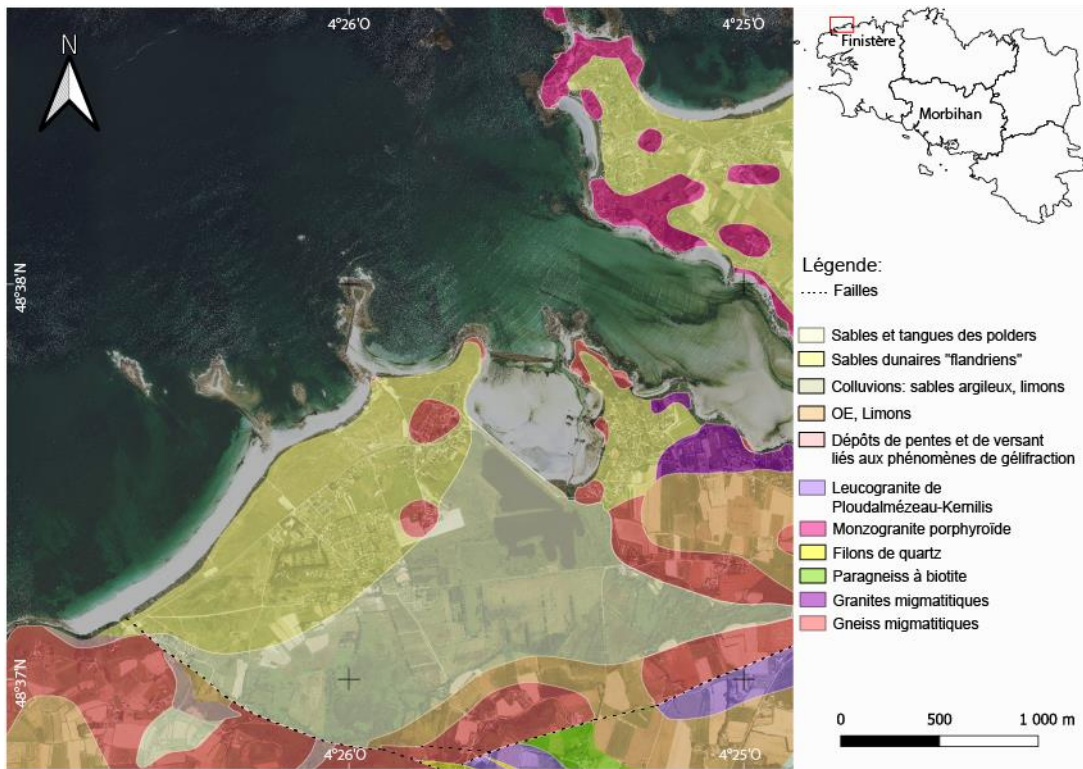
Profile interval (s) : 600
Number of cells : 25
Cell size (m) : 0.25
Blanking distance (m) : 0.40
Measurement load (%) : 88
Average interval (s) : 60
Power level : LOW+
Number of wave samples : 1024
Wave interval (s) : 3600
Wave sampling rate (Hz) : 1
Wave cell size (m) : 1.00
Compass upd. rate (s) : 600
Coordinate System : XYZ
Speed of sound (m/s) : MEASURED
Salinity (ppt) : 35
Analog input 1 : NONE
Analog input 2 : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping : OFF
TellTale : OFF
Acoustic modem : OFF
Serial output : OFF
Baud rate : 9600

Assumed duration (days) : 30.0
Battery utilization (%) : 80.0
Battery level (V) : 13.4
Recorder size (MB) : 3773
Recorder free space (MB) : 3771.363
Memory required (MB) : 18.0
Vertical vel. prec (cm/s) : 2.0
Horizon. vel. prec (cm/s) : 5.9

Profile interval (s) : 600
Number of cells : 25
Cell size (m) : 0.25
Blanking distance (m) : 0.40
Measurement load (%) : 88
Average interval (s) : 60
Power level : LOW+
Number of wave samples : 1024
Wave interval (s) : 3600
Wave sampling rate (Hz) : 1
Wave cell size (m) : 2.00
Compass upd. rate (s) : 600
Coordinate System : XYZ
Speed of sound (m/s) : MEASURED
Salinity (ppt) : 35
Analog input 1 : NONE
Analog input 2 : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping : OFF
TellTale : OFF
Acoustic modem : OFF
Serial output : OFF
Baud rate : 9600

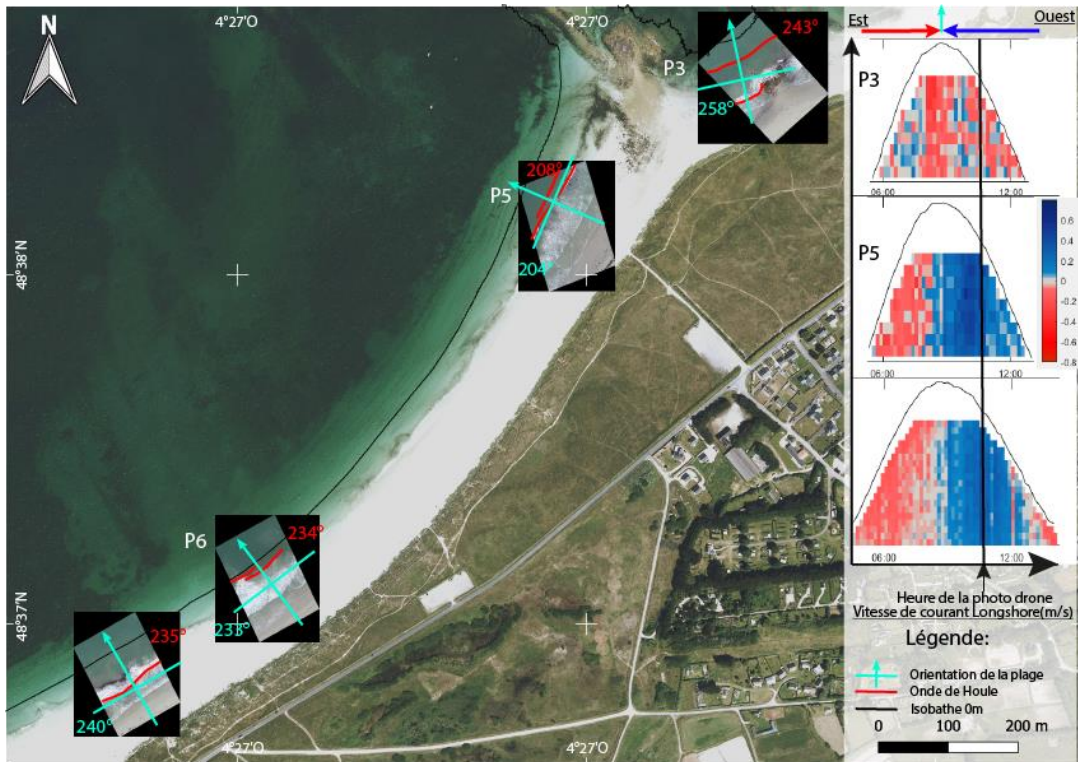
Assumed duration (days) : 30.0
Battery utilization (%) : 28.0
Battery level (V) : 13.1
Recorder size (MB) : 3773
Recorder free space (MB) : 3770.719
Memory required (MB) : 18.0
Vertical vel. prec (cm/s) : 2.0
Horizon. vel. prec (cm/s) : 5.9

3. Présentation du site

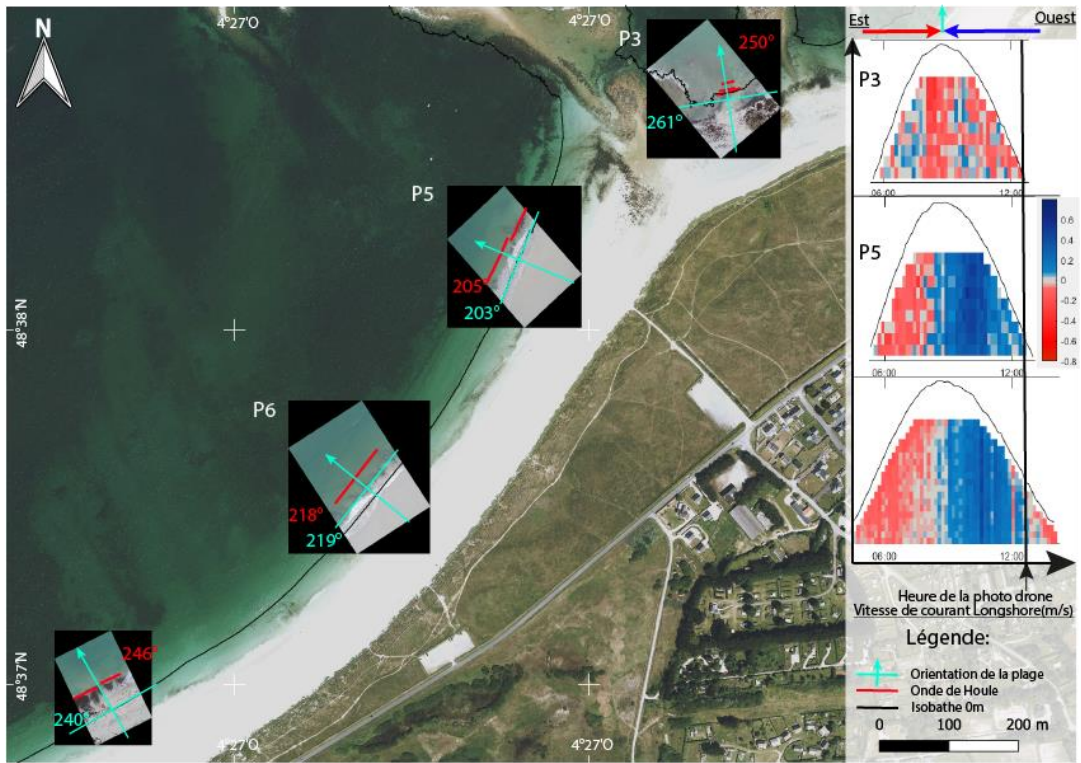


Annexes 8 : Carte géologique de la plage du Vougot

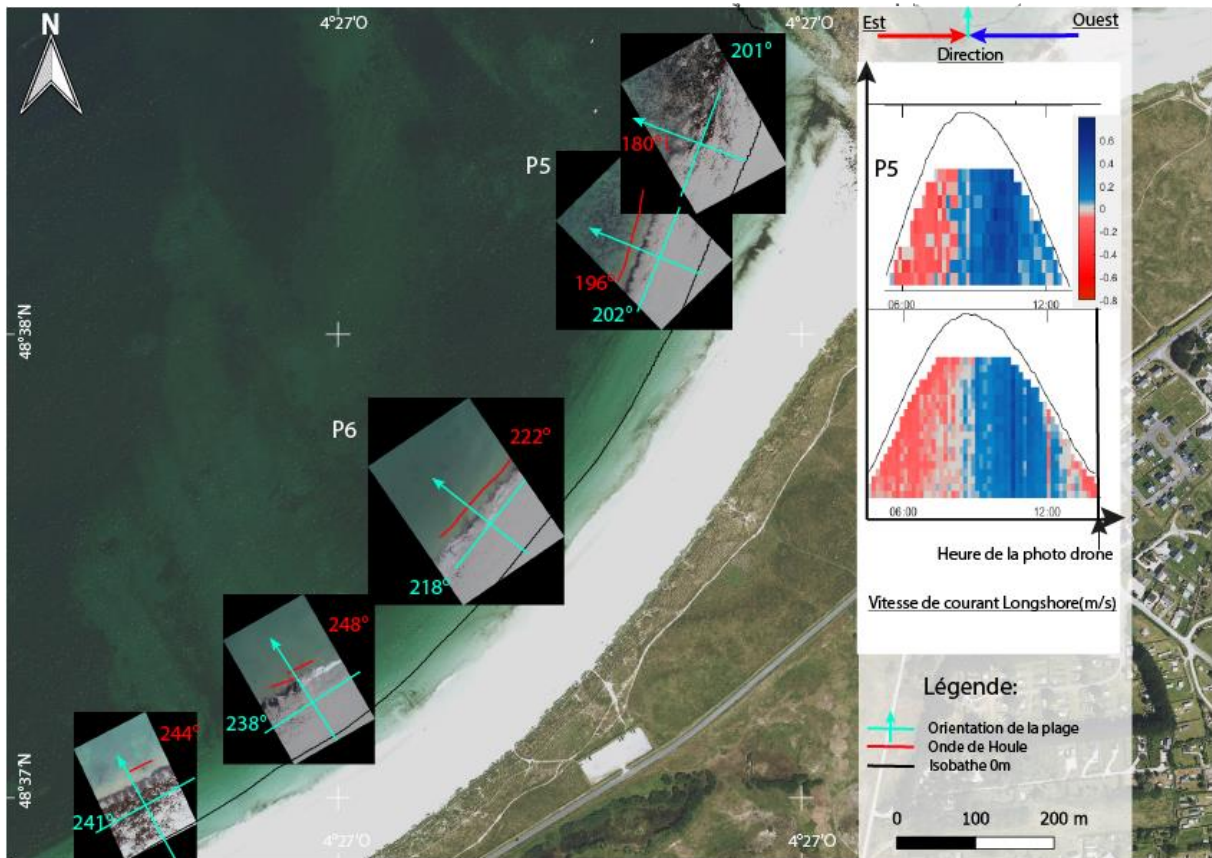
4. Vols drone



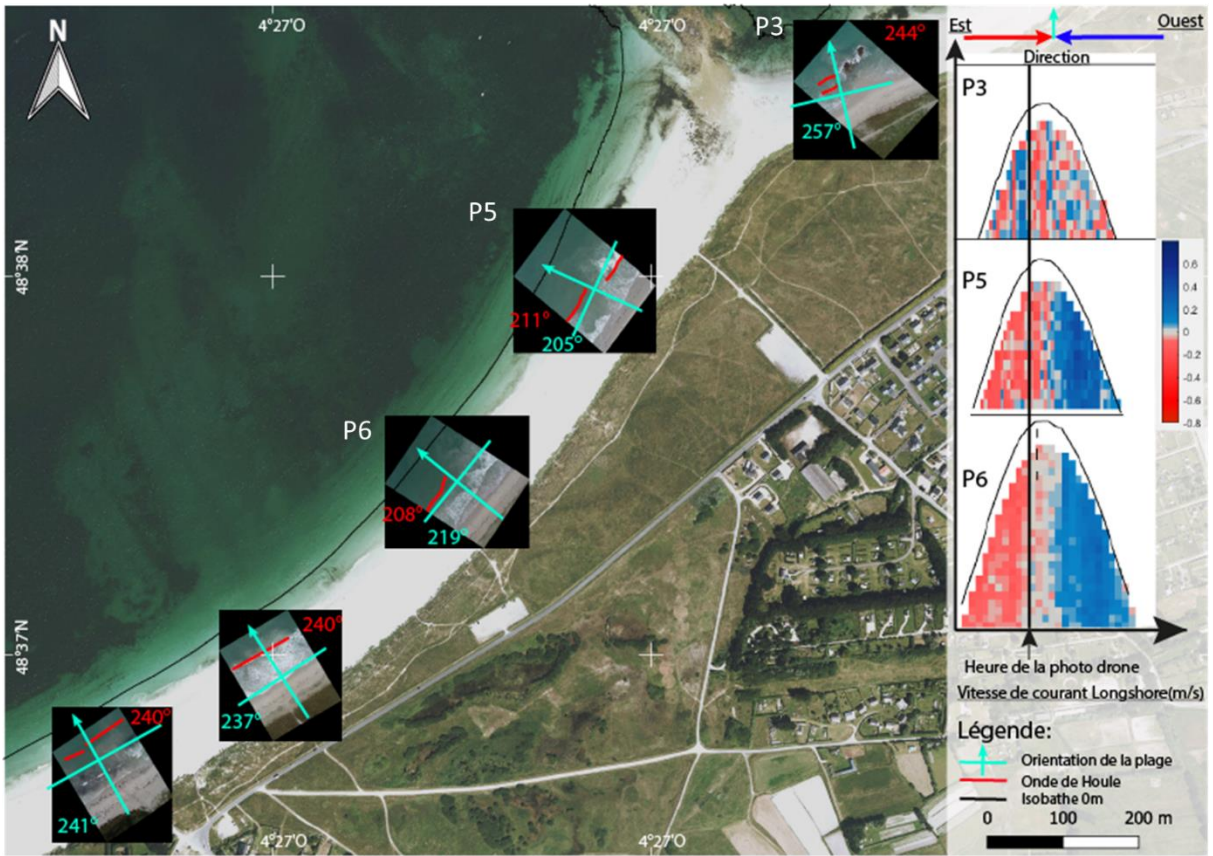
Annexes 9: vols drone : 23/02/2022 (marée haute)



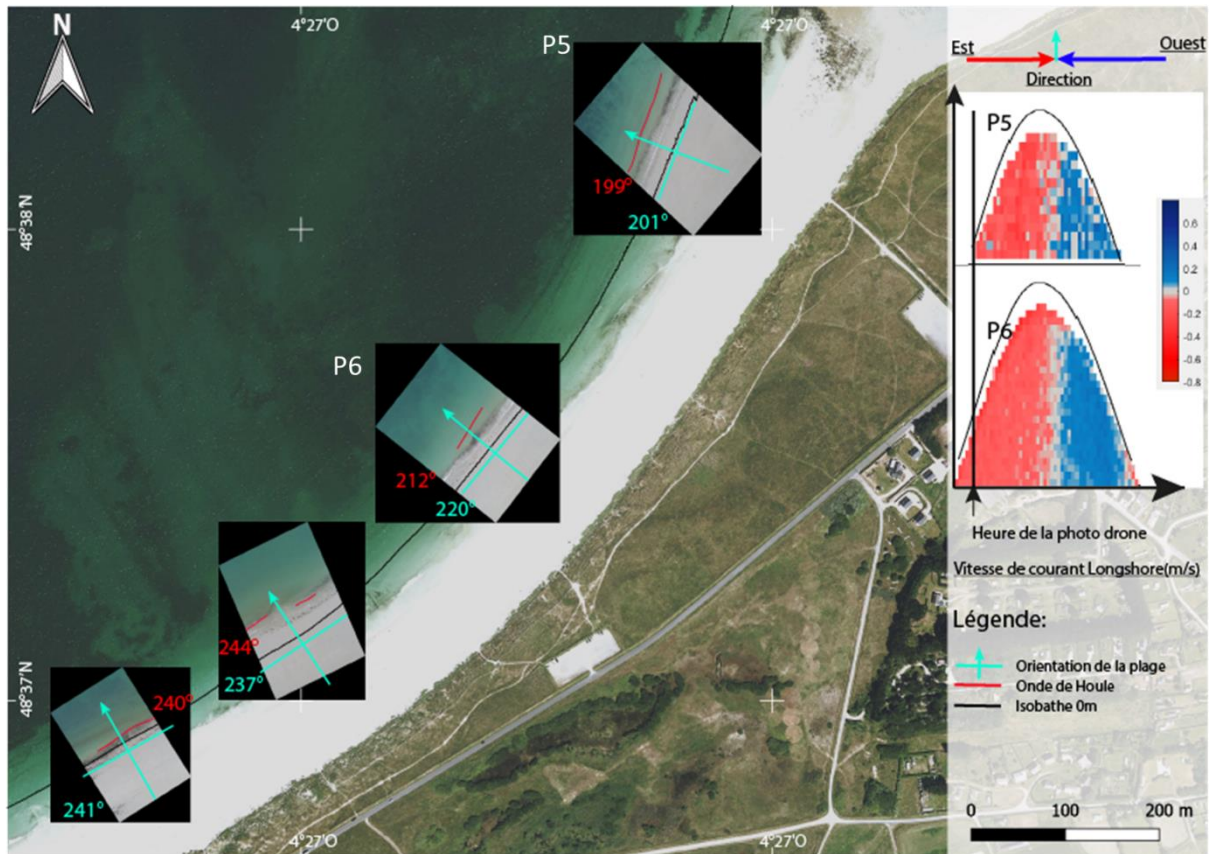
Annexes 10: Vols drone : 23/02/2022 (fin de marée descendante)



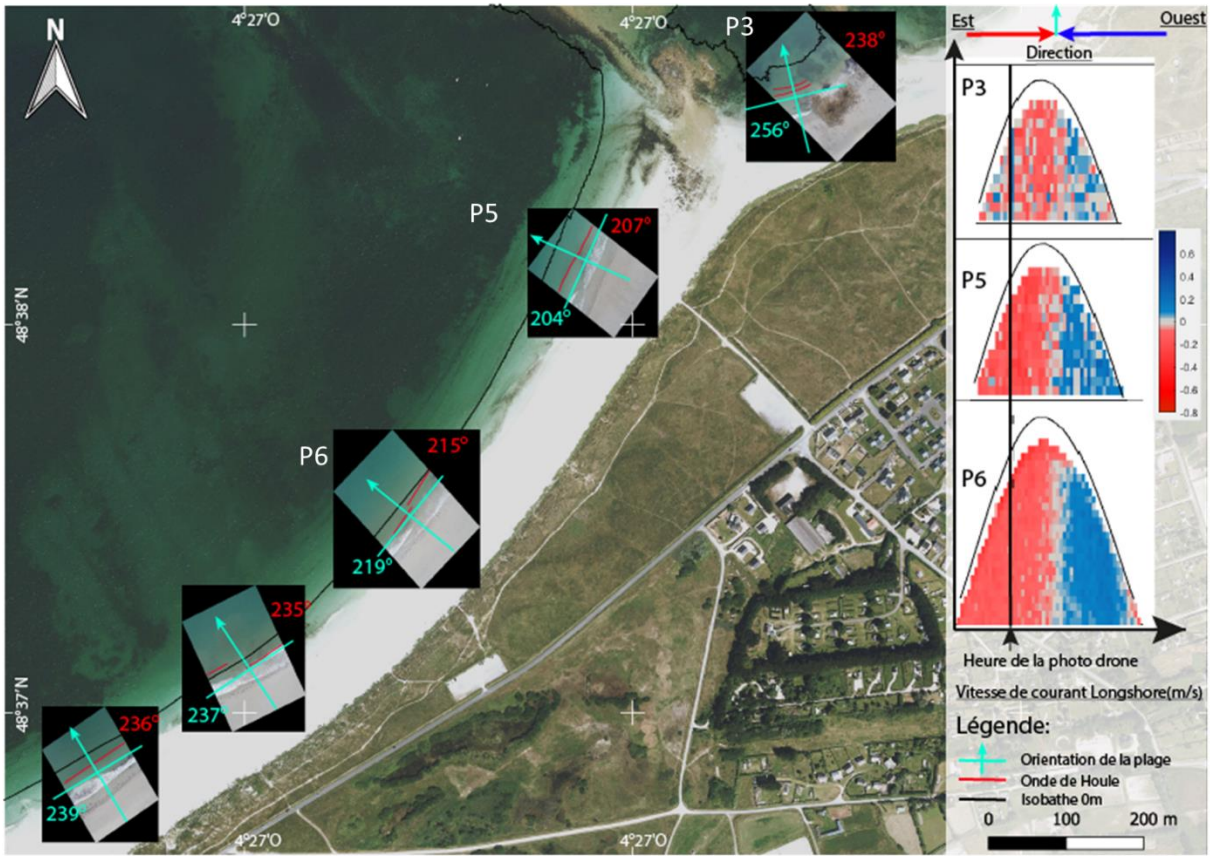
Annexes 11 : vols drone : 23/02/2022 (marée basse)



Annexes 12 : vols drone : 01/03/2022 (marée haute)

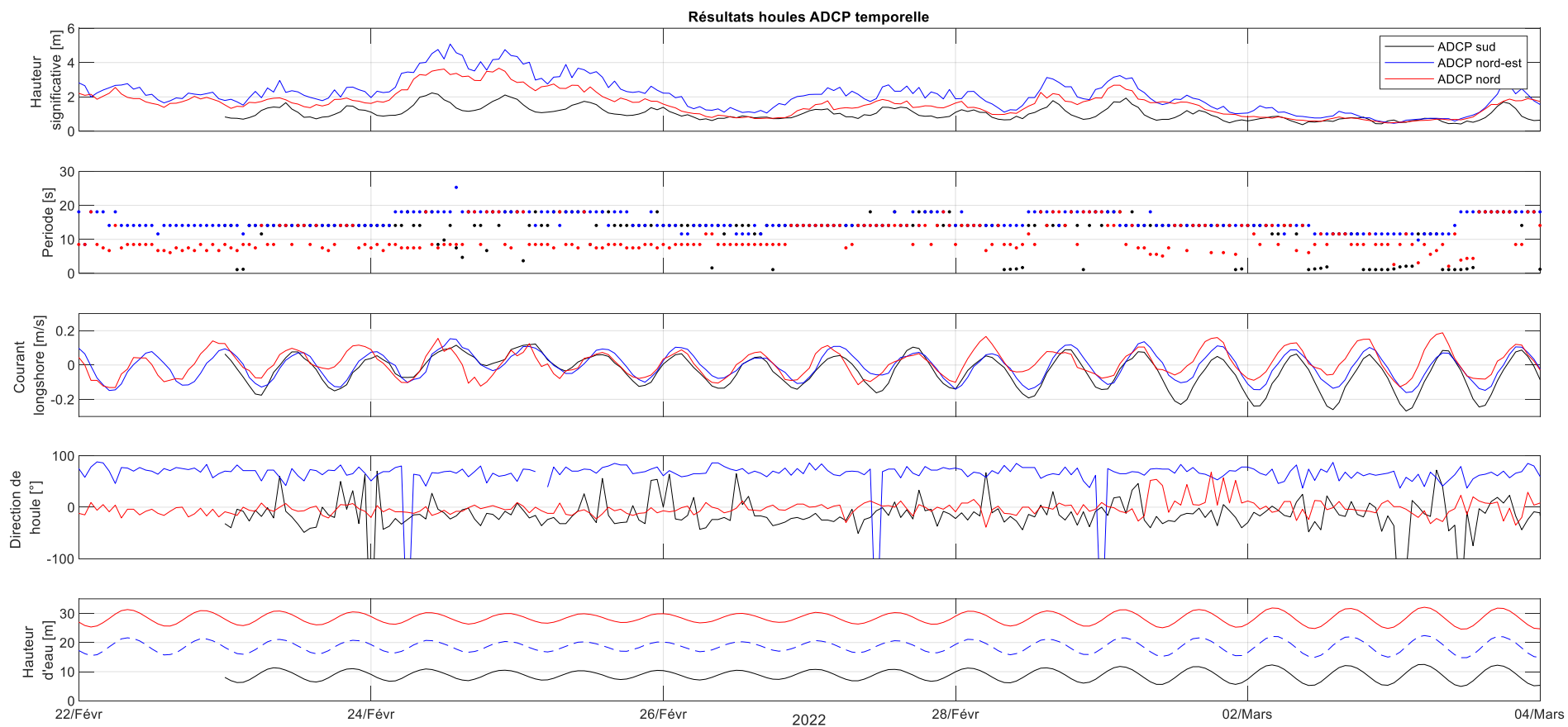


Annexes 13 : vols drone : 03/02/2022 (marée montante)

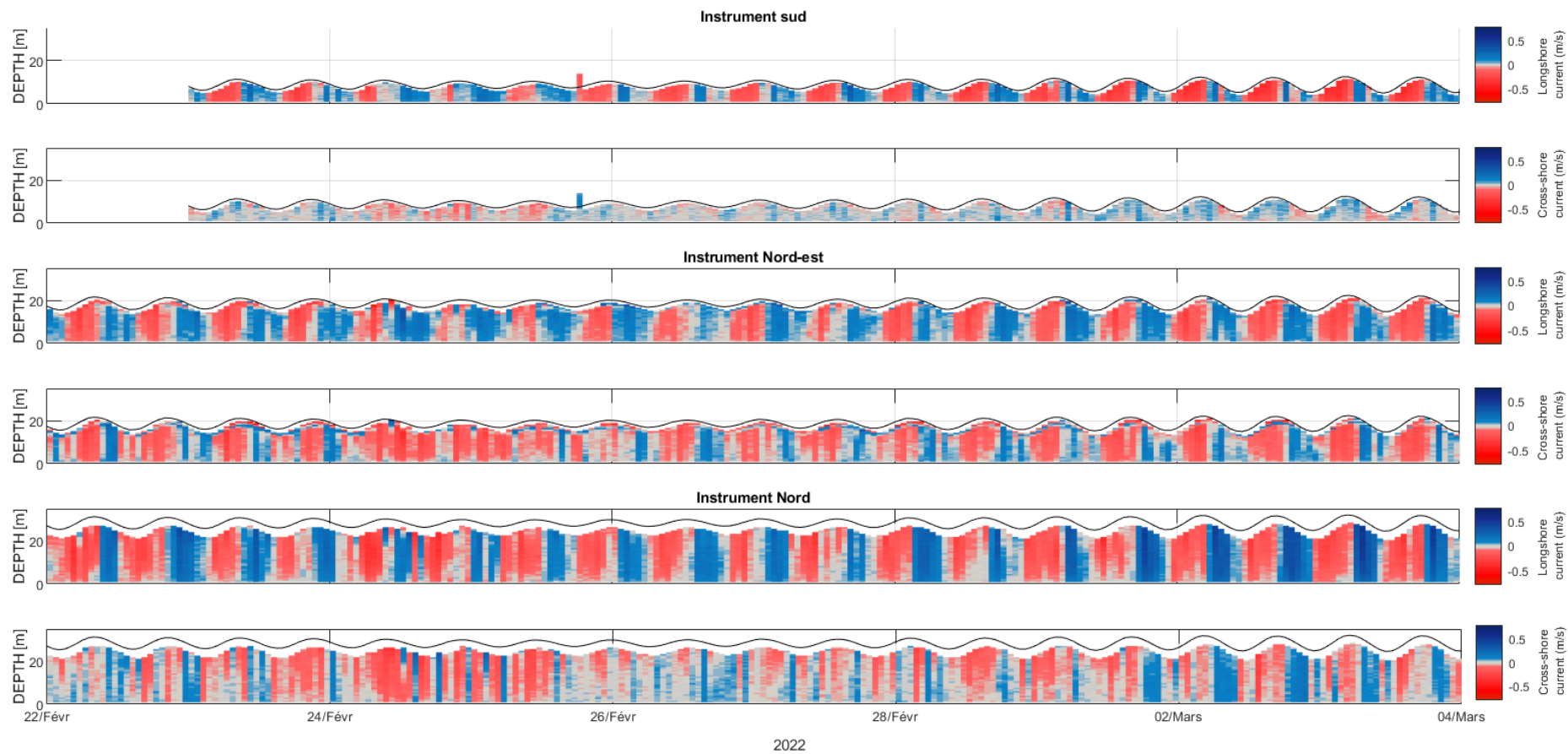


Annexes 14 : vols drone : 02/03/2022 (fin de marée montante)

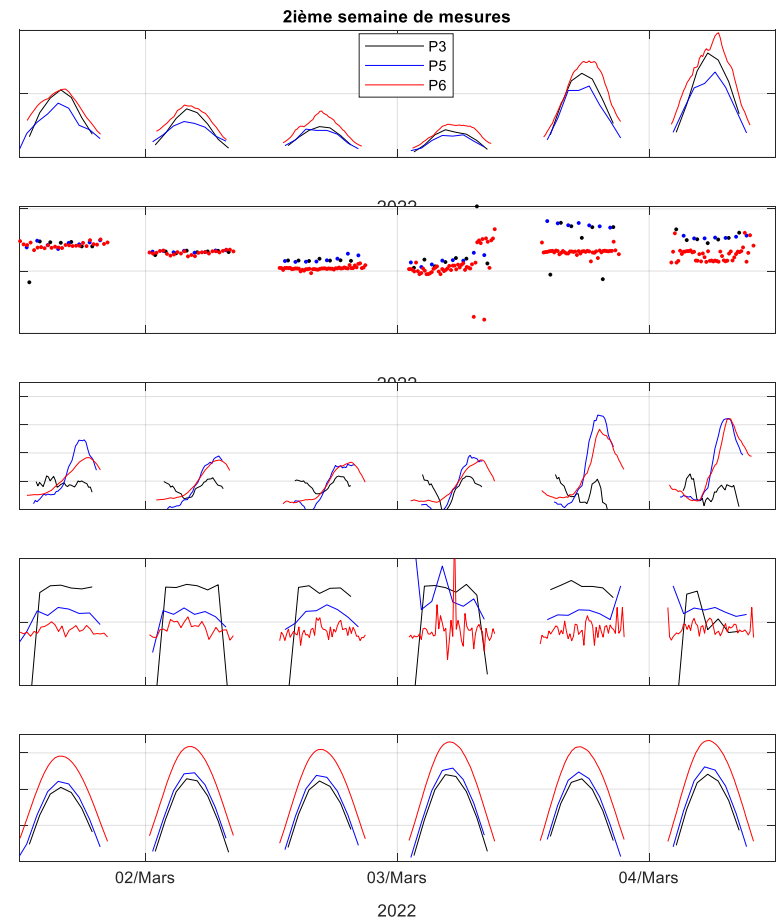
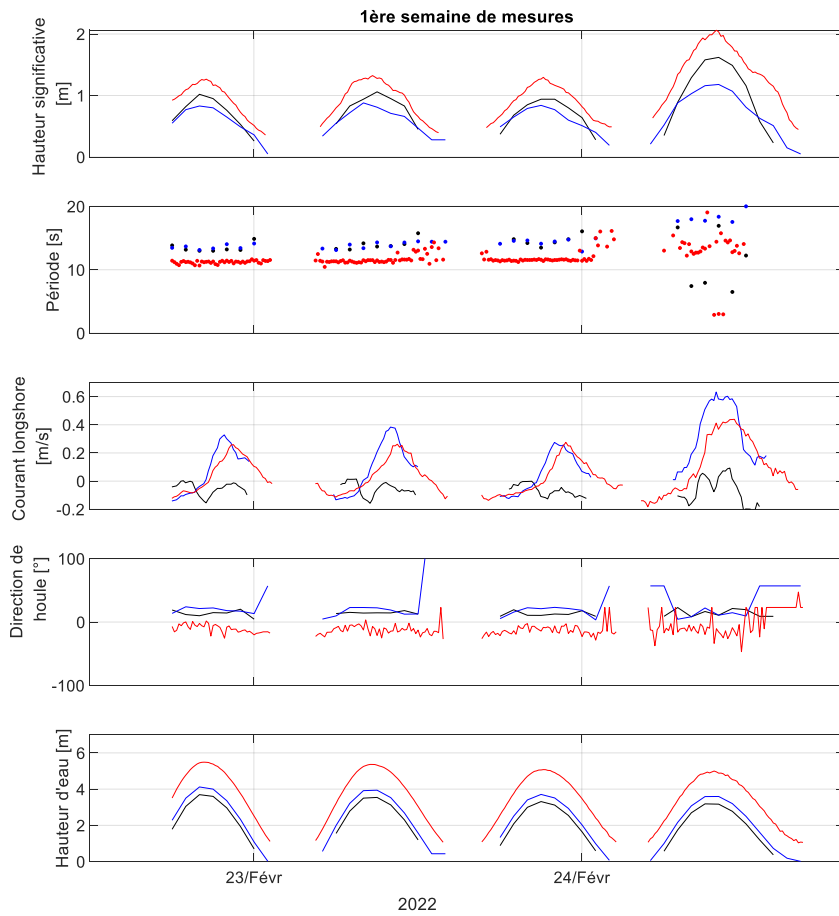
5. Hydrodynamisme au large



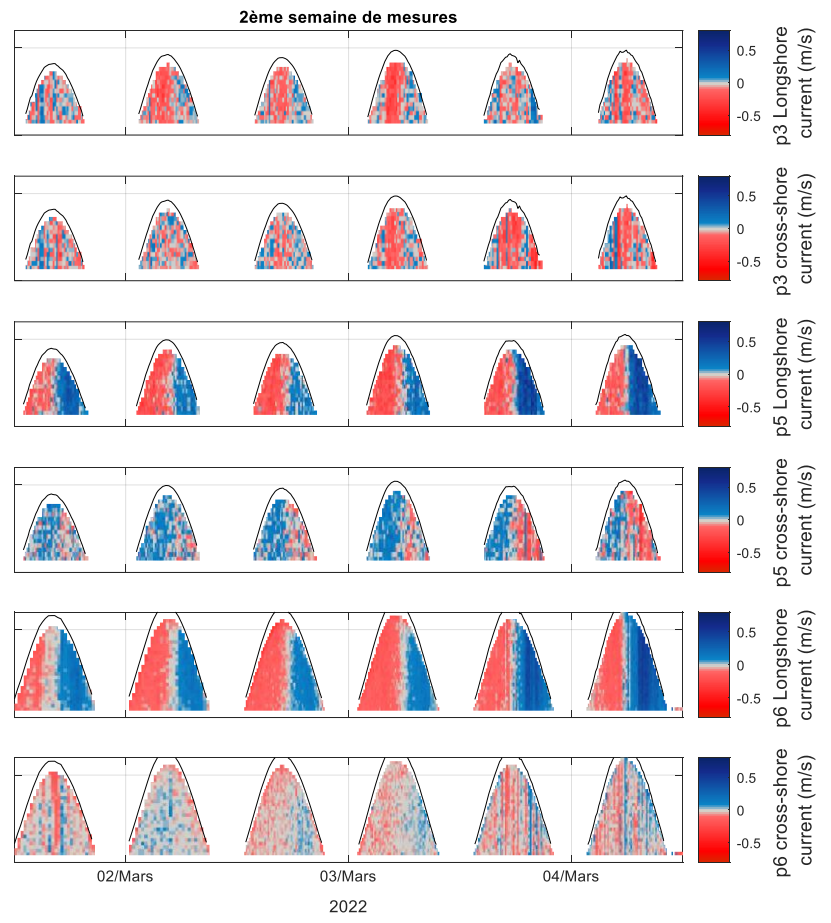
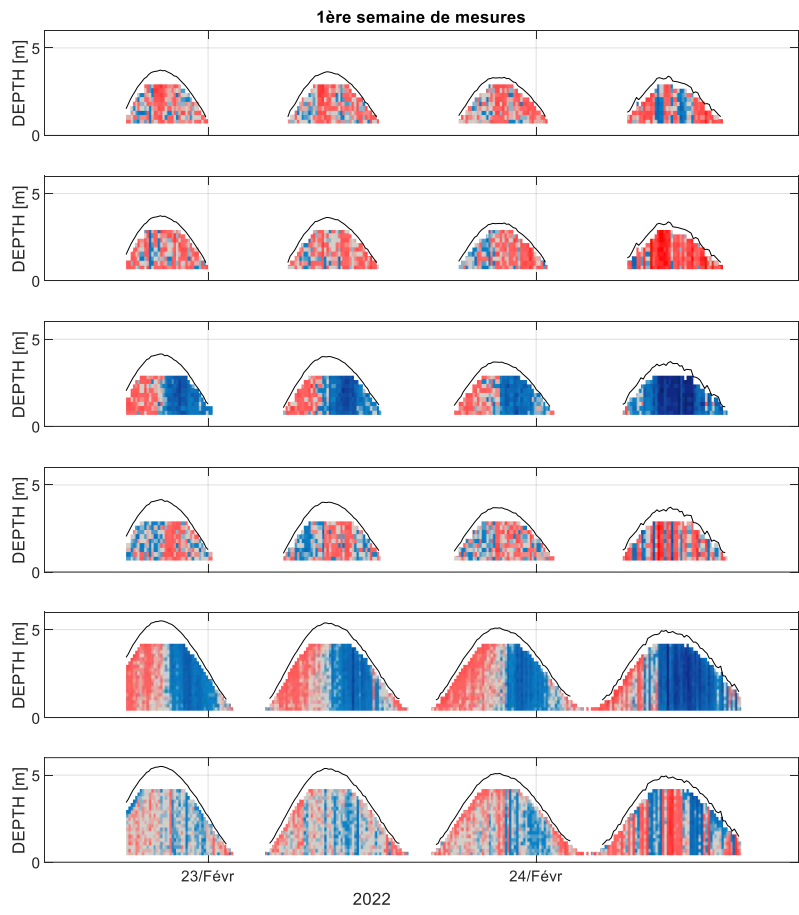
Annexes 15 : Résultats des houles ADCP en temporel



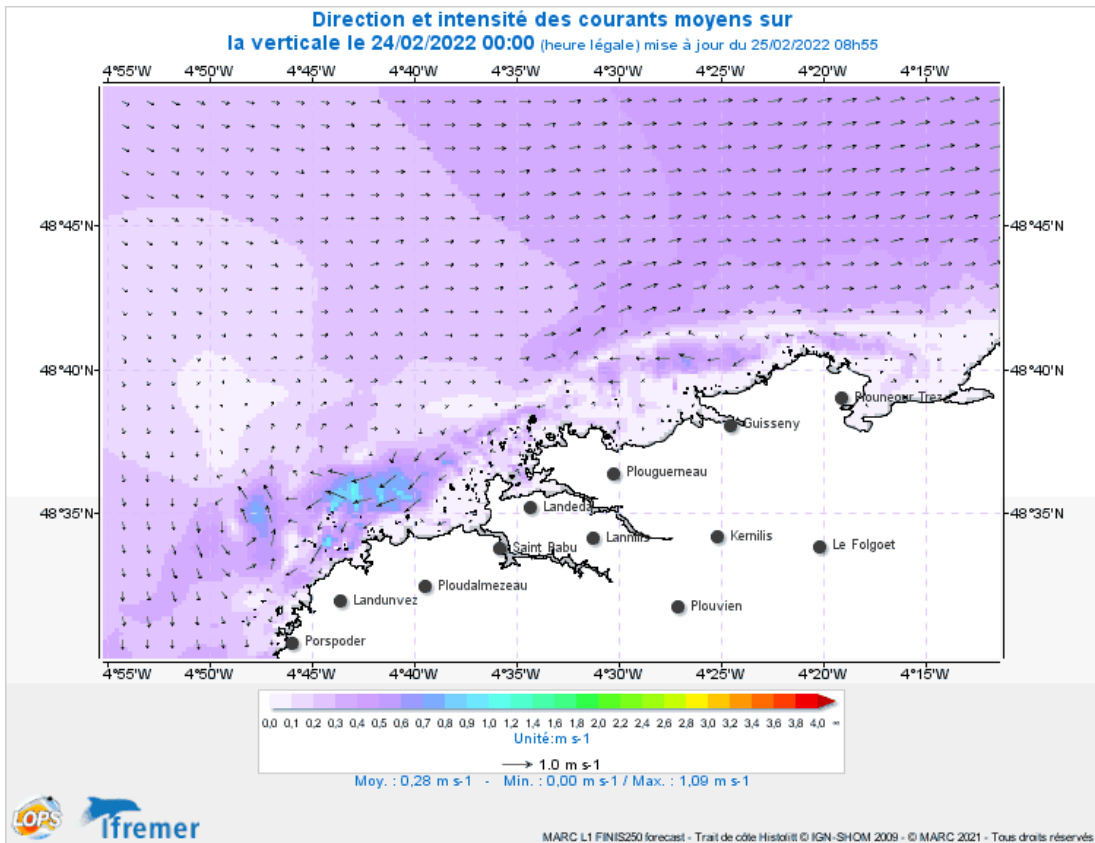
Annexes 16 : Résultats des courants ADCP en temporel



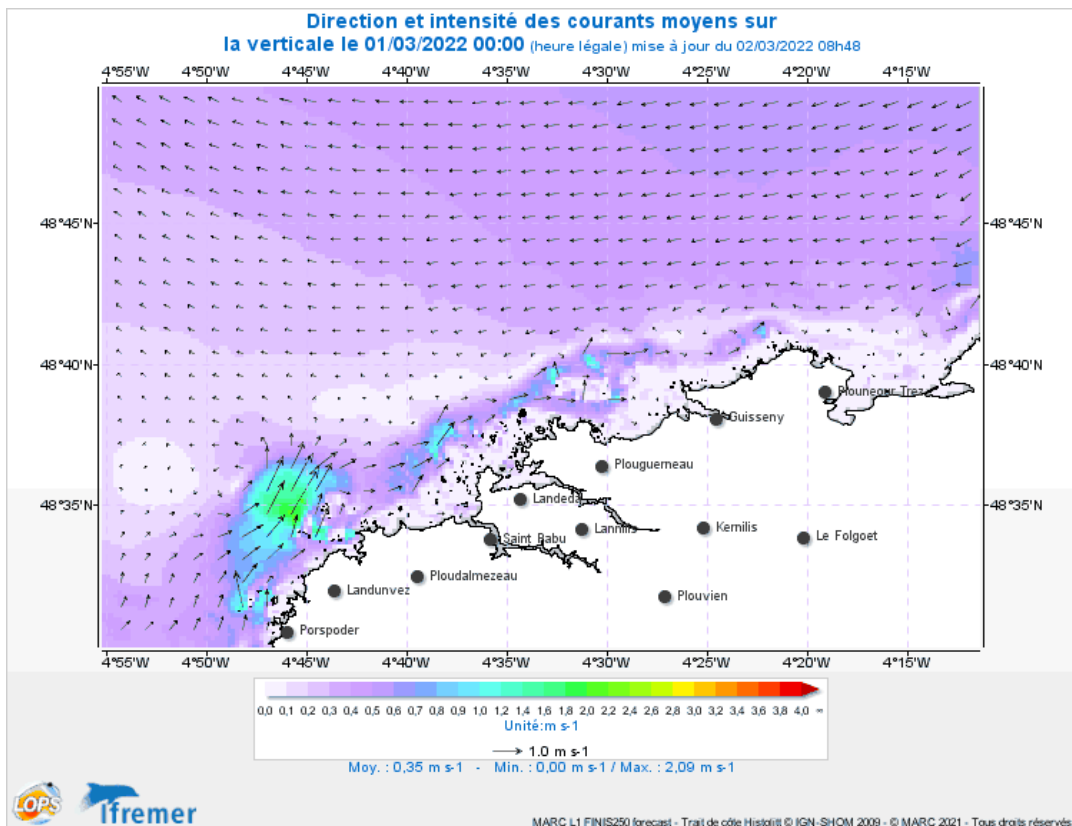
Annexes 17 : Résultats des houles Aquapro en temporel



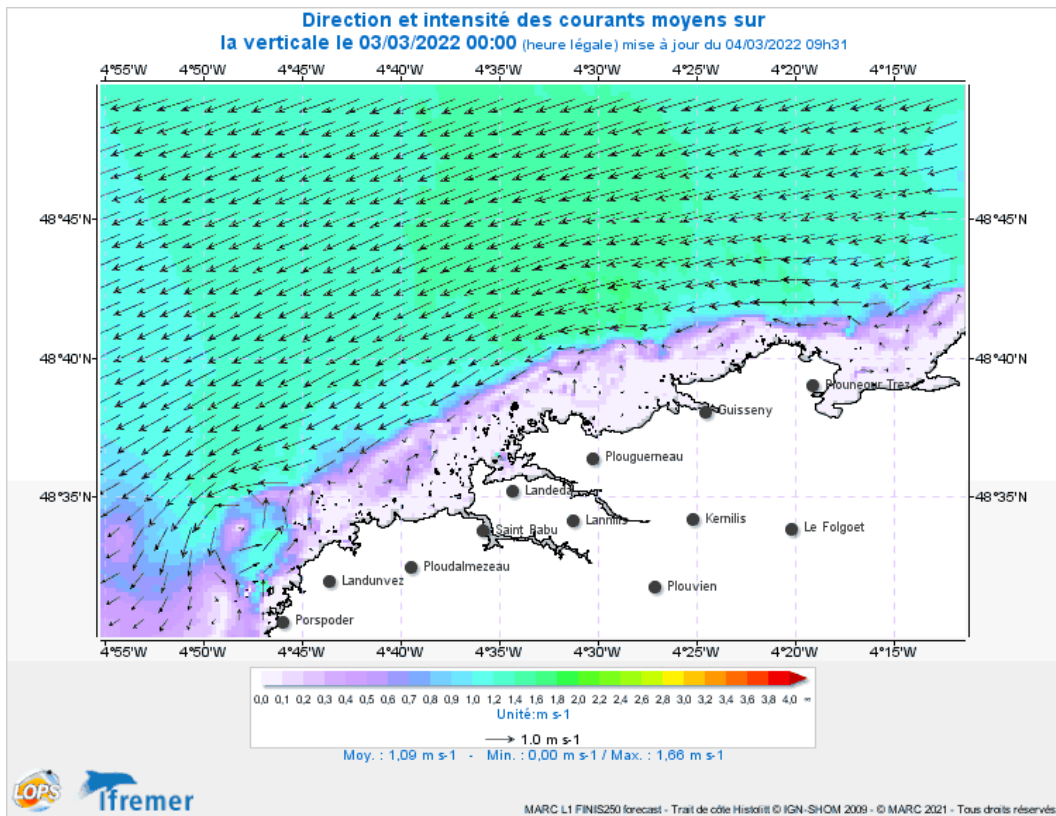
Annexes 18 : Résultats des courants Aquapro en temporel



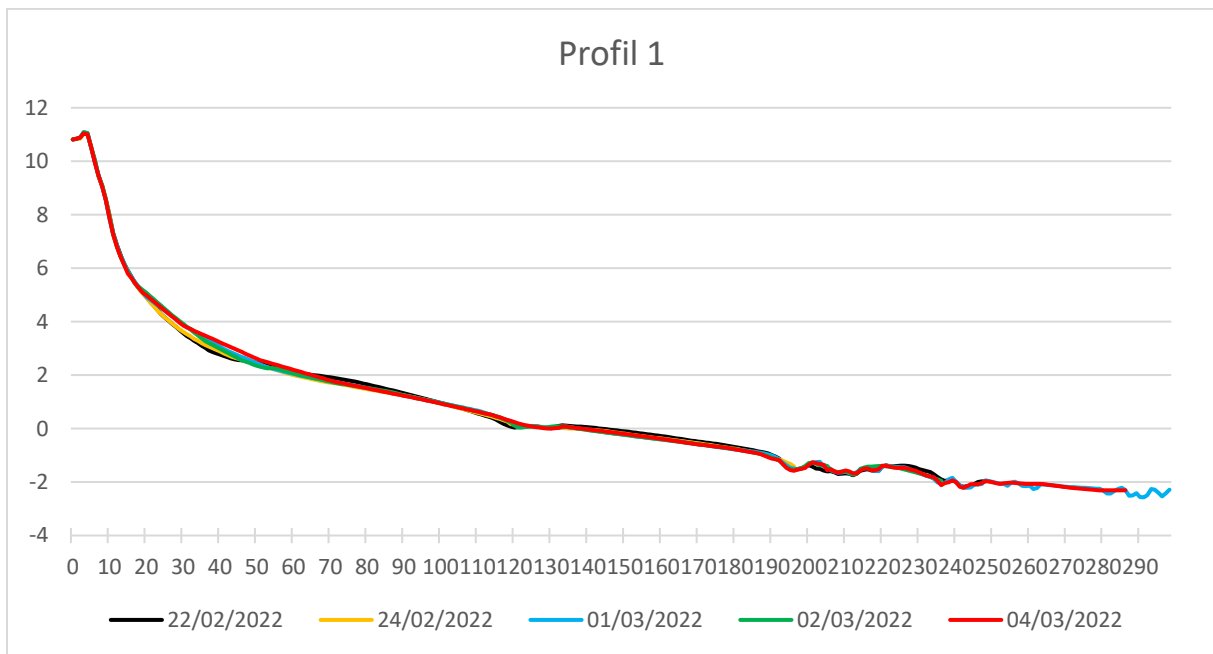
Annexes 19: Courant de marée au large 24 février

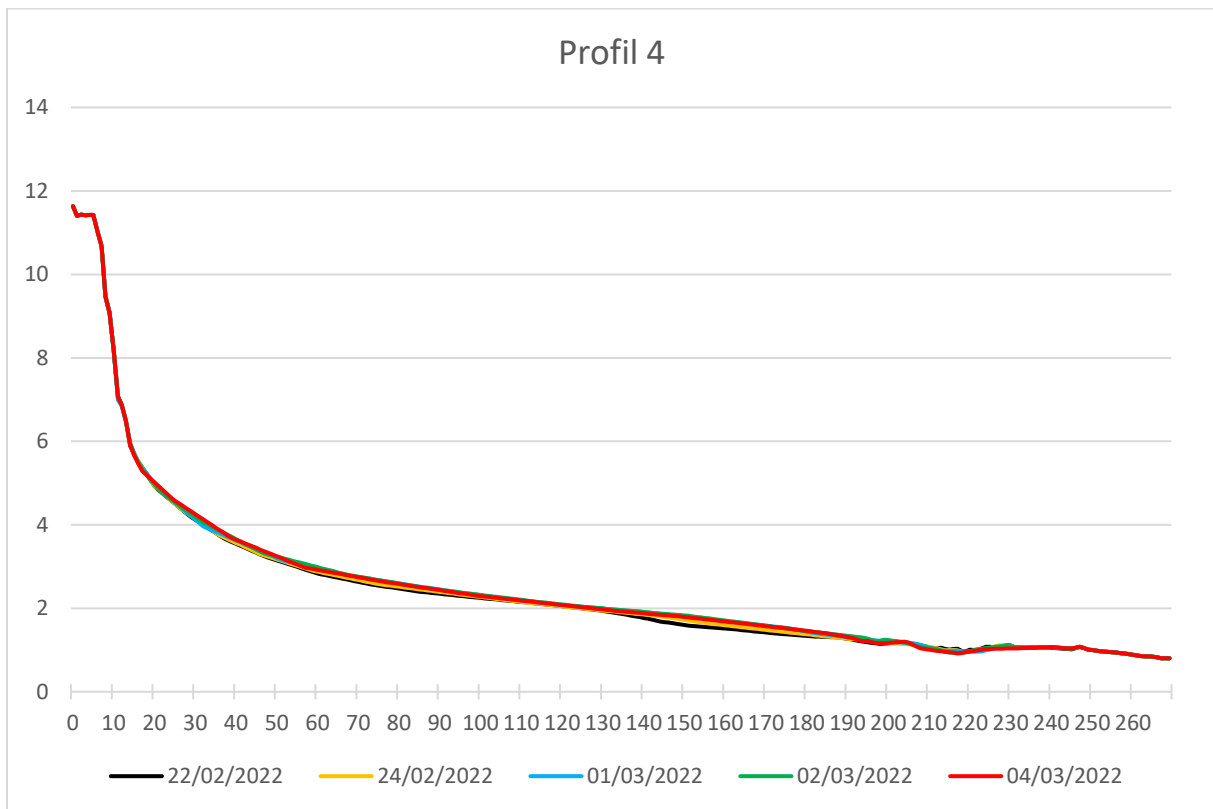
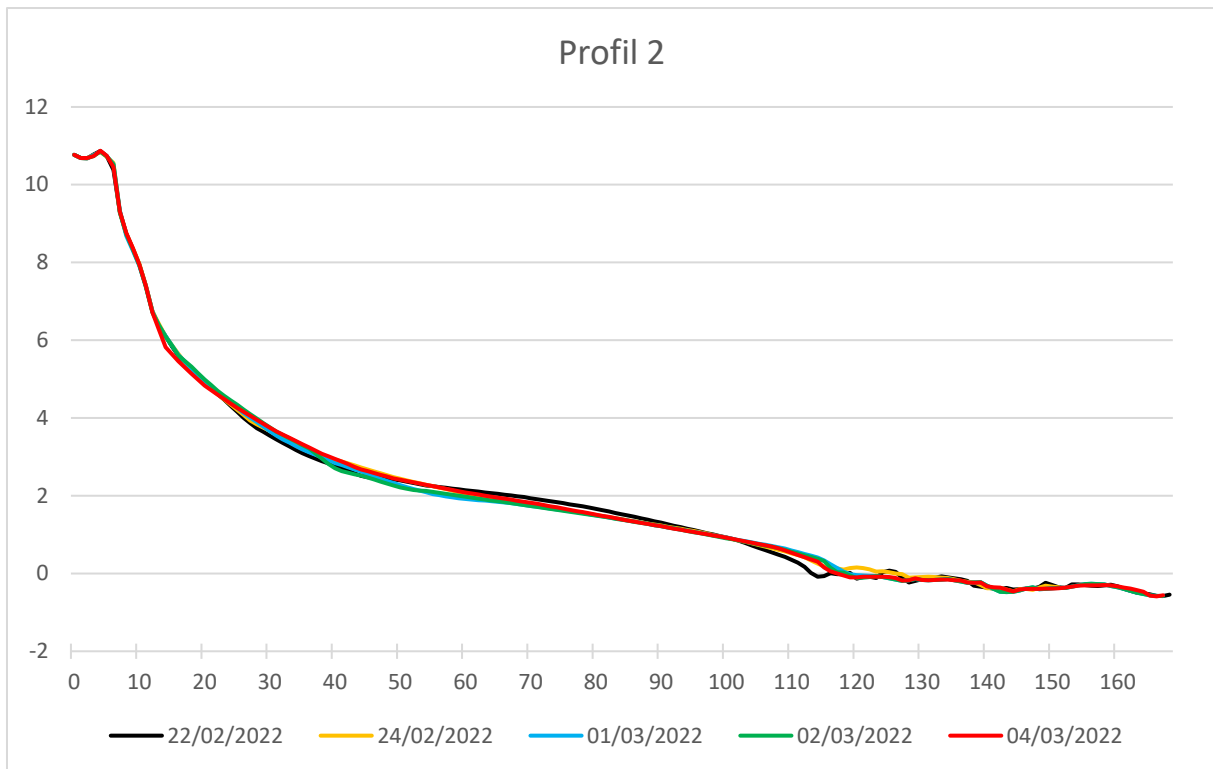


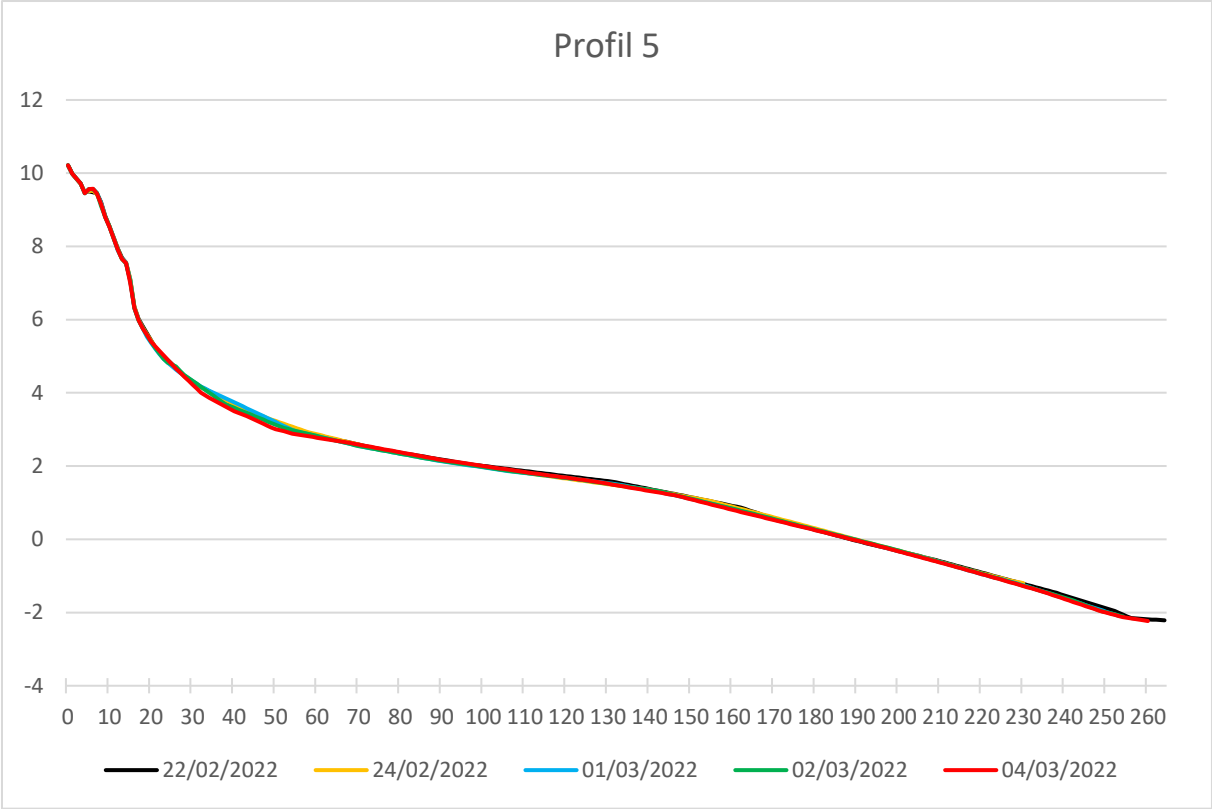
Annexes 20 : Courant de marée au large 01 mars



Annexes 21 : Courant de marée au large 03 mars







Annexes 22: Résultats des profils