

PDG/REM/RDT/LHYMAR

BOTHOREL Pierre • TRÄSCH Martin • PERIER Vincent • RÉPÉCAUD Michel

Date : 06.10.2023

INTER-COMPARAISON D'ÉQUIPEMENTS DE MESURE DE LA HOULE

Ifremer - Plouzané



Fiche documentaire

Titre du rapport : Inter-comparaison d'équipements de mesure de la houle - Ifremer - Plouzané	
Référence interne : REM/RDT/LHYMAR 23-53 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (internet) - date de levée d'embargo : <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) - date de levée de confidentialité :	Date de publication : 06.10.2023 Version : 2.0.1 Référence de l'illustration de couverture : MATOUG Camil/Mole de Ste Anne du Portzic pendant la tempête Claudio/4 novembre 2022 Langue(s) : Français
Résumé / Abstract : L'Ifremer opère le site d'essais en mer de Sainte-Anne du Portzic. Cette zone côtière est utilisée pour tester des structures et des capteurs qui doivent être déployées en mer, ainsi que des prototypes d'énergie marine renouvelable, comme des systèmes houlomoteurs ou des éoliennes flottantes. Il y a donc un besoin de pouvoir caractériser avec précision des vagues rencontrées sur le site. Pour déterminer quel instrument utilisé, une campagne de mesure de houle a été réalisée entre octobre et avril 2023 en utilisant des bouées houlographes Spotter et Datawell, des capteurs de pression RBR et un ADCP Nortek Signature. L'objectif de ce stage est de traiter les données obtenues et de réaliser une inter-comparaison des résultats pour déterminer les caractéristiques relatives des différents instruments de mesure de houle.	
Mots clés / Key words : inter-comparaison, mesure de houle, bouée, capteur de pression, ADCP, analyse spectrale	
Comment citer ce document : Bothorel Pierre, Träsch Martin, Perier Vincent, Répécaud Michel (2023). Inter-comparaison d'équipements de mesure de houle. IFREMER REM/RDT/LHYMAR/23-053.	
Disponibilité des données de recherche :	
DOI :	

Commanditaire du rapport :	
Nom / référence du contrat : REM/RDT/LHYMAR 23-53 <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit :	
Auteur(s) / Adresse mail BOTHOREL Pierre / pierre.bothorel@centrale-marseille.fr TRÄSCH Martin / mtrasch@ifremer.fr	Affiliation PDG/REM/RDT/LHYMAR PDG/REM/RDT/LHYMAR
Encadrement(s) : Träsch Martin	
Destinataire : IFREMER RDT. Michel Outré, Marc Pezerat (SHOM)	
Validé par : Maisondieu Christophe	

Table des matières

1	Introduction	5
2	Présentation de la campagne	6
2.1	Présentation du matériel de mesure	6
2.1.1	Datawell Waverider Mk-III	6
2.1.2	Sofar Ocean Spotter	7
2.1.3	RBRsolo3 D	7
2.1.4	ADCP Nortek Signature1000	8
2.2	Déploiement	10
2.2.1	Présentation du site	10
2.2.2	Dates et positions des déploiements	11
2.2.3	Mouillage	12
3	Paramètres d'étude et méthodes de calcul	14
3.1	Paramètres vague-à-vague	15
3.2	Paramètres spectraux omnidirectionnels	16
3.3	Paramètres spectraux directionnels	17
3.4	Analyse statistique	18
3.5	Filtrage des données	18
4	Résultats	19
4.1	Observation des états de mer durant la campagne	19
4.2	Impact de la marée	20
4.3	Comparaison Spotter/Datawell	21
4.4	Comparaison avec les RBR	25
4.5	Comparaison avec l'ADCP	28
4.6	Comparaison Spotter	30
4.7	Analyse du spectre	33
5	Conclusion et perspectives	36
	Références	37

1 Introduction

Ce rapport présente l'analyse des résultats issus de la campagne d'inter-comparaison des équipements de mesure de houle menée par l'Ifremer et effectuée sur le site d'essai de Sainte-Anne du Portzic à Plouzané, dans le goulet de Brest (TRÄSCH et al. 2022). Cette campagne, réalisée entre octobre 2022 et avril 2023 en partenariat avec le SHOM et Nortek, a pour objectif de caractériser et comparer les performances de différents types d'instruments de mesure de vagues.

Les capteurs étudiés sont deux bouées Sofar Ocean Spotter, une bouée Datawell Waverider Mk-III, trois capteurs de pression RBRsolo ainsi qu'un ADCP Nortek Signature1000. Les bouées sont des instruments de mesure de houle qui se situent à la surface de l'eau et mesurent le mouvement de la surface en l'assimilant à leur propre déplacement. Les capteurs de pression et l'ADCP sont des instruments de mesure Eulérien situés sous la surface. D'un point de vue pratique, ils ont été déployés fixés à une cage instrumentée posée au fond de l'eau. Ces capteurs diffèrent, entre autres, par leur méthode de mesure, leur taille, leur prix et leur moyen de déploiement. Cependant, ils peuvent tous être utilisés pour extraire les mêmes paramètres de vagues. Il est donc important de comparer ces capteurs pour attester de leur précision relative, mais également de déterminer leur gamme de fonctionnement. En effet, certains instruments sont bien plus simples à déployer et coûtent moins cher. Même s'ils sont moins précis, leur utilisation peut tout de même se révéler avantageuse dans certains contextes.

À la fin de la campagne, les données brutes de chacun des capteurs ont été extraites. Par la suite, un programme python a été développé pour traiter ces données, filtrer les mesures aberrantes et calculer les paramètres de vagues d'intérêt. Ce sont les résultats obtenus à l'aide de ce code qui seront comparés.

Des campagnes d'inter-comparaison d'instruments de mesure de houle ont déjà été réalisées (KERGADALLAN et al. 2022), (HERBERS et al. 2012). La bouée Spotter étant relativement récente, elle a été étudiée pour attester de son efficacité. Des études précédentes montrent qu'il peut s'agir d'une bonne alternative à des dispositifs plus onéreux, avec un écart de hauteur de vagues d'environ 10% et de 6° de direction moyenne par rapport à la bouée Datawell, avec une bonne correspondance des spectres (RAGHUKUMAR et al. 2019). Ces bouées ont également été comparées avec des capteurs de pression (ANDREWS et al. 2019), (LANCASTER et al. 2021). Ces capteurs mesurent correctement les vagues, mais avec une précision plutôt faible, en particulier pour les périodes de vague.

Un intérêt important de cette étude est le contexte de la campagne. Le site de Sainte-Anne du Portzic est un site de mesure particulier. En effet, il possède un fort marnage, une faible profondeur et des courants de marée importants. Ces conditions ne sont pas idéales pour la mesure des vagues, en particulier pour les bouées. De plus, le temps de mesure est relativement long (6 mois) et permet de comparer des données mesurées par les capteurs sur des états de mer très variés.

Ce rapport présente tout d'abord en détail les différents équipements de mesure de houle. Leurs caractéristiques techniques, leur configuration et leur méthode de mesures sont introduites. Les déploiements sont également décrits. Puis, le programme python et les méthodes de calculs utilisés pour traiter les données brutes sont explicités. Dans un second temps, les résultats obtenus par les différents capteurs sont étudiés et comparés. Enfin, les différences de mesures sont interprétées et mises en relation avec les méthodes de mesure des capteurs.

2 Présentation de la campagne

2.1 Présentation du matériel de mesure

Durant la campagne de mesure, différents capteurs de mesure de houles ont été utilisés. Chacun de ses capteurs mesure les vagues de façon différente. Avant de traiter leurs données et d'interpréter leurs résultats, il est important de comprendre comment ces données sont obtenues et que représentent-elles. Ces capteurs vont donc être introduits en détail par la suite.

2.1.1 Datawell Waverider Mk-III

La bouée Datawell Waverider Mk-III est une bouée de mesure houlographique de référence en océanographie. La bouée utilisée pour cette campagne a été fournie par le SHOM. Elle mesure les vagues en utilisant un accéléromètre. A partir de ses données d'accélération en trois dimensions au cours du temps et à l'aide d'un compas et d'un inclinomètre, la Datawell retrouve son déplacement selon les axes Nord, Est et l'altitude (HERBERS et al. 2012). Elle peut mesurer des élévations de surface allant jusqu'à $\pm 20\text{m}$ avec une résolution de 1cm. Elle détecte les périodes de vague entre 1s et 24s. Son compas lui permet également d'indiquer la direction des vagues par rapport au Nord magnétique avec une résolution de 1.5°. La bouée renvoie, entre autres, un fichier de données brutes contenant les déplacements selon les axes x,y,z en cm à une fréquence de 1.28Hz sur une période de 30 minutes, ainsi que la date et l'heure de la séquence (**Datawell_File_Format**). Dans la configuration utilisée ici, la bouée Datawell mesurait les vagues en continu. La Datawell peut également mesurer la température de l'eau et possède une balise GPS permettant de suivre son déplacement durant son déploiement. La bouée peut réaliser un traitement interne et en ressortir les paramètres statistiques de vagues. Ces données peuvent ensuite être transmises par radio haute fréquence à la fin de chaque séquence de 30 minutes pour obtenir un suivi en temps réel des conditions de mer du site de déploiement. Elle possède également une carte SD pouvant contenir 2GB de données, soit l'équivalent d'environ 80 mois de mesure. Alors que la transmission haute fréquence ne renvoie que des paramètres de vagues traitées par la bouée, la carte SD contient les données brutes de déplacements ainsi que les spectres calculés pour l'ensemble du déploiement (DATAWELL 2006). C'est ce fichier de déplacement brut .raw qui sera traité par le programme python. Cette bouée mesure 70cm de diamètre pour 90kg. Elle est équipée d'un set de batterie qui lui offre une autonomie théorique de 16 mois. La taille et le poids de cette bouée, essentiellement dû à la centrale inertielle, impliquent des difficultés pour son déploiement. De plus, la batterie nécessite d'être changée régulièrement. Celle-ci peut être changée durant le déploiement, mais nécessite par conséquent une intervention régulière pour être déployée sur de très longues durées.



FIGURE 1 – Bouée Datawell Waverider Mk-III déployée sur le site de Sainte-Anne du Portzic.

2.1.2 Sofar Ocean Spotter

La bouée Sofar Ocean Spotter est une nouvelle bouée de mesure de houle. Elle a été introduite récemment (RAGHUKUMAR et al. 2019). Elle mesure les vagues à partir de son déplacement uniquement déterminé par sa position GPS. Elle ne nécessite donc pas de centrale inertielle. La bouée calcule son positionnement GPS avec une fréquence d'échantillonnage de 2.5Hz. Les données satellites permettent de mesurer des déplacements avec une précision de $\pm 2\text{cm}$ dans des conditions favorables. Spotter mesure également les périodes entre 1s et 30s en appliquant un filtre passe-bande (ANDREWS et al. 2019). Tout comme la Datawell, elle peut mesurer la température de l'eau. Elle réalise également un traitement interne permettant de calculer les principaux paramètres de vagues (hauteur, période, direction) ainsi que les spectres de déplacement et les transmets par satellite. Les données brutes de déplacements sont contenues dans des fichiers .csv et stockés sur une carte SD de 16GB, soit 4 ans d'acquisition. Dans ces fichiers, se trouve pour chaque point de mesure l'heure en format Unix EPOCH, ainsi que les déplacements selon x, y et z en mm, c'est-à-dire respectivement les déplacements vers l'Est, le Nord et l'altitude (SPOTTER 2022). Les déplacements de la bouée Spotter sont calculés au cours du temps et indépendamment de la marée ou de la dérive de la bouée à l'aide d'une moyenne glissante. La bouée définit son déplacement comme l'écart entre sa position actuelle et sa position moyenne au cours du temps (**log_Spotter**). Spotter renvoie également d'autres fichiers contenant notamment les données de localisation GPS pour suivre le déplacement de la bouée durant le déploiement, par exemple si la bouée est dérivante, et les données spectrales calculées par un logiciel interne.

Les bouées Spotter mesurent 42 cm de diamètre et pèsent 7.45kg (*Spotter Specifications Sheet s. d.*). Elles sont par conséquent bien plus simples à déployer. Dans le cas de bouées dérivantes, elle peuvent être lâchées à la main depuis un bateau. Ce format offre beaucoup de praticités. Elles offrent également comme intérêt d'être environ dix fois moins chères que les bouées Datawell. Elles peuvent donc représenter une alternative peu coûteuse pour mesurer les vagues. De plus, les bouées sont équipées de panneaux solaires qui peuvent les rendre, dans de bonnes conditions, autonomes en énergie. Cependant, si l'on veut extraire les données de déplacement brutes, il faut récupérer la carte SD contenue dans la bouée. L'utilisation du GPS pour mesurer les vagues permet aussi aux bouées Spotter de ne pas nécessiter de calibration, contrairement à la centrale inertielle de la Datawell. Cependant, malgré l'aspect pratique des bouées Spotter, il reste à déterminer leur précision dans le cas étudié.



FIGURE 2 – Bouée Sofar Ocean Spotter (droite) déployée sur le site de Sainte-Anne du Portzic avec son flotteur (gauche).

2.1.3 RBRsolo3 D

Le RBR Solo3-D est un capteur de pression compact et léger. Il est régulièrement utilisé pour mesurer la houle à partir des perturbations de pression générées par le passage des vagues, qui se propagent le long de la colonne d'eau. Il est généralement fixé proche du fond et peut être laissé pendant de longues périodes de mesures. Cet appareil mesure la pression à l'aide d'un capteur piezo-résistant qui convertit le signal de

pression mécanique en signal électrique. Le capteur a une fréquence d'échantillonnage de 2Hz. Lors de cette campagne, trois RBR Solo3 D ont été déployés sur la même cage instrumentée. Un RBR Solo3 D-200m Bars a été déployé en configuration d'acquisition continue. Il renvoyait alors un fichier Excel contenant toutes les 0.5 secondes l'heure de la mesure, les données brutes de pression mesurée avec et sans inclure la pression atmosphérique en dbar, ainsi que la profondeur estimée du capteur, calculée à partir de la formule de la pression hydrostatique en m. Le fichier Excel contient également les données de densité et de pression atmosphérique utilisées pour le calcul. Ce capteur a été fourni par le SHOM. Les deux autres capteurs étaient des RBR Solo3 Wave16 D-50m déployés en mode *burst*. Ce mode utilise également une fréquence d'échantillonnage de 2Hz et renvoie les mêmes données que précédemment, mais il va aussi calculer en interne de nombreux paramètres de vagues. Le RBR Solo3-D200m peut mesurer des pressions allant jusqu'à 200m avec une précision de 10cm et une résolution de 0.2cm. Les RBR Solo3 Wave16 D-50m, peuvent mesurer des pressions jusqu'à 50m avec une précision de 2.5cm et une résolution de 0.5mm. La profondeur maximale recommandée pour pouvoir mesurer la houle est 50m (s. d.).

Les capteurs RBR D-200m et RBR D-50m peuvent respectivement stocker jusqu'à 382 et 670 jours de données et ont une autonomie de 62 et 108 jours. Ils fonctionnent avec des piles AA. Les capteurs pèsent 130g et mesurent 21cm de long. Ils ont été fixés à la cage instrumentée à l'aide de colliers Stauff avec la membrane orientée vers le bas pour éviter les dépôts de sédiments. Les capteurs se trouvaient alors à 14 cm du fond.



FIGURE 3 – Vue de près du RBR D-200m fixé sur la cage instrumentée à l'aide d'un collier Stauff. La membrane piezo-électrique se trouve sur la partie rouge.

2.1.4 ADCP Nortek Signature1000

Le dernier capteur utilisé est un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Il s'agit d'un appareil de mesure acoustique qui peut mesurer la vitesse du courant le long d'une colonne d'eau à partir de l'effet Doppler (NORTEK 2017). Le capteur est constitué de plusieurs membranes qui émettent des pulses en ultrasons. Ces pulses vont être réfléchis par les particules en suspension dans l'eau de mer et la fréquence du pulse va être modifiée par la vitesse des particules grâce à l'effet Doppler. L'onde réfléchie est ensuite captée par l'ADCP qui peut ainsi retrouver la distance du point de mesure et la vitesse associée. Les rayons émis étant unidirectionnels, un ADCP nécessite au moins trois rayons non-coplanaires pour obtenir une vitesse de fluide en trois dimensions. En pratique, les ADCP possèdent souvent un quatrième rayon qui sert à améliorer la précision du résultat. Pour mesurer la vitesse du fluide dans une cellule de la colonne d'eau, chaque rayon va émettre un signal ultrason. Ce signal va être réfléchi et modifié par les particules en suspension dans le fluide, dont on considère la vitesse comme égale à celle du fluide. L'ADCP reçoit donc 4 données de vitesse selon 4 directions différentes. Il utilise alors une matrice de rotation pour reconstituer le déplacement en 3 dimensions selon les axes de l'appareil (ANDREWS et al. 2019). L'ADCP utilisé durant la campagne possède cinq rayons, comme

visible sur la figure 4. Il y a quatre rayons inclinés de 25° (**ADCP_drawing**) et un rayon vertical. Ce dernier rayon vertical sert d'altimètre. Il peut mesurer la hauteur de la surface de l'eau. Il peut également être utilisé pour mesurer la dynamique de couches de banquises (SHCHERBINA et al. 2005). Ici, l'altimètre va permettre de suivre l'évolution de la surface de l'eau au cours du temps et ainsi de pouvoir mesurer la houle. L'appareil est fixé sur la même cage instrumentée que les capteurs de pression et orienté vers le haut pour pouvoir mesurer les vagues.

L'ADCP Nortek Signature1000 mesure 142mm de diamètre pour 151mm le longeur (**ADCP_drawing**). Il pèse 2.21kg. On peut malgré tout noter que si l'on souhaite le déployer dans une zone de fort courant, il est nécessaire d'utiliser une cage dont la masse peut dépasser celle de la bouée Datawell. Il est alimenté par un bloc de pile alcaline ayant une autonomie d'environ 43 jours selon la configuration. Il possède une mémoire de 64 GB ce qui représente autour de 160 jours de données selon la configuration. Il peut mesurer des vagues allant de -15m à +15m et des périodes entre 0.5s et 50s avec une résolution respective de 2cm et entre 0.8s et 1s selon la hauteur d'eau moyenne.



FIGURE 4 – Vue de près de l'ADCP. Les cinq disques blancs correspondent aux membranes servant à émettre et recevoir les signaux ultrasons.

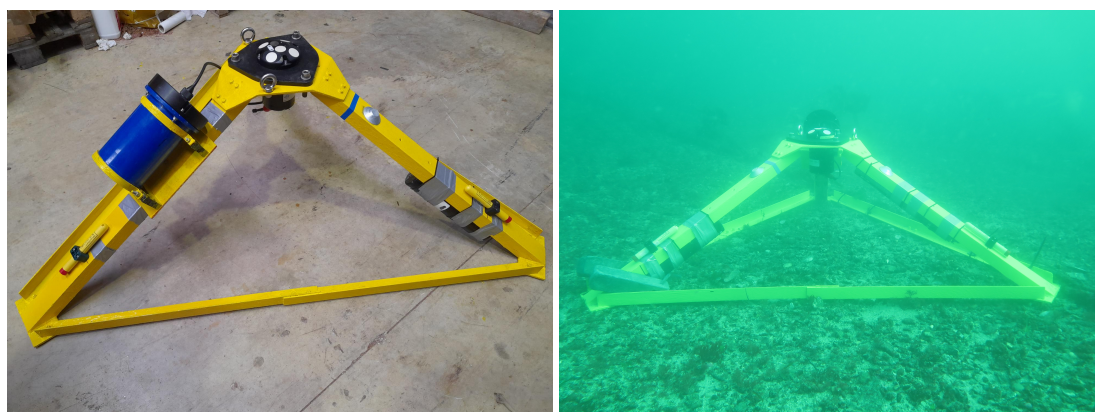


FIGURE 5 – Cage instrumentée avant le déploiement (gauche) et au fond de l'eau (droite). On observe les capteurs de pression sur les pieds de la cage et l'ADCP au sommet.



	Masse	Dimensions	Position
Datawell	90kg	70cm	Surface
Spotter	7.45kg	42cm	Surface
RBR	130g	21cm	14cm du fond
ADCP	2.21kg	15.1cm	60cm du fond
	Fréquence d'échantillonnage	Résolution hauteur	Gamme de période
Datawell	1.28 Hz	1cm	1-24s
Spotter	2.5Hz	2cm	1-30s
RBR	2Hz	0.2cm/0.5mm	dépend de la profondeur
ADCP	4Hz/8Hz	2cm	0.5-50s

TABLE 1 – Résumé des caractéristiques des capteurs

2.2 Déploiement

2.2.1 Présentation du site

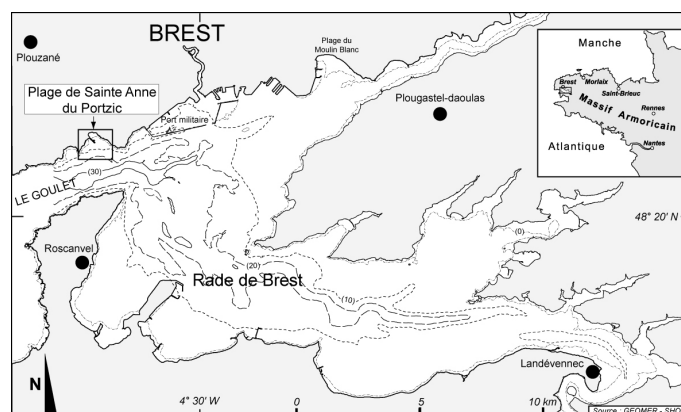


FIGURE 6 – Plan du Goulet et de la Rade de Brest et positionnement de la plage de Sainte-Anne du Portzic FICHAUT et al. 2008.

Tous les capteurs ont été déployés sur le site d'essai de Sainte-Anne du Portzic. Cette plage, située en contrebas de l'Ifremer, entre les communes de Plouzané et Brest, sert de site d'essai pour des prototypes d'énergie marines renouvelables (MAISONDIEU et al. 2022). On y trouve notamment la station **SOMLIT** qui réalise un suivi régulier des paramètres physico-chimique des eaux côtières à l'aide de prélèvements hebdomadaires et la bouée **COAST-HF-MAREL-Iroise** (RIMMELIN-MAURY et al. 2016). Le site est également utilisé pour étudier le vieillissement des matériaux en mer, dont la corrosion ou le biofouling (développement de matière organique sur un corps immergé en mer). Le site de Sainte-Anne fait également partie de l'infrastructure de recherche **TheoREM** ainsi que de l'institut **Carnot MERS** (TRÄSCH et al. 2022). Les données environnementales de Sainte-Anne (vent et houle) sont également accessibles en direct (*données environnementales*).

Ce site possède une topographie particulière qui va avoir un impact sur les vagues rencontrées. Tout d'abord, il s'agit d'un site côtier peu profond. On ne peut donc pas se placer en hypothèse d'eau profonde. Cependant, les capteurs se trouvent suffisamment loin de la berge pour que les vagues ne déferlent pas. Le site se trouve dans le goulet de Brest. Le site est cerné par la plage au Nord-Ouest et la digue au Nord-Est. On trouve également en amont à l'Ouest la pointe du Diable qui va diffracter les vagues incidentes vers Sainte-Anne. La bathymétrie est visible sur la figure 7. De plus, l'océan étant au Sud-Ouest on sait déjà que les vagues mesurées doivent essentiellement provenir du Sud-Ouest. Le site est particulier, car la profondeur d'eau est relativement faible,

mais il possède également un important marnage. Il s'agit de la différence de profondeur entre la marée haute et la marée basse. Il s'élève à 7.68m à Sainte-Anne (TRÄSCH et al. 2022). Ce fort marnage implique également des courants de marée importants. Ces courants vont avoir un impact sur les vagues du site. Il peut également avoir un impact sur les mesures des bouées. Les états de mer du site ont déjà été étudiés (TRÄSCH et al. 2022),(COLINE 2019).



Wave monitoring equipments in the Brest Bay test site

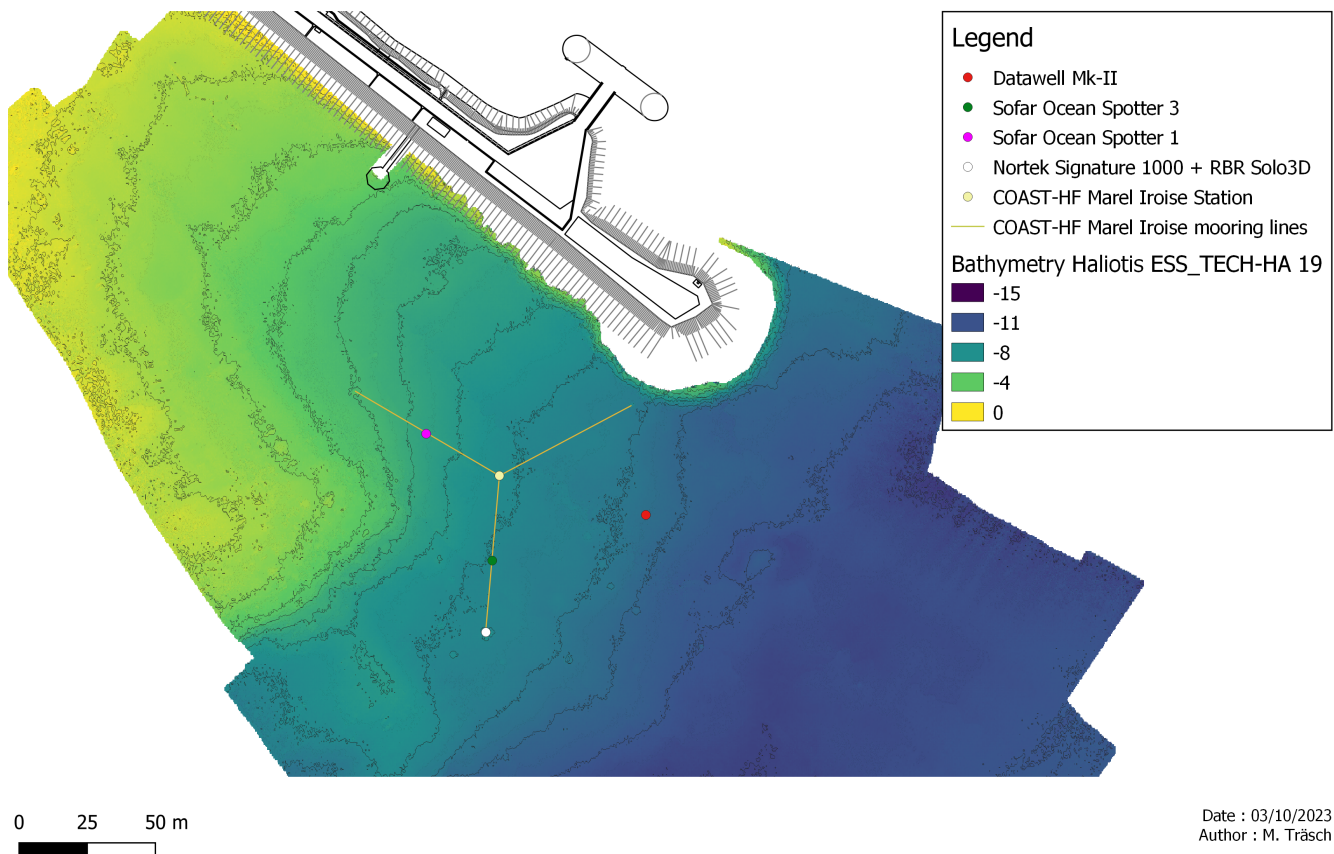


FIGURE 7 – Carte et bathymétrie du site d'essai *in situ* de Sainte-Anne du Portzic et position des capteurs.

2.2.2 Dates et positions des déploiements

Cette campagne s'est déroulée entre le 20 octobre 2022 et le 25 avril 2023. Les déploiements ont été répartis sur 4 legs. Les dates des différents legs sont visibles sur le tableau 2. La cage instrumentée contenant tous les capteurs de pression ainsi que l'ADCP a été déployée durant chaque legs. Elle a cependant été récupérée entre chacun d'entre eux, notamment pour changer les batteries des différents capteurs. Cependant, le capteur de pression appartenant au SHOM n'a pas été déployé lors du legs 2. L'ADCP a été déployé selon deux configurations. Durant le legs 1, il avait une fréquence d'échantillonnage de 8Hz et enregistrait des séquences de 20 minutes toutes les heures. Durant les autres legs, il avait une fréquence d'échantillonnage de 4Hz et enregistrait des séquences de 20 minutes toutes les 30 minutes. La bouée Datawell a été déployée pendant l'ensemble de la campagne, jusqu'au 17 avril. Enfin, deux bouées Spotter ont été utilisées. Elles seront désignées Spotter 1 et Spotter 3. Ces deux bouées diffèrent par leur mouillage, qui sera décrit par la suite. La bouée Spotter 3 a été déployée sur l'ensemble de la campagne. La bouée Spotter 1 quant à elle, n'a été déployée que durant le legs 3, soit une durée d'environ un mois et demi. Les positions des différents capteurs sont visibles sur la figure 7. On remarque que la bouée Spotter 1 a été déployée plus au centre du site. Les autres capteurs

sont presque en mer ouverte. La bouée Spotter 1 est plus proche de la plage et en eau moins profonde.

	leg 1	leg 2	leg 3	leg 4
début	20/10/2022	16/12/2022	02/02/2023	15/03/2023
fin	09/12/2022	01/02/2023	13/03/2023	25/04/2023

TABLE 2 – Dates des différents legs.

2.2.3 Mouillage

Les bouées ont été déployées avec un mouillage. Ce mouillage doit permettre aux bouées de rester en place malgré les vagues et le courant. Il doit donc contenir un lest suffisamment important pour retenir la bouée. De plus, sur un site comme Sainte-Anne, il doit être capable de gérer le marnage. En effet, une variation importante de hauteur d'eau nécessite un mouillage suffisamment long pour garder la bouée en surface à marée haute. Cependant, si le mouillage consiste en une ligne très longue, à marée basse une grande partie de cette ligne ne sera pas utilisée. La corde va donc flotter et dériver au gré du courant et risque de s'emmêler autour de la bouée, gênant ainsi les mesures. Pour cela, différentes méthodes de mouillage utilisant notamment des flotteurs et des poids de subsurfaces sont utilisés. Le mouillage doit également être capable de résister aux vagues et aux courants, en traction et en torsion, sans influencer les mesures de vagues de la bouée. Il doit, de plus, supporter la corrosion et le biofouling.

La bouée Datawell a été déployée en s'inspirant du mouillage recommandé par le constructeur. Son schéma est visible figure 8. La bouée est maintenue par un corps-mort de 300kg. Des émerillons sont utilisés pour éviter la torsion de la ligne. Un élastomère a été utilisé pour réduire l'impact du mouillage sur le mouvement de la bouée. Les recommandations suggèrent d'utiliser deux élastomères de 15m pour ce déploiement. Ici, un seul élastomère de 15m a été utilisé pour limiter le rayon d'évitement. Il s'agit du rayon sur lequel la bouée peut se déplacer durant son déploiement, au gré des courants et des marées.

La raison pour laquelle deux bouées Spotter seront étudiées est qu'elles ont été déployées avec deux mouillages différents. Ces mouillages sont visibles figure 9. Le mouillage de la bouée Spotter 3 est inspiré des recommandations de Sofar Ocean. Il compense la marée avec une série de bouts et de flotteurs. Les bouts les moins profonds, et qui se retrouvent donc en surface à marée basse, se trouvent dans des tubes de PVC pour éviter qu'ils s'emmêlent. Le mouillage est assez complexe, mais fonctionne bien et perturbe peu la mesure. Afin de simplifier le mouillage et de réduire le rayon d'évitement, la bouée Spotter 1 utilise un élastomère pour compenser le marnage, de façon similaire à la bouée Datawell. Le mouillage est alors bien plus simple. Cependant, la bouée Spotter est bien plus légère que la bouée Datawell. Par conséquent, il faut s'assurer que ce mouillage innovant ne perturbe pas les mesures de vagues. Ce rapport va également étudier l'impact du mouillage sur les mesures des bouées Spotter.

**MOUILLAGE HOULOGRAPHE
IFREMER**

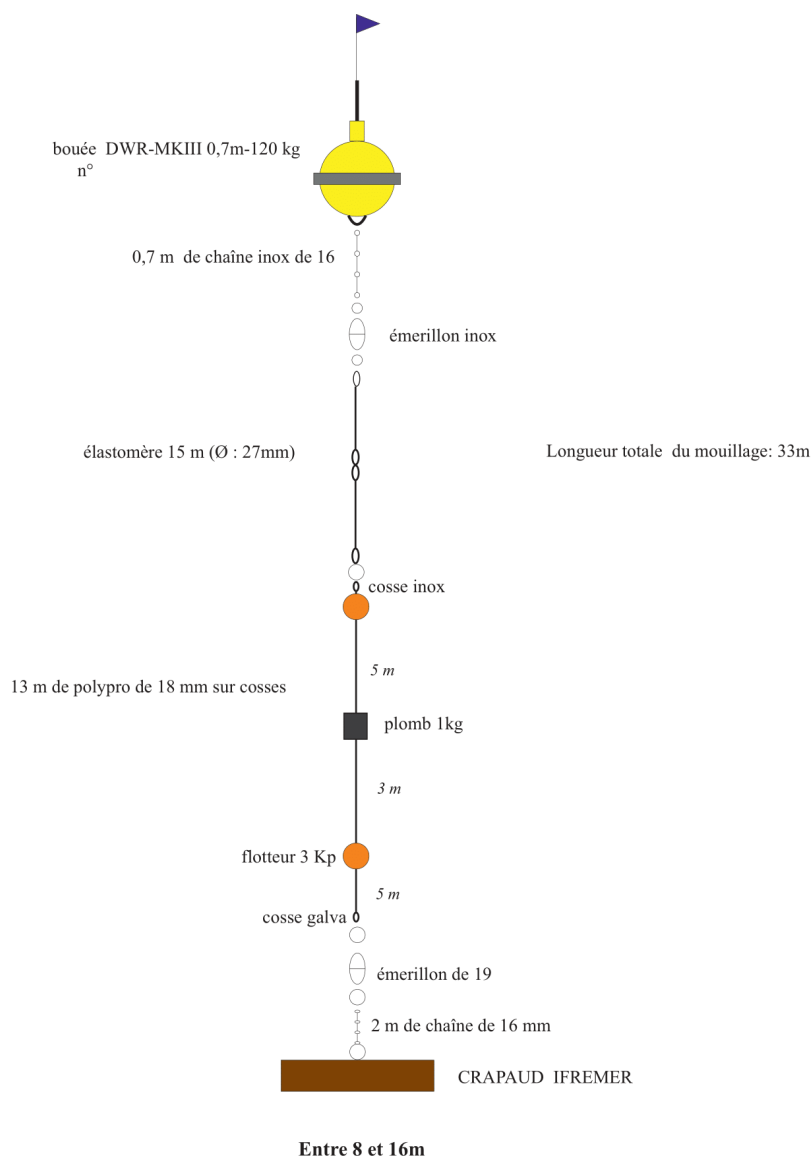


FIGURE 8 – Schéma de mouillage de la bouée Datawell.

Comme précisé précédemment, les capteurs de pression et l'ADCP sont fixés à une cage instrumentée. Cette cage est lestée et posée au fond de l'eau durant chaque legs. Les capteurs de pression sont fixés sur chaque pied de la cage et l'ADCP est fixé au sommet de celle-ci, orienté vers le haut.

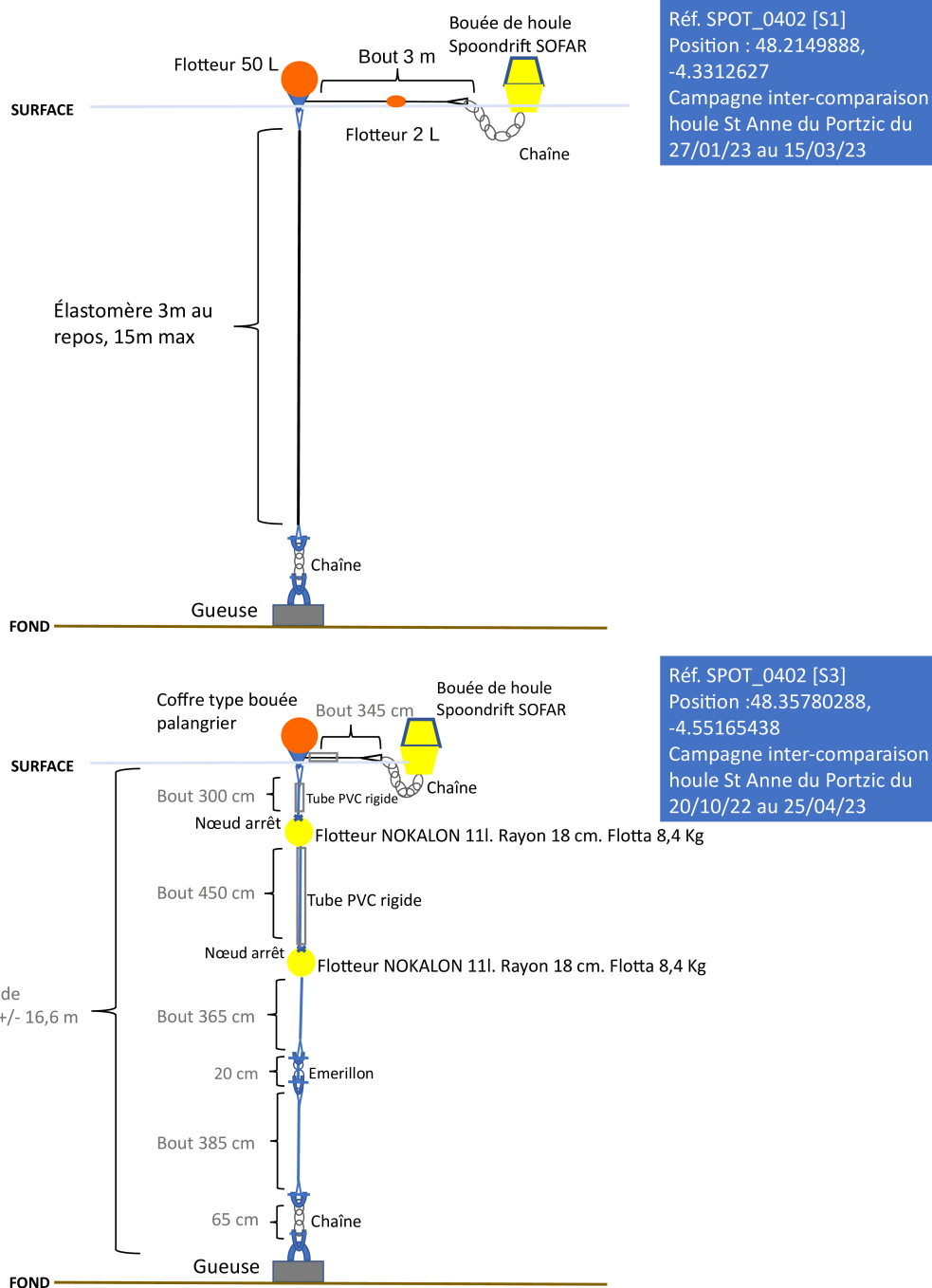


FIGURE 9 – Schéma de mouillage des bouées Spotter 1 (haut) et Spotter 3 (bas).

3 Paramètres d'étude et méthodes de calcul

Pour pouvoir comparer la capacité de chaque capteur à mesurer un état de mer, nous allons comparer les paramètres de vagues. Ces paramètres vont être calculés à partir de moyennes et d'écart-type de grandeurs permettant de caractériser les vagues, ici la hauteur, la période et la direction. Pour pouvoir comparer les paramètres statistiques, on doit considérer des états de mer stationnaires. Il faut donc utiliser des séquences de données suffisamment courtes pour être considérées comme stationnaires. Cependant, il faut suffisamment de données pour pouvoir établir des paramètres statistiques fiables. En général, on considère des échantillons

entre 15 et 30 minutes (HOLTHUIJSEN 2010). Ici, tous les capteurs utilisent des échantillons de 30 minutes, à l'exception de l'ADCP qui utilise des séquences de 20 minutes. Pour étudier les états de mer de l'ensemble de la campagne, on attribuera une valeur à chaque paramètre toutes les 30 minutes.

On utilisera ici deux types de paramètres, différant par leur méthode de calcul. Il y a les paramètres vague-à-vague, qui sont calculés directement à partir de la série temporelle d'élévation de la surface de l'eau, et les paramètres spectraux, qui nécessitent de calculer des spectres. Ces paramètres et leurs méthodes de calcul vont être introduits.

3.1 Paramètres vague-à-vague

Ces paramètres sont issus de calculs réalisés directement à partir des séries temporelles de déplacements, c'est-à-dire les données brutes extraites des capteurs. Pour déterminer leurs paramètres, il faut d'abord définir ce qu'est une vague. Une vague est définie comme le profil de l'élévation de la surface entre deux croisements successifs croissants (respectivement décroissants) de la hauteur moyenne de la surface. Une élévation de surface peut être négative, une vague ne l'est pas. Il existe plusieurs méthodes pour définir les vagues d'une séquence donnée. Ici, nous utiliserons le *zero-crossing downward* qui consiste à définir les vagues par rapport à l'instant où la surface de l'eau croise le niveau zéro (ou moyen) de façon décroissante. Cette définition de vague est visible figure 10.

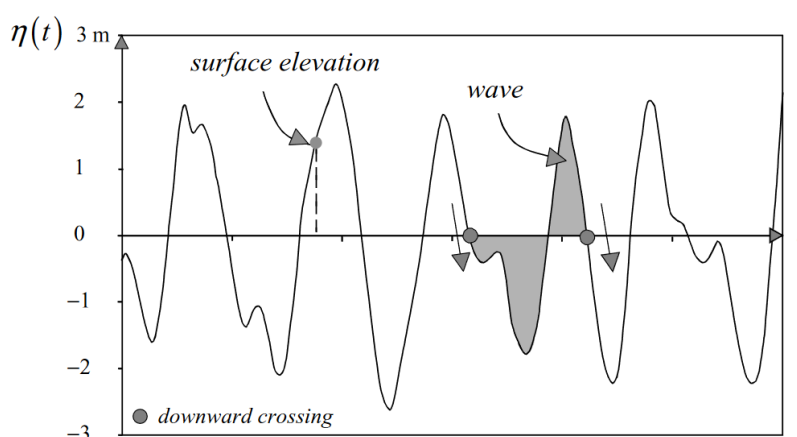


FIGURE 10 – Définition d'une vague d'après la méthode de *zero-crossing downward* HOLTHUIJSEN 2010.

En pratique dans cette étude, pour calculer les hauteurs et périodes de vagues, il a fallu créer une fonction dans le code qui distinguait les vagues une à une. L'interprétation est visible figure 11. Les racines sont les points de *zero-crossing downward*. Les vagues sont définies comme l'ensemble des points entre deux racines. La hauteur de la vague est définie comme la différence d'élévation de surface entre le minimum et le maximum global de la vague. Le maximum et minimum sont pris à des points de mesure sans extrapolation. La période est définie comme la durée entre les deux racines. L'instant de chaque racine est pris comme la moyenne entre l'instant du point précédent et celui suivant cette racine.

Cette analyse nous permet de définir deux paramètres à partir des données brutes :

- H_{\max} , la hauteur de la plus haute vague sur une séquence de 30 minutes.
- T_{moy} , la moyenne des périodes des vagues sur une séquence de 30 minutes.

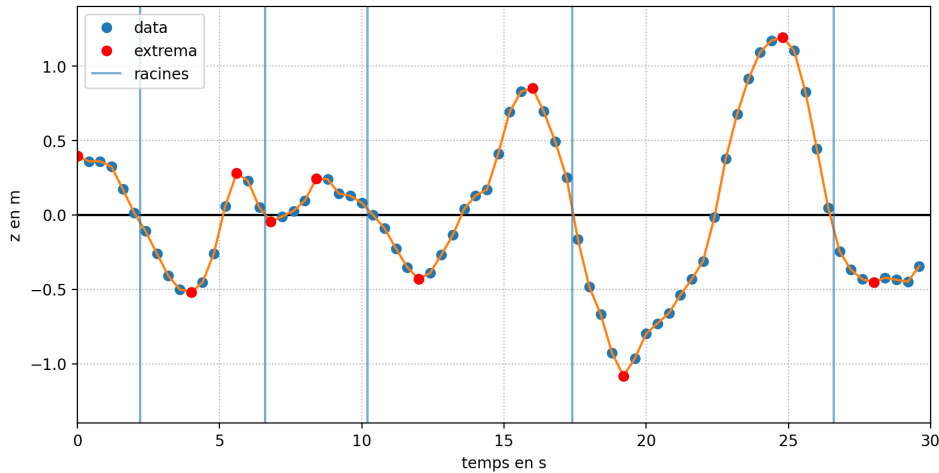


FIGURE 11 – Définition des vagues à partir des données brutes de déplacement.

3.2 Paramètres spectraux omnidirectionnels

De nombreux paramètres peuvent également être obtenus à partir du spectre du signal de déplacement vertical. D'un point de vue pratique, ce spectre est calculé par le programme python à l'aide de la fonction `scipy.signal.welch`. Cette fonction calcule le spectre en utilisant la méthode de Welch (DINGEMANS 1997). Cette méthode divise le signal en plusieurs séquences, calcule le spectre de chacune des séquences séparément, et renvoie la moyenne de ces séquences. Pour cette étude, on a utilisé une seule séquence pour limiter les pertes d'informations issues du lissage du spectre et pour améliorer la résolution fréquentielle (HERBERS et al. 2012).

Pour l'analyse omnidirectionnelle, on considérera le spectre des déplacements de la bouée S comme étant égal au spectre d'auto-corrélation selon l'altitude z , soit $S(f) \approx S_{zz}(f)$, avec f la fréquence du signal (HERBERS et al. 2012). On définit alors les moments de ce spectre tels que (GROUP et al. 2005) :

$$m_n = \int_{f_0}^{f_1} S(f) \cdot f^n df \quad (1)$$

avec m_n le moment d'ordre n et f , la fréquence du signal.

Les grandeurs obtenues à partir de ces moments sont :

- la hauteur significative H_s . Cette grandeur est considérée comme représentative de la hauteur des vagues pour un enregistrement. Elle est définie telle que

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2)$$

- T_{01} la période moyenne calculée à partir du spectre définie comme

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (3)$$

- la période de pic T_p , représente la période associée au pic d'énergie le plus élevé sur le spectre.

$$T_p = 1/f_p \quad (4)$$

$$f_p = \operatorname{argmax}_f(S(f)) \quad (5)$$

3.3 Paramètres spectraux directionnels

Une caractéristique importante dans l'étude des états de mer est la directionnalité. On cherche à connaître la direction d'incidence des vagues. Pour cela, on introduit le spectre directionnel $S(f, \theta)$, avec θ la direction en °. Elle est définie comme la direction d'où les vagues proviennent. On utilisera à présent les spectres de quadrature (partie imaginaire du spectre d'inter-corrélation) Q_{xz} et Q_{yz} , pour inclure les paramètres directionnels dans l'analyse. Ces spectres permettent de calculer les premiers moments de Fourier tels que (HERBERS et al. 2012), (LONG 1980) :

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \int_0^{2\pi} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix} S(\theta) d\theta = \begin{bmatrix} Q_{xz} / \sqrt{(S_{xx} + S_{yy}) S_{zz}} \\ Q_{yz} / \sqrt{(S_{xx} + S_{yy}) S_{zz}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ces moments nous permettent ensuite de calculer la direction des vagues θ telle que :

$$\tan(\theta) = b_1 / a_1 \quad (7)$$

Pour obtenir les valeurs moyennes, on calcule les moments de Fourier moyen \bar{a}_1 et \bar{b}_1 à partir des moyennes des spectres :

$$\begin{pmatrix} \bar{a}_1 \\ \bar{b}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{xz}} / \sqrt{(\overline{S_{xx}} + \overline{S_{yy}}) \overline{S_{zz}}} \\ \overline{Q_{yz}} / \sqrt{(\overline{S_{xx}} + \overline{S_{yy}}) \overline{S_{zz}}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

On obtient alors la direction moyenne θ_m :

$$\tan(\theta_m) = \bar{b}_1 / \bar{a}_1 \quad (9)$$

On peut également, de façon similaire à \mathbf{T}_p , définir la direction de pic θ_p tel que :

$$\tan(\theta_p) = b_1(f_p) / a_1(f_p) \quad (10)$$

avec f_p défini comme dans l'équation 5.

On peut également obtenir l'étalement directionnel σ tel que :

$$\sigma = \sqrt{2 \left(1 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \right)} \quad (11)$$

On obtient de façon similaire à θ_m et θ_p les paramètres σ_m et σ_p .

3.4 Analyse statistique

Pour comparer les résultats, nous utiliserons des grandeurs statistiques. Les grandeurs trouvées par la bouée Datawell seront utilisées comme référence par rapport à tous les autres capteurs. Les écarts de mesures seront caractérisés par le biais défini tel que, pour un paramètre donné, on note x l'ensemble des valeurs mesurées par le capteur étudié et y , les valeurs mesurées par Datawell sur des périodes communes avec n échantillons, on a (ANDREWS et al. 2019) :

$$\text{biais} = \bar{x} - \bar{y} \quad (12)$$

et le coefficient de corrélation r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

3.5 Filtrage des données

Avant de calculer les paramètres de vagues introduits précédemment, deux filtres ont été appliqués aux données brutes dans l'objectif d'améliorer les résultats finaux. Tout d'abord, pour filtrer les composantes très basses fréquences qui ne représentent pas de la houle, on utilise un filtre passe haut de Butterworth. Le filtrage est réalisé par un filtre d'ordre 5 de fréquence de coupure $f_c = 0.025\text{Hz}$ et appliqué à chaque séquence de 30 minutes (ANDREWS et al. 2019). Ce filtre sert également à retirer les fréquences que les capteurs ne sont pas capables de mesurer. Pour l'ADCP, un filtre passe-bas de fréquence de coupure $f_c = 1\text{Hz}$ a également été ajouté. En effet, le signal brut mesuré par l'ADCP est très bruité. Sans ce filtre, les périodes trouvées par l'ADCP sont extrêmement faibles.

Le second filtre a pour objectif de retirer les pics de valeurs grossières dûs à des erreurs de mesure. Ce filtre se base sur les paramètres de *skewness* et *kurtosis* des données (D'AGOSTINO et al. 1990). Ces paramètres mesurent respectivement l'asymétrie et l'aplatissement de distributions et permettent de caractériser l'écart d'une distribution par rapport à une loi gaussienne. Le *skewness* $\sqrt{b_1}$ et le *kurtosis* b_2 sont décrits tels que pour un échantillon X_1, X_2, \dots, X_n de taille n :

$$\sqrt{b_1} = m_3 / m_2^{3/2} \quad (14)$$

$$b_2 = m_4 / m_2^2 \quad (15)$$

avec

$$m_k = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^k / n \quad (16)$$

Pour qu'une séquence soit considérée comme valide, il faut un *skewness* compris entre -0.3 et 0.3 et le *kurtosis* doit être inférieur à 5 (KERGADALLAN et al. 2022).

En traitant les données brutes obtenues par les différents capteurs, on remarquait la présence de séquences aberrantes. Ce filtre permet de les éliminer efficacement.

4 Résultats

4.1 Observation des états de mer durant la campagne

Tout d'abord, nous allons observer les résultats obtenus pour les différents paramètres sur l'ensemble de la campagne. Les données obtenues par la Datawell seront prises comme comparaison. Les observations qui seront faites ici sont également visibles sur les jeux de données des autres capteurs.

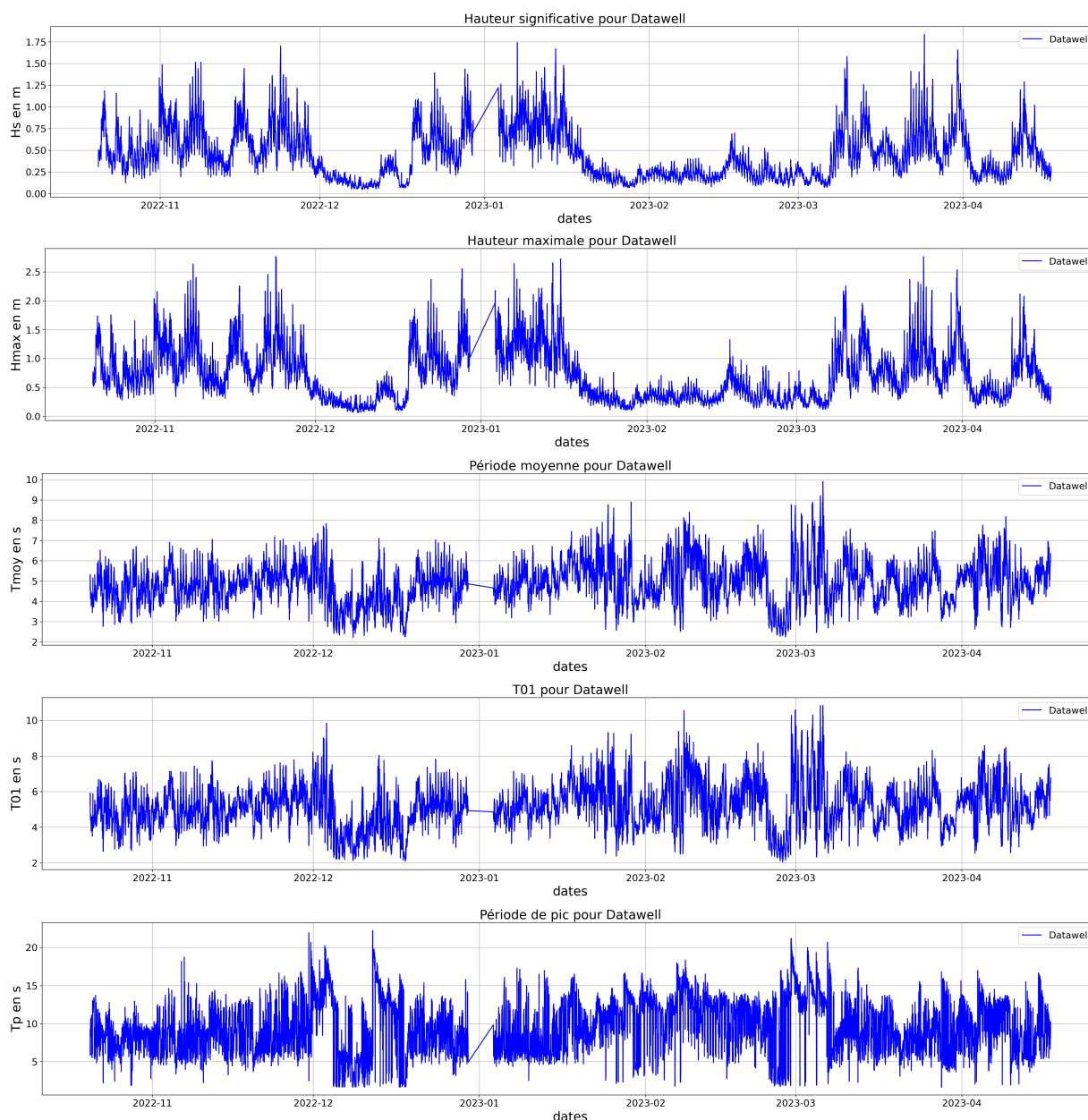


FIGURE 12 – Observation des résultats obtenus pour les paramètres H_S , H_{max} , T_{moy} , T_{01} et T_p par la bouée Datawell sur l'ensemble de la campagne.

On trace alors les valeurs obtenues pour les paramètres choisis sur l'ensemble de la campagne (figure 12). On peut faire plusieurs observations sur ces résultats. Premièrement, la campagne se déroulant sur plusieurs mois, on peut observer la tendance des vagues au fil des saisons. On remarque une alternance entre des périodes de hautes vagues à l'échelle du site (entre 25cm et 1.5m de hauteur significative) et des périodes plus calmes (entre 0 et 50cm). On remarque également dans les périodes de hautes vagues des périodes de quelques jours durant lesquelles les vagues sont très hautes (comme autour du 15 novembre par exemple). Ces événements correspondent à des tempêtes. On constate également une corrélation entre les différentes périodes définies. On note par exemple un motif similaire début mars entre T_{moy} , T_{01} et T_p .

4.2 Impact de la marée

Si l'on étudie un échantillon de données plus court, nous pouvons observer d'autres phénomènes. Sur la figure 13, sont tracées les valeurs de différents paramètres sur une durée de 15 jours. On trace également la hauteur moyenne de l'eau sur chaque séquence de 30 minutes, calculée à partir d'un capteur de pression, et de la formule de la pression hydrostatique. Ce dernier graphe nous permet d'observer les marées. On observe effectivement une courbe ayant une période d'environ 12 heures. On remarque également une variation de l'intensité de la marée liée au cycle astronomique. On trace alors en rouge les périodes de marée descendante et en bleu les périodes de marée montante.

On remarque alors que les hauteurs significatives sont plus importantes à marée montante et plus faibles à marée descendante. Les vagues les plus grandes apparaissent alors généralement au milieu de la marée montante. Sans même comparer avec la courbe de hauteur d'eau moyenne, on remarque une périodicité sur la courbe H_s , ainsi que sur les suivantes. D'après la bibliographie, lorsque les vagues se propagent dans le sens du courant, elles ont une plus grande longueur d'onde (VENUGOPAL et al. 2011) et sont plus petites (WOLF et al. 1999). De plus, elles devraient avoir des périodes plus courtes, car pour un observateur fixe, les vagues se déplacent plus vite si le courant de marée va dans la même direction (PLESKACHEVSKY et al. 2009). On comprend alors que l'impact de la marée sur les vagues est lié au courant. Cependant, le courant de marée est assez complexe sur le site de Sainte-Anne du Portzic. Par conséquent, il est difficile d'estimer le sens du courant par rapport à la direction de propagation des vagues, pour chaque bouée en fonction de la marée. Enfin, on note également que les directions de vagues ont tendance à être plus orientée à l'Est lors des marées montantes. On remarque cependant que la hauteur de vague ne dépend pas uniquement de la marée, et de son intensité. Sur les courbes de la figure 13, on note que les vagues les plus hautes se trouvent vers la fin de l'échantillon. Or, cette période correspond à un marnage faible. Les vagues sont donc impactées par d'autres phénomènes, en particulier le vent local.



FIGURE 13 – Mise en relation des hauteurs significatives, périodes moyennes et directions avec la marée. Les périodes de marée montante sont tracées en bleu et les périodes de marée descendante en rouge.

4.3 Comparaison Spotter/Datawell

A présent, les résultats obtenus par la bouée Datawell Waverider Mk-III et la bouée Sofar Ocean Spotter seront comparés. Ici, la bouée Datawell sera uniquement comparée avec la bouée Spotter 3 car elles ont toutes deux été déployées sur l'ensemble de la campagne. De plus, la bouée Spotter 3 utilise un mouillage classique. Nous ne savons pas encore quel est l'impact du mouillage innovant de la bouée Spotter 1 sur les résultats. Par conséquent, il est plus prudent de ne pas l'utiliser comme référence de la bouée Spotter.

On peut observer sur les séries temporelles ainsi que sur les diagrammes de dispersion, une très bonne correspondance entre les hauteurs. Le coefficient de corrélation pour H_S est de 0.97. Le paramètre de hauteur maximale est facilement sujet à erreur, car il se base sur la plus grande valeur de déplacement. Par conséquent, il suffit d'une erreur de mesure qui exagère le déplacement pour obtenir une erreur de hauteur maximale. Ainsi, le coefficient de corrélation de 0.95 est un bon résultat. On remarque cependant que les résultats pour les périodes sont moins proches. La bouée Spotter a tendance à sous-estimer les périodes par rapport à Datawell. Cette différence est moins marquée pour T_{01} , avec un coefficient directeur de la régression linéaire de 0.79, que pour T_{moy} , avec un coefficient directeur de 0.69. Le coefficient de corrélation est très faible pour T_{moy} ($r=0.3$) alors que pour T_{01} , il vaut 0.85. La période de pic a plutôt tendance à être surestimée par Spotter. On remarque en particulier des périodes durant lesquelles Spotter trouve des périodes de pics très élevées contrairement à Datawell, comme par exemple au début de décembre. On peut donc d'ores et déjà supposer

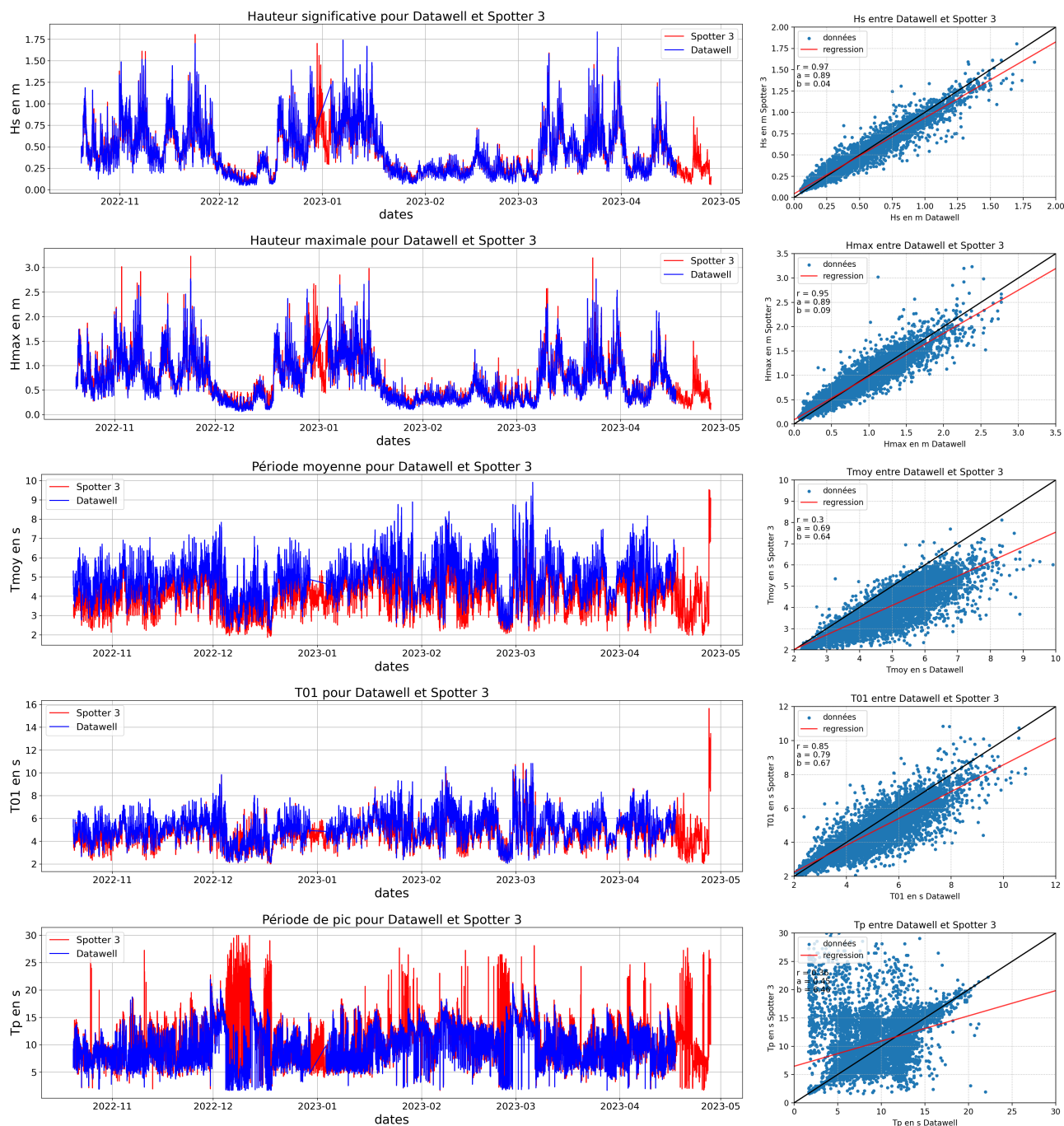


FIGURE 14 – Comparaison des séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres H_s , H_{max} , T_{mean} , T_{01} et T_p de la bouée Datawell et Spotter 3 sur l'ensemble de la campagne. Les diagrammes de dispersions contiennent le coefficient de corrélation r , ainsi que le coefficient directeur a et l'ordonnée à l'origine b de la régression linéaire associée.

qu'il y a des différences au niveau du spectre basses fréquences entre les bouées.

Les résultats pour les paramètres directionnels sont visibles ci-dessous. On constate tout d'abord que, en accord avec la topographie du site, les vagues viennent essentiellement du Sud-Sud-Ouest. On remarque que la distribution des directions moyennes et de pics semble proche (fig 16). On note principalement une différence d'étalement. Cette différence est également visible sur les figures 15. Les directions trouvées par Spotter sont plus étalées. Même si sur les séries temporelles, les résultats des deux bouées semblent relativement proches, on constate malgré tout que la corrélation est faible (autour de 0.65 pour les grandeurs moyennes et proche de 0 pour les grandeurs de pic). De plus, on note le même motif que pour les périodes de pics au début du mois

de décembre. Les directions trouvées par Spotter varient beaucoup comparé à celles trouvées par Datawell.

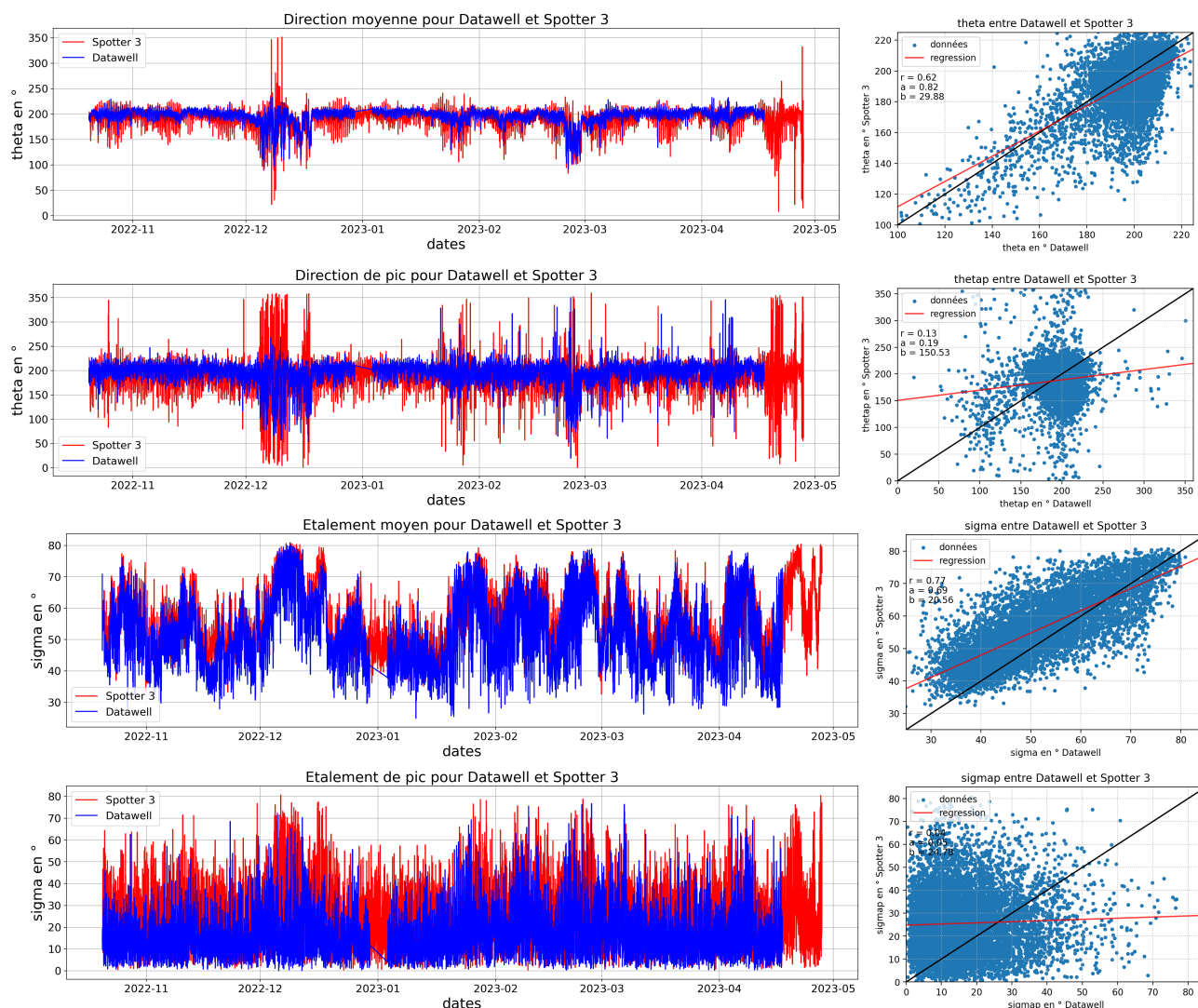


FIGURE 15 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres directionnels θ_m , θ_p , σ_m et σ_p de la bouée Datawell et Spotter 3 sur l'ensemble de la campagne.

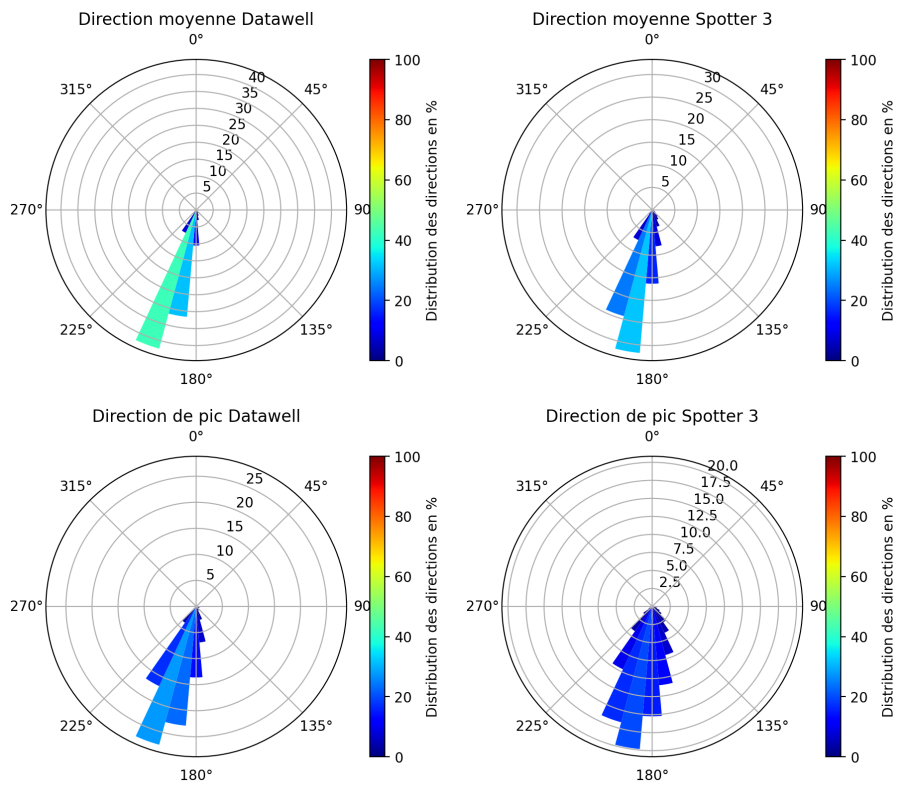


FIGURE 16 – Diagrammes de répartition des directions moyennes et de pic des bouées Datawell et Spotter en %. Les directions sont orientées de telle sorte que le Nord soit à 0° et l’Est à 90°.

On peut observer la comparaison statistique entre les résultats mesurés par les bouées Datawell et Spotter 3 pour les différents paramètres étudiés dans le tableau 3. On constate que les résultats pour les hauteurs sont très proches. Les mesures de périodes sont cependant moins précises. Les coefficients de corrélation sont faibles et il y a un biais notable entre les deux bouées. Parmi les différences notables entre les bouées Spotter et Datawell, il y a la fréquence d’échantillonnage. Celle de Spotter est deux fois plus importante que celle de Datawell. Elle est donc plus susceptible de mesurer des faibles périodes. Cela peut expliquer la sous-estimation des périodes moyennes par Spotter par rapport à Datawell. De plus, la bouée Spotter est 12 fois plus légère que la bouée Datawell. Les vagues de faibles périodes sont plus petites et de faible énergie. La bouée Datawell doit être trop lourde pour détecter les très faibles périodes. Ces caractéristiques physiques permettent d’expliquer l’écart de mesure pour les périodes entre les bouées Spotter et Datawell. On note une bonne correspondance globale pour les directions. Les distributions sont proches mais les corrélations sont très faibles.

	biais absolu	biais relatif	écart maximal	<i>r</i>
H_s	-6mm	-1%	-0.6m	0.97
H_{max}	6mm	1%	1.9m	0.95
T_{moy}	-0.88s	-18%	-3.3s	0.3
T₀₁	-0.42s	-8%	-4.8s	0.85
T_p	1.2s	13%	26s	0.36

TABLE 3 – Comparaison statistique de Datawell et Spotter.

4.4 Comparaison avec les RBR

Nous allons à présent étudier les résultats des capteurs de pression déployés durant la campagne. Les différents capteurs de pression déployés ont été comparés entre eux. Pour tous les paramètres, les résultats sont presque identiques avec un coefficient de corrélation $r > 0.99$. Seul le paramètre T_p est moins précis, mais possède tout de même un coefficient de corrélation de 0.96, ce qui est excellent en comparaison avec les résultats précédents. On considérera donc que les résultats des différents capteurs sont les mêmes, et la comparaison avec les autres capteurs se fera à partir d'un seul d'entre eux.

Les capteurs de pression ne mesurent pas directement les vagues. Ils mesurent le signal de perturbation de pression généré par le passage de la houle transmis le long de la colonne d'eau. Cependant, ce signal est atténué durant sa diffusion. Par conséquent, plus le capteur de pression se trouve loin sous la surface, plus le signal est atténué. Pour retrouver des paramètres de vagues corrects, il faut donc appliquer une correction au signal. Dans ce rapport, on utilise les données de pression d'un des RBR déployé en mode burst. Ces données de pression sont tout d'abord converties en hauteur d'eau à l'aide de la formule de pression hydrostatique. Ensuite, il faut transformer ce signal de hauteur d'eau en signal de déplacement vertical de la surface par rapport à une position de référence sans impact de la marée. Pour cela, pour chaque séquence de 30 minutes, on réalise une régression linéaire de la hauteur d'eau, et on considère le déplacement vertical z comme la différence entre la hauteur d'eau mesurée par le capteur et cette régression linéaire.

Cependant, le signal étant atténué le long de la colonne d'eau, il nécessite une correction pour les hauteurs de vagues qui dépend de la profondeur à laquelle se trouve le capteur. Une méthode existante consiste à amplifier les hauteurs trouvées à l'aide du coefficient suivant (CAVALERI 1980) :

$$H_{\text{corrigée}} = H_{\text{brut}} e^{kh} \quad (17)$$

avec $H_{\text{corrigée}}$ la hauteur corrigée, H_{brut} la hauteur calculée par le capteur de pression, k le nombre d'onde des vagues et h la profondeur du capteur de pression. La grandeur h est calculée à partir des données du capteur de pression. Le seul paramètre manquant est k . Comme précisé dans les conditions du site, on ne peut pas se placer en conditions d'eau profonde. Pour connaître la valeur de k , on utilise la relation de dispersion en conditions de profondeur intermédiaire et on utilise la relation de dispersion d'Airy (AIRY 1845).

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh} \quad (18)$$

Cette équation n'a pas de solution analytique. Par conséquent, il faut trouver une méthode de résolution. On utilise une formule itérative basée sur la méthode de Newton-Raphson (YOU 2008), (YPMA 1995) :

$$kh \approx x_0 \left[\frac{k_0 z + (x_0 / \cosh x_0)^2}{x_0 \tanh x_0 + (x_0 / \cosh x_0)^2} \right] \quad (19)$$

où x_0 est une première approximation de la grandeur kh , h la hauteur d'eau calculée par le capteur de pression à partir de la formule de la pression hydrostatique et k_0 , le nombre d'onde en eau profonde défini par :

$$k_0 = \frac{(2\pi/T_p)^2}{g} \quad (20)$$

avec g la constante de pesanteur, et T_p , la période de pic calculée par le RBR.

La première valeur attribuée à x_0 est $k_0 h$. Ensuite, on calcule kh à partir de l'équation 19, on attribue cette nouvelle valeur de kh à x_0 , et on réalise une nouvelle itération. La méthode converge à 10^{-2} au bout de 5 itérations. Le calcul est donc très rapide et peu contraignant pour le traitement.

On constate sur la figure 17 que pour les hauteurs la régression linéaire est très bonne avec des directeurs très proches de 1 ($a > 0.95$). Cependant, la corrélation n'est pas très bonne ($r \approx 0.8$). Pour les périodes quant

à elles, qui ne sont pas corrigées, la corrélation est faible ($r < 0.3$). Les différentes périodes sont globalement surestimées par le capteur de pression.

On remarque sur les séries temporelles de la figure 17 la présence de nombreux pics. Sur les diagrammes de dispersion, on constate que même si les valeurs sont justes en moyenne, elles sont très dispersées. On sait que la correction dépend des périodes de pics trouvées par le RBR. Or, on vient de constater que le capteur de pression n'est pas juste pour mesurer les périodes.

Pour limiter la dispersion, on peut fixer comme valeur de T_p dans l'équation 20, la valeur moyenne de T_p calculée par la bouée Datawell durant la période de déploiement du RBR.

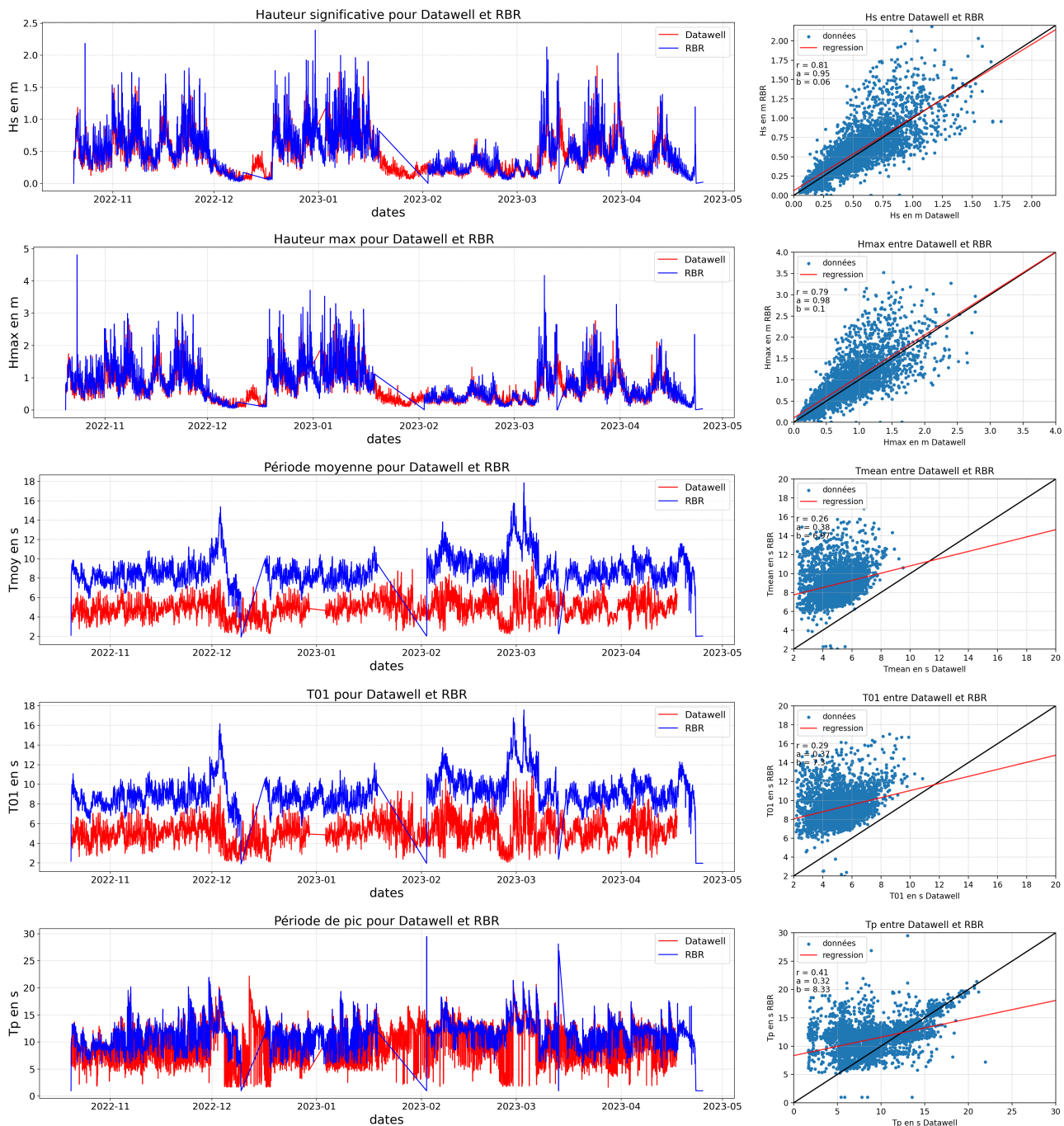


FIGURE 17 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres H_s , H_{max} , T_{mean} , T_{01} et T_p entre le capteur de pression RBR avec correction et la bouée Datawell.

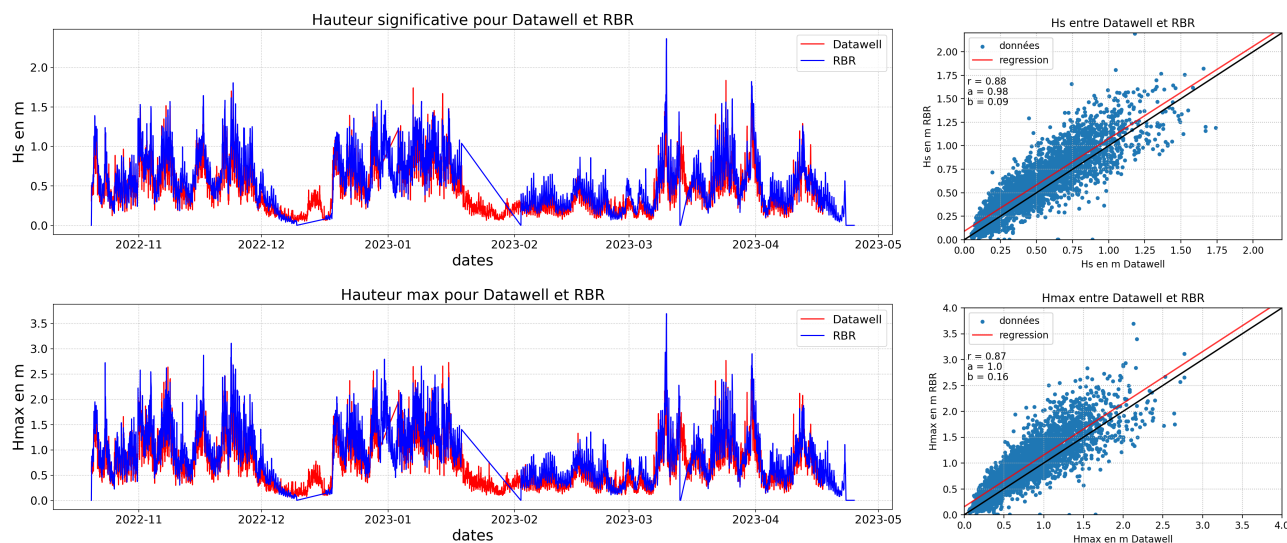


FIGURE 18 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres H_s , H_{max} , T_{mean} , T_{01} et T_p entre le capteur de pression RBR avec correction en utilisant la valeur moyenne de T_p et la bouée Datawell.

Les résultats statistiques sont visibles sur les tableaux 4 et 5. Pour la première correction, on constate pour les hauteurs un biais plutôt faible avec 3.5cm pour les hauteurs significatives et 8.4cm pour les hauteurs maximales. On remarque également que le capteur de pression corrigé surestime en moyenne les hauteurs par rapport à Datawell. Comme mentionné précédemment, les résultats sont assez dispersés avec un coefficient de corrélation autour de 0.8. Pour la seconde correction, comme prévu, les hauteurs sont moins dispersées avec un coefficient de dispersion autour de 0.87. Cependant, les biais sont plus importants avec 8.3cm pour H_s et 15cm pour H_{max} .

Les périodes n'étant pas corrigées, leurs résultats sont similaires pour les deux traitements. Leur correspondance avec les valeurs trouvées par Datawell est faible. Le coefficient de corrélation est autour de 0.26 pour les périodes T_{moy} et 0.29 pour T_{01} , avec un biais relatif autour de 80%. Ce résultat est en accord avec des études précédentes (ANDREWS et al. 2019). Le capteur de pression surestime fortement les périodes de vagues. De plus, on peut constater sur les diagrammes de dispersion figure 17 que les périodes mesurées semblent minorées. On remarque par exemple que pour les périodes de pics T_p , on ne trouve presque aucune période en dessous de 5s, alors qu'on en trouve beaucoup à partir de 5s. Comme présenté précédemment, les vagues sont mesurées à partir du capteur de pression par la perturbation de pression générée par le passage de celle-ci. Cette perturbation se propage de long de la colonne d'eau et est mesurée par le capteur RBR situé au fond de l'eau. Or, durant sa propagation, le signal de pression est particulièrement atténué pour les hautes fréquences. La colonne d'eau agit ainsi comme un filtre passe-bas naturel qui va annuler les composantes hautes fréquences du signal de pression. C'est cette coupure qui explique l'absence de périodes de pic inférieures à 5s. Le capteur de pression n'est pas adapté pour mesurer les périodes de vagues.

	biais absolu	biais relatif	écart maximal	r
H_s	3.5cm	7%	1.4m	0.81
H_{max}	8.4cm	11%	3.0m	0.79
T_{moy}	3.9s	80%	12s	0.26
T_{01}	4.0s	78%	12s	0.29
T_p	2.1s	22%	18s	0.41

TABLE 4 – Comparaison statistique de Datawell et capteur de pression.

	biais absolu	biais relatif	écart maximal	r
H_s	8.3cm	17%	1.0m	0.88
H_{max}	15cm	20%	1.6m	0.87

TABLE 5 – Comparaison statistique de Datawell et capteur de pression en utilisant la valeur moyenne de T_p .

4.5 Comparaison avec l'ADCP

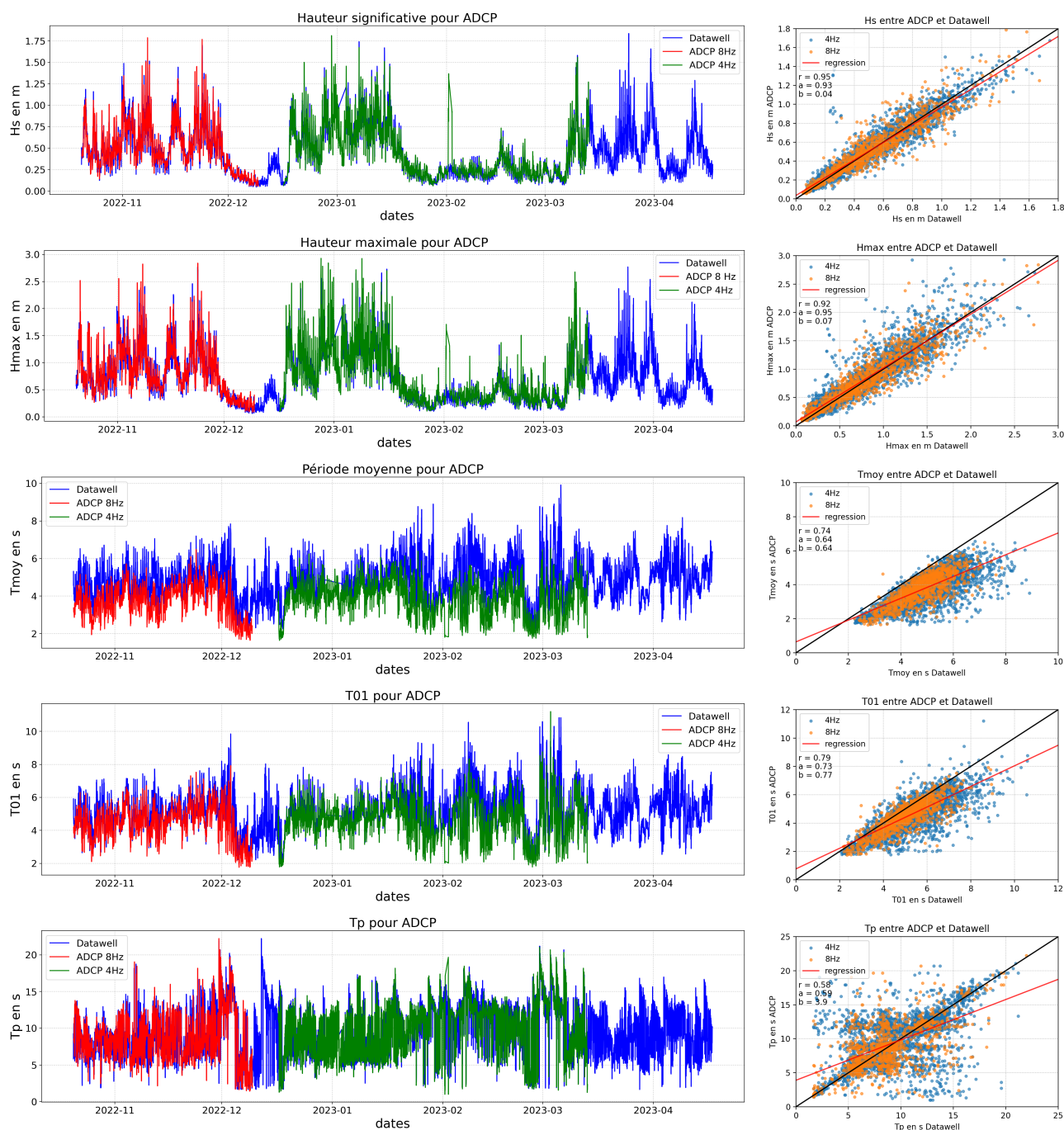


FIGURE 19 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres H_s , H_{max} , T_{mean} , T_{01} et T_p entre l'ADCP et la bouée Datawell.

Enfin, nous allons étudier les résultats obtenus à l'aide de l'ADCP. On rappelle que l'ADCP a été déployé sous deux configurations différentes. La première a une fréquence d'échantillonnage de 8Hz et mesure la houle par séquences de 20 minutes toutes les heures. La seconde a une fréquence d'échantillonnage de 4Hz et mesure des séquences de 20 minutes toutes les 30 minutes.

On remarque sur la figure 19 une très bonne correspondance pour les hauteurs entre l'ADCP et Datawell. Les périodes ont cependant tendance à être sous-estimées par l'ADCP par rapport à la bouée Datawell. La corrélation reste malgré tout bien meilleure que pour les capteurs de pression. On sait que l'ADCP a des fréquences d'échantillonnage de 4Hz et 8Hz, ce qui est très supérieur à la fréquence d'échantillonnage de 1.28Hz de Datawell. L'ADCP est donc susceptible de mesurer des vagues de très faible période. Par conséquent, les périodes moyennes sont plus faibles.

Les résultats sont similaires pour les configurations 4Hz et 8Hz. On note seulement que la configuration 8Hz donne une corrélation légèrement moins bonne pour les hauteurs et légèrement meilleure pour les périodes (de l'ordre de ± 0.03).

Les statistiques pour l'ADCP sont présentées dans le tableau 6. Pour les configurations à 4Hz et 8Hz. On remarque un biais faible et une corrélation forte pour les hauteurs. L'ADCP et la bouée Datawell sont deux instruments de mesure de houle de référence (LANCASTER et al. 2021),(LAWRENCE et al. 2012). Il n'est pas étonnant de constater que leurs résultats ont une forte correspondance pour les hauteurs. Les résultats sont malgré tout moins proches pour les périodes. L'ADCP sous-estime d'environ une seconde les périodes moyennes par rapport à la bouée Datawell. Le tableau nous permet également de comparer les résultats selon la configuration de l'ADCP. On constate qu'augmenter la fréquence d'échantillonnage réduit l'écart de périodes, mais augmente l'écart de hauteur. Il faut cependant prendre en compte qu'il y a environ trois fois plus de points de mesures en configuration 4Hz qu'en configuration 8Hz.

	biais absolu	biais relatif	écart maximal	<i>r</i>
H_s	0.9/6mm	0.18%/1.4%	0.54/1.1m	0.96/0.93
H_{max}	1.9/3.6cm	2.3%/5.2%	1.2/1.6m	0.92/0.91
T_{moy}	-1.1/-1.0s	-23%/-22%	-5.4/-4.0s	0.73/0.79
T₀₁	-0.69/-0.54s	-13%/-11%	-5.1/-4.0s	0.78/0.82
T_p	0.08/-0.02s	0.84%/-0.27%	16/14s	0.57/0.60

TABLE 6 – Comparaison statistique de Datawell et de l'ADCP en configuration 4Hz/8Hz.

4.6 Comparaison Spotter

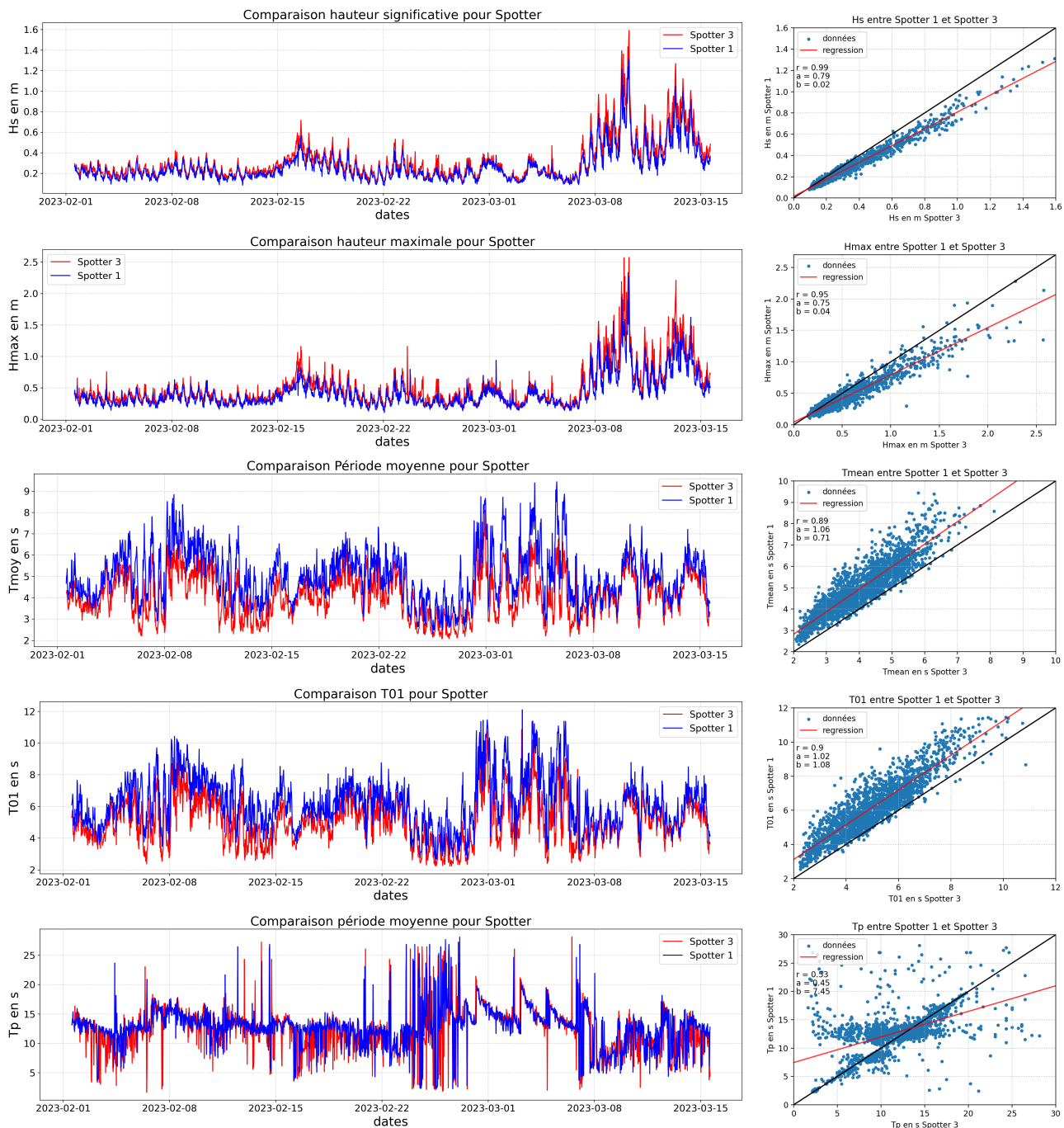


FIGURE 20 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres H_s , H_{max} , T_{mean} , T_{01} et T_p entre les bouées Spotter sur le legs 3.

Nous allons à présent comparer les résultats trouvés pour les deux bouées Spotter. Ces deux bouées sont exactement les mêmes et ont été déployées avec la même configuration. L'objectif de cette inter-comparaison est d'estimer l'impact d'un mouillage élastomère sur la mesure de houle. La bouée Spotter 1 n'a été déployée que durant le legs 3. La comparaison ne portera donc que sur cette période d'une durée d'un mois et demi. Sur la figure 20, on remarque une très forte corrélation entre les hauteurs, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.95. La corrélation entre les périodes est moins importante, mais reste bonne avec une corrélation

autour de 0.9. Cependant, on remarque que le coefficient directeur de la régression linéaire est autour de 0.75 pour les hauteurs. La bouée Spotter 1 a tendance à atténuer les hauteurs, et ce phénomène augmente avec la taille des vagues. De plus, le coefficient directeur pour les périodes est proche de 1 mais il y a une ordonnée à l'origine de 0.71 et 1.08 respectivement pour T_{moy} et T_{01} . Cela signifie que la bouée Spotter 1 surestime de façon relativement constante des périodes mesurées par rapport à Spotter 3.

On sait que la bouée Spotter 1, utilisant une ligne de mouillage en élastomère, sous-estime les hauteurs et surestime les périodes par rapport à Spotter 3. Cette différence peut être une conséquence de la ligne de mouillage. On sait que la ligne de mouillage sert à retenir la bouée tout en s'adaptant à la marée. Avec un mouillage élastomère, on peut penser qu'à marée haute, la ligne étant tendue, les vagues seront plus amorties. De plus, on a constaté (figure 20) que les hauteurs sont d'autant plus sous-estimées qu'elles sont importantes. Or, on sait également (figure 13), que les plus hautes vagues se trouvent à marée haute. Par conséquent, on peut supposer que l'écart entre les valeurs de hauteurs trouvées par les deux bouées Spotter sera plus important à marée haute qu'à marée basse. Pour étudier cet impact, on calcule la hauteur moyenne de l'eau durant le déploiement de la bouée Spotter 1. Toutes les séquences pour lesquelles la hauteur d'eau moyenne est supérieure à ce niveau de référence sont considérées comme à marée haute. Toutes les autres sont considérées à marée basse. On calcule ainsi les biais des différents paramètres à marée haute et à marée basse, en prenant la bouée Spotter 3 comme référence. On trouve alors pour la hauteur significative un biais de -4.7cm à marée haute et -4.9 cm à marée basse. De même pour la hauteur maximale, on trouve un biais de 7.9cm à marée haute et de 8.4cm à marée basse. On constate le même phénomène pour les périodes. Par conséquent, la marée n'a pas d'impact sur la précision de la mesure de vague pour les deux bouées. On peut constater que la distribution des valeurs à marée haute et marée basse semble la même sur la figure 21.

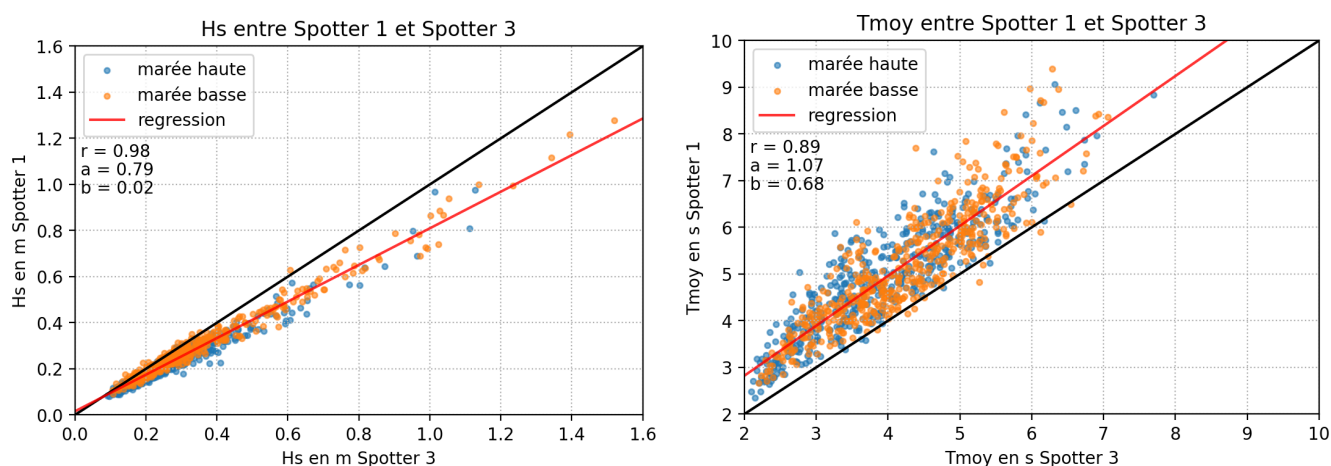


FIGURE 21 – Diagramme de dispersion des hauteurs significatives et périodes moyennes entre les bouées Spotter 1 et Spotter 3 à marée haute et marée basse.

Cependant, on remarque malgré tout des différences entre les mesures des deux bouées, comme on peut voir sur le tableau 7 qui résume la comparaison statistique des bouées sur l'ensemble du déploiement de Spotter 1, indépendamment de la marée, il y a un biais de 5 cm pour les hauteurs significatives et 8.4 cm pour les hauteurs maximales sur l'ensemble du déploiement. Pour les périodes, il y a un biais de 0.93s pour T_{moy} et 1.25 pour T_{01} . La bouée Spotter 1 étant située plus proche de la côte, les vagues mesurées peuvent être différentes.

Les résultats directionnels des deux bouées sont quant à eux très différents. En effet, sur la figure 22, on constate que la bouée Spotter 3, et comme vu précédemment la bouée Datawell, mesure des directions de vagues provenant du Sud, légèrement orientée Ouest. On constate ici que la bouée Spotter trouve des directions venant du Sud-Est. Le résultat de la bouée Spotter 1 est en désaccord avec les autres bouées. Cependant,

	biais absolu	biais relatif	écart maximal	r
H_S	-5.0cm	-16%	-33cm	0.99
H_{max}	-8.4cm	-17%	-1.2m	0.95
T_{moy}	0.93s	23%	3.6s	0.89
T_{01}	1.2s	23%	4.3s	0.9
T_p	0.82s	6%	25s	0.53

TABLE 7 – Comparaison statistique de Spotter 1 et Spotter 3. Les valeurs de Spotter 3 sont prises comme référence.

il n'est pas incohérent avec les conditions du site. La plage de Sainte-Anne du Portzic est orientée Sud-Est. Il est donc possible que des vagues proviennent de cette direction. De plus, on remarque figure ?? que la bouée Spotter 1 est déployée plus proche de la berge. Les autres capteurs sont déployés au niveau de la fin de la digue. La bouée Spotter 1 se situe au centre du site. Par conséquent, les vagues que la bouée rencontre ont peut-être été modifiées par la digue et la réfraction sur le fond de mer, sachant que les vagues remontent le gradient de bathymétrie. On note cependant que l'étalement directionnel est assez similaire entre les deux bouées. Il est plus important que pour la bouée Datawell. Ici, les différences de résultats ne sont pas uniquement liées à la différence de ligne de mouillage.

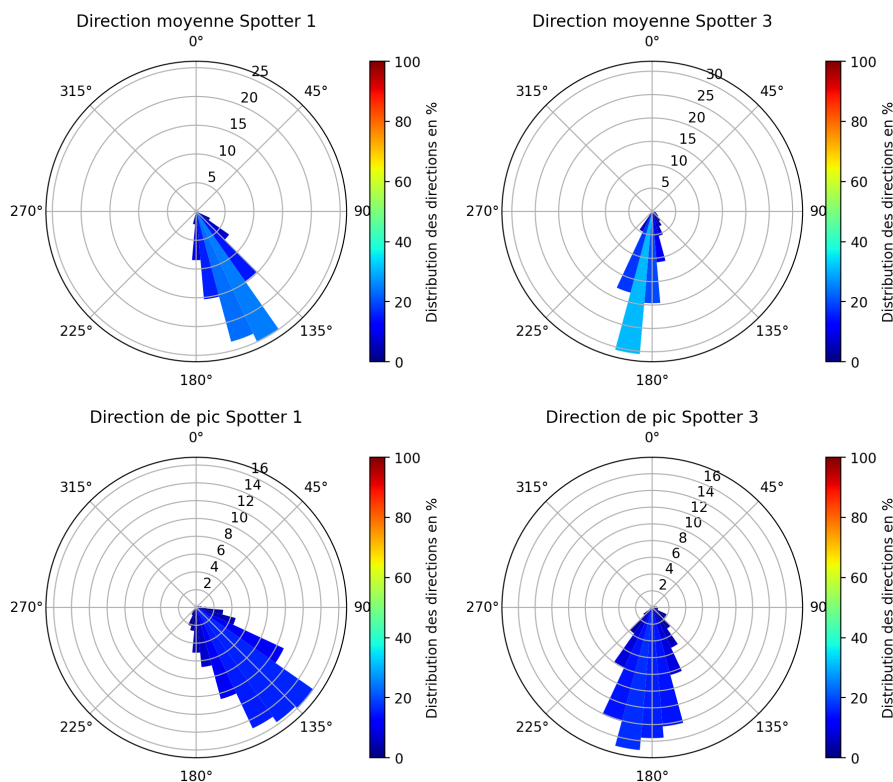


FIGURE 22 – Diagrammes de répartition des directions moyennes et de pic des bouées Spotter en % sur le legs 3.

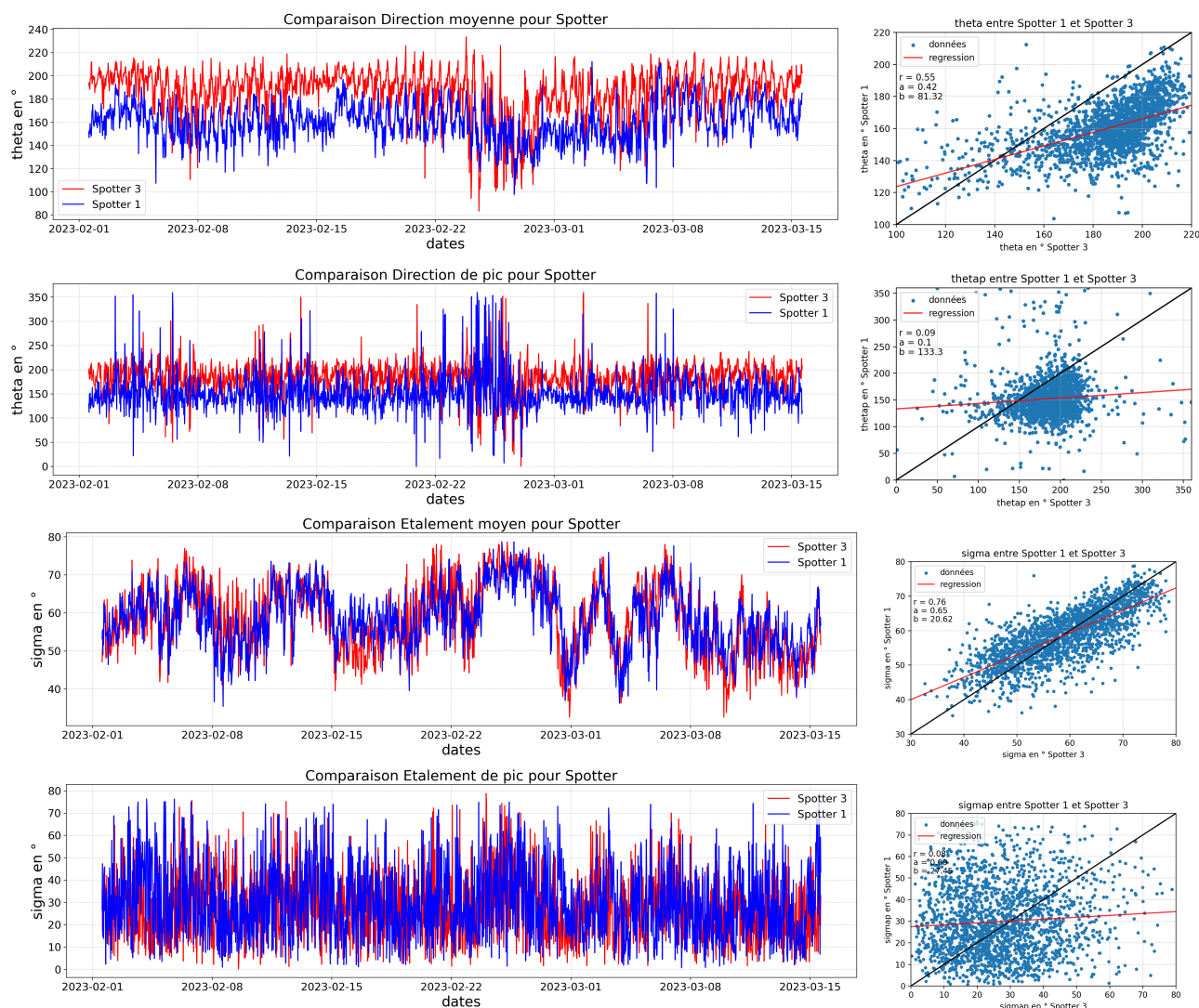


FIGURE 23 – Comparaison séries temporelles des résultats obtenus pour les paramètres directionnels θ_m , θ_p , σ_m et σ_p des bouées Spotter.

4.7 Analyse du spectre

Un moyen de comparer le comportement des différents capteurs durant la campagne est de comparer leur spectre. Nous allons à présent étudier le spectre de déplacement vertical S_{ZZ} . L'étude de ce spectre permet d'observer la réponse en fréquence des différents capteurs stimulés par le même groupe de vagues. Il permet donc de caractériser les mesures des différents équipements de mesure de houle.

Pour étudier la réaction de chacun des instruments de mesure aux vagues, on trace leur spectre S_{ZZ} pour une même séquence de 30 minutes sans appliquer de filtre de Butterworth. Par soucis de visibilité, on a tracé ici les spectres calculés à partir de la méthode de Welch, en prenant des segments de 1024 points. On obtient le résultat de la figure 24 ci-dessous :

On peut faire plusieurs remarques sur ce spectre. Premièrement, les différents spectres ne sont pas définis sur les mêmes domaines. En effet, leur domaine de définition dépend de leur fréquence d'échantillonnage f_s . Les spectres sont calculés pour les fréquences $f \in [0; f_s/2]$. On constate notamment que l'ADCP possède le plus grand domaine de définition, car il a la fréquence d'échantillonnage la plus élevée. Pour cette séquence, il était en configuration $f_s=4\text{Hz}$. On constate de plus que tous les spectres ont globalement la même allure, c'est-à-dire une très forte croissance jusqu'à $f=0.1\text{Hz}$, une forte amplitude entre 0.1Hz et 0.25Hz , puis une décroissance vers

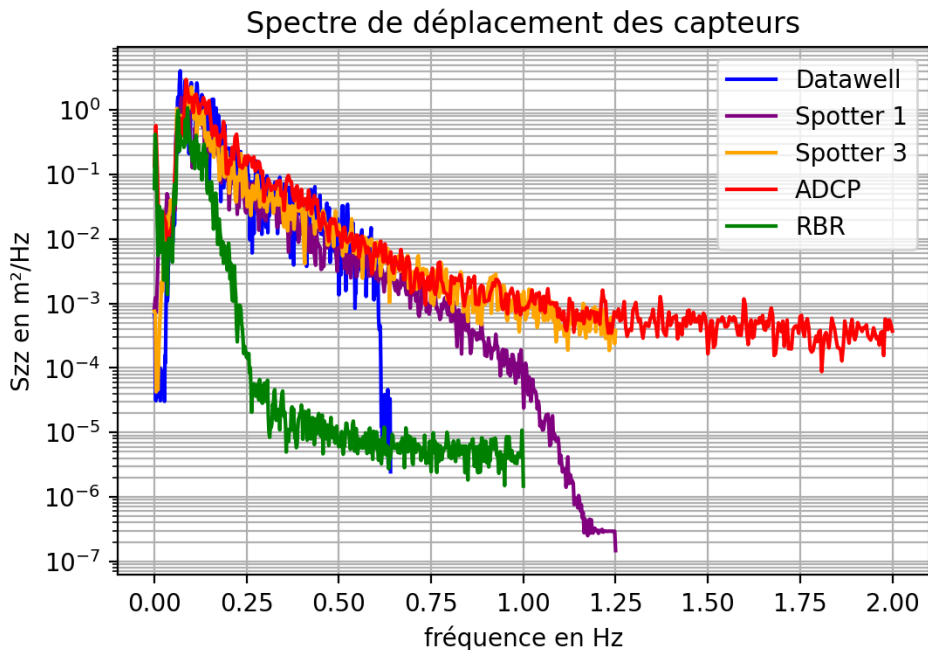


FIGURE 24 – Densité spectrale d'énergie de tous les capteurs étudiés calculé à partir du déplacement vertical mesuré sur une séquence de 30 minutes.

les hautes fréquences. Il y a malgré tout des différences notables entre les spectres.

On peut notamment remarquer une divergence à hautes fréquences entre les bouées Spotter. Le spectre haute fréquence de la bouée Spotter 3, utilisant un mouillage classique, reste proche de celui de l'ADCP, alors que celui de la bouée Spotter 1 s'atténue fortement. Les hautes fréquences de la bouée Spotter 1 sont coupées. On peut alors évidemment mettre ce résultat en parallèle avec celui de la figure 20, où l'on constatait une surestimation des périodes par la bouée Spotter 1 par rapport à la bouée Spotter 3. Une atténuation des hautes fréquences mène effectivement à surestimer les périodes moyennes. On peut imaginer que la ligne de mouillage élastomère agisse comme un filtre passe bas. On remarque également que l'amplitude de la bouée Spotter 1 est légèrement plus faible que les autres capteurs. Cela peut également expliquer la sous-estimation des hauteurs. On note cependant que la bouée Spotter 3 a un spectre proche de celui de l'ADCP, même en haute fréquence. La bouée Spotter est donc capable de mesurer les vagues aussi bien que l'ADCP.

On remarque également que le spectre du capteur de pression chute très fortement à partir de 0.2Hz. On sait que cette forte atténuation est due à un phénomène physique naturel. Cependant, cela pose problème pour identifier les périodes de vagues. On a effectivement constaté figure 17, une proportion des capteurs de pression à surestimer les périodes.

Pour la plupart des séquences, les spectres des différents capteurs ont la même allure que ceux de la figure 24. Cependant, lors de l'étude des bouées Spotter, en comparaison avec la bouée Datawell, on a constaté des périodes pour lesquelles les paramètres spectraux avaient une allure différente. Les paramètres directionnels avaient un étalement plus important et les périodes de pics des bouées Spotter alternaient entre de très grandes et très faibles valeurs. Ces périodes sont visibles sur les figures 20 et 23, notamment pendant la première moitié du mois de décembre et la dernière semaine du mois de février. Durant ces périodes, on y observe le spectre visible figure 25 :

On constate que le spectre n'a pas la même allure. Ici, on constate tout d'abord un premier maximal d'amplitude à plus basses fréquences pour les bouées Spotter. Précédemment, ce maximal était entre 0.1Hz et 0.25Hz. Pour ce nouveau spectre, il est vers 0.05Hz pour les deux bouées Spotter et vers 0.1Hz pour les autres capteurs. Cette distinction des maxima d'amplitude est une première différence par rapport au spectre précédent. De plus, il y a un deuxième maximum local pour tous les instruments. Il se trouve aux alentours de 0.35Hz. La présence de ces deux maxima pour tous les spectres est à l'origine de la forte variation de périodes de pics

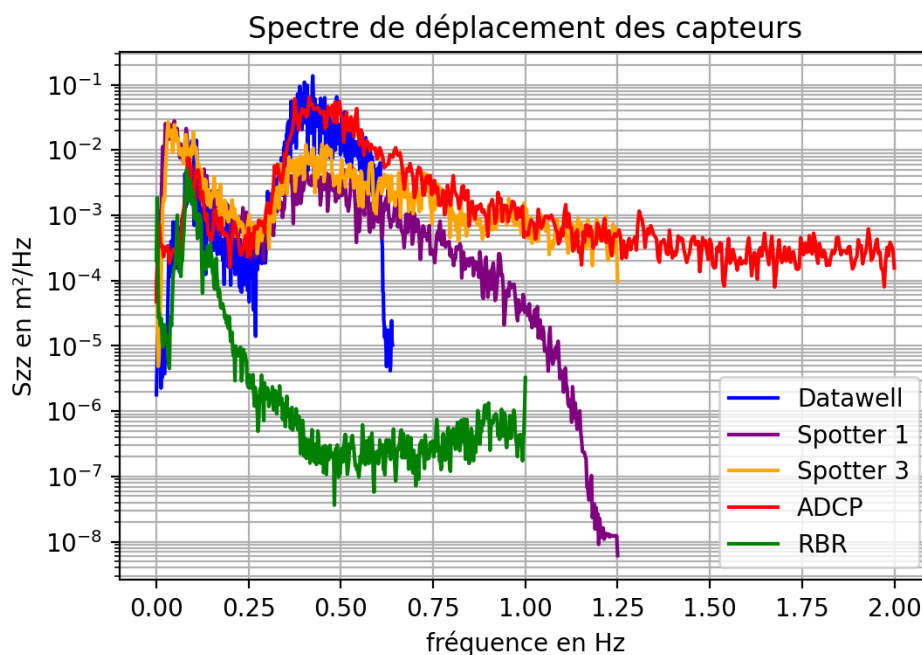


FIGURE 25 – Spectre des bouées sur une séquence de la dernière semaine de février. Le pic d'amplitude est en haute fréquence.

mesurées par les bouées Spotter. Le maximal d'amplitude est atteint lors du pic basses fréquences ou hautes fréquences selon les échantillons, ce qui induit une forte variation des périodes de pics. On remarque que durant les périodes concernées, tous les capteurs voient leurs périodes de pics varier beaucoup. Pour tous les spectres, le maximum global d'amplitude peut passer d'un pic à l'autre, donnant souvent des périodes de pic très faibles (de l'ordre de 3s). Cependant, pour tous les capteurs sauf les bouées Spotter, les périodes de pics ne montent généralement pas au-dessus de 15s alors que les bouées Spotter mesurent des périodes allant jusqu'à 30s. Cela signifie que le pic d'amplitude des bouées Spotter peut se trouver en plus basses fréquences, comme sur la figure 25.

Etant donné que les deux pics sont présents sur tous les spectres, on peut en déduire qu'il s'agit d'un phénomène climatique et non d'un problème de mesure d'un instrument. On remarque sur les séries temporelles figure 14 que ces fortes variations de période de pics, correspondant à des spectres à double pic, correspondent à des périodes de petites vagues. De plus, on remarque que sur la figure 24, correspondant à des vagues de $H_s=1m$, le pic d'amplitude des spectres est supérieur à 1 et pour une fréquence de 0.1Hz. Sur la figure 25, le pic autour de 0.1Hz a une amplitude d'environ 10^{-2} , et donc bien plus faible. De plus, dans les deux cas, pour une fréquence autour de 0.35Hz, les spectres ont une amplitude entre 10^{-2} et 10^{-1} . Or, on sait que les états de mer sont généralement caractérisés par deux régimes, la houle et la mer du vent (ARDHUIN et al. 2018). La houle correspond à des vagues de basse fréquence, alors que la mer du vent correspond à des vagues de plus haute fréquence. On peut alors considérer que dans les deux configurations, la mer du vent est d'intensité similaire, ce qui explique les valeurs proches des deux spectres autour de 0.35Hz, alors que la houle est forte sur la figure 24 et faible sur la figure 25. Les variations entre des fortes et faibles périodes de pics correspondent à des variations de prédominance des régimes de houle et de mer du vent.

5 Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence des différences entre plusieurs capteurs de mesure de houle. Tout d'abord, on note des différences pratiques en termes de déploiement et de logistique. L'instrument le plus encombrant est la bouée Datawell pesant 90kg et nécessitant un corps-mort de 300kg et des changements de batteries réguliers. Le capteur le plus simple d'utilisation est la bouée Spotter, car elle est autonome en énergie et légère.

Ensuite, on a pu observer l'impact de la marée sur les vagues. Le facteur le plus important est le courant de marée qui impacte fortement la taille et les périodes de vagues. Cependant, la caractérisation précise des interactions courant-vague est très complexe et nécessiterai une carte précise des courants du site de Sainte-Anne du Portzic.

Ensuite, en comparant les paramètres de vagues obtenus par les différents capteurs, on constate que les hauteurs sont très proches. Même après correction, le capteur de pression reste l'instrument le moins précis, avec une corrélation autour de 0.8 et un biais de 10%. On trouve une correspondance plus faible pour les périodes entre les différents capteurs. Une des raisons permettant d'expliquer ces écarts est la différence de fréquence d'échantillonnage. Les capteurs n'ont pas tous la même gamme de mesure de périodes ce qui impacte fortement les périodes moyennes calculées. L'ADCP possède la gamme la plus large. En théorie, la bouée Datawell devrait avoir la gamme la plus faible car elle a la fréquence d'échantillonnage la plus faible. Cependant, on a constaté que le signal de pression mesuré par les RBR atténuait fortement les hautes fréquences. Il peut donc mesurer une gamme de fréquence assez faible. Ces différences de fréquence d'échantillonnage ont également un impact sur les périodes de pics car la résolution fréquentielle du spectre dépend directement de la fréquence d'échantillonnage. Les périodes de pics trouvées par les capteurs sont donc très dispersées.

On a également comparé deux bouées Spotter pour caractériser l'impact du mouillage sur leurs mesures. On constate que la Spotter utilisant un mouillage avec un élastomère tend à sous-estimer les vagues et à surestimer les périodes. Cette différence est indépendante de la hauteur d'eau et donc de la tension de l'élastomère. De plus, on constate une différence notable des directions de vagues. Cet écart peut être une conséquence de la position de la bouée Spotter 1, plus proche de la berge. On a également constaté sur les spectres que le mouillage élastomère amorti les hautes fréquences.

Références

blx@hook@bibinit

- AIRY, G. B. (1845). *Tides and waves*. B. Fellowes.
- ANDREWS, E. et L. PEACH (2019). *Wave monitoring equipment comparison : An evaluation of current and emerging in-situ ocean wave monitoring technology*. Department of Environment et Science.
- ARDHUIN, F. et A. ORFILA (2018). "Wind waves". In : *New Frontiers in Operational Oceanography*, p. 393-422.
- CAVALERI, L (1980). "Wave measurement using pressure transducer". In : *Oceanologica Acta* 3.3, p. 339-346.
- COLINE, P. (2019). "STAGE DE FIN D'ETUDES". fr. In.
- D'AGOSTINO, R. B., A. BELANGER et R. B. D'AGOSTINO JR (1990). "A suggestion for using powerful and informative tests of normality". In : *The American Statistician* 44.4, p. 316-321.
- DATAWELL, B. (2006). "Datawell waverider reference manual". In : *Datawell BV, Zumerlustraart 4*, p. 2012.
- DINGEMANS, M. W. (1997). *Water wave propagation over uneven bottoms*. Advanced series on ocean engineering v. 13. River Edge, NJ : World Scientific Pub.
- FICHAUT, B. et S. SUANEZ (2008). "Le rechargement de la plage de Sainte-Anne-du-Portzic (Brest-Finistère) : quand la recherche fondamentale se met au service d'une gestion cohérente du littoral". In : *Norois* 208, p. 29-44.
- GROUP, C. A. W. et al. (2005). *Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves*. OCLC : 439941878.
- HERBERS, T. H. C., P. F. JESSEN, T. T. JANSSEN, D. B. COLBERT et J. H. MACMAHAN (juill. 2012). "Observing Ocean Surface Waves with GPS-Tracked Buoys". en. In : *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 29.7, p. 944-959. DOI : [10.1175/JTECH-D-11-00128.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00128.1).
- HOLTHUIJSEN, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- KERGADALLAN, X. et I. Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les RISQUES la mobilité et l'aménagement (2022). "Comparaison de bouées de mesure de houle - SofarOcean Spotter versus Datawell MKIII". français. In : sous la dir. de F. A. S. LE BERRE Ronan; HEDOU, 46 p. URL : <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/590824/comparaison-de-bouees-de-mesure-de-houle-sofarocean-spotter-versus-datawell-mkiii> (visité le 09/08/2023).
- LANCASTER, O., R. COSSU, S. BOULAY, S. HUNTER et T. E. BALDOCK (2021). "Comparative wave measurements at a wave energy site with a recently developed low-cost wave buoy (Spotter), ADCP, and pressure loggers". In : *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 38.5, p. 1019-1033.
- LAWRENCE, J, B HOLMES, I BRYDEN, D MAGAGNA, Y TORRE-ENCISO, J. ROUSSET, H SMITH, M PAUL, L MARGHERITINI et J CÂNDIDO (2012). "D2. 1 wave instrumentation database". In : *Work Package 2*.
- LONG, R. B. (juin 1980). "The Statistical Evaluation of Directional Spectrum Estimates Derived from Pitch/Roll Buoy Data". en. In : *Journal of Physical Oceanography* 10.6, p. 944-952. DOI : [10.1175/1520-0485\(1980\)010<0944:TSEODS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0944:TSEODS>2.0.CO;2).
- MAISONDIEU, C. et M. TRASCH (2022). "Les défis de l'innovation dans le domaine des énergies marines renouvelables". In : *The Conversation*.
- NORTEK, A. (2017). *Signature Principles of Operation*. Rapp. tech. Technical Report.
- PLESKACHEVSKY, A., D. P. EPEL et H. KAPITZA (2009). "Interaction of waves, currents and tides, and wave-energy impact on the beach area of Sylt Island". In : *Ocean Dynamics* 59, p. 451-461.
- RAGHUKUMAR, K., G. CHANG, F. SPADA, C. JONES, T. JANSSEN et A. GANS (juin 2019). "Performance Characteristics of "Spotter", a Newly Developed Real-Time Wave Measurement Buoy". en. In : *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 36.6, p. 1127-1141. DOI : [10.1175/JTECH-D-18-0151.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0151.1).

RIMMELIN-MAURY, P., S. L'HELGUEN, M. RÉPÉCAUD, L. QUÉMÉNER, L. BEAUMONT, E. GROSSTEFFAN, A. JOLIVET, L. CHAUVAUD, P. TRÉGUER et Y. BOZEC (2016). "MAREL-Iroise/SOMLIT-Brest : Un outil à "fonctions-multiples", pour l'observation des eaux côtières". In : *Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier*. Sous la dir. de L. A. SCHMITT FRANÇOIS G. CNRS Editions, p. 31 -39. URL : <https://hal.science/hal-02569957>.

SHCHERBINA, A. Y., D. L. RUDNICK et L. D. TALLEY (2005). "Ice-draft profiling from bottom-mounted ADCP data". In : *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22.8, p. 1249-1266.

SPOTTER (2022). *Spotter Technical Reference Manual*. Sofar Ocean Technologies : San Francisco, CA, USA.

TRÄSCH, M, N RAILLARD, V PERIER, M LE BOULLUEC, M RÉPÉCAUD et C MATOUG (2022). "Metocean conditions at the Ifremer in situ test site in Brest". In : *Trends in Renewable Energies Offshore : Proceedings of the 5th International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2022, Lisbon, Portugal, 8–10 November 2022)*. CRC Press, p. 77.

VENUGOPAL, V., T. DAVEY, H. SMITH, G. SMITH, B. HOLMES, S. BARRETT, M. PREVOSTO, C. MAISONDIEU, L. CAVALIERI, L. BERTOTTI et al. (2011). "EquiMar. Deliverable D2. 2. Wave and tidal resource characterisation". In.

WOLF, J et D PRANDLE (1999). "Some observations of wave-current interaction". In : *Coastal Engineering* 37.3-4, p. 471-485.

YOU, Z.-J. (avr. 2008). "A close approximation of wave dispersion relation for direct calculation of wavelength in any coastal water depth". en. In : *Applied Ocean Research* 30.2, p. 113-119. DOI : [10.1016/j.apor.2008.08.001](https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.08.001).

YPMA, T. J. (1995). "Historical development of the Newton-Raphson method". In : *SIAM review* 37.4, p. 531-551.

Spotter Specifications Sheet (s. d.). Sofar Ocean. Sofar Ocean Technologies : San Francisco, CA, USA.