

ENSTA BRETAGNE

2, rue François Verny  
29806 BREST cedex  
FRANCE

Tel +33 (0)2 98 34 88 00

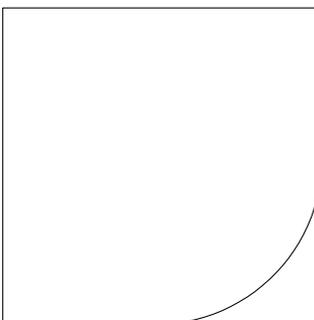
[www.ensta-bretagne.fr](http://www.ensta-bretagne.fr)



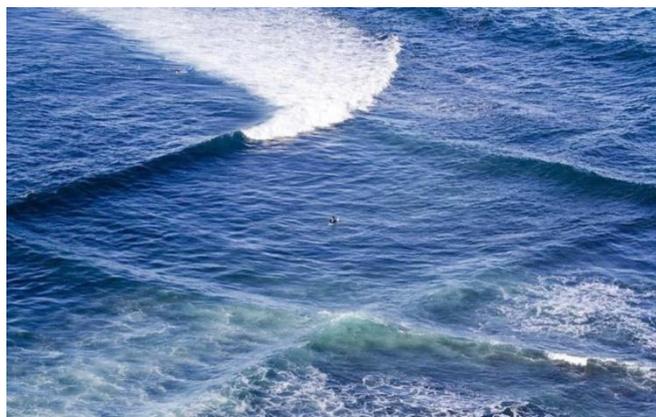
Projet de Fin  
d'Etudes

HYO 2023

25 juillet 2023



## Interactions vagues-courant en Méditerranée



Thomas ROUET

[thomas.rouet@ensta-bretagne.org](mailto:thomas.rouet@ensta-bretagne.org)

---

## Résumé

Le courant de surface influence l'état de mer en général, que ce soient les amplitudes, directions et fréquences des vagues dominantes ou des vagues plus courtes qui constituent la rugosité du plan d'eau. Cette étude s'intéresse à l'impact du courant sur les états de mer en Méditerranée, le but du présent travail est de caractériser cet impact. Pour cela, on utilise différentes sources de données, telles que des mesures in situ dédiées obtenues avec des bouées SPOTTER et un ADCP, et des données préliminaires du satellite SWOT. Par ailleurs, un radar de navigation (bande X) permet de faire des mesures d'opportunité. On utilise aussi des simulations de l'état de mer réalisées avec le code de calcul WAVEWATCH III. L'acquisition de données in situ en Méditerranée s'inscrit dans la mission CalVal, qui a pour but de calibrer et valider les données du satellite SWOT. En particulier, la connaissance de l'état de mer servira aux interprétations des mesures de l'instrument KaRIN embarqué sur le satellite SWOT, et à la validation des algorithmes de mesure du niveau d'eau et de la hauteur des vagues.

## Abstract

Ocean surface currents influence sea state in general, including amplitudes, directions and frequencies of the dominant waves or the shorter waves that make up the sea surface. This study focuses on the impact of currents on sea states in the Mediterranean sea, with the aim of characterising this impact. Various data sources are used, such as dedicated in situ measurements obtained with SPOTTER buoys and an ADCP, and preliminary data from the SWOT satellite. In addition, an X-band navigation radar is used for opportunity measurements. Sea-state simulations using the WAVEWATCH III model are also used to guide the interpretation of data. The acquisition of in situ data in the Mediterranean is part of the CalVal mission, which aims to calibrate and validate the SWOT satellite data. In particular, knowledge of the sea state will be used to interpret measurements from the KaRIN instrument on board the SWOT satellite, and to validate algorithms for measuring water level and wave height.

## Mots clés

Houle, courants, Méditerranée, SWOT, bouées, radar bande X, WAVEWATCH III, simulations, CalVal.

## Keywords

Sea state, ocean surface currents, Mediterranean, SWOT, buoys, X-band radar, WAVEWATCH III, simulations, CalVal

## Remerciements

Je voudrais d'abord remercier mon tuteur Fabrice Ardhuin pour ce stage passionnant. Merci pour sa bienveillance, sa patience, sa pédagogie, et son implication. Je voudrai également remercier mon cotuteur Pierre Garreau pour son accompagnement pendant la campagne C-SWOT et pendant ma période au LOPS.

Merci au CNRS de m'avoir financé cette expérience enrichissante et à l'Ifremer pour l'accueil dans ses locaux. Merci également à toutes les personnes que j'ai eu la chance de rencontrer au cours du stage à SIAM et au LOPS, merci pour votre aide et pour l'ambiance de travail stimulante.

---

## Table des matières

Introduction.....	4
Eléments de description des états de mer .....	5
Méthodes.....	9
1. Données in situ .....	9
1.1. Contexte des acquisitions.....	9
1.2. Bouées SPOTTER.....	9
1.3. Radar bande X.....	10
1.4. ADCP.....	11
1.5. Données satellites.....	12
2. Simulations du bassin Nord méditerranéen .....	13
2.1. Modèles de courant.....	13
2.2. Modèle de houle .....	13
Analyses et interprétations .....	14
3. Résultats .....	14
3.1. Signatures du courant dans les simulations et mesures ADCP.....	14
3.1.1. Modèle avec courants « MENOR ».....	14
3.1.2. Modèle avec courants « SWOT ».....	15
3.1.3. Comparaison courants simulés et mesurés.....	16
3.2. Acquisitions des bouées SPOTTER .....	17
3.2.1. Acquisitions en avril.....	17
3.2.2. Acquisitions en mai.....	19
3.3. Exploration des données radar bande X.....	20
3.3.1. Mosaiques de puissance rétrodiffusée.....	20
3.3.2. Courants WAVEX.....	25
4. Discussions .....	27
Conclusions .....	28
Bibliographie.....	29

---

## Introduction

A San Pedro en 2002, Walter Munk témoigne à la commission des états unis sur la politique des océans à propos de l'océanographie : « la plupart du siècle passé peut être appelé un siècle de sous-échantillonnage » (Munk, 2002). L'océanographe souligne la révolution des données satellites pour la compréhension des dynamiques océaniques ; ils permettent des mesures beaucoup plus globales des océans, avec une résolution spatiale de l'ordre de 200 km et une résolution temporelle de l'ordre de 28 jours (Ballarotta et al., 2019). 20 ans plus tard, en décembre 2022, le satellite SWOT est lancé. Il est équipé d'un radar de type nouveau pour l'océanographie : un radar à synthèse d'ouverture (SAR) interférométrique qui mesure le niveau de la mer par la différence de phase des ondes rétrodiffusées reçues par deux antennes de réception séparées de 10 m, et la hauteur des vagues par la décorrélation entre les images SAR formées par les chacune des deux antennes de réception : SWOT est capable de produire des images de hauteur de mer et hauteur des vagues sur une fauchée de 110 km de large, avec une résolution de l'ordre de quelques kilomètres, qui reste à définir mais est fonction du bruit de mesure : il s'agit donc d'un saut important dans l'échantillonnage spatial des mesures. La deuxième révolution amenée par SWOT est le choix d'une orbite de calibration avec une répétitivité proche de 24h entre décembre 2022 et juillet 2023. Une telle résolution spatiale et temporelle n'a jamais été atteinte auparavant (Morrow et al., 2019), et ne sera pas répétée avant longtemps (la phase en cours de la mission SWOT a une répétitivité de 21 jours).

La phase de validation des données de SWOT est en cours : il s'agit de déterminer les incertitudes sur les mesures. Comme pour l'altimétrie classique, on peut s'attendre à ce que l'erreur principale dans la mesure du niveau de la mer vienne de la méconnaissance du biais d'état de mer (Minster et al. 1992) qui vient du fait que le niveau moyen des échos radar de la surface océanique est déplacé vers le bas d'environ 3% de la hauteur significative des vagues. Par ailleurs, le traitement complexe des images SAR peut introduire des biais associés à la corrélation entre le champ de vagues et la hauteur dynamique, via le champ de courant. Il est donc important de connaître la variabilité spatiale de l'état de mer à l'échelle de la mesure de la hauteur dynamique, avec une limitation possible par la présence de groupes de vagues (De Carlo et al., 2023). Entre l'échelle des groupes (quelques kilomètres) et 200 km, la variabilité spatiale de l'état de mer semble dominée par l'effet des courants (Ardhuin et al., 2017). Il est donc essentiel de caractériser les interactions vagues-courant pour valider les mesures SWOT

Les courants influencent la houle ; ces derniers peuvent la disperser, la concentrer, l'atténuer, modifier sa fréquence... Les courants peuvent également influencer l'état de mer à plus petite échelle : ils peuvent changer la rugosité du plan d'eau, ce qui les rend détectables avec des observations régulières de la surface de la mer. Les interactions entre les courants et la houle ont des échelles diverses, et peuvent créer des phénomènes remarquables, par exemple au large de l'Afrique du Sud, où l'on peut observer des anomalies de hauteurs significatives de plusieurs mètres dans le courant des Aiguilles (Marechal & Ardhuin, 2021).

CalVal est une mission qui a pour objectif de calibrer et valider les données du satellite, en comparaison avec des données in situ issues de zones particulières, au-dessus desquelles le satellite passe tous les jours, pendant la mission. Une des zones retenues est la méditerranée, et particulièrement la zone entre le courant Nord Baléares et le courant Nord, qui longe la partie française des côtes méditerranéennes. La Méditerranée est une zone particulièrement complexe pour appréhender la houle et ses mécanismes ; dans le bassin que l'on étudie, la houle est principalement de la houle créée sur de faibles distances, par des coups de vents brusques de l'ordre de quelques jours maximum. Les houles se croisent et se mêlent aux courants environnants.

La question qui émerge est : peut-on observer la signature des courants sur la houle en méditerranée ? On se basera sur des mesures in situ, des données satellites, et trois simulations WAVEWATCH III. On tente d'observer la signature de courants sur des variations d'amplitude de houle avec la hauteur significative, de variations de direction et de période et avec les spectres de houle.

# Eléments de description des états de mer

Avant de commencer la présentation des méthodes et des résultats, on établit ici des connaissances sur la zone étudiée et sur les grandeurs employées.

## Rappels sur la théorie des vagues et sur les interactions houle – courant

L'état de mer peut être représenté par une superposition d'ondes de gravité de surface avec des phases aléatoires. Ces ondes sont générées par le vent et sont fortement influencées par les courants sur une grande gamme d'échelles. Les périodes des ondes de gravité de surface sont de 1 à 25s. La force du vent, la durée et la distance sur lesquelles le vent souffle sont des paramètres importants pour comprendre les caractéristiques d'une houle. Le fetch désigne la distance sur laquelle le vent souffle, en mètres ou kilomètres. Pour quantifier la force du vent, on utilise la vitesse du vent, en mètres par seconde. Les grandeurs caractéristiques que l'on utilisera pour décrire la houle sont toutes basées sur des intégrations de la variance de l'élévation de la surface, aussi appelée énergie. Cette dernière dépend de la direction et de la fréquence.

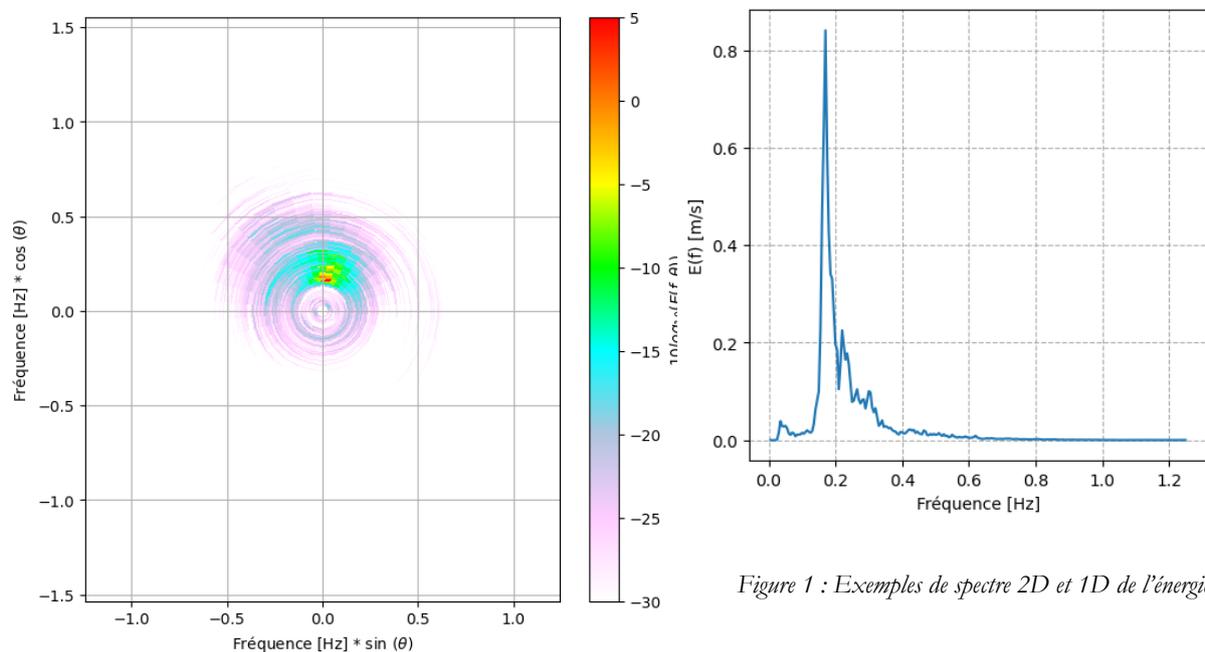


Figure 1 : Exemples de spectre 2D et 1D de l'énergie.

Le spectre 2D consiste simplement en un tracé de l'énergie en fonction de la direction et des fréquences. Pour obtenir le spectre 1D, on intègre l'énergie sur toutes les directions, pour n'obtenir qu'une dépendance en fonction de la fréquence. Une mesure par une bouée ancrée utilise généralement la fréquence absolue  $f = \omega/2\pi$ , alors qu'une bouée dérivante mesure la fréquence relative  $f_r = \sigma/2\pi$  dans le référentiel en déplacement avec le courant de surface, avec la relation de dispersion :

$$\sigma^2 = gk \tanh(kD) \quad (1)$$

Avec  $g$  la gravité apparente,  $\mathbf{k}$  le vecteur du nombre d'onde avec  $k$  sa norme et  $D$  la profondeur d'eau.

L'influence du courant sur la fréquence absolue d'une onde monochromatique plane, est donnée par un décalage Doppler avec un vecteur courant effectif  $\mathbf{U}$  qui est le profil de courant pondéré par le profil de la dérive de Stokes (Stewart et Joy, 1974). Dans le cas d'un cisaillement linéaire, le courant effectif est le courant à la profondeur  $1/(2k)$ , et dépend de la longueur d'onde des vagues (Maréchal, 2022).

$$\omega = \pm \sqrt{gk \tanh(kD)} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} \quad (2)$$

L'évolution du spectre des vagues est régie par les équations ci-dessous (Komen et al., 1994).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \dot{\phi} N}{\partial \phi} + \frac{\partial \dot{\lambda} N}{\partial \lambda} + \frac{\partial \dot{k} N}{\partial k} + \frac{\partial \dot{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

$$N(k, \theta, \phi, \lambda, t) = \frac{E(k, \theta, \phi, \lambda, t)}{\sigma} \quad (4)$$

$$\dot{\phi} = \frac{C_g \cos(\theta) + \hat{v}}{R} \quad (5)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{C_g \sin(\theta) + \hat{u}}{R \cos(\phi)} \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = \frac{C_g \sin(\theta) \tan(\phi)}{R} + \sin(\theta) \frac{\partial \omega}{\partial \phi} - \frac{\cos(\theta)}{\cos(\phi)} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \frac{1}{kR} \quad (7)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial D} \frac{\mathbf{k}}{k} \cdot \nabla D - \mathbf{k} \cdot \nabla \hat{u} \quad (8)$$

Avec  $E$  l'énergie de la houle, qui dépend (dans l'ordre des variables de l'expression) du nombre d'ondes, de la direction de propagation, de la longitude, de la latitude et du temps.  $C_g$  est la vitesse de groupe relative, elle correspond à la vitesse à laquelle se propage l'énergie de la houle.  $R$  est le rayon de la Terre. Les variables  $u$  et  $v$  correspondent aux composantes zonales (vers l'Est) et méridionales (vers le Nord) du courant horizontal. Le courant intervient aussi dans le terme de réfraction via le gradient de  $\omega$ . En étudiant l'évolution d'un paquet d'ondes, on peut utiliser la relation de dispersion pour réécrire les deux dernières équations de la manière suivante (Tolman et al., 2014), en rendant explicite l'effet du gradient de profondeur et de courant :

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s} \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial m} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial m} \right] \quad (10)$$

Avec  $s$  la coordonnée le long du rayon et  $m$  la coordonnée le long d'un vecteur perpendiculaire au rayon. Ici,  $\mathbf{u}$  désigne le vecteur courant effectif. Avec ce deuxième jeu d'équations, on voit que les courants peuvent influencer la direction ou la longueur d'onde de la houle, au cours de sa propagation. La réfraction de la houle se voit avec l'influence des courants sur la direction, soit la dernière équation. La modification de la longueur d'onde est traduite par l'équation (9).

On utilise certaines grandeurs caractéristiques de la houle pour quantifier ses interactions avec le courant. Pour l'atténuation ou l'intensification locale de la houle par le courant, on utilise la hauteur significative (Ardhuin, 2021) :

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta df} \quad (11)$$

Calculer la hauteur significative revient à intégrer l'énergie sur toutes les fréquences du spectre, dans toutes les directions possibles. Quand à la variation de longueur d'onde pouvant être provoquée par le courant, on utilise la période moyenne, définie ci-dessous (Ardhuin, 2021).

$$T_{m0,-1} = \frac{1}{\int_f \int_\theta E(f, \theta) d\theta df} \int_f \int_\theta f^{-1} E(f, \theta) d\theta df \quad (12)$$

On regardera également les spectres de houles, qui correspondent à des tracés 2D de l'énergie en fonction de la fréquence et de la direction, pour voir la répartition spatiale et fréquentielle de cette dernière.

Pour la signature du courant sur la hauteur significative, on se base sur une approche qualitative. Les figures (a), (b), (c), (d) représentent les courants, et (e), (f), (g), (h) sont les champs de houle résultant d'une simulation WAVEWATCH sur chaque courant respectif. On remarque que les anomalies de hauteurs significatives se produisent aux gradients élevés de courants (frontière entre deux directions différentes par exemple) ou aux endroits où on observe des maximums d'intensité des courants.

Les anomalies les plus fortes se produisent sous l'effet de la réfraction (eq. 10) lorsque la direction de la houle est colinéaire à celle des courants (sens opposé ou égal), avec les gradients de courants perpendiculaires à la direction des rayons de houles. Ces anomalies se produisent car le courant dévie et focalise les rayons de houle. Elles augmentent au cours de la propagation (figure h), jusqu'au point de focalisation dont la position s'éloigne quand la période des vagues augmente (car  $C_g$  augmente avec la période) et est proportionnelle à l'échelle de variation des courants. Si les gradients sont dans la direction de propagation ou bien portent sur la composante des courants qui est perpendiculaire à la direction de propagation, alors le courant a un effet faible et passager via le terme  $C_g + u$  de l'équation (6) (figures e et f).

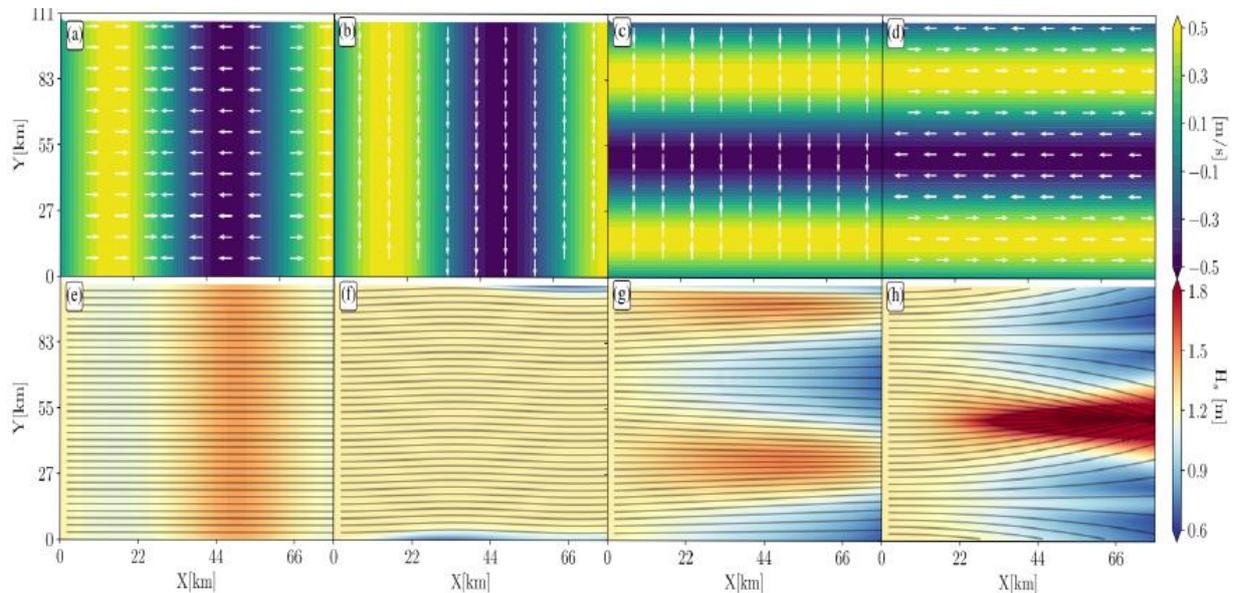


Figure 2 : Champs de courants, hauteurs significatives et rayons de houles simulés sur ces derniers (Maréchal, 2022).

### Zone étudiée

Quelques explications sur la zone s'imposent, en termes de vents, de courants et de houle. Le bassin nord méditerranéen est soumis à deux vent locaux, le mistral et la tramontane, des vents de Nord et de Nord-Ouest (André et al., 2009). Ces vents sont générés par les reliefs du Sud de la France : pour le Mistral, l'air s'engouffre dans le couloir du Rhône (reliefs au Sud-Est de la France), le vent créé a une direction allant du Nord au Nord-Ouest. Pour la tramontane, le vent est canalisé entre les Pyrénées et le Massif central. (*Les vents régionaux méditerranéens - Tempêtes en France métropolitaine*, s. d.). On assiste également à des changements brusques de direction du vent au Sud et Sud-Est pendant le printemps et l'automne généralement (A. Duchez, 2011).

L'amplitude des marées étant très faible, principalement deux sources sont à prendre en compte pour comprendre la circulation dans la zone étudiée : le vent, et les différences de densité entre l'océan Atlantique et la Méditerranée. Ces dernières sont les moteurs principaux de la circulation. Les eaux de l'océan Atlantique sont moins salées que les eaux méditerranéennes, à cause de l'évaporation importante en méditerranée, qui l'emporte sur tous les apports extérieurs en eau douce. Ceci crée des mouvements d'eau à l'Ouest du bassin, à Gibraltar, pour équilibrer les gradients de concentration en sel. La circulation générale qui en découle est affichée ci-dessous. Le rectangle rouge permet de situer les fauchées du satellite SWOT. Dans le cadre de notre étude, on s'intéressera surtout à la partie des fauchées entre les Baléares et Toulon.

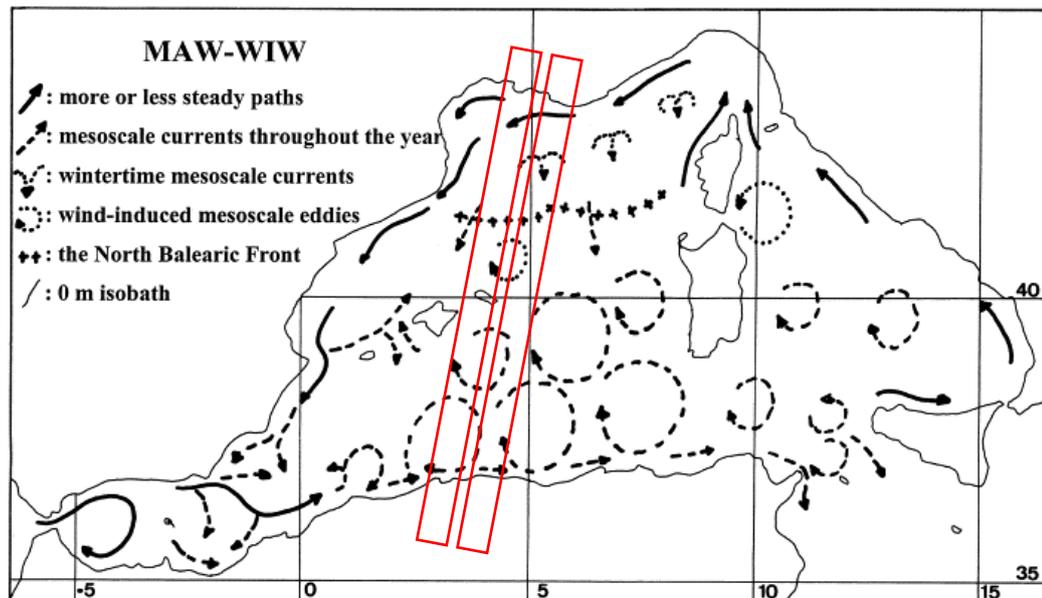


Figure 3 : Circulation globale en méditerranée (Millot, 1999)

La circulation générale, affichée en traits pleins, a des composantes méso échelles variables, en points tillés sur la carte. Ces courants et tourbillons sont observés de manière récurrente. On voit qu'il existe des phénomènes observés à l'année, d'autres saisonniers ou induits par le vent.

La houle en méditerranée, par la taille du bassin, est une houle sur des périodes faibles par rapport à celles que l'on pourrait observer en Atlantique. La houle se lève en même temps que le vent, et perd en intensité rapidement dès que le vent arrête de souffler, contrairement à l'Atlantique. Sa direction principale dans le bassin est du Nord-Ouest. On peut également s'attendre à observer des houles venant du Sud-Est lors des bascules de vent entre vents dominants et vent du Sud-Est.

---

# Méthodes

## 1. Données in situ

### 1.1. Contexte des acquisitions

Dans le cadre de la mission CalVal de SWOT, trois campagnes de mesures sont organisées entre Toulon et Minorque. Deux s'effectuent en avril, C-SWOT à bord du TETHYS II, et WEMSWOT à bord de l'Atalante. Une autre mission a lieu en mai, BioSWOT, sur l'Atalante. Les bateaux sont affrétés pour faire des mesures sous les fauchées du satellite SWOT, et ainsi disposer de mesures in situ, à comparer avec les données du satellite. Les jeux de données dont on se servira sont issus de ces trois campagnes.

### 1.2. Bouées SPOTTER

Au cours des campagnes, plusieurs types de bouées sont utilisées, on se focalisera sur les résultats des bouées SPOTTER. Ce type de bouée enregistre sa position et ses vitesses le long d'axes X, Y, Z dans un référentiel fixe, via un GPS à l'intérieur de cette dernière. Pendant C-SWOT deux d'entre elles ont été mises à l'eau du 5 au 10 avril 2023, et pendant BioSWOT deux sont à l'eau du 6 au 11 mai 2023.



Figure 4 : Bouée SPOTTER en mer. Source : Neotek-web.com.

La première partie du traitement des données consiste en deux programmes à lancer d'affilée pour chaque bouée. Ils réorganisent les données brutes, et calculent les grandeurs nécessaires pour décrire la houle, à partir des vitesses de la bouée. Les grandeurs calculées sont le spectre d'élévation de surface, et les étalements directionnels de l'énergie. Ce premier traitement renvoie un fichier netCDF avec ces grandeurs exploitables. Le second traitement est effectué sur python, pour visualiser et interpréter les données. On calculera également d'autres grandeurs à partir de celles disponibles sur le netCDF, comme la hauteur significative et la fréquence moyenne.

La même chaîne de traitement est appliquée aux quatre bouées, on détaillera la seconde partie du traitement uniquement pour la bouée 149 à titre d'exemple. On commence en premier par trier les données et récupérer uniquement la période d'acquisition en mer de la bouée :

On ne récupère que la portion de trajectoire qui ne comporte aucun angle ou discontinuité qui pourrait s'apparenter à la mise à la mer / remise à bord de la bouée. On se base sur l'allure de la trajectoire, puis on vérifie et ajuste le tri avec les courbes de longitude et latitude ci-dessous. Une dernière vérification a lieu, en calculant les accélérations des bouées au cours du temps, on remarque ainsi si le tri a conservé les mises à l'eau des bouées ou non : le lâcher des bouées se remarque par une discontinuité dans les accélérations. Une fois le tri effectué, on affiche les spectres, les hauteurs significatives, les trajectoires et les hauteurs moyennes obtenues avec le traitement. On récupère également la fréquence pic qui correspond au maximum de l'énergie intégrée sur les directions. On utilisera dans les résultats une simulation WAVEWATCH III pour référence. Pour faire des comparaisons quantitatives on interpole chaque trajectoire de bouée sur la grille de la simulation.

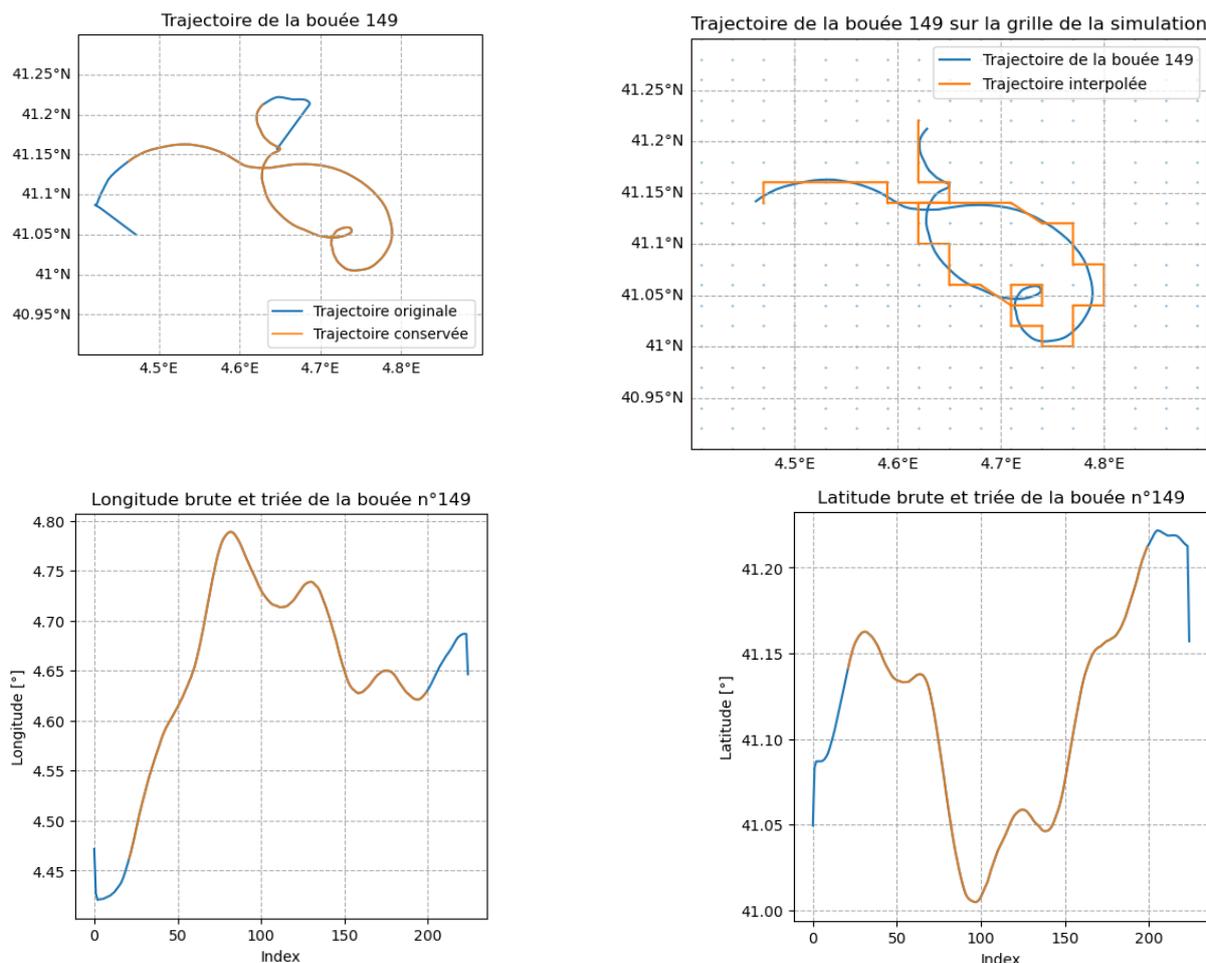


Figure 5 : Tri des données et interpolation sur la grille de la simulation WAVEWATCH III.

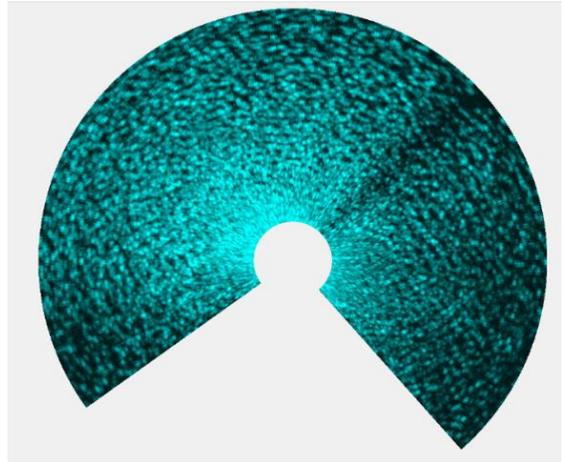
Dans le second traitement, on calcule également la vitesse des bouées au long de leur acquisition, et on récupère la vitesse du vent simulé le long de la trajectoire des bouées, pendant la même période. Ces informations me seront utiles pour interpréter les résultats.

### 1.3. Radar bande X

Les radars qui sont utilisés pour la navigation sont susceptibles de fournir des informations intéressantes sur les variations de vent, vagues et courant à petite échelle (Lund et al.2018), y compris à l'intérieur du champ de mesure. Le radar de l'Atalante fonctionne en bande X avec une antenne tournante et fournit des données en mode « short pulse » (de l'ordre de 1 microseconde) qui donnent un enregistrement de la réflectivité de la surface sur un disque de 3 km de diamètre, toutes les 2,5 s, avec une résolution de 4 m. Ces données ont été acquises avec un système MIROS WAVEX pendant la campagne WEMSWOT, ce système fait l'enregistrement et le traitement des données. Un premier traitement réalisé par le logiciel WAVEX, détermine un courant de surface moyen sur tout le disque d'acquisition via la relation de dispersion des vagues détectées. Il s'agit donc d'un courant effectif au sens de Stewart & Joy (Stewart & Joy, 1974), correspondant à une profondeur inférieure à 5 m. Les hauteurs significatives et les spectres de houle sont aussi estimées. Ces estimations sont généralement moins fiables que des mesures de bouées du fait de la fonction de transfert entre élévation de surface et image radar : en effet pour des angles très rasants, les crêtes des vagues créent des ombres et la fonction de transfert est fortement non-linéaire. En parallèle de ces résultats fournis par la « boîte noire » du système WAVEX, on examine aussi des cartes de rétrodiffusion, moyennées sur plusieurs tours d'antenne. Ce second traitement permet de faire des mosaïques de ces images, pour un intervalle de temps donné après normalisation par la puissance moyenne

reçue pour une position (distance, angle) relative à l'orientation du navire. Ainsi les mosaïques affichent la moyenne de la puissance des échos perçus par le radar venant de chaque pixel de 5 m par 5 m et permet de réduire la signature des vagues qui a une fluctuation rapide pour révéler des signaux plus basse fréquence. Le premier traitement se base sur la modification de l'état de mer par les courants, et la houle. Le second calcule la puissance des échos perçus par le radar, et l'affiche à l'endroit correspondant sur l'image.

Figure 6 : Exemple d'image à traiter du radar bande X



Les résultats des hauteurs significatives du premier traitement sont vérifiés avec un modèle de référence. On les exploitera directement. Les résultats de courants moyennés sont comparés avec des mesures ADCP, mais ne sont pas suffisamment consistants pour être exploités dans la suite. On étudiera donc les résultats du second traitement.

## 1.4. ADCP

On dispose également de données issues de deux courantomètres en acquisition pendant WEMSWOT et BioSWOT, un à 38kHz et un à 150kHz, pour les mois d'avril et mai 2023, sous format Long Term Average (LTA) et Short Term Average (STA). L'ADCP à 38kHz permet d'avoir des données de courant de 50m jusqu'à 500m, celui à 150kHz permet d'avoir des données avec une meilleure résolution, de 19m jusqu'à 80m. On utilisera majoritairement les données issues du profileur à 150kHz, pour avoir les courants le plus en surface possible. On récupère et moyenne les données acquises le moins profond possible, soit entre 19m et 24 m pour le capteur à 150 kHz, et entre 48m et 54m pour le capteur à 38kHz. Les données ADCP permettent de détecter les fronts de courants, sur lesquels on construira des mosaïques des échos reçus par le radar. Les acquisitions sont réalisées sous les fauchées du satellite SWOT, on pourra également comparer les courants obtenus par les deux systèmes. Les données de courants seront également comparées aux courants utilisés dans les simulations.

Pour situer spatialement les mesures de l'ADCP et du radar, la carte ci-dessous montre la trajectoire de l'Atalante, pendant WEMSWOT. Les fauchées de SWOT sont en traits gris.

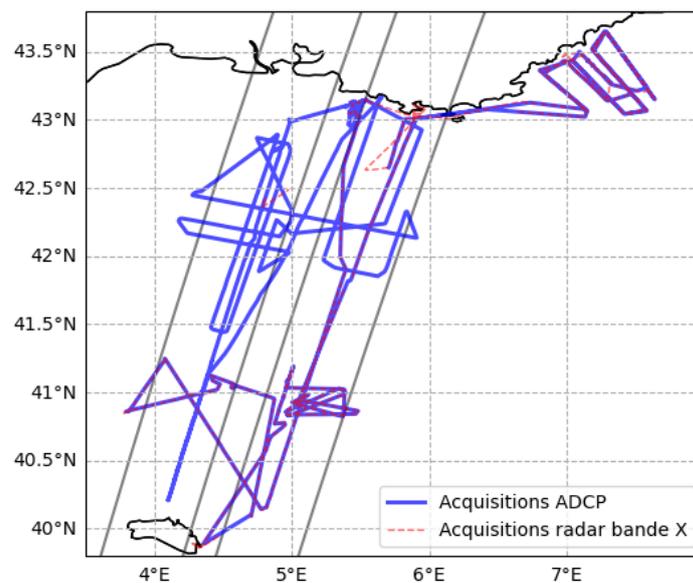


Figure 7 : Trajectoire et acquisitions de l'Atalante pendant WEMSWOT

---

## 1.5. Données satellites

Pour connaître la circulation globale, on récupère des données satellites dans la base de données en ligne du programme Copernicus. Les données sont ici fournies par le Conseil National de Recherche Italien (CNR). On utilise les produits dits « multi-observations », qui sont basés sur plusieurs instruments, issus de différents satellites : les instruments utilisés sont SeaWiFS, MERIS, MODIS, VIIRS et OLCI. Le CNR recalcule différentes grandeurs en se basant sur les données issues de ces instruments et en les combinant à d'autres mesures météorologiques (S. Colella et.al). Des cartes de concentration en chlorophylle sont disponibles pour chaque jour. Ces données sont intéressantes, car la chlorophylle est un bon traceur des différentes masses d'eau ; en surface, les eaux riches en chlorophylle ne se mélangent pas avec les eaux pauvres en chlorophylle. Cela permet de suivre les masses d'eau sur des échelles de plusieurs jours.

On utilisera également les premières données SSH issues du satellite SWOT. A partir des élévations de surface, on peut retrouver la valeur des courants de surface si l'on utilise l'hypothèse de courants géostrophiques. Cette hypothèse nous permet de faire le lien direct entre les deux grandeurs à l'aide d'une formule les reliant. On ne dispose que d'une image de SSH, pour le 10 avril.

---

## 2. Simulations du bassin Nord méditerranéen

Pour avoir des données de référence au même endroit et au même moment que les données in situ, on configure trois modèles WAVEWATCH III. Le second objectif est d'obtenir un ordre de grandeur de la signature des courants que l'on pourrait observer sur les grandeurs utilisées.

On lance trois configurations différentes. Les modèles sont très similaires, deux prennent en compte du courant. On comparera dans un premier temps les simulations avec courant et sans courant. On comparera également les mesures ADCP avec les valeurs utilisées dans les simulations. Ensuite, la simulation sans courant nous servira de référence, pour étudier les hauteurs significatives et périodes moyennes : on interpolera les trajectoires des bouées sur la grille de la simulation, pour obtenir les valeurs simulées des bouées au cours de leur trajectoire.

### 2.1. Modèles de courant

On dispose des sorties d'un modèle de courant haute résolution MARS-3D. La configuration utilisée est MENOR, à une résolution de 1.2km (Garreau et al., 2011). Ce modèle est précis d'un point de vue statistique ; lorsque l'on regarde la circulation et les événements à l'échelle de quelques mois il correspond à la réalité. Cependant, lorsque l'on regarde le modèle pour une date donnée, il se peut que le modèle ne corresponde pas à la situation réelle le même jour. On choisit donc parmi les archives des sorties une circulation qui correspond à la circulation générale observée pendant la campagne. On retient donc une sortie du modèle de 2019, avec le courant Nord et le courant Nord Baléares marqué, ce qui correspond à la circulation générale du bassin Nord Méditerranéen. La circulation retenue est la sortie du modèle le 02 avril 2019 à 9h00.

Pour le second modèle, on se base sur les courants géostrophiques obtenus avec l'image de SSH de SWOT du 10 avril. Les courants sont pris nuls hors des fauchées du satellite.

### 2.2. Modèle de houle

Les trois modèles sont initialisés de la même manière, et sont forcés par le même champ de vent : on utilise les analyses et prévisions opérationnelles déterministes de l'Integrated Forecasting System (IFS) du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme, le modèle ECMWF. La grille de la simulation (données de bathymétrie, résolution spatiale et temporelle) est la même pour les trois modèles. WAVEWATCH est basé sur la résolution de l'équation d'action de la houle décrite précédemment (eq. 3)

Dans la simulation, chaque terme source est décrit par différents modules de calculs que l'on peut garder ou enlever selon les configurations. Le modèle résout l'équation d'action en chaque point de la maille, ce qui permet la description de l'évolution spatiale et spectrale des houles dans la zone donnée. Dans notre cas, on conserve les mêmes modules pour les trois simulations.

# Analyses et interprétations

## 3. Résultats

### 3.1. Signatures du courant dans les simulations et mesures ADCP

#### 3.1.1. Modèle avec courants « MENOR »

Pour comparer la simulation basée sur la sortie courants du modèle MENOR avec celle sans courant, on réalise un transect, sur lequel on récupère la hauteur significative et la période moyenne. On choisit un transect avec des valeurs de courants variées, puis on moyenne les différences entre les deux simulations, du 1 au 15 avril.

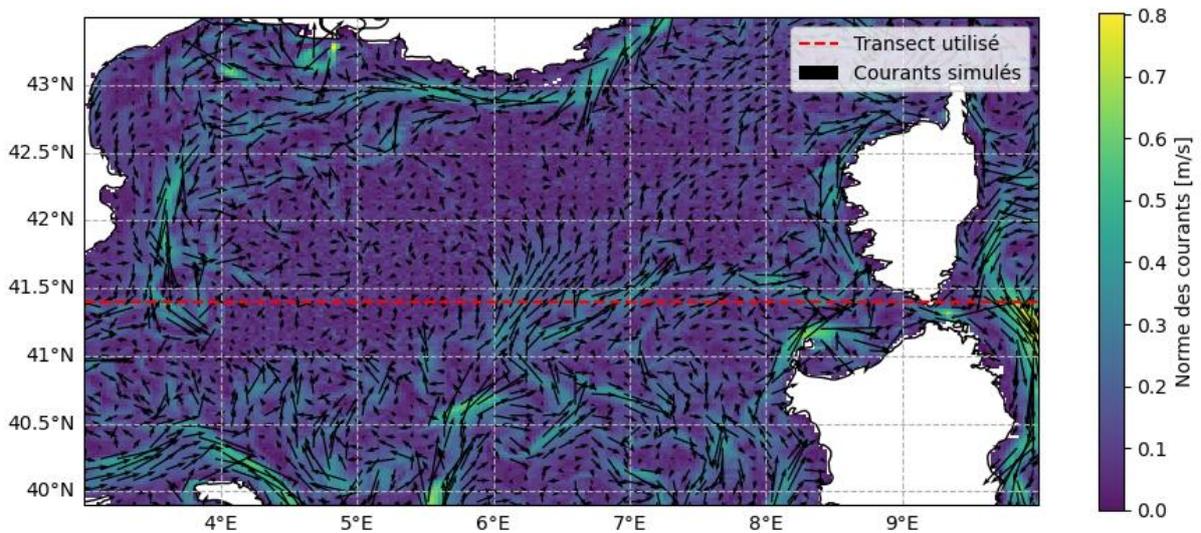


Figure 8 : Transect sur la sortie du modèle de courants.

Sur la figure ci-dessus, les vecteurs sont normalisés. Entre 4°E et 6°E les courants sont faibles voir nuls, entre 3°E et 4°E ou entre 6°E et 8°E les courants sont plus intenses. On trace ensuite les écarts de hauteur significative et de période moyenne entre les deux simulations.

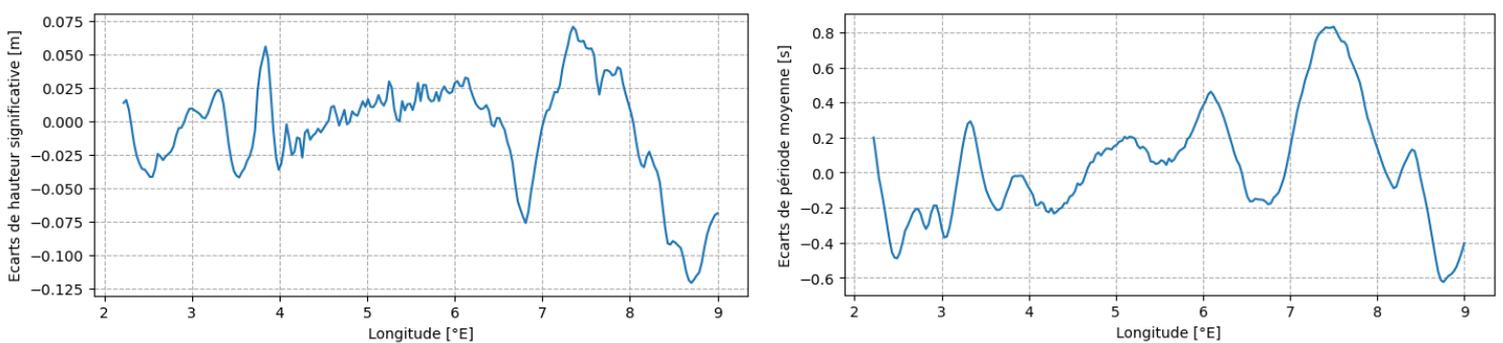


Figure 9 : Ecart entre les deux modèles le long du transect.

Les différences entre les simulations se localisent surtout aux endroits correspondants aux forts gradients de courants, ou aux endroits avec des courants plus intenses : la limite autour de 4°E entre les zones riches et pauvres en courant correspond à des pics d'écart de hauteur significative et de période pic. Entre 6°E et 8°E on constate également des pics des écarts.

L'amplitude des erreurs de hauteur significative et de période moyenne sont faibles : les écarts moyennés sont de l'ordre du centimètre et de la demi seconde. Cependant, lorsque l'on regarde les statistiques sur les valeurs non moyennées le long du transect, on observe des écarts plus élevés, à contraster avec les valeurs mesurées.

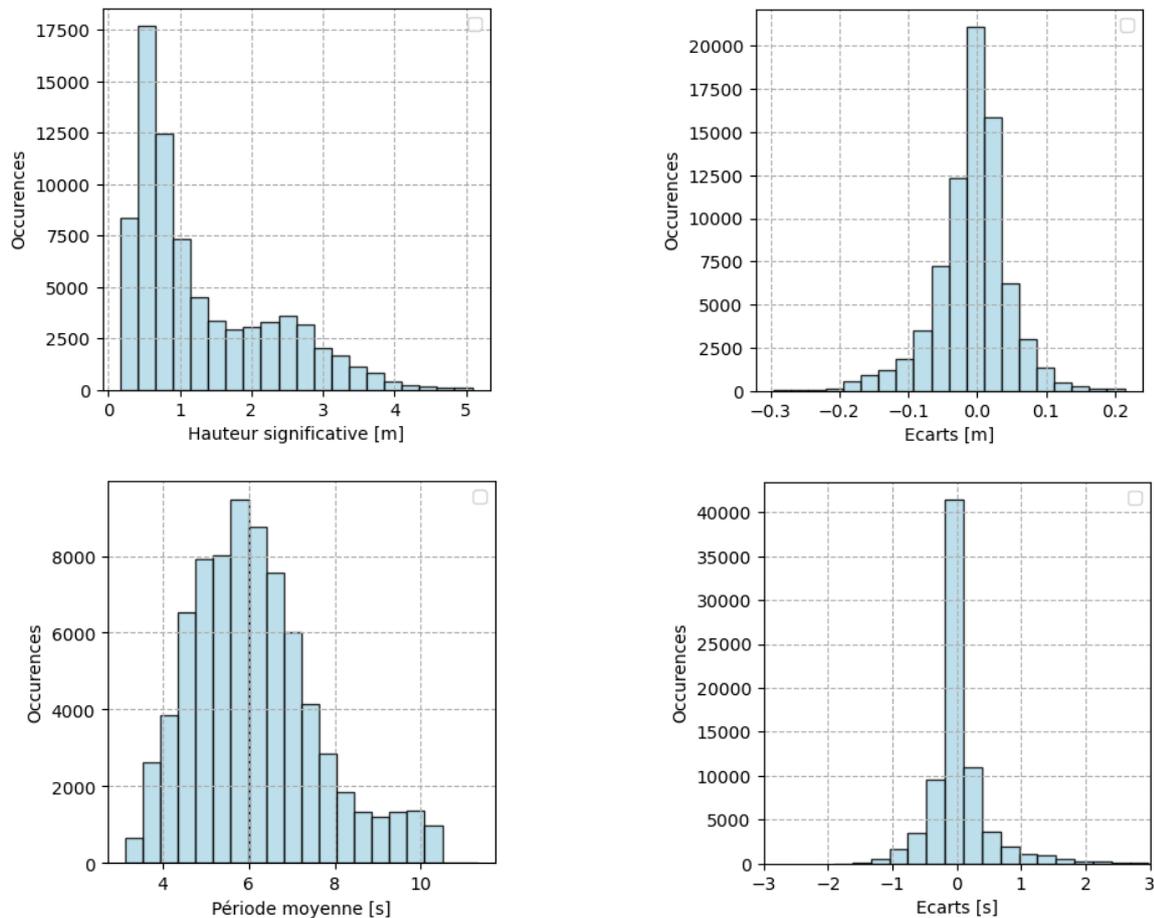


Figure 10 : Histogramme des écarts et des valeurs sur le transect.

Pour la hauteur significative, les écarts peuvent représenter une part importante de la mesure : la plupart des mesures se situent entre 50cm et 1m, et les écarts, en valeur absolue, vont jusqu'à 30 cm. Pour une houle de 1m, on pourrait observer des écarts allant jusqu'à 30% de la mesure. Pour la période moyenne, on peut observer des écarts allant jusqu'à 2s, pour des périodes allant majoritairement de 5 à 7s. Pour une houle de 6s, on pourrait observer des anomalies de 33% maximum.

On retient donc des différences entre les simulations qu'il est possible d'observer la signature du courant sur la houle avec la hauteur significative et la période pic, bien que les écarts soient en moyenne faibles par rapport aux hauteurs mesurées.

### 3.1.2. Modèle avec courants « SWOT »

Pour observer la signature des courants, on utilise une méthode différente, les courants calculés étant moins étendus sur la zone d'étude. On moyenne les différences entre la simulation avec et sans courant, du 1 au 15 avril. On obtient la figure ci-dessous. Dans les écarts moyennés, on observe cette fois-ci un effet des courants sur la hauteur des vagues qui atteint 30cm autour de 41°N 5°E, dans la région où le courant est le plus fort, contre les vagues, avec un maximum de vagues décalé en aval de la propagation des vagues par rapport au maximum de courant, ce qui correspond à une situation de réfraction comme en figure (2.h). Bien que le champ de courant ne soit pas réaliste avec une variation brutale en bord de fauchée SWOT, la simulation permet d'avoir un ordre de grandeur de l'effet local des courants qui combine advection et

réfraction à l'intérieur de la fauchée, et des effets plus lointains associés à la réfraction. Les deux bandes à grande échelle entre 6 et 7°E sont liées à une faible houle venant du sud.

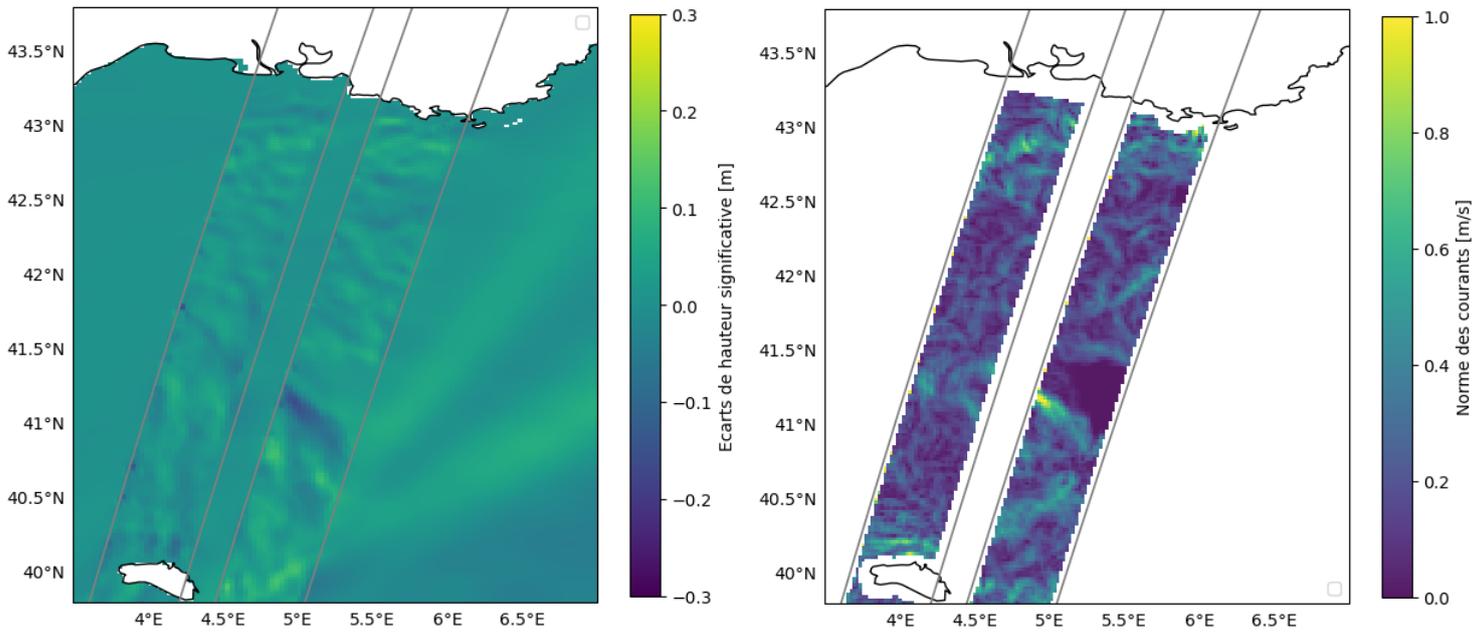


Figure 11 : Carte des écarts de hauteurs significatives moyennés et courants SWOT.

Il est probable qu'une interpolation des courants SWOT au milieu de la fauchée augmente encore l'effet du courant en permettant à la réfraction de se cumuler sur une plus grande distance de propagation, comme en figure 2.h.

Les cartes des écarts de période moyenne n'ont rien révélé de suffisamment significatif, les écarts maximums observés étant de moins de 1s : cette faible variation des périodes est cohérente avec un effet dominant de la réfraction qui ne joue pas sur la période.

### 3.1.3. Comparaison courants simulés et mesurés

On compare les données ADCP avec les deux champs de courants utilisés, pour savoir si les ordres de grandeurs obtenus pourraient s'appliquer à nos mesures. Pour la simulation MENOR, on a interpolé les mesures ADCP sur la grille de la simulation. Pour les courants SWOT, on ne conserve que les courants ADCP sous les faisceaux du satellite, et on compare ces derniers aux courants calculés sous l'hypothèse géostrophique.

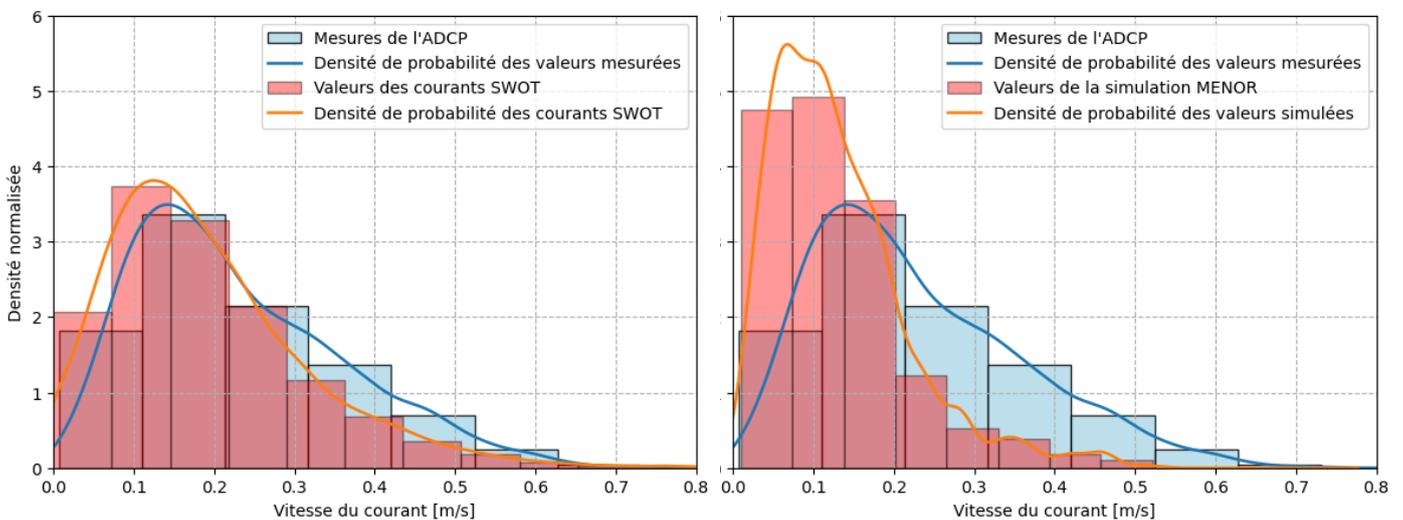


Figure 12: Comparaison des courants des simulations aux mesures par ADCP.

On remarque que la simulation MENOR présente un plus grand nombre de valeurs entre 0 et 0,2 m/s. On peut donc espérer observer des signatures légèrement plus importantes que celles obtenues sur les simulations. L'histogramme des valeurs de SWOT est similaire à celui des mesures ADCP. Les courants obtenus avec SWOT sont légèrement inférieurs à ceux mesurés par l'ADCP. Les données du 10 avril n'étant pas des données validées, on peut remettre en cause ces dernières. De plus, les courants sont calculés avec l'hypothèse géostrophique, on ne prend donc pas en compte les contributions du reste des courants.

### 3.2. Acquisitions des bouées SPOTTER

Après le traitement décrit précédemment, on étudie d'abord les acquisitions d'avril (bouées 143 et 149) puis de mai (bouées 144 et 147). Celles d'avril sont plus riches, la période d'acquisition pour mai étant plus courte, et les bouées étant plus éloignées.

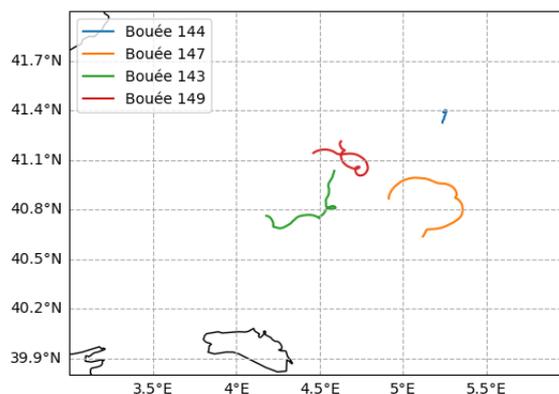


Figure 13 : Trajectoires des bouées.

#### 3.2.1. Acquisitions en avril

On trace la hauteur significative et la période moyenne, pour les mesures et simulations des deux bouées.

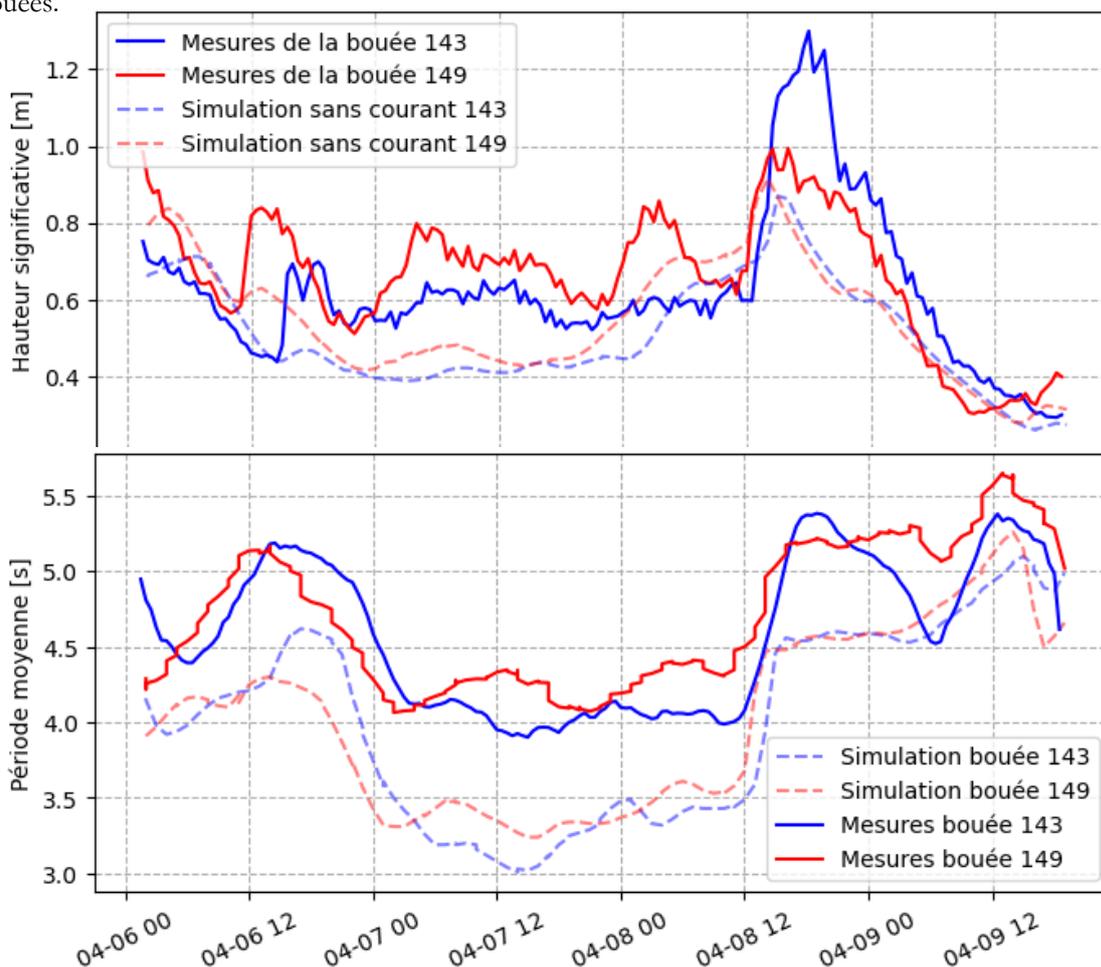


Figure 14 : Hauteurs significatives, périodes moyennes mesurées et simulées.

Les signaux sont déphasés : les bouées sont proches, mais suffisamment distantes pour que l'on observe des différences liées à leurs positions. La bouée 149, positionnée plus au Nord, reçoit les vagues en première, car les vents et les vagues viennent du nord. Les courbes de la bouée 149 sont donc en avance de phase. On remarque également des différences : entre les mesures des bouées, et entre les bouées et leurs simulations respectives. La signature des courants pourrait s'observer sur ces deux types de différences.

Pour les mesures in situ, une partie uniquement s'explique par cet effet. Par exemple, l'écart visible sur les hauteurs significatives du 6 avril à 12h peut s'expliquer par ce dernier ; les deux bouées présentent un écart important, mais les simulations entre elles aussi, et les écarts sont du même ordre de grandeur. Lorsque l'on corrige le déphasage lié aux positions des bouées, les écarts mesurés et simulés sont les mêmes pour le 06 avril. Les écarts à ce moment ne sont donc pas dus au courant. Pour les autres pics, la différence entre les simulations est trop faible pour expliquer complètement les écarts mesurés. Le long de l'acquisition, les bouées se rapprochent ; voir figure X, la bouée 143 se déplaçant de l'ouest vers l'est. Ce rapprochement progressif des bouées explique la diminution de l'écart entre les deux simulations au cours du temps : cela se voit de manière claire sur la période moyenne. On trace ensuite les écarts de hauteur significative entre les mesures et les valeurs simulées, pour chaque bouée.

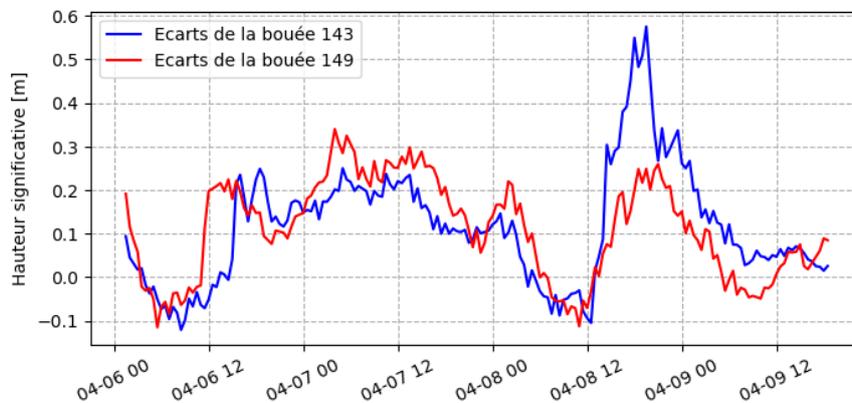


Figure 15 : Ecart entre hauteurs des vagues mesurées et simulation sans courant.

Sur les écarts de hauteur significative, le pic du 8 avril au soir retient notre attention. Pour l'instant correspondant au pic, on superpose les trajectoires et vecteurs vitesses des bouées à la carte de chlorophylle du 08 avril.

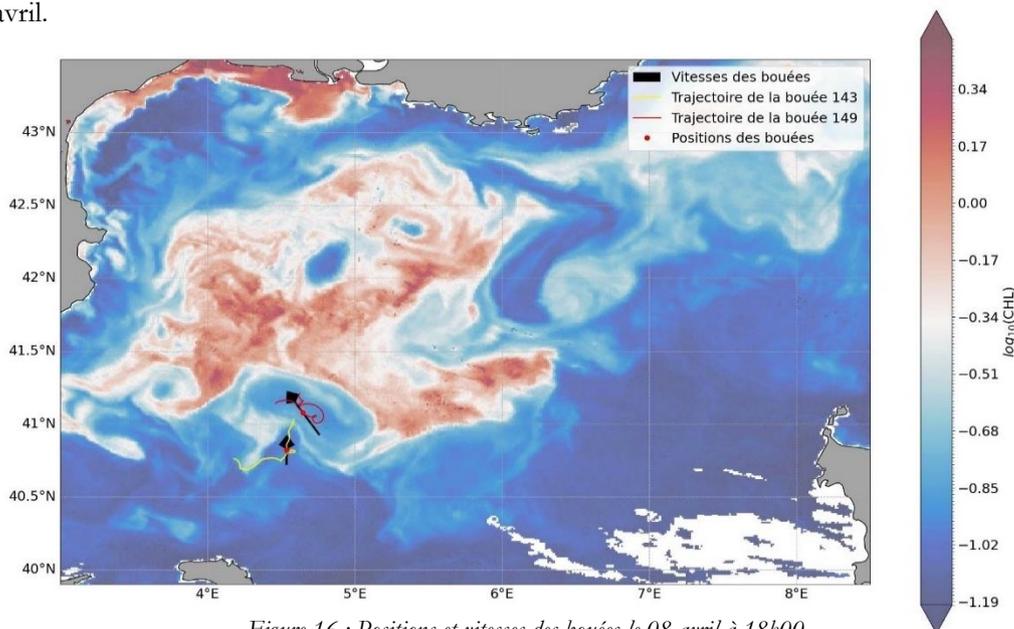


Figure 16 : Positions et vitesses des bouées le 08 avril à 18h00.

Avec la carte de chlorophylle on comprend mieux les trajectoires des bouées : La bouée 143 est prise dans un tourbillon anticyclonique, tandis que la bouée 149 est prise dans un bras de courant qui le longe, puis qui le traverse. Pour tenter de comprendre les sources possibles de l'anomalie, on trace également le spectre de la houle au moment de l'anomalie, pour les deux bouées.

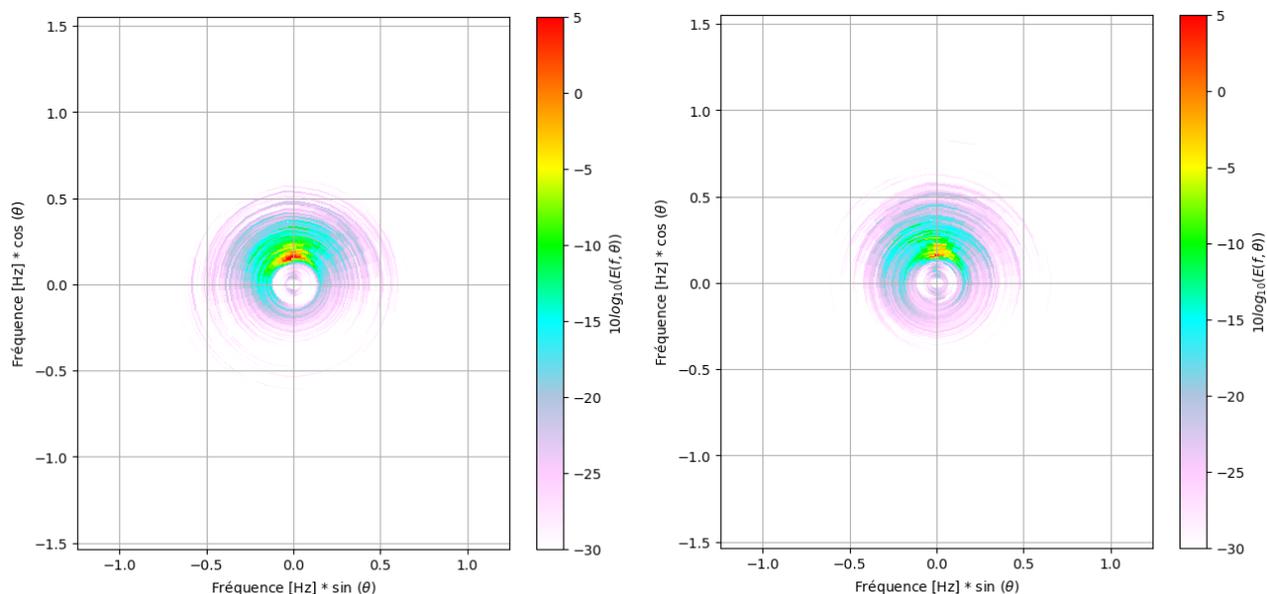


Figure 17 : Spectres des bouées le 08 avril à 18h00, bouée 143 à gauche et 149 à droite.

La direction de la houle est Nord, les deux bouées sont donc approximativement en situation de houle contre courant. Les spectres sont similaires, plus d'énergie arrive à la bouée 143. La houle qui atteint la bouée 143 pourrait possiblement être influencée par le tourbillon dans lequel la bouée 149 est prise ; les simulations sans courants ne prédisent pas de différence significative entre les deux bouées (un écart de 5cm environ). Dans la simulation qui utilise les courants SWOT, les bouées se trouvent entre les deux fauchées du satellite. On peut cependant regarder les écarts autour des positions des bouées, qui sont de l'ordre de 30cm. Un effet qui pourrait être la source de l'erreur serait la focalisation de la houle par les courants du tourbillon, sur la bouée 143.

### 3.2.2. Acquisitions en mai

On applique le même traitement aux acquisitions effectuées en mai, et on obtient les courbes suivantes pour la hauteur significative :

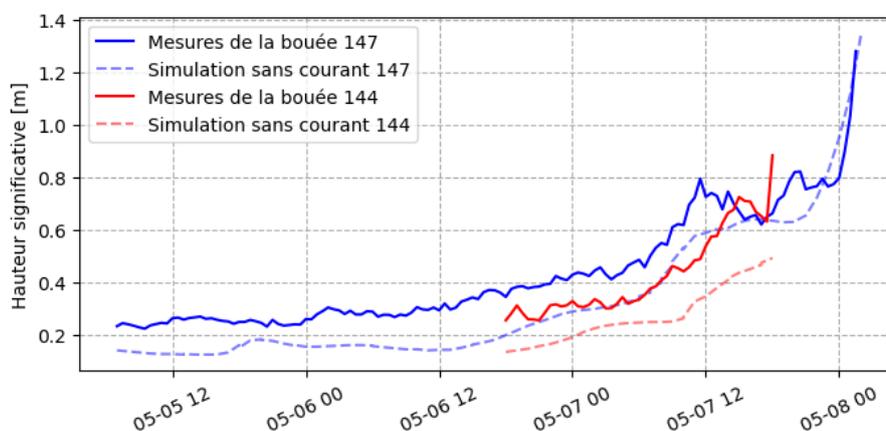


Figure 18 : Hauteurs significatives mesurées et simulées en mai.

Les bouées sont plus éloignées entre elles, et plus distantes. Les écarts entre les deux sont difficilement interprétables : les différences de houle à atteindre les bouées suffiraient à expliquer les valeurs des différences observées. De plus, on a une période d'acquisition commune plus faible, avec moins d'évènements susceptibles de révéler des signatures. Pour la période moyenne on trouve des courbes similaires à celles des hauteurs significatives : des évolutions sans phénomène particulier, avec des écarts explicables uniquement par la distance entre les deux bouées.

### 3.3. Exploration des données radar bande X

En attendant que les données SWOT soient disponibles, et au vu de l'importance des courants à petite échelle, j'ai exploré les informations que peut fournir un radar de navigation.

#### 3.3.1. Mosaïques de puissance rétrodiffusée

Pour appliquer le second traitement des données du radar, on repère d'abord une zone sans front. Le but est d'obtenir une image neutre sans motif particulier, pour mieux appréhender les résultats en présence d'un front. Au cours des acquisitions, on dispose de peu de jours avec houle faible à moyenne et vent moyen. Le 12 avril au matin correspond à des trajectoires au nord des baléares, dans une zone riche en fronts, sur un jour avec peu de vent, et une houle moyenne à faible (hauteurs significatives entre 50cm et 2m). On se basera sur ce jour pour tenter d'obtenir des mosaïques sans artefacts liés au vent ou à une mer trop forte. En appliquant le traitement sur deux fronts, un par vent très faible et un par vent fort, nous verrons aussi les artefacts liés à ces deux situations.

	Date des mosaïques
<b>Portion sans front</b>	12/04 21h20-21h40
<b>Front 1</b>	12/04 00h00-01h00
<b>Front 2</b>	12/04 00h50-01h50
<b>Front 3</b>	12/04 03h00-03h40
<b>Artefact 1</b>	12/04 14h10-14h30
<b>Artefact 2</b>	13/04 13h20-14h10

Tableau 1 : Bilan des mosaïques.

On récupère aussi les données de la station météo à bord :

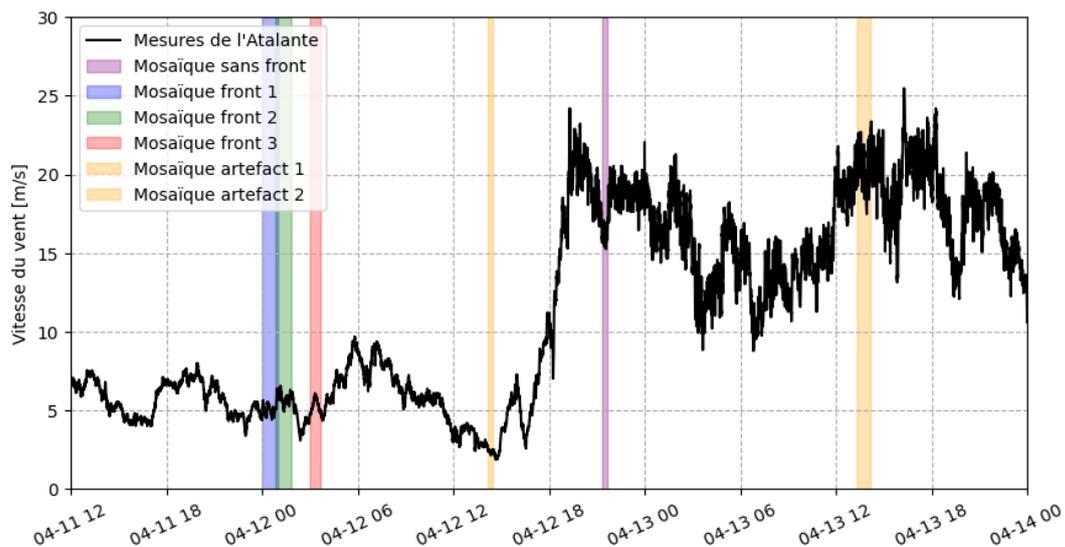


Figure 19 : Mesures corrigées de vent et date des mosaïques.

Les mosaïques des fronts 1,2,3 sont calculées par vent moyen, les vitesses sont d'environ 5m/s. Le premier artefact correspond à un vent trop faible, d'environ 2m/s. Le second artefact correspond à un vent trop fort, de 23 m/s. La mosaïque sans front est réalisée pour un vent de 20m/s.

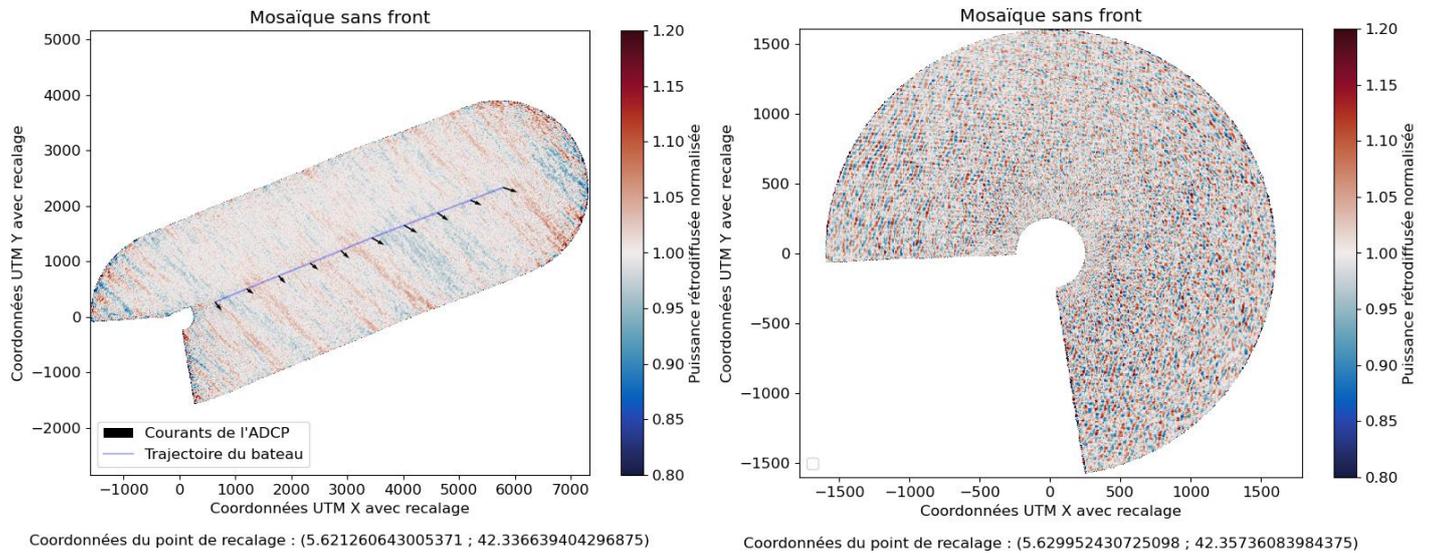
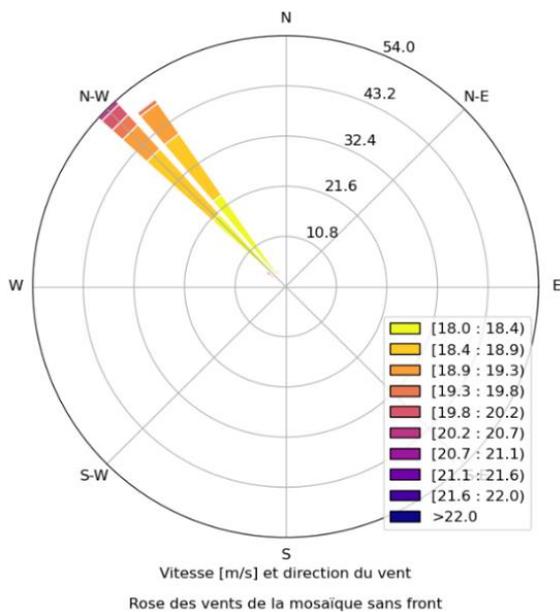


Figure 20 : Mosaïque sur une portion sans front de courants et image de rétrodiffusion calibrée.

On applique le traitement sur une zone sans fronts, le 12/04 entre 21h20 et 21h40. On obtient la mosaïque ci-dessus, pour les vents affichés ci-dessous. L'image ne possède pas de front, comme attendu. On remarque malgré tout des motifs transversaux à la trajectoire du bateau. On applique le traitement à une image, au milieu de la mosaïque, pour obtenir plus de détails sur les motifs.

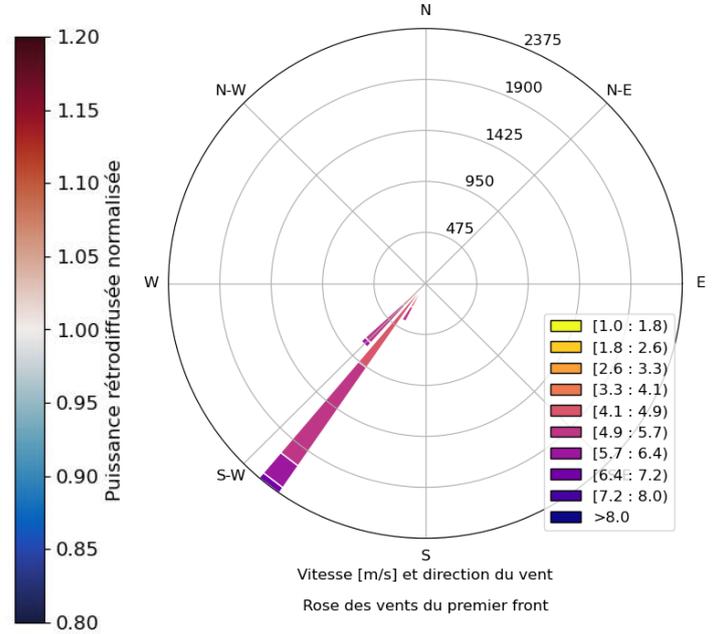
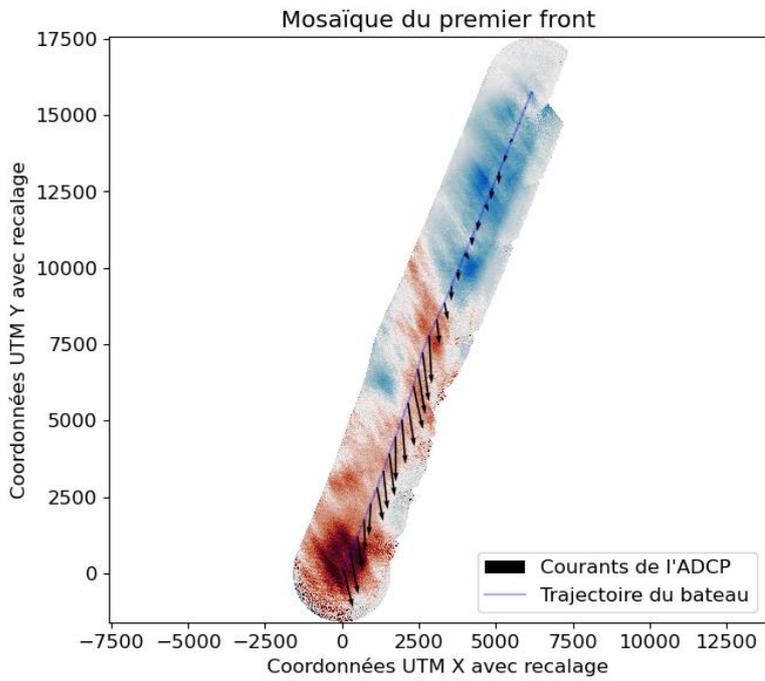
La figure X montre des bandes de maximum de puissance rétrodiffusée orientées nord-ouest / sud-est, qui sont presque perpendiculaire et à plus grande échelle que les crêtes des vagues.



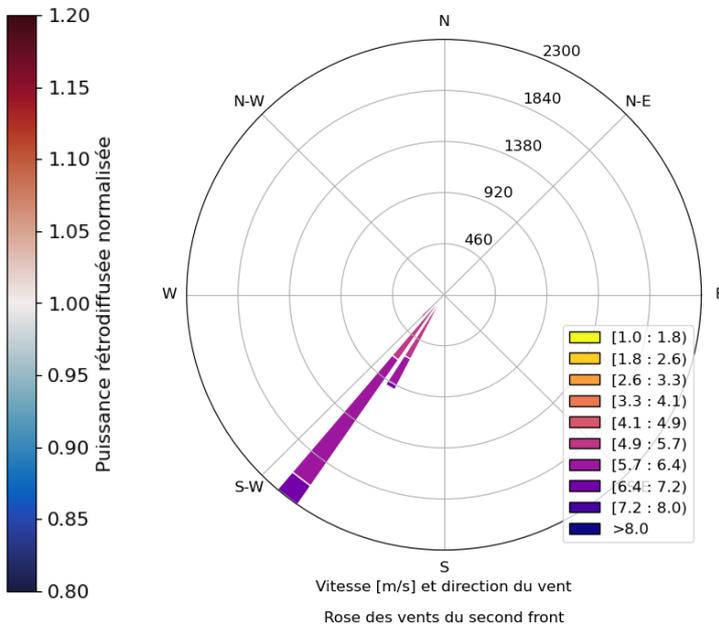
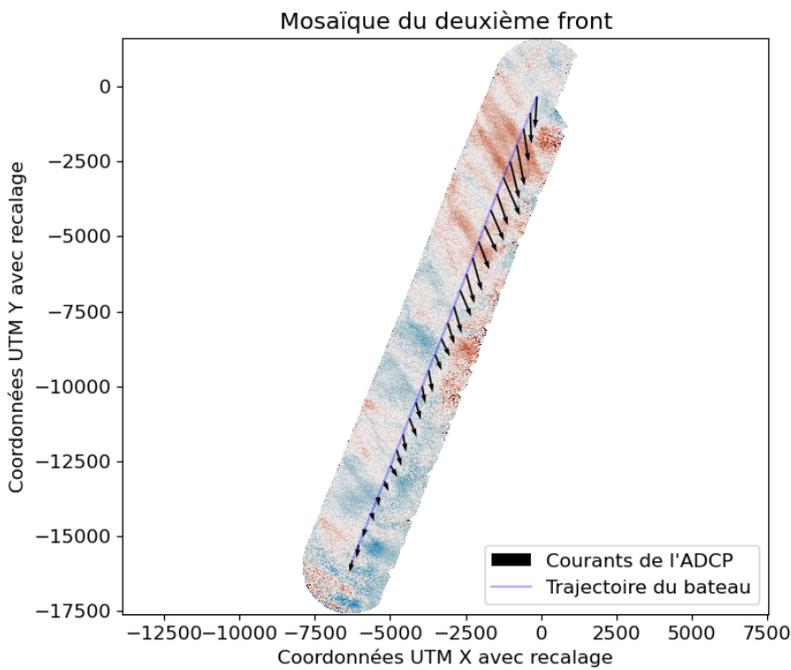
Ces motifs sont parallèles à la direction du vent (figure 20), ces derniers pourraient s'expliquer par des rafales, changeant le long de la ligne où la rafale souffle la rugosité du plan d'eau. Les courants sont homogènes sur la portion choisie d'après les mesures ADCP, et la houle a une direction différente.

Figure 21 : Rose des vent mesurées sur l'Atalante le long du transect correspondant à la figure 20.

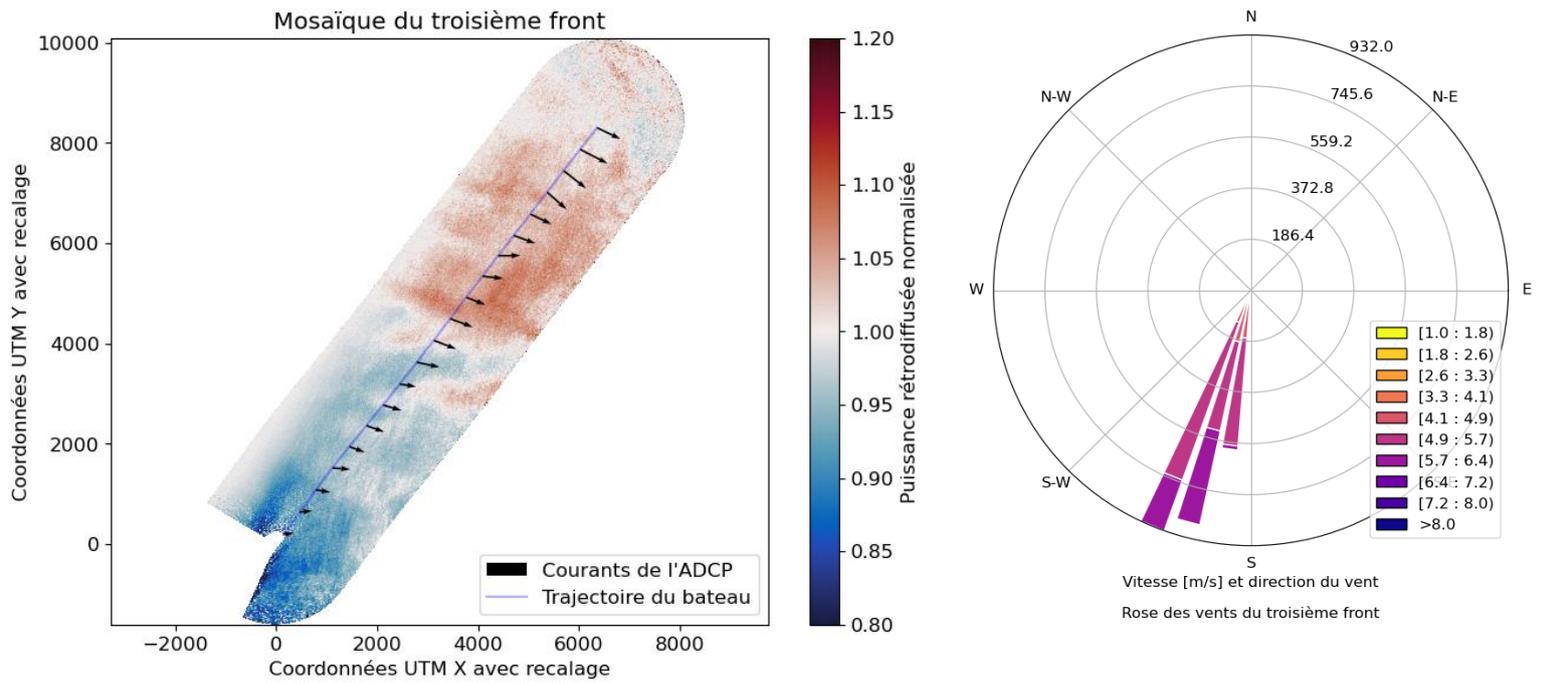
Pour les 3 fronts, les mosaïques et roses des vents sont affichés ci-dessous.



Coordonnées du point de recalage : (5.188361644744873 ; 40.912254333496094)



Coordonnées du point de recalage : (5.212077617645264 ; 40.922019958496094)

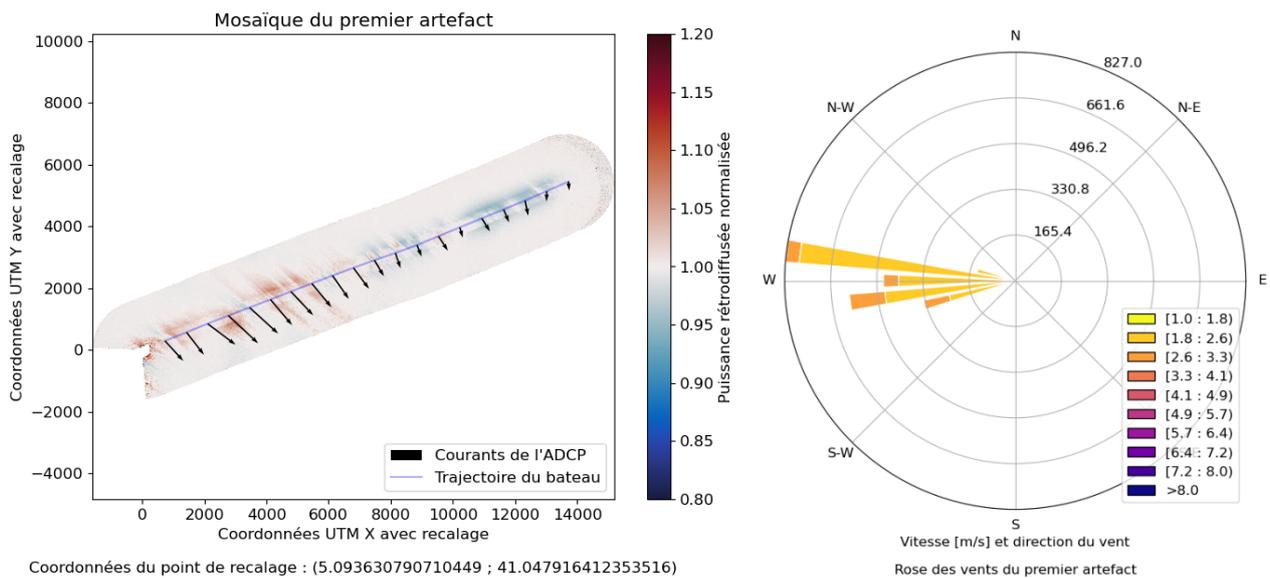


Coordonnées du point de recalage : (4.9858903884887695 ; 40.880916595458984)

Figure 22 : Mosaïques et roses des vents associées sur les trois fronts.

Les vents sont moyens pour les trois fronts, entre 3 et 8 m/s. La direction est sud-ouest à sud-sud-ouest. Dans la puissance rétrodiffusée on ne remarque aucun motif orienté avec le vent. La puissance rétrodiffusée est toujours plus élevée là où les courants en surface sont le plus forts sur la mosaïque. Il est possible que cette augmentation de la puissance des échos radar soit associée à une modification du champ de vagues mais aussi à un effet de la température de la mer sur la couche limite atmosphérique. Plus le front est marqué, plus la différence de puissance est délimitée : sur le troisième front, qui est le plus marqué, le passage entre puissances plus faibles et plus fortes est lui aussi le plus marqué des trois mosaïques. Le front 2 par exemple, présente un front plus progressif, le long de la mosaïque on observe des zones avec des puissances plus faibles et plus fortes qui se confondent. Le front 1 est le plus complexe, la transition est progressive et on observe une intensification puis un changement de direction des courants.

On s'intéresse ensuite aux mosaïques qui n'ont pas donné de résultats cohérents.



Coordonnées du point de recalage : (5.093630790710449 ; 41.047916412353516)

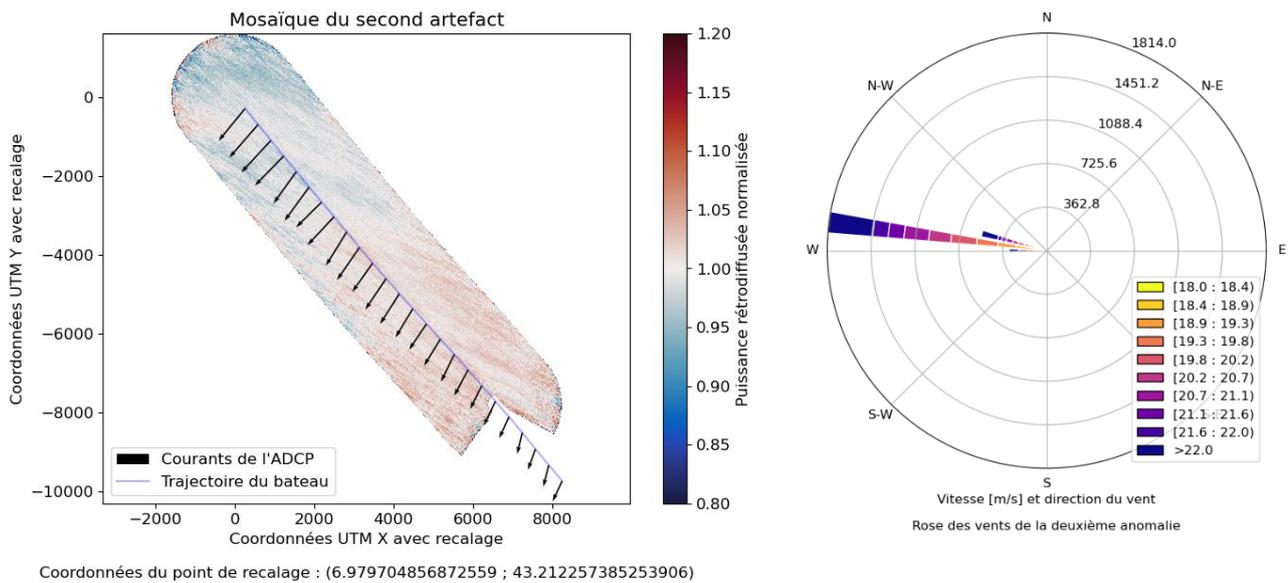


Figure 23 : Mosaïques anormales et roses des vents associées.

Sur la première mosaïque, la puissance rétrodiffusée normalisée s'écarte très rarement de la valeur 1. Le radar a du mal à détecter le changement de rugosité de la surface, car le vent est plus faible que sur les mosaïques précédentes. Le radar utilise des ondes bande X, de l'ordre de 3cm. Les échos sont donc sensibles aux ondes à la surface de longueur d'onde 1,5 cm (rétrodiffusion de Bragg). Avec un vent moyen, des ondes de gravité courtes sont présentes avec toutes les longueurs d'onde de 4 mm à quelques mètres, ce qui rend les fronts détectables ; ils changent localement la longueur d'onde de ces dernières, ce qui est visible sur les échos. Pour un vent inférieur à 3 m/s la surface devient lisse, ces ondes courtes ne sont plus que rarement présente, et les échos sont alors très faibles et hétérogènes. On remarque quelques taches de puissances supérieures et inférieures à 1, qui sont cohérentes avec les vecteurs courants.

Sur la deuxième mosaïque, les minimums de puissance correspondent aux maximums de courants, ce qui est l'inverse de toutes les autres mosaïques observées jusqu'ici. Il y a des motifs ressemblant à la mosaïque sans front : des lignes dans le sens du vent. Cette fois ci elles sont moins visibles, bien que présentes tout le long de la mosaïque. Elles sont dans le sens du vent, qui oscille monte jusqu'à plus de 22m/s dans les rafales. L'effet du vent pourrait expliquer l'artefact observé ; à ces vitesses, il pourrait complètement modifier le plan d'eau, et fausser les résultats du radar. La différence entre les motifs de la mosaïque sans front et de celle-ci-dessus s'explique par la durée choisie : pour la première, la mosaïque est réalisée sur 20 minutes d'acquisition, et pour celle-ci-dessus la durée est de 50 minutes ; les rafales sont donc moins visibles sur la deuxième. On trace l'évolution de l'intensité du vent mesuré par la station météo au moment correspondant à la mosaïque :

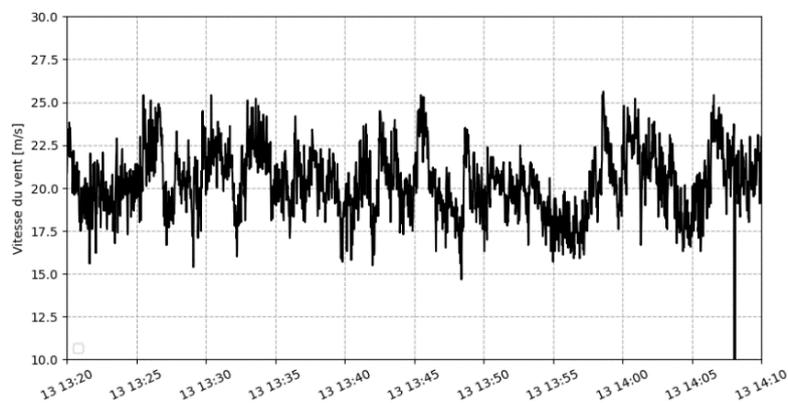


Figure 24 : Série temporelle du vent mesuré pendant la mosaïque.

Les vents sont dans les mêmes gammes de valeurs au début et à la fin ; en calculant les moyennes sur la première et deuxième moitié de la série temporelle, on trouve 20,5 m/s et 20m/s. Les histogrammes des mesures sur la première et deuxième moitié sont eux aussi similaires. On peut difficilement conclure sur l'origine du front de puissance rétrodiffusée que l'on observe.

### 3.3.2. Courants WAVEX

On compare ensuite les courants moyennés obtenus avec le traitement WAVE X aux données ADCP 38kHz, sur des fronts retenus précédemment.

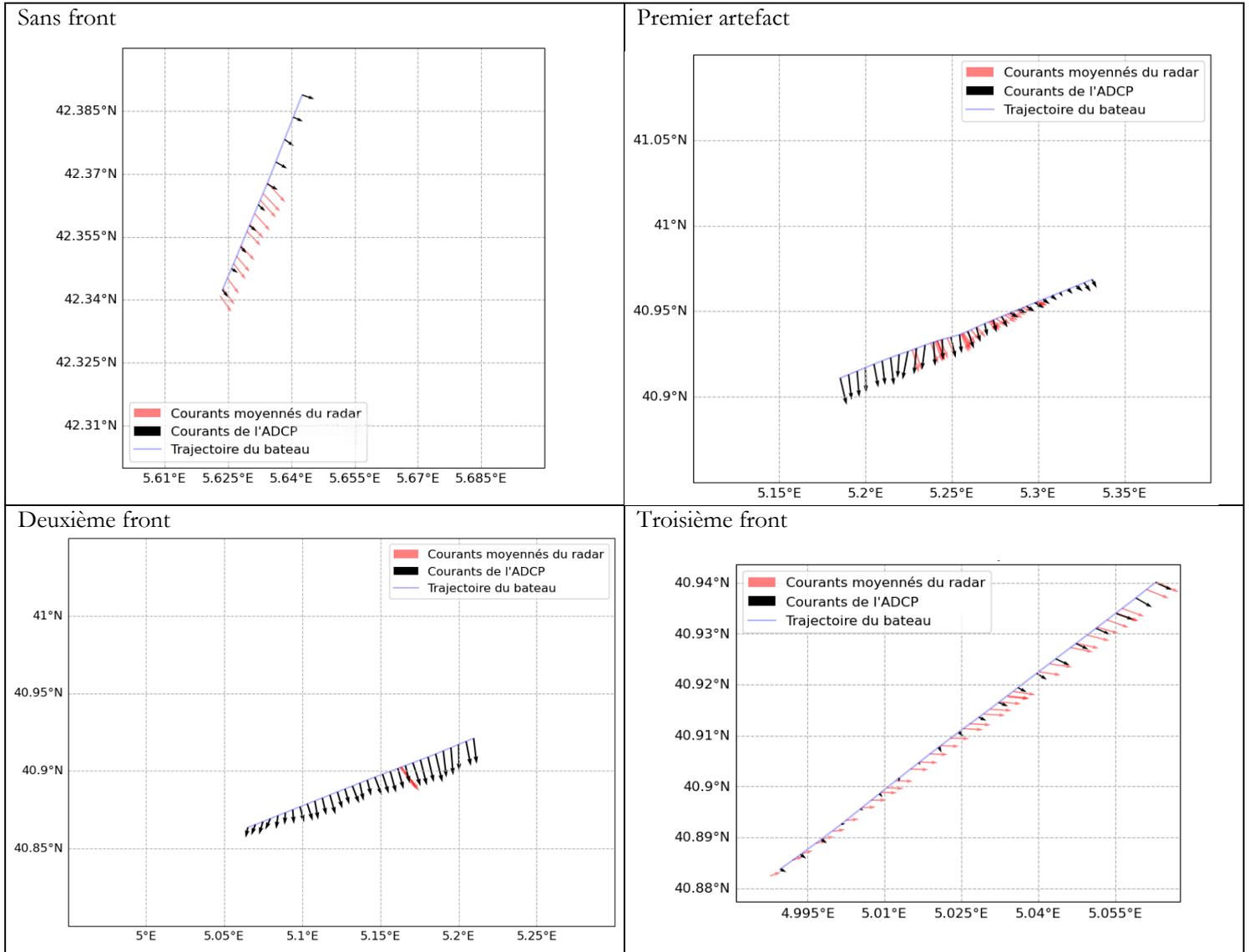


Tableau 2 : Vecteurs courant du radar et de l'ADCP.

On a ici un condensé de ce que peuvent fournir les résultats du traitement WAVE X : parfois on ne dispose que d'une portion de trajectoire sur lesquels les courants sont disponible, jusqu'à même un vecteur (deuxième front). Il y a systématiquement un décalage de direction entre les courants mesurés à 50m et ceux mesurés en surface par le radar. Ce changement de direction pourrait s'expliquer par une spirale d'Eckman : les particules en surface, dont le mouvement est une combinaison de courants liés à la stratification et au vent, sont déviées vers la droite. Plus on descend en profondeur, plus le changement de direction du courant est important, par la friction exercée par les couches d'eau supérieures. Cet effet expliquerait les différences de direction observées. Cependant ce raisonnement ne permet pas d'expliquer

---

le cas de la zone sans front, où ce sont les courants du radar qui sont à droite des courants mesurées plus profondément.

---

## 4. Discussions

Les comparaisons entre les simulations montrent que celle basée sur les courants MENOR semble sous-estimer les courants et en conséquence la signature des courants sur les grandeurs caractéristiques, comme dans les précédentes études sur l'effet du courant sur les vagues en Méditerranée qui ont conclu à un effet faible (Bolanos et al., 2007). Les résultats sont donc à mettre en perspective ; ils paraissent peu réalistes, en comparaison avec les écarts mesurés par les bouées SPOTTER, qui semblent plus être de l'ordre de la dizaine de centimètres, et les résultats obtenus avec la simulation basée sur les courants SWOT. Cette dernière est aussi à remettre en question ; il nous manque des observations en milieu de fauchée. Cependant la zone est riche en courants, on peut se demander si avec les données de courants hors des fauchées les écarts n'auraient pas pu être encore plus marqués, par exemple avec des gradients orthogonaux à la propagation des vagues.

Les comparaisons entre les courants montrent une sous-estimation des courants obtenus avec SWOT par rapport aux mesures ADCP et radar. Les courants mesurés par les ADCP à 85 et 150kHz sont plus en profondeur, et les courants du radar sont au contraire, plus à la surface. Les courants du satellite sont calculés sous l'hypothèse de l'équilibre géostrophique, à partir de données non validées. Ces deux facteurs peuvent expliquer la sous-estimation : l'équilibre géostrophique ne permet pas de prendre en compte les autres courants à échelle plus petite, et le second facteur ajoute une part d'incertitude, non quantifiable, sur les courants. Les courants sont pourtant du même ordre de grandeur que ceux mesurés, et les courbes de densité de probabilité des mesures ADCP et du satellite se ressemblent fortement.

La simulation basée sur les courants SWOT fournit des résultats du même ordre de grandeur que les mesures des bouées SPOTTER. La comparaison est malgré tout courte et limitée : on n'a comparé les sorties du modèle qu'avec des mesures de 4 jours, sur les trajectoires de deux bouées.

Les mosaïques obtenues semblent satisfaisantes, en comparaison avec les données ADCP à 150kHz. Les résultats sont irréguliers par forts et faibles vents, ou lorsque la direction du bateau change. Par ligne droite et vent moyen, le traitement fournit des résultats réguliers et exploitables ; on pourrait imaginer une carte des courants d'une zone, en effectuant des transects rectilignes et proches, puis en superposant les mosaïques de chaque transect. La sortie du traitement WAVE-X cependant fournit des résultats irréguliers, sans que les raisons soient clairement identifiées. Comme on peut le voir sur les vecteurs, les données sont lacunaires. Parfois on obtient des vecteurs denses et cohérents par faibles ou forts vents, et des portions incohérentes et lacunaires par vents moyens. Une partie des dysfonctionnements a probablement un lien avec l'instrument, utilisé pour la navigation ; un changement de mode de navigation pourrait changer les réglages du radar, et ainsi perturber l'acquisition / traitement par WAVE-X.

---

## Conclusions

J'ai réalisé un traitement et analyse des données de vagues acquises lors des campagnes C-SWOT et WEMSWOT en Méditerranée occidentale en avril et mai 2023, et des simulations du champ de vagues avec le modèle numérique WAVEWATCH III afin d'aider à l'interprétation de des mesures. Dans certaines situations météorologiques, j'ai pu observer la signature des courants, sur les simulations, sur les mosaïques de rétrodiffusion issues du radar de navigation, et probablement sur les bouées SPOTTER. Pour ces dernières on ne dispose pas de suffisamment d'éléments pour interpréter leurs écarts. La mise à disposition des données SWOT devrait permettre d'éclaircir cela. Une simulation sur début avril, avec des courants calculés à partir des données quotidiennes de SWOT, aurait pu me permettre d'avoir une base de comparaison plus fiable, et une idée plus précise des écarts observable. Des acquisitions plus longues avec des bouées SPOTTER proches serait également intéressant ; on aurait ainsi plus de données de référence, il serait plus facile de reconnaître un écart dû aux courants d'un écart lié aux autres facteurs.

Les résultats du radar sont intéressants, bien qu'irréguliers. Les radars de navigation étant omniprésents dans la marine marchande et militaire, il serait intéressant de récupérer d'importants volumes de données, dans des conditions variées, pour mieux appréhender le traitement de ces données, autant pour les mosaïques que pour le traitement par WAVE-X. Un traitement indépendant avec un re-calcul du courant à partir des relations de dispersion des vagues observées sur les séquences d'images pourrait permettre de mieux comprendre les résultats du traitement standard.

---

## Bibliographie

- André, G., Garreau, P., & Fraunie, P. (2009). Mesoscale slope current variability in the Gulf of Lions. Interpretation of in-situ measurements using a three-dimensional model. *Continental Shelf Research*, 29(2), 407-423. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.10.004>
- Ardhuin, F. (2021). *Ocean waves in geosciences*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16019.78888/9>
- Ardhuin, F., Gille, S. T., Menemenlis, D., Rocha, C. B., Rasche, N., Chapron, B., Gula, J., & Molemaker, J. (2017). Small-scale open-ocean currents have large effects on wind-wave heights. *Journal Of Geophysical Research-Oceans*, 122(6), 4500-4517. <https://doi.org/10.1002/2016JC012413>
- Ballarotta, M., Ubelmann, C., Pujol, M.-I., Taburet, G., Fournier, F., Legeais, J.-F., Faugère, Y., Delepouille, A., Chelton, D., Dibarboure, G., & Picot, N. (2019). On the resolutions of ocean altimetry maps. *Ocean Science*, 15(4), 1091-1109. <https://doi.org/10.5194/os-15-1091-2019>
- Bolanos, R., Osuna, P., Wolf, J., Monbaliu, J., & Sanchez-Arcilla, A. (2007). *The POLCOMS-WAM Wave-Current Interaction Model: Development and performance in the NW Mediterranean* (C. Guedes Soares & P. K. Kolev, Éd.s.; Vol. 2, p. 685-691). Taylor Francis. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/5374/>
- Copernicus Marine Service (2022), *Product User Manual*.
- De Carlo, M., Ardhuin, F., Ollivier, A., & Nigou, A. (2023). Wave Groups and Small Scale Variability of Wave Heights Observed by Altimeters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(8), e2023JC019740. <https://doi.org/10.1029/2023JC019740>
- Duchez, A. (2011) *Contrôle du courant Nord Méditerranéen dans le golfe du Lion : une approche par simulation du système d'observation*.  
NNT : 2011TOUL0005ff. fftel-03092269
- Garreau, P., Garnier, V., & Schaeffer, A. (2011). Eddy resolving modelling of the Gulf of Lions and Catalan Sea. *Ocean Dynamics*, 61(7), 991-1003. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0399-2>
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628955>

- 
- Les vents régionaux méditerranéens—Tempêtes en France métropolitaine.* (s. d.). Consulté 15 mai 2023, à l'adresse <http://tempetes.meteo.fr/Les-vents-regionaux-mediterraneens.html#mistral>
- Maréchal, G. (2022). *Significant wave height variability and meso- and submesoscale current properties* [Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest]. <https://theses.hal.science/tel-03784757>
- Marechal, G., & Ardhuin, F. (2021). Surface Currents and Significant Wave Height Gradients : Matching Numerical Models and High-Resolution Altimeter Wave Heights in the Agulhas Current Region. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2). <https://doi.org/10.1029/2020JC016564>
- Millot, C. (1999). Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 20(1), 423-442. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(98)00078-5)
- Morrow, R., Fu, L.-L., Ardhuin, F., Benkiran, M., Chapron, B., Cosme, E., d'Ovidio, F., Farrar, J. T., Gille, S. T., Lapeyre, G., Le Traon, P.-Y., Pascual, A., Ponte, A., Qiu, B., Rasclé, N., Ubelmann, C., Wang, J., & Zaron, E. D. (2019). Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00232>
- Munk, W. (2002). The Evolution of Physical Oceanography in the Last Hundred Years. *Oceanography*, 15. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2002.45>
- Stewart, R. H., & Joy, J. W. (1974). HF radio measurements of surface currents. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 21(12), 1039-1049. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90066-7)
- Tolman, H., Accensi, M., Alves, J.-H., Ardhuin, F., Bidlot, J., Booij, N., Bennis, A.-C., Campbell, T., Chalikov, D., Filipot, J.-F., Foreman, M., Janssen, P., Leckler, F., Li, J.-G., Chawla, A., Lind, K., Orzech, M., Padilla-Hernandez, R., Rogers, E., & Zieger, S. (2014). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18.*