



CAMPAGNE DE MESURES

PROJET DE PARC EOLIEN EN MEDITERRANEE (ZONE B)

Analyse, traitement et qualification des données

Volet « Courant »

Lot 4 – référence T4.C

Auteurs : Pierre AGIUS, Thibault DELAHAYE, Stéphanie DESMARE, Edith LE BORGNE

Référence : convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de site en vue d'appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises

Table des matières

| | |
|--|----|
| CAMPAGNE DE MESURES..... | 1 |
| PROJET DE PARC EOLIEN EN MEDITERRANEE (ZONE B)..... | 1 |
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Observations des courants sur la zone EMR de Méditerranée B | 4 |
| 2.1 Emplacements du point de mesure | 4 |
| 2.2 Systèmes d’acquisition | 6 |
| 2.3 Paramètres mesurés..... | 7 |
| 3. Contrôle qualité et méthode de validation des données | 7 |
| 3.1 Contrôle de la continuité de la donnée..... | 7 |
| 3.1.1 Contrôle du format et de l'information | 8 |
| 3.1.2 Bilan des résultats : disponibilité, continuité..... | 8 |
| 3.2 Contrôle qualité..... | 10 |
| 3.2.1 Données de hauteur d’eau | 10 |
| 3.2.2 Donnée de conductivité..... | 11 |
| 3.2.3 Données de courant..... | 11 |
| 3.3 Validation des données | 17 |
| 4. Post-traitements | 18 |
| 4.1 Analyse des données courants..... | 18 |
| 4.2 Caractéristiques des courants | 18 |
| 4.3 Modèle hydrodynamique..... | 20 |
| 4.3.1 Description du modèle numérique..... | 20 |
| 4.4 Qualification du modèle sur la zone d’étude | 20 |
| 5. LIVRABLES..... | 23 |
| 6. CONCLUSION..... | 24 |
| 7. REFERENCES..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Synthèse du système d'acquisition déployé en Méditerranée | 26 |
| Annexe 2 : Récapitulatif de la configuration mise en place | 27 |
| Annexe 3 : Bilan de la disponibilité des mesures | 28 |
| Annexe 4 : Architecture du livrable transmis..... | 29 |
| Annexe 5 : Cartes de la circulation générale et saisonnières en Méditerranée Ouest (ZEE française) | 30 |

1. Introduction

La présente étude vise à compléter les travaux menés dans le cadre du Lot 2 des études EMR menées par le Shom en Méditerranée Zone B et dont l'objectif est de caractériser les conditions météocéaniques sur la zone envisagée pour l'implantation d'un parc éolien offshore en Méditerranée, à partir des mesures existantes et produits de courants disponibles. Ces études s'inscrivent dans le cadre de l'appel d'offres n°6 (AO6) conduit par la DGEC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat).

Afin de compléter la connaissance existante¹, une campagne de mesures météorologiques et océanographiques a été menée sur trois sites dans le Golfe du Lion.

Ce livrable présente les mesures océanographiques (hors houle) acquises lors de cette campagne d'une durée initialement fixée à 12 mois calendaires et prolongée de manière à pouvoir disposer d'une série de données représentative d'une année de mesures. Dans un premier temps, ce rapport présente une description du suivi, des contrôles et des traitements appliqués aux données de courants et de hauteur d'eau acquises durant cette campagne. Ensuite, les données seront qualifiées et interprétées sur la base des connaissances actuelles (données disponibles à proximité et modèles existants). Enfin, les comparaisons menées avec le modèle de courant 3D HYCOM mis en œuvre sur la zone Méditerranée par le Shom permettront d'évaluer la cohérence entre mesures et modèle.

L'analyse des paramètres de houle acquis durant la phase de mesure fait l'objet d'un rapport spécifique également rédigé par le Shom. De la même manière, un rapport dédié aux mesures météorologiques et études statistiques est fourni par METEOFRACTANCE.

2. Observations des courants sur la zone EMR de Méditerranée B

En complément des éléments déjà fournis dans le cadre du rapport de fin de campagne (2023, [3]), le présent paragraphe résume les principales informations sur les données collectées au niveau de la bouée B, leurs traitements et les résultats de leurs analyses et interprétations.

2.1 *Emplacements du point de mesure*

Une bouée LIDAR instrumentée a été déployée en Méditerranée, dans le Golfe du Lion en juin 2021. Le système, nommé **Bouée Méditerranée B (WINDSEA 12)** a été mis en place à environ 21 milles nautiques de Port La Nouvelle, et à 15 milles du Cap d'Agde, tel que présenté sur la figure 1.

La hauteur d'eau est de 90.3 m à l'endroit de la bouée.

¹ décrite dans les dossiers de l'état de la connaissance cités en références [1] et [2]

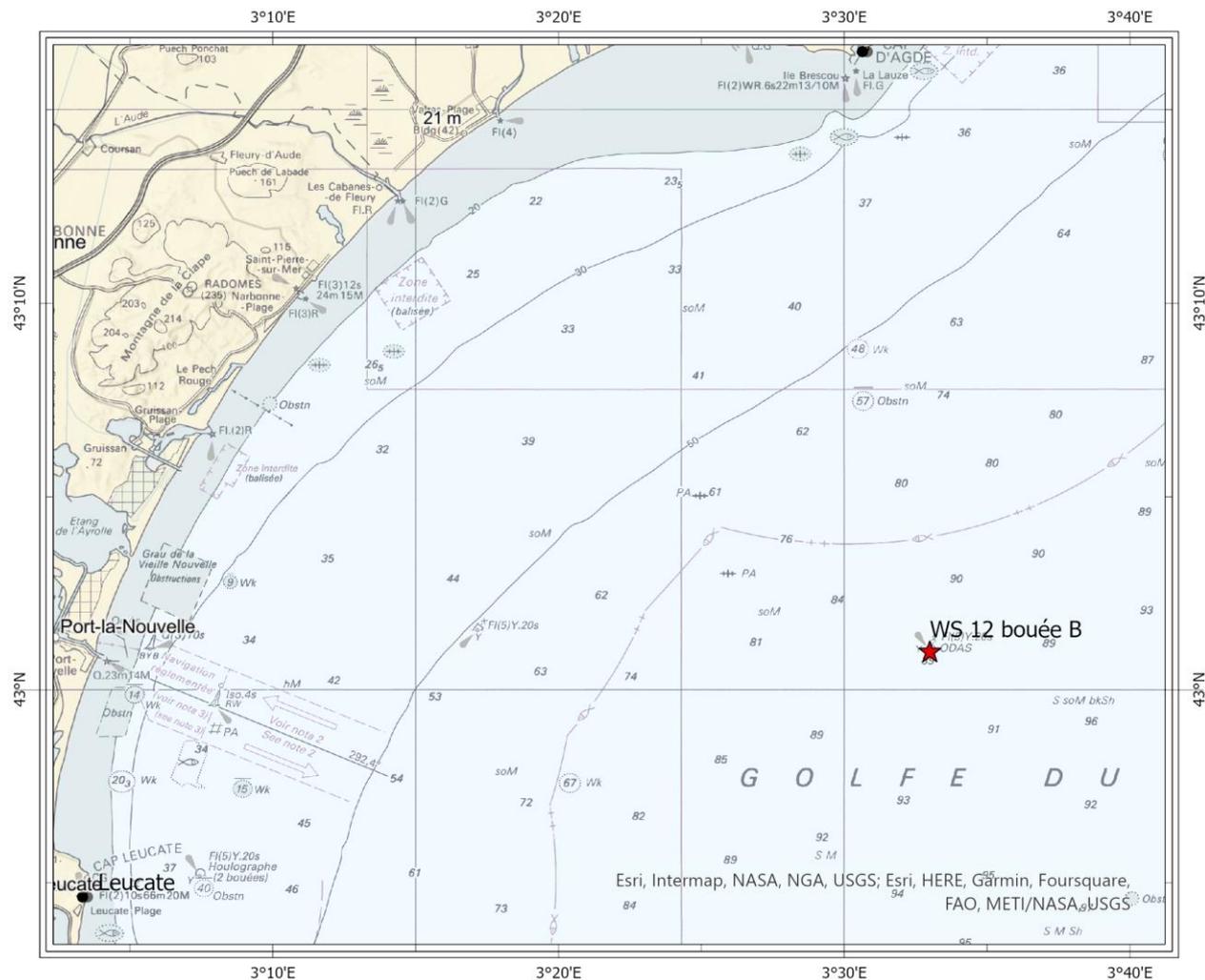


Figure 1 - Localisation de la bouée LIDAR WINDSEA 12 (© Shom)

Les acquisitions effectives pour les mesures de courant ont débuté le 9 juin 2021.

La campagne de mesure prévue initialement pour une durée de 12 mois consécutifs a été poursuivie au-delà afin de disposer d’une série de mesures suffisante, représentative de la saisonnalité, permettant de combler les périodes de mesure manquantes lorsque les instruments de mesures océanographiques sont défectueux (cf. [rapport \[3\]](#)).

Les métadonnées concernant la campagne sont fournies dans le tableau ci-après.

| | |
|---|----------------------|
| Bouée | WINDSEA 12 - bouée B |
| Longitude | 3°33.00' E |
| Latitude | 43°01.00' N |
| Profondeur (m / zéro des cartes marines) | 90.3 m |
| Date de début de campagne de mesure de courant | 09/06/2021 |
| Date de fin d'analyse des mesures de courant² | 30/06/2023 |

Tableau 1 - Caractéristiques de la campagne

2.2 Systèmes d'acquisition

Les paramètres océanographiques (houle, courant, hauteur d'eau, température) ainsi que des paramètres météorologiques (vents en altitude, humidité, etc.) ont été mesurés au niveau de la Bouée B (WINDSEA 12) depuis juin 2021. Le système de mesure déployé, les principes de mesure, les caractéristiques et configuration des instruments sont plus largement décrits dans les différents rapports de campagne et sont résumés en **annexes 1 et 2**.

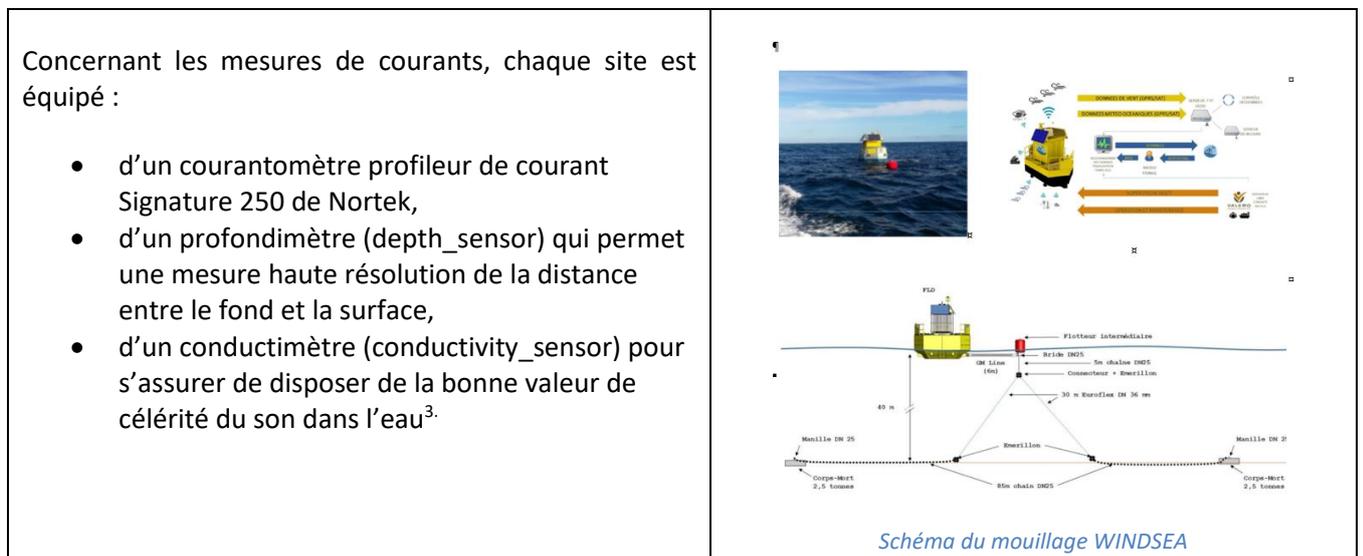


Figure 2 - Système de mesures océanographiques sur bouée multi-paramètres WINDSEA (© Akrocean)

²date arrêtée pour ce rapport, les acquisitions se poursuivent jusqu'à mi 2024

³ celle-ci est calculée à chaque pas de temps grâce à la mesure de température effectuée par l'ADCP, doté d'un capteur de température au niveau de la tête

Dans la suite du document, il est essentiel de retenir ce qui suit :

- Une mesure par profileur ADCP est basée sur l'acoustique et l'effet Doppler (changement de fréquence dans les fluides en mouvement).
- La mesure de vitesse le long des 4 faisceaux (BEAM) s'effectue en connaissant la vitesse de propagation d'une impulsion acoustique dans l'eau.
- L'ADCP utilise la vitesse du son dans l'eau au niveau des têtes des transducteurs pour calculer la vitesse du courant et la distance de mesure. La vitesse du son varie avec la température, la salinité et la profondeur (d'où l'intérêt de mesurer la conductivité pour recalculer la salinité).
- Le profileur Signature 250 peut calculer les vitesses et directions du courant sur différentes couches de la colonne d'eau.

Les réglages du courantomètre sont spécifiques et fonction de l'environnement du mouillage (voir **annexe 2**).

Le profileur acoustique (ADCP) est orienté vers le bas et fixé à la bouée de surface. Il a été paramétré pour acquérir une mesure de l'écoulement dans la colonne d'eau toutes les 15 minutes (moyenne sur 5 minutes). Celle-ci est échantillonnée au travers de 35 cellules de 3m d'épaisseur chacune avec une zone aveugle de 50 cm entre le transducteur et première cellule de mesure.

2.3 Paramètres mesurés

Pour chaque campagne, les données mises à disposition sont :

- les données brutes du courantomètre (**raw data adcp**) ;
- les données **moyennées** et/ou **corrigées** de la direction selon le Nord magnétique
 - o des données de courant (vitesse et direction) et d'attitude (cap, roulis, tangage) issues de l'ADCP (**adcp nortek pnorc** et **adcp nortek pnors**),
 - o des données de hauteur d'eau (**depth sensor**)
 - o des données de température et conductivité (**conductivity sensor**).

Tout au long de la campagne, quatre fichiers de données sont envoyés quotidiennement par télémétrie au format '.csv', en dehors des données brutes, très volumineuses, qui sont mises à dispositions après récupération physique sur site lors des maintenances. Les fichiers sont horodatés en heure UTC.

Le choix de l'intervalle de profilage prend en compte les variations ciblées. Dans le cas présent, au pas de temps de 15 minutes.

3. Contrôle qualité et méthode de validation des données

3.1 Contrôle de la continuité de la donnée

Le déploiement d'instruments scientifiques sur une bouée dans un environnement fortement dynamique comme en Mer Méditerranée, peut conduire à de nombreuses avaries. Il est ainsi nécessaire d'appliquer un certain nombre de vérifications sur la qualité des données afin d'assurer leur cohérence et leur fiabilité.

La validation des données est réalisée par l'application de procédures de filtrage, de contrôle qualité et la réalisation des post-traitements décrits ci-après. Les données incorrectes ou incohérentes doivent être supprimées et/ou « marquées ».

3.1.1 Contrôle du format et de l'information

Des contrôles élémentaires sont réalisés sur chaque série de données au fur et à mesure de leur mise à disposition. Ceux-ci permettent de disposer d'une première analyse des mesures et de mettre en évidence tout problème majeur nécessitant des interventions, soit pour modifier une configuration inadaptée, soit pour réparer un instrument défaillant.

Un premier niveau de contrôle a donc été effectué dès réception des données.

- Tri des répertoires :
 - o détection des lacunes = vérification que le nombre effectif de données correspond au nombre de données attendu => listing des fichiers manquants
 - o détection des doublons = sélection des fichiers à ne pas prendre en compte
- Contrôles de complétude :
 - o vérification du remplissage du fichier acceptable $\geq 80\%$ (écarté si condition non vérifiée)
 - o vérification du respect de la chronologie de la série temporelle (écarté si condition non vérifiée)
 - o contrôle des dates de début et de fin d'acquisition
 - o test de la continuité des données, listing des absences de données le cas échéant
- Contrôle de cohérence :
 - o détection des inhomogénéités (problème de format, d'unités, etc.), fichier non écarté mais qualifié avec un code spécifique
 - o vérification de la cohérence des paramètres (continuité des paramètres fournis et respect de immersions).

3.1.2 Bilan des résultats : disponibilité, continuité

Les résultats de ce premier niveau de contrôle sont décrits ci-dessous. Du fait des nombreuses difficultés rencontrées lors de la campagne de mesure⁴ (incidents, aléas techniques, chalutage, etc.) , les données récupérées ne sont pas complètes.

Le graphe suivant illustre l'état du jeu de données disponible pour cette étude.

⁴ Liste exhaustive fournie dans le rapport de campagne (voir Lot 3, 2023)

DECF EMR MEDITERRANEE B – Lot 4 - Volet technique COURANT v1.0

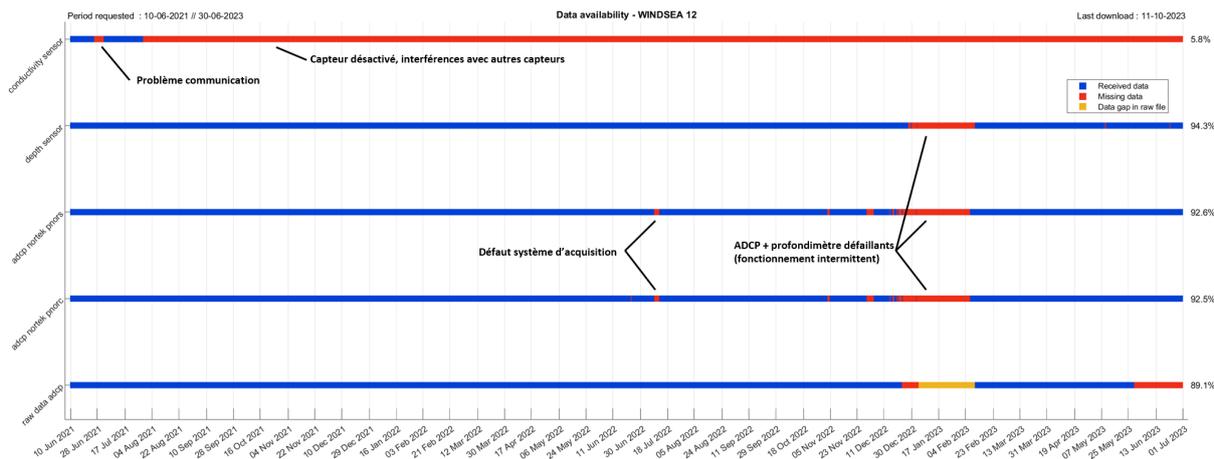


Figure 3 - Graphique de disponibilité des données sur le site Méditerranée B (WINDSEA 12) en date du 11 octobre 2023

Le taux de disponibilité des données de courant est résumé dans le tableau suivant :

| AO6 - Méditerranée | Date de début | Date de fin | Taux | Discontinuités constatées |
|--------------------|---------------|-------------|-------|--|
| MED B | 09/06/2021 | 30/06/2023 | 92.5% | Au total, 50 jours de données ont été perdues sur la période d'étude : La discontinuité la plus importante correspond à une interruption de la mesure durant 25 jours consécutifs en raison d'une défaillance de l'ADCP |

Tableau 2 - Taux de disponibilité des données de courant (fichiers adcp_pnorc)

Le tableau ci-après résume les fichiers exploités dans le cadre de l'étude.

| Bouée | Type de fichiers | Date de début | Date de fin | Notes |
|-------|---------------------|---------------|-------------|---|
| MED B | Adcp_pnorc | 09/06/2021 | 30/06/2023 | Configuré de 0.5 m à 102.5 (par cellule de 3 m) |
| | Adcp_pnors | 09/06/2021 | 30/06/2023 | |
| | Conductivity_sensor | 10/06/2021 | 21/10/2021 | Arrêté suite à des interférences avec le wave sensor. |
| | Depth_sensor | 10/06/2021 | 30/06/2023 | |

Tableau 3 - Répartition des types de données par plage d'acquisition

3.2 Contrôle qualité

La deuxième phase de contrôle consiste en la visualisation globale de toutes les séries temporelles des paramètres océanographiques pouvant :

- mettre en évidence les valeurs aberrantes (spikes), la stationnarité,
- vérifier présence de toutes les plages directionnelles (pour les mesures de direction) et le respect de la gamme de mesure pour tous les paramètres,
- s’assurer de la bonne corrélation physique entre tous les paramètres.

3.2.1 Données de hauteur d’eau

La mesure de hauteur d’eau au niveau de la bouée a été obtenue via le profondimètre (depth_sensor) mis en œuvre sur la bouée. L’instrument déployé est positionné à 1.35m sous la ligne de flottaison et mesure la hauteur d’eau instantanément.

Lors du contrôle des données brutes de hauteur d’eau, beaucoup de valeurs aberrantes, et de bruits, ont dû être filtrés et écartés du jeu de données (16.3%).

La comparaison avec la hauteur d’eau prédite au niveau de la bouée permet de s’assurer de la cohérence de la composante tidale du signal mesuré.

Les données de hauteurs d’eau prédites sont peu cohérentes avec les données mesurées, en effet, le marnage est faible en Méditerranée, et les surcotes ou décotes sont surtout liées aux vents établis, à la pression atmosphérique et à la houle, qui ne sont pas pris en compte dans ces calculs. Néanmoins, le signal de marée module localement le signal mesuré : une moyenne glissante pourrait mettre en évidence cette tendance, bruitée à première vue.

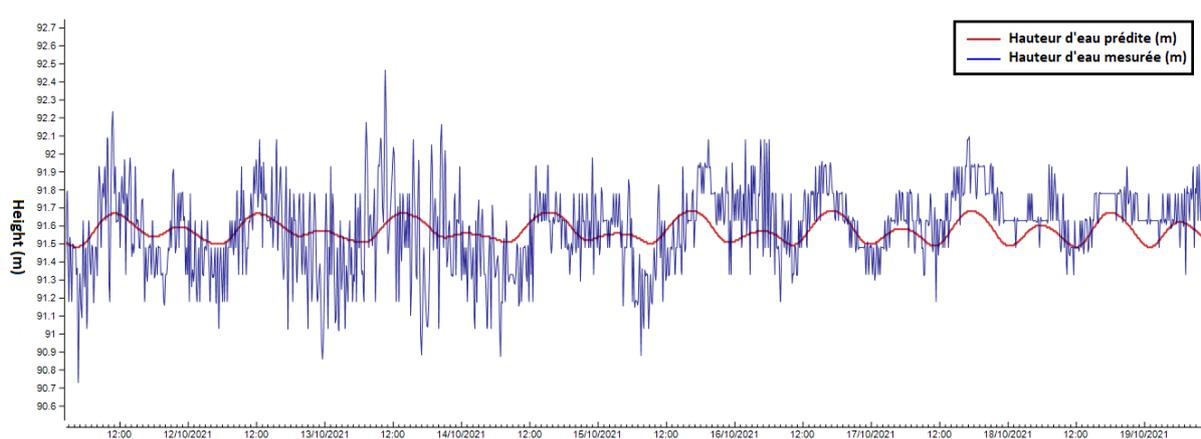


Figure 4 - Variation tidale de la hauteur d'eau au niveau de la bouée WINDSEA 12 en octobre 2021 - comparaison de la hauteur prédite (rouge) avec les observations du profondimètre (bleu)

Enfinement : 83.7% des mesures de hauteur d’eau ont été validées

3.2.2 Donnée de conductivité

Les données de conductivité devaient être collectées afin de procéder au calcul de la salinité puis de la célérité du son dans l'eau. Des interférences ont été détectées avec d'autres capteurs (houle, notamment), et ont ainsi induit un arrêt prématuré des mesures. En outre, elles se sont révélées incohérentes en raison d'un défaut de calibration de l'instrument. Ces données sont donc totalement inexploitable.

Sans possibilité d'établir la célérité du son dans la colonne d'eau sous la bouée, c'est une valeur fixe définie par défaut lors de la configuration du courantomètre qui a été retenue. Il est à noter que la célérité du son dans l'eau varie généralement en fonction de la profondeur sous la surface de l'eau, cette variation n'a pas d'effet sur la mesure de la vitesse horizontal de l'ADCP mais en a sur la précision de la position des cellules de mesure (§3.2.3.4).

3.2.3 Données de courant

Les données de courant contrôlées sont celles issues des fichiers adcp_pnorc (données de vitesse et direction) et adcp_pnors (données d'attitudes : cap, roulis, tangage)⁵.

3.2.3.1 Vérification de l'inclinaison des instruments

La première étape du contrôle des données concerne la stabilité de la bouée, nécessaire pour la qualité et la cohérence des mesures. Il s'agit donc d'identifier les périodes de mesure durant lesquelles la bouée s'est éloignée de sa position initiale, au-delà du seuil de tolérance. Pour cela, des graphiques temporels des données d'inclinaison (tangage et roulis), issues des fichiers adcp_pnors, sont tracés pour observer le comportement du système bouée-ADCP lors de la campagne. Les mesures effectuées avec des angles d'inclinaison de l'appareil excédant 10°, sont altérées et donc non retenues pour l'étude.

Ce contrôle est primordial afin de s'assurer de la fiabilité des données :

- si l'inclinaison est inférieure à 10°, les données sont fiables ;
- si l'inclinaison est grande (entre 10° et 30°), la précision des données est affectée et les mouvements excessifs de l'instrument ne sont pas compensés par le logiciel intégré, les données peuvent comprendre des erreurs et sont donc peu fiables ;
- si l'inclinaison de l'appareil est excessive (supérieure à 30°), les profils de courants sont possiblement erronés ; les données acquises avec de telles inclinaison des cellules ne sont pas fiables et doivent être supprimées.

Les séries temporelles traduisant l'inclinaison de l'ADCP durant la campagne de mesures sont présentées ci-dessous ([figure 5](#)).

⁵ Heading, roll, pitch sur les graphiques

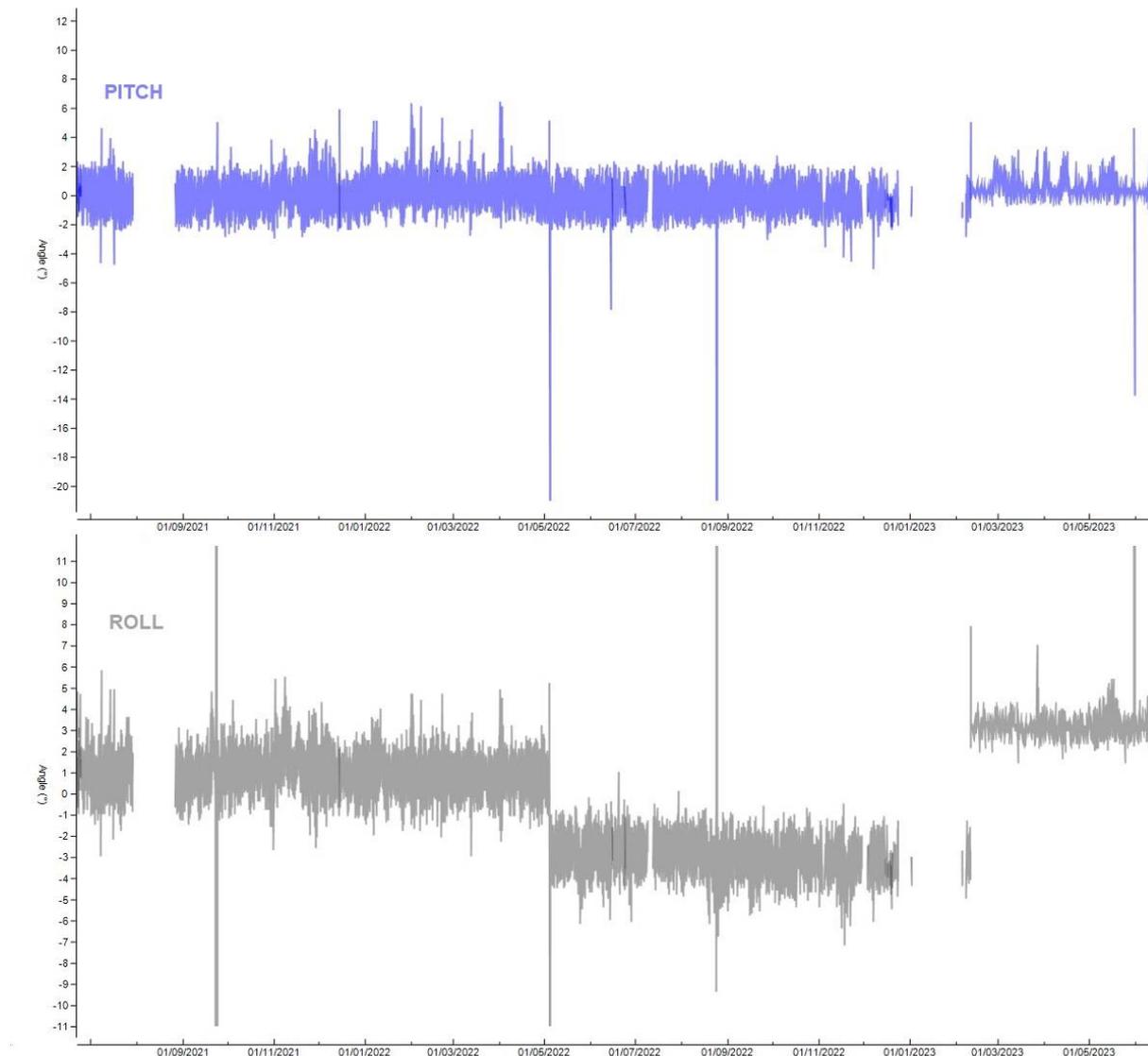


Figure 5 - Série temporelle de l'inclinaison de l'instrument durant la période de mesure

Les deux décalages observés sur les données de roulis en mai 2022 et février 2023 font suite à des opérations de maintenance sur la bouée qui ont modifié l'équilibre de la bouée et ainsi impacté son inclinaison moyenne. Cela n'a pas d'effet sur la qualité de l'acquisition.

Le critère le plus restrictif (seuil de 10°) a été utilisé pour nettoyer les données.

Résultat des filtres liés à ce critère : moins de 0.001% de données écartées

3.2.3.2 Vérification des données de pression

L'étape suivante consiste à vérifier que les données de pression acquises par l'ADCP sont valides. Le graphe de la série temporelle des mesures de pression a permis de vérifier le bon déroulement de la campagne et la bonne immersion du capteur. En cas de changement brusque de la pression, il convient de faire preuve d'une attention particulière. Les variations de pression les plus remarquables correspondent généralement aux interventions des équipes techniques (déploiement, maintenances). Les mesures concernées sont alors considérées comme incohérentes et ne sont pas conservées pour le post-traitement.

3.2.3.3 Vérification des données de température

La série temporelle de la température de l'eau mesurée par le capteur interne de l'ADCP est représentée ci-dessous (figure 6).

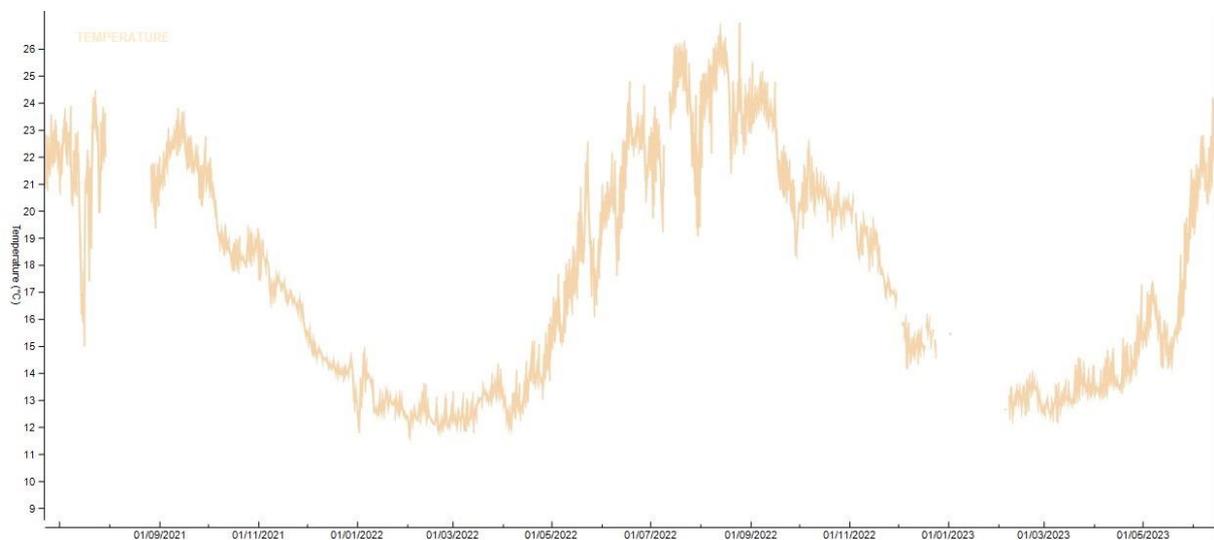


Figure 6 - Série temporelle de la température de l'eau mesurée en subsurface, Bouée WINDSEA 12.

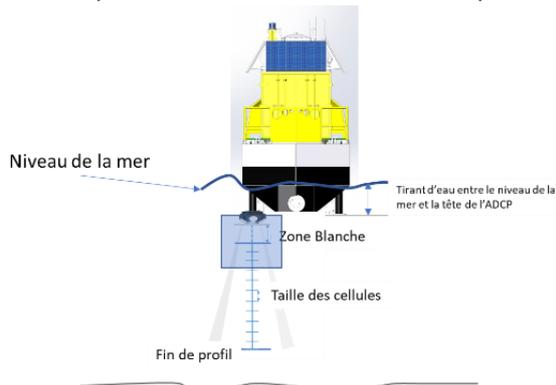
Mis à part un signal bruité, les données de température sont cohérentes, et la variabilité saisonnière est bien visible :

| | |
|--------------------------|---|
| | MED B |
| Période hivernale | Minimum : 11.9° début février 2022 |
| Période estivale | Maximum : 27.8° fin août 2022 |

3.2.3.4 Emplacement des cellules de mesure

Sur la zone d'étude, l'ADCP a été déployé (configuration « tête en bas ») à quelques mètres au-dessous de la surface de la mer.

À noter qu'il existe une zone blanche à proximité de la tête du capteur (de 50 cm minimum) où la mesure de courant ne peut être faite, cf. figure ci-contre).



Cette distance correspond au produit du temps nécessaire pour que les faisceaux acoustiques qui émettent les impulsions soient prêts à écouter leurs échos, par la célérité de l'onde dans le fluide. Ainsi, la plage de profilage commence à la profondeur qui est égale à l'épaisseur de la zone blanche plus celle d'une cellule.

Avec une orientation vers le bas, le capteur ne peut pas mesurer les courants proches du fond en raison d'interférences entre les ondes émises et celles qui y sont réfléchies/diffractées (phénomène de retour des lobes secondaires).

Un ADCP intègre un calculateur qui utilise la célérité du son dans l'eau afin d'associer les vitesses de déplacement des particules mesurées à la bonne cellule (au bon intervalle de profondeur), selon le retard mesuré entre l'émission et la réception de l'onde acoustique. Ces calculs prennent également en compte la géométrie du capteur, et sont basés sur l'hypothèse selon laquelle la vitesse du son ne varie pas avec la profondeur. C'est pour cette raison qu'il est utile de coupler ces mesures avec celles d'un conductimètre (température et salinité) afin d'obtenir la célérité réelle du son dans la colonne d'eau et donc d'associer les vitesses mesurées par l'ADCP aux bonnes profondeurs. En l'absence de données de conductivité, il n'est pas possible de déterminer la profondeur de chaque cellule de manière optimale.

Compte tenu du tirant d'eau de 1.60 m entre le niveau de la mer et la tête de l'ADCP, de la zone blanche de 0.5 m et de la taille des couches de mesure de 3 m, la répartition des cellules de mesure le long de la colonne d'eau est la suivante :

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Profondeurs configurées | 0.5 - 3.5 - 6.5 - ... - 102.5m |
| Profondeurs calculées | 2.1 - 5.1 - 8.1 - ... - 104.1m |

3.2.3.5 Vérification des niveaux acoustiques

D'autres incohérences peuvent être déterminées graphiquement par de fortes discontinuités sur l'amplitude du signal enregistré (vitesse et écho rétro diffusé). L'amplitude des niveaux acoustiques est une mesure de l'intensité ou force du signal rétro diffusé par les particules en suspension dans l'eau. Cette valeur est exprimée en dB (ou convertie en unité sans dimension dénommée « counts »). Cette valeur est directement liée à la quantité de particules présentes dans l'eau. L'instrument ne peut pas mesurer la vitesse avec précision si l'eau ne contient pas assez de diffuseurs. L'intensité du signal réfléchi serait alors trop faible. A contrario, elle peut augmenter excessivement s'il y a trop de cibles en mouvement.

Un contrôle de qualité de l'amplitude doit être appliqué pour chaque beam sur l'ensemble du profil de mesure. Typiquement, des amplitudes acoustiques élevées sont observées à proximité immédiate du capteur et diminuent de façon exponentielle avec la distance à l'instrument (figure 7). Une augmentation significative des niveaux acoustiques peut correspondre à une rencontre avec une interface (surface, fond ou un obstacle). Les cellules les plus éloignées du capteur, et pour lesquelles

le signal commence à augmenter (réflexion sur le fond), sont susceptibles d’être corrompues et sont à retirer du profil.

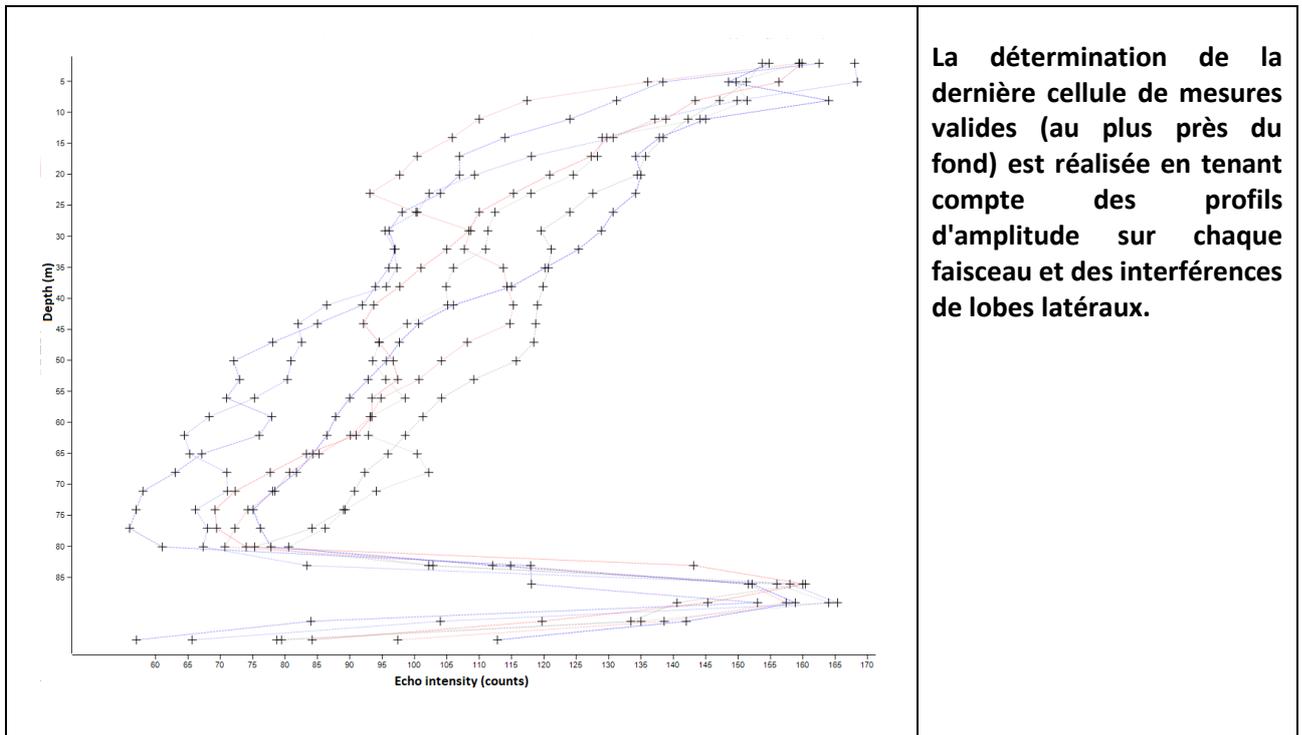


Figure 7 - Profils verticaux à différents instants du signal ampl beam1 – WINDSEA 12

3.2.3.6 Contrôle des valeurs de corrélation

La corrélation fournie par l’ADCP est un excellent indicateur de la qualité des mesures issues de l’instrument. Il s’agit d’une mesure statistique de la cohérence ou de la « similitude » entre les signaux émis et réfléchis. La corrélation est exprimée en %, où 100 % correspond à une corrélation parfaite et 0 % à l’absence de similitude.

Les couches de mesures situées dans la zone d’interférences à proximité du fond ont été supprimées, avec un seuil conforme au manuel du fournisseur de l’instrument.

| Constat | MED B |
|---|--------|
| Première couche subsurface validée | 5.10m |
| Invalidation des couches au fond au-delà de | 80.10m |

Tableau 4 - Résultats de l’analyse des profils de corrélation et d’amplitude

3.2.3.7 Vitesses et directions

Les données relatives à la vitesse sont exprimées en m/s.

- Les profils de courant qui présentent d'importantes variations verticales ou des structures verticales doivent être signalés comme étant suspects.
- Les profils physiquement irréalistes (par exemple, des variations de plus d'1 m/s d'une couche à l'autre), dont les valeurs sont éloignées de la moyenne, sont à supprimer.

Les figures suivantes permettent de visualiser les variations du courant en amplitude et direction, sur l'ensemble de la colonne d'eau durant la période considérée pour l'analyse ici présente. L'axe des abscisses représente le temps, l'axe des ordonnées correspond à la hauteur d'eau et la couleur traduit la valeur de la vitesse ou de la direction (selon l'échelle de couleur à droite).

La [figure 8](#) montre les champs 3D de vitesse et de direction observés par l'ADCP au niveau de la bouée WINDSEA 12.

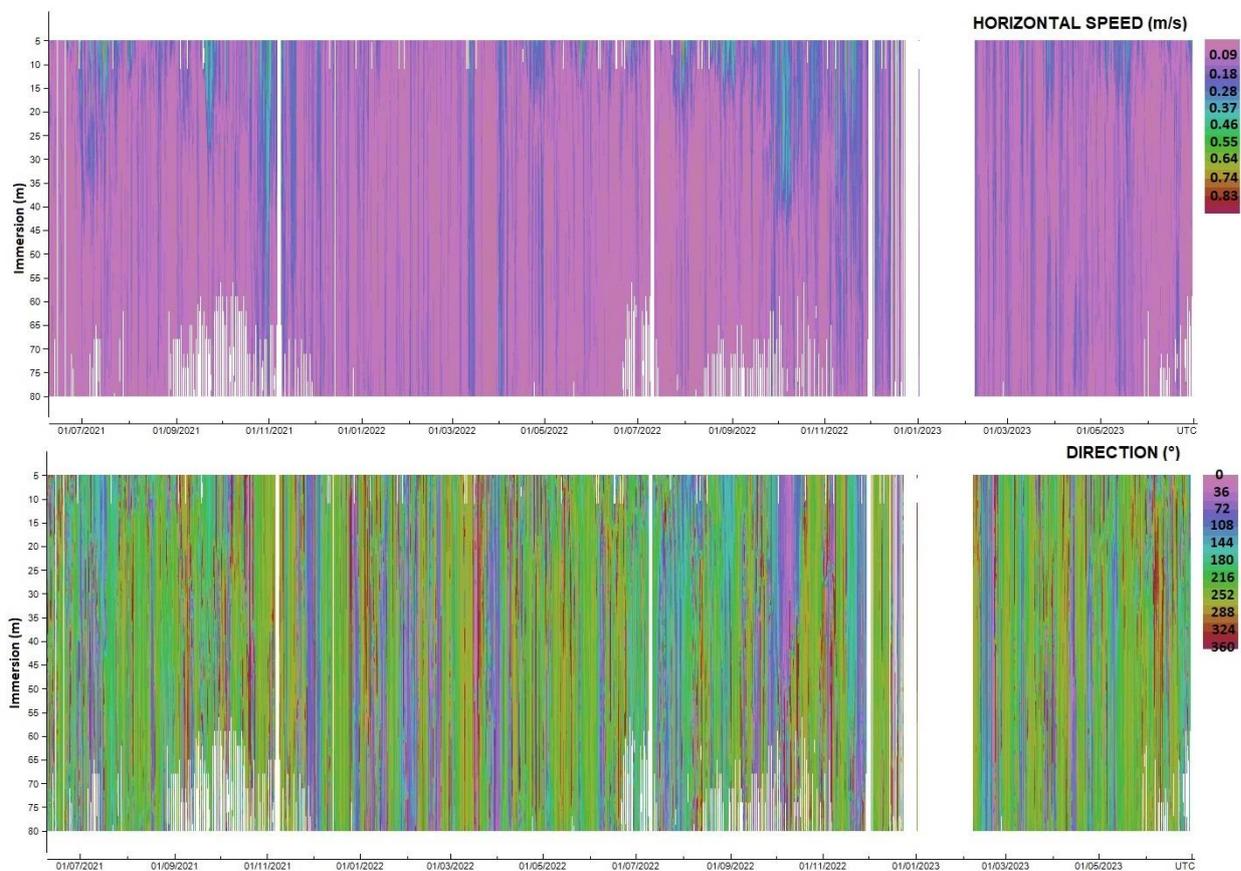


Figure 8 - Champ 3D de l'amplitude et de la direction du courant sur la période d'étude

La figure ci-dessous se focalise sur le mois de septembre 2022, durant lequel des variations périodiques sont visibles sur le graphique des directions. Leur fréquence, et les rotations qu'elles décrivent dans l'ensemble de la colonne d'eau semblent correspondre à un phénomène d'oscillations inertielles faisant suite à un épisode venteux. Ces d'oscillations, bien décrites par *Petrenko et al. ([5], 2003)* en Méditerranée, ont une période caractéristique qui dépend de la latitude (~17h30 sur la zone d'étude) et qui correspond donc bien à ce qui est observé ici. Ces oscillations se traduisent également par une variation de l'amplitude de la vitesse et ont été observées après différents évènements venteux sur la

période d'étude. Leur impact sur la circulation à court terme est prépondérant. Les courants de marée (~12h de période) sont quant à eux difficiles à détecter car très faibles en Méditerranée.

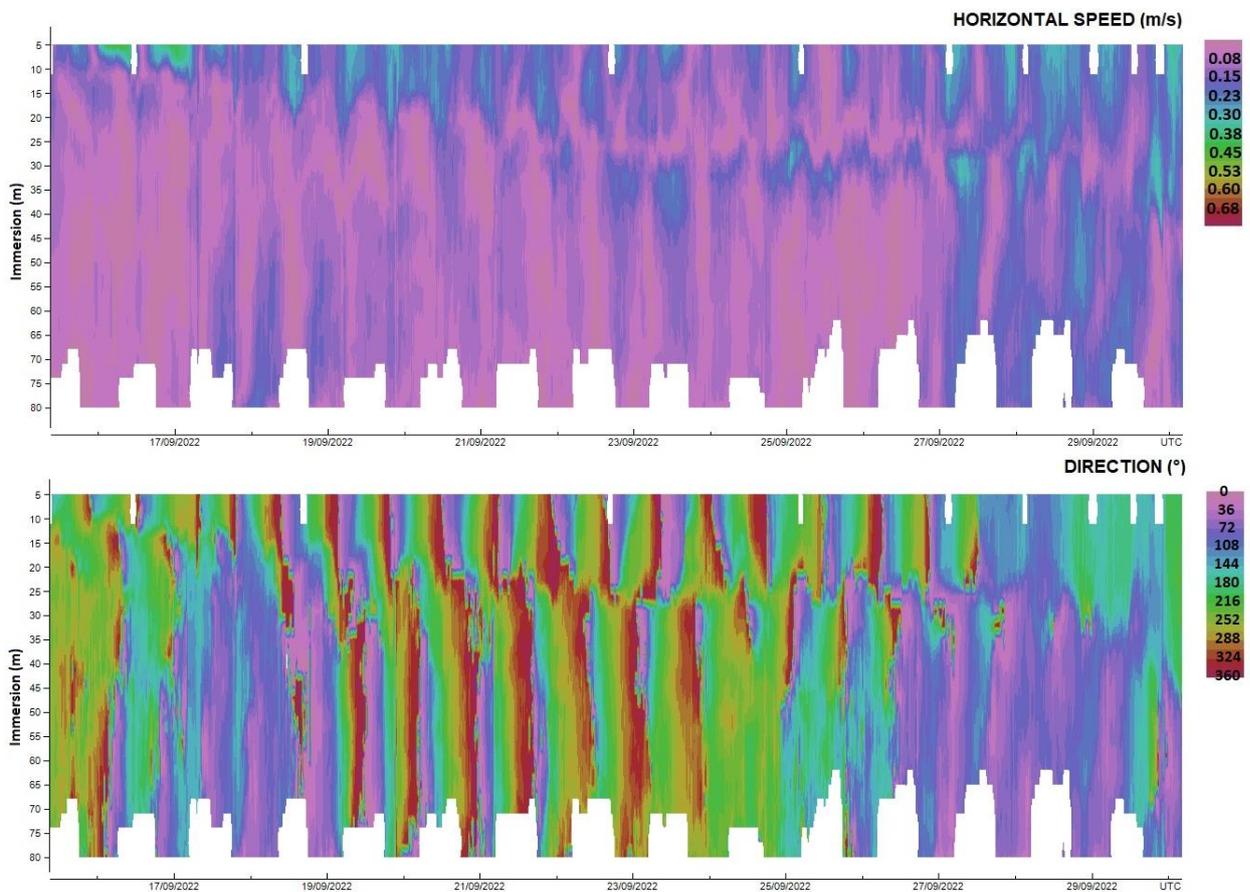


Figure 9 - Champ 3D de l'amplitude et de la direction du courant durant le mois de septembre 2022

3.3 Validation des données

Le tableau ci-dessous présente le pourcentage de retour de données valides.

| Bouée WS 12 – MED B | Début de mesure validée | Fin de mesure validée | % de paramètres mesurés valides | Commentaires |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|--|
| ADCP (vitesse direction) | 09/06/2021 | 30/06/2023 | 94.8% | Les couches sont dans l'ensemble très bien exploitables. La couche 8.1m est celle comprenant le plus de données non validées (32.5%) |
| Attitudes | 09/06/2021 | 30/06/2023 | 94.8% | Très peu de données aberrantes (maintenances...) |
| Hauteur d'eau | 10/06/2021 | 30/06/2023 | 83.7% | Sources d'erreurs : biofouling, bancs de poissons... |
| Conductivité | - | - | 0% | Données inexploitable, appareil désactivé |

Tableau 5 - Pourcentage de données valides sur le site de mesure WINDSEA 1distance2

4. Post-traitements

4.1 Analyse des données courants

Les mesures de courant moyennées toutes les 15 minutes sont présentées dans ce paragraphe. Par convention, la direction du courant indique la direction vers laquelle il porte.

4.2 Caractéristiques des courants

Le choix des couches d'intérêt dans la colonne d'eau est effectué en examinant les profils verticaux de vitesses qui permettent de visualiser la variabilité de l'intensité des courants selon la profondeur. En milieu homogène, le profil de courant est généralement caractérisé par des amplitudes importantes en surface et subsurface qui diminuent de manière logarithmique en fonction de la profondeur. Dans des eaux plus hétérogènes et selon les saisons, il est possible d'observer une variabilité plus marquée dans les couches inférieures, avec parfois des vitesses plus importantes en profondeur.

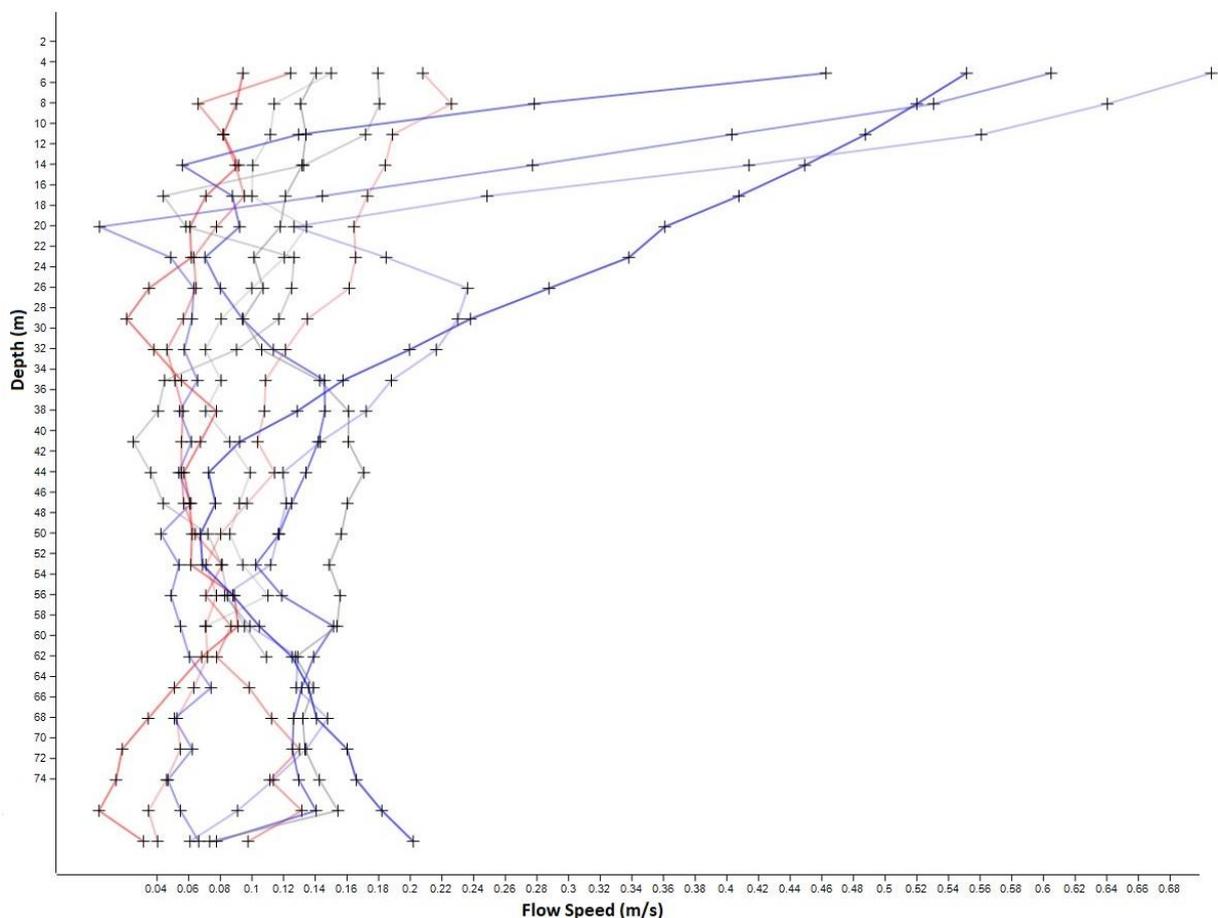


Figure 10 - Représentation de différents profils verticaux de la vitesse pour la bouée WINDSEA 12

La figure qui suit illustre les séries temporelles représentatives de la colonne d'eau.

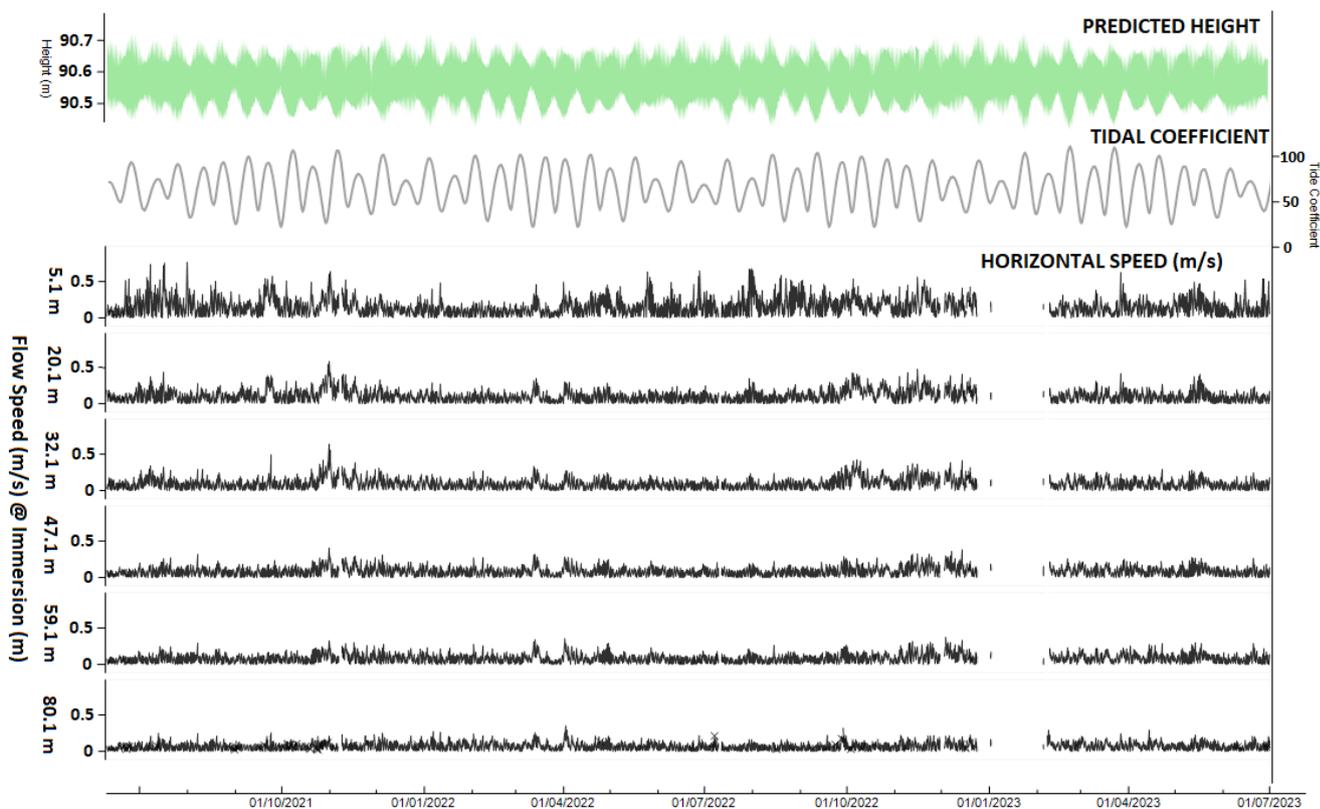


Figure 11 - Mesures de courants réalisées à différentes immersions (de 5.1m à 80.1m sous la surface) dans la zone côtière AO6 (au point WINDSEA 12)

Les observations des vitesses ne permettent pas de distinguer précisément le signal de marée, qui est faible en Méditerranée, et bruité localement par les courants de dérive.

Le site est caractérisé par des vitesses atteignant au maximum 0.76m/s sur la première couche validée (5.1m). Le profil est hétérogène en termes de vitesses, les plus forts courants sont observés sur les couches de subsurface.

La direction des courants varie fortement selon la profondeur. En effet, il n’est pas rare d’observer un cisaillement entre les 20-30 premiers mètres et le reste de la colonne d’eau.

| Mouillage | Vmax et Vmoy en surface sur la période de mesure | Vmax et Vmoy dans les couches les plus profondes |
|-----------|---|---|
| MED B | Maximum 0.76m/s portant au SSE Moyenne 0.15m/s | Maximum : 0.35m/s portant au NNE à 80.1m Moyenne : 0.06m/s à 80.1m |

Tableau 6 - Caractéristiques des courants sur la période de mesure

4.3 Modèle hydrodynamique

4.3.1 Description du modèle numérique

Les prévisions des courants marins reposent sur des modèles océaniques qui permettent de les représenter assez fidèlement sur une empreise géographique plus étendue que ce qu'offrent les mesures in situ.

Le modèle mis en œuvre par le Shom sur la zone EMR Méditerranée est une variante du modèle hybride HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model, développé par un consortium multi-institutionnel étasunien).

Ce modèle repose sur une grille régulière, dont la résolution horizontale est d'1/60 ° tandis que la colonne d'eau étudiée est divisée en 40 couches, de la surface jusqu'à 200m sur la zone d'étude. Les données de modèle ont été extraites au pas de temps horaire au niveau du nœud le plus proche de la bouée. Elles seront comparées aux courants mesurés dans la suite de cette étude.

4.3.1.1 Conditions de forçages

Le modèle HYCOM est un modèle physique, forcé par des données de vent (issues du modèle Arpège HR développé par Météo-France avec une résolution spatiale d'environ 10km le long des côtes françaises), d'apports fluviaux (données de débits fluviaux CMEMS⁶) et de marée (issues des atlas COMAPI⁷). Le frottement sur le fond a été optimisé pour reproduire au mieux la marée sur le domaine, puis, une année pleine et 22 événements de tempêtes ont permis de caler la tension du vent pour la configuration. Des bathymétries, à jour des dernières données disponibles, ont été mises au point par le Shom et sont utilisées par le modèle.

4.4 Qualification du modèle sur la zone d'étude

La capacité du modèle à reproduire les composantes du courant est évaluée sur la zone d'étude avec le jeu de données validées. Le but est de comparer les données de courant issues des observations avec les résultats de la simulation HYCOM sur l'ensemble de la période d'étude pour différentes profondeurs au niveau de la bouée WINDSEA 12.

On retrouve sur les roses de courant la signature du Courant Nord (aussi connu sous le nom de courant liguro-provençal) qui longe le talus continental sur des profondeurs et des largeurs importantes et porte donc vers le SSO au niveau de la bouée WINDSEA 12 ([6], 2023). Ce courant peut également s'infiltrer dans le Golfe du Lion (en période hivernale notamment), dans ces situations, les eaux sont entraînées vers le Nord. Par ailleurs, des tourbillons saisonniers, atteignant plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre selon la force des vents, peuvent également impacter les courants au niveau de la bouée. Ces processus complexes sont décrits plus en détails en [annexe 5](#).

⁶ Copernicus Marine Environment Monitoring Service

⁷ Atlas régionaux de marée issus du projet COMAPI (CNES, LEGOS et Noveltis)

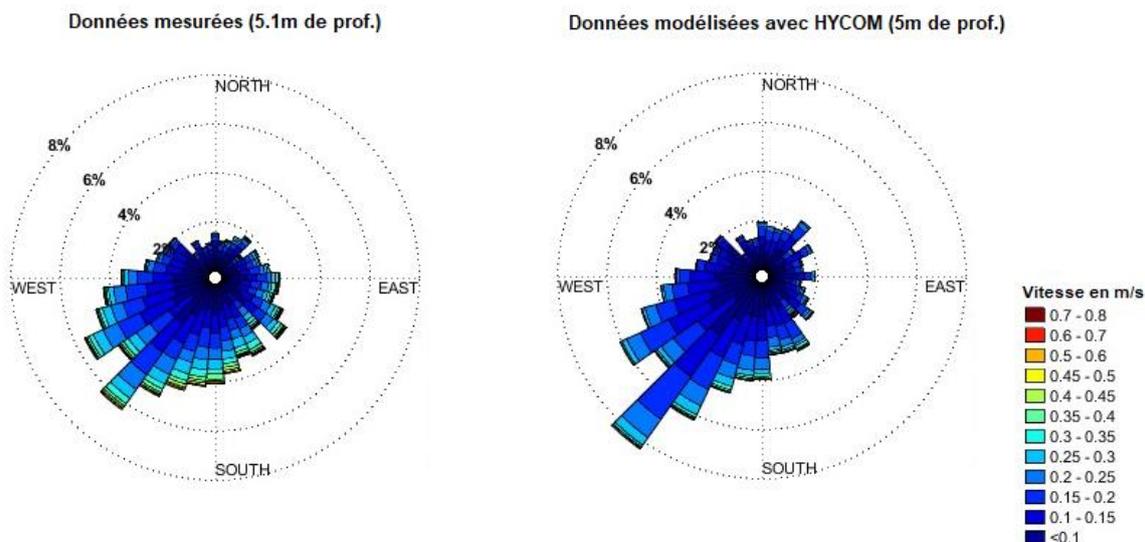


Figure 12 - Comparaison des roses de courants mesurés et modélisés sur la période d'étude, proche surface.

Proche de la surface (5m de profondeur), les chroniques de vitesses et directions des courants sur la période d'étude sont cohérentes, bien que des différences soient observables. Les deux jeux de données indiquent bien une même direction principale d'écoulement vers le Sud-Sud-Ouest, qui correspond bien au sens du Courant Nord dans cette zone, qui longe le talus continental. Néanmoins les données modélisées décrivent des directions moins dispersées, principalement orientées Sud-Ouest et avec des amplitudes plus faibles.

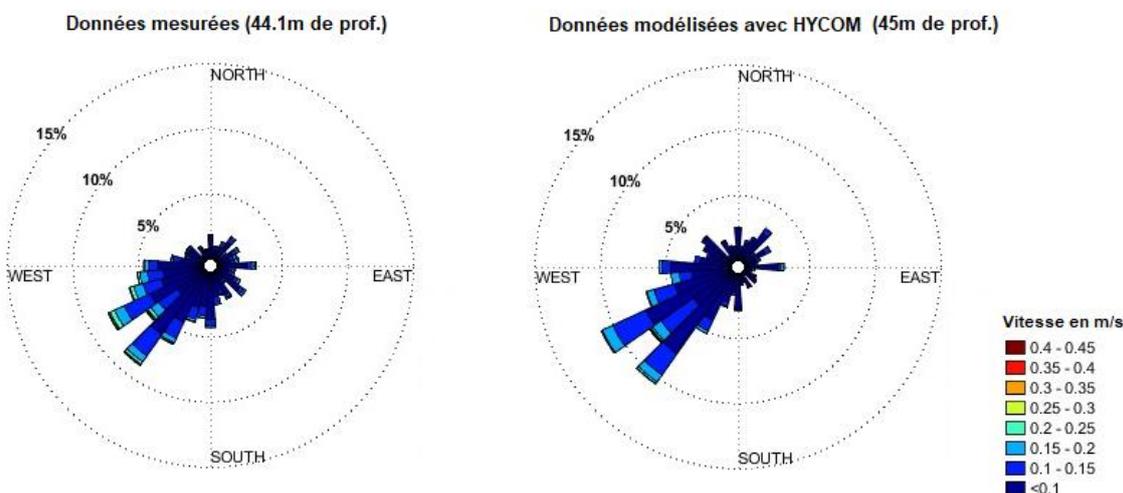


Figure 13 - Comparaison des roses de courants mesurés et modélisés sur la période d'étude, au milieu de la colonne d'eau

Au milieu de la colonne d'eau, les données modélisées semblent cohérentes avec les données mesurées. Les directions principales sont très bien modélisées, ainsi que leurs amplitudes et proportions. Le modèle sous-estime légèrement les amplitudes du courant.

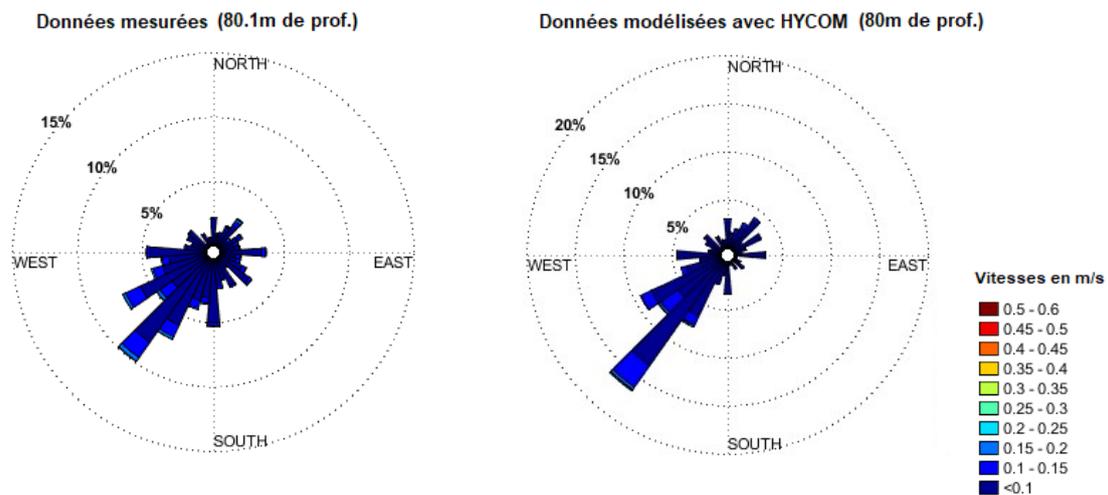


Figure 14 - Comparaison des roses de courants mesurés et modélisés sur la période d'étude, proche du fond

Proche du fond, le modèle a bien réussi à retranscrire la composante principale du courant (SSO toujours, le Courant Nord influence l'écoulement sur toute la colonne d'eau) au niveau de la bouée sur la période d'étude. L'étalement autour de cette direction est bien visible sur la rose des courants modélisés, mais plus restreint que dans la réalité, correspondant à une légère surestimation de la proportion de la composante principale.

Le modèle estime très bien les composantes principales des courants sur la colonne d'eau au niveau de la bouée MED B, qui semblent correspondre aux effets locaux du Courant Nord qui longe le talus continental vers le SSO. Cette comparaison des roses de courants mesurés/modélisés est satisfaisante mais pas suffisante pour qualifier le modèle dans la zone. Il s'agit néanmoins d'une évaluation qualitative intéressante, dans la mesure où la possibilité de s'appuyer sur les prévisions dans la zone MED B semble cohérente pour des études long-termes nécessaires pour le dimensionnement des parcs éoliens.

5. LIVRABLES

Les données validées sont exportées au format *.csv pour les périodes de données valides.

Les livrables fournis sont constitués comme suit :

| Numéro de livrable / Type de données | Description du livrable | Commentaires |
|--|---|--|
| <p>Livrable T4.C1</p> <p>Mesures in situ : site équipé de profileur ADCP</p> | Fichiers des mesures de courant in situ (u,v) en fonction du temps | <p>Mesures moyennées sur 15 minutes, à toutes les profondeurs qualifiées =</p> <ul style="list-style-type: none"> De 5.10 à 80.10 m <p>Format ASCII</p> |
| <p>Livrable T4.C1</p> <p>Mesures in situ : site équipé d'un profondimètre</p> | Fichiers des mesures de hauteur d'eau in situ en fonction du temps | <p>Mesures moyennées sur 10 minutes</p> <p>Format ASCII</p> |
| <p>Livrable T4.C3</p> <p>Courants issus des prévisions HYCOM sur les périodes considérées, au nœud situé au plus près du point de mesure</p> | Fichiers des valeurs de courant in situ (u,v) en fonction du temps, extraction du modèle Hycom au nœud le plus proche de la bouée | Format ASCII |
| <p>Livrable T4.C3</p> <p>Comparaison des mesures collectées avec les valeurs issues du modèle de prévision au nœud proche du point de mesure</p> | Analyse qualitative | Fourni dans le paragraphe 4 du rapport |

Une description détaillée de l'architecture du dossier transmis se trouve en [annexe 4](#).

6. CONCLUSION

Ce rapport a présenté le traitement et l'analyse des données acquises en Méditerranée par les instruments de la bouée WINDSEA 12 au cours de la campagne de mesures mise en place dans le cadre des études de reconnaissance environnementale menées au profit de l'AO6. Cette analyse s'étend sur une période de 24 mois, de juin 2021 à juin 2023 afin d'observer les courants saisonniers ainsi que les événements significatifs pour établir des statistiques locales.

Durant la campagne, le courantomètre a subi quelques avaries techniques qui ont limité la disponibilité des mesures et entraîné des absences de données allant jusqu'à plusieurs semaines. Le pourcentage de données validées, autrement dit exploitables, est satisfaisant pour les données de courant, et plus faible pour les données issues du profondimètre, très bruitées. Par ailleurs, l'absence de données de conductivité (acquisition arrêtée après quelques jours de campagne), n'a pas permis un calcul de la célérité du son intrinsèque à la colonne d'eau.

Malgré les difficultés évoquées, l'analyse des mesures validées pour la période considérée a été menée. Les conditions de courants observées sur une période de 2 ans corroborent la connaissance disponible sur la zone d'étude. Cette campagne aura permis de disposer de séries temporelles de mesures à proximité du site d'implantation pressenti pour le futur parc éolien en mer situé en Méditerranée dans la partie centrale du Golfe du Lion.

Divers processus régissent la courantologie dans le Golfe du Lion. Les épisodes de Mistral et Tramontane sont souvent à l'origine de courants de dérive et d'oscillations inertielles, qui prédominent localement. Par ailleurs, le Courant Nord, ses intrusions sur le plateau continental ainsi que les tourbillons saisonniers décrits dans la littérature complexifient l'analyse des mesures effectuées de par leur intensité, leurs variations saisonnières. Une étude plus approfondie sur la courantologie locale, et notamment sur le lien entre les conditions de vent et la résultante du courant permettrait une meilleure compréhension des conditions hydrodynamiques mesurées sur la zone dans le cadre la mise en place d'infrastructures offshore.

7. REFERENCES

Rapports antérieurs

[1]-Shom, 2020. Description de l'état de la connaissance et des caractéristiques physiques de la macrozone éolien en mer située en Méditerranée (Occitanie et Sud PACA). Volet « Courants ». Lot1 – référence T1C1, Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019.

[2]-Shom 2022. Dossier de l'état de la connaissance initiale de la zone d'implantation du parc éolien en Méditerranée - Zone B. Volet « Courants ». Lot2 – référence T2C1, T2C2, Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019.

[3]-Shom , 2023: Campagne de mesures de courants pour l'étude de l'hydrodynamique côtière sur la zone d'étude EMR située en Méditerranée. Rapport final de campagne courant. Lot3 – référence T3.C4, Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019.

[4]-Shom 2022. Dossier de l'état de connaissance initiale des zones d'implantation du parc et de raccordement de la zone éolien en mer Méditerranée - Zone B. Volet « Houle ». Lot2 – référence T2H, Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019.

[5]-Anne, Petrenko. (2003). Variability of circulation features in the Gulf of Lion NW Mediterranean Sea. Importance of inertial currents. Oceanologica Acta. 26. 10.1016/S0399-1784(03)00038-0.

[6]-Shom, 2023. Description sommaire de l'état de la connaissance et des caractéristiques physiques de la façade maritime Méditerranée. Lot7, Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019.

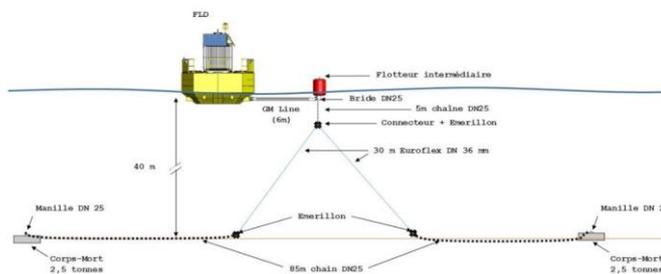
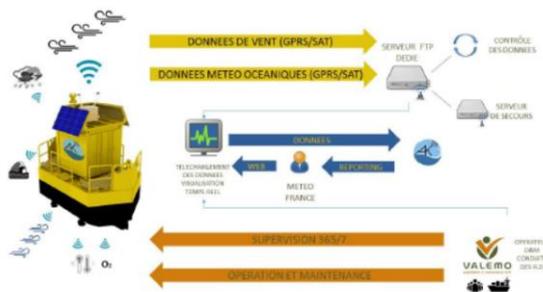
Documentations techniques

Aanderaa, 2023. TD 316 Operating Manual – Motus Wave Sensor 5729. 139p. Disponible sur :
https://www.aanderaa.com/media/pdfs/td316-motus-wave-sensor-5729_6729.pdf

Nortek Signature 250 ADCP, Spécifications techniques
<https://www.nortekgroup.com/fr/products/signature250>

Airmar EchoRange SS510. Brochure SS510-NS. Disponible sur :
<https://assets-7484b3de52.cdn.insitecloud.net/f1ffaba9174c4a6/SS510-NS.pdf>

Annexe 1 : Synthèse du système d’acquisition déployé en Méditerranée



Système de mesures sur bouée multi-paramètres WINDSEA, © Akrocean

Tableau 1. Vue d'ensemble et spécifications des différents appareils de mesure du courant utilisés dans cette étude. Les ADCP sont des instruments de profilage.

| Paramètres mesurés | Appareils – Système ⁸ |
|----------------------------|--|
| Profil du courant | Nortek Signature 250 |
| Houle | Wave Sensor 5729 AANDERAA MOTUS |
| Attitude (roulis, tangage) | Nortek Signature 250 |
| Vent | Wind Cube WLS 866 V2.1/(MET) Weather station Gill GMX500 |
| Hauteur d’eau | AIRMAR EchoRange SS510 |
| Conductivité | Conductivity sensor XYLEM 4319 |

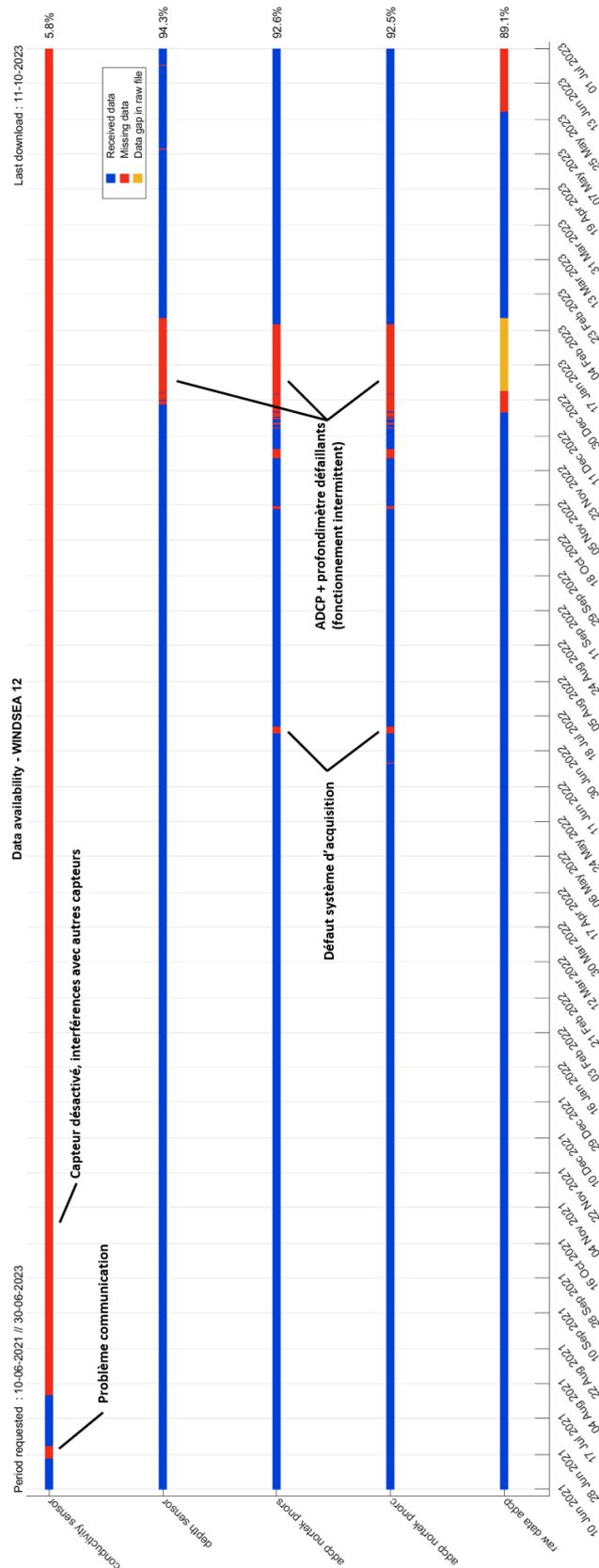
⁸ Les caractéristiques techniques de ces appareils sont décrites dans les documents cités en référence.

Annexe 2 : Récapitulatif de la configuration mise en place

La précision théorique de la mesure donnée par le constructeur est de l'ordre de 0.3 cm/s ou 1% sur le module de vitesse.

| Bouée | WINDSEA 12 |
|---|---|
| Localisation | Méditerranée Zone B |
| Profondeur (m) | 90.3 m |
| Appareil utilisé | ADCP Signature 250 kHz |
| Fréquence d'acquisition (Hz) | 1 Hz |
| Moyennage | 5 minutes toutes les 15 minutes |
| Taille cellule (m) | 3 |
| Échantillonnage (s) | 300 |
| Cadence d'acquisition (s) | 900 |
| Position de la tête de l'ADCP | Tête de l'ADCP affleurant aux quilles anti-roulis |
| Tirant d'eau entre le niveau de la mer et la tête de l'ADCP | 1.60 m |
| Première cellule (par rapport au transducteur) | 0.5 m |
| Zone blanche (en m) | NC |
| Profondeurs configurées | 0.5- 3.5 - 6.5 - ... - 102.5 m |
| Profondeurs calculées (selon documentation Akrocean) | 2.1 – 5.1 – 8.1 – ... – 104.1 m |
| Profondeurs fournies dans les fichiers csv | 0.5- 3.5 - 6.5 - ... - 102.5 m |

Annexe 3 : Bilan de la disponibilité des mesures



Annexe 4 : Architecture du livrable transmis

Le dossier T4_C1_C3 fourni dans le cadre du Lot 4 est organisé en répertoires et sous-répertoires selon l'arborescence suivante :

- Rapport
- Données

- T4.C1_Données_validées
- T4.C3_Données_modèles

Répertoire T4 C1 Données validées

Pour les séries temporelles associées à la bouée, les données sont fournies sous forme de fichiers des mesures de courant in situ (u,v) en fonction du temps (toutes les 15 min) et de hauteur d'eau (toutes les 10 min).

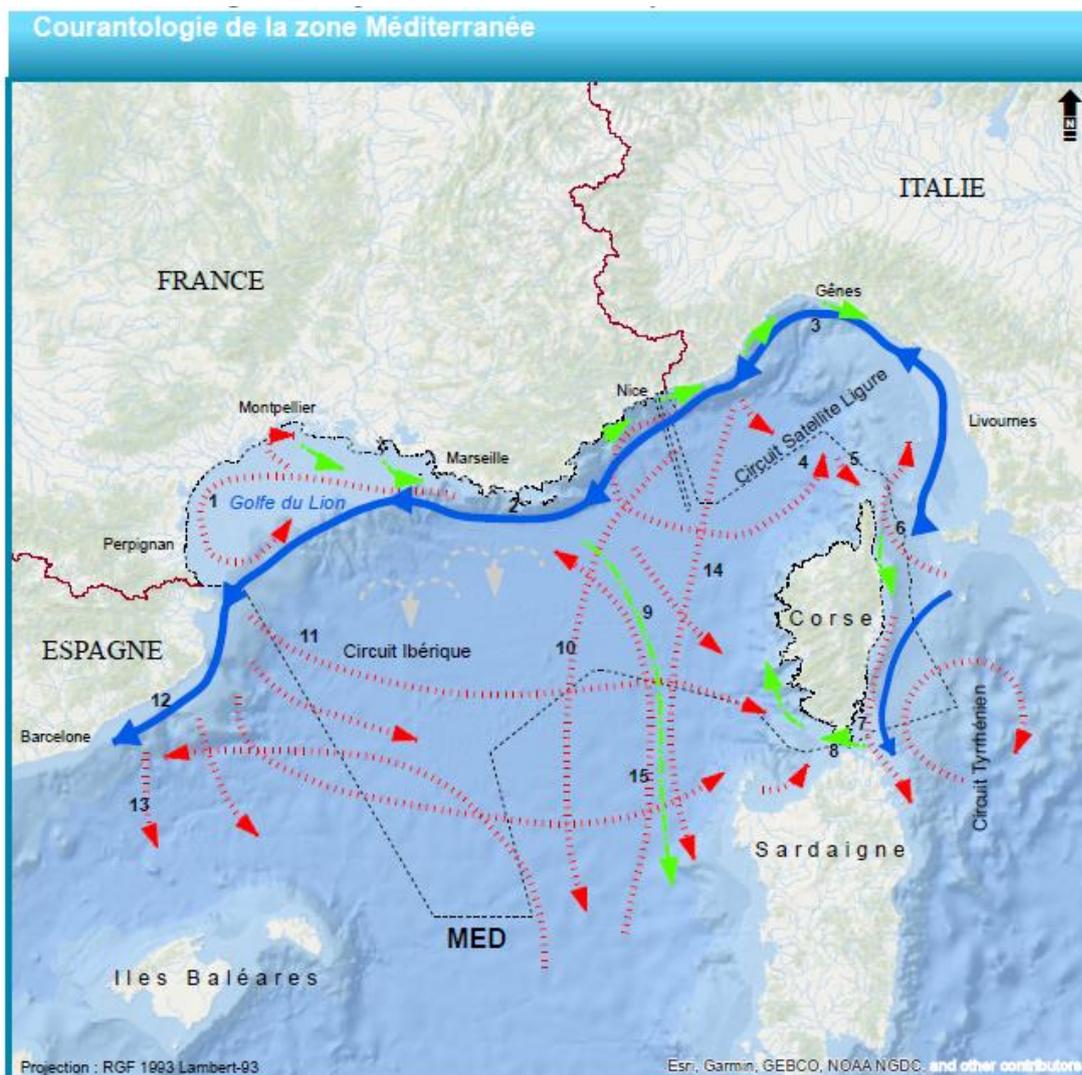
| Sous- dossier | Information sur les livrables |
|---|--|
| CartesianFlow2D <i>Format :</i> Date, Heure (UTC), Vitesse U (m/s), Vitesse V (m/s) | 26 immersions fournies (de 5.10 m à 80.10 m tous les 3m) Fichiers : BOUEE_MED_B.UTC_XXm.txt |
| Hauteur_d_eau Date, Heure (UTC), H(m) | Données de hauteur d'eau validées MED_B_Height.UTC.txt |

Répertoire T4 C3 Données modèles

Pour les séries temporelles associées aux sorties de modèle HYCOM extraites au point du maillage le plus proche de la bouée, les données sont fournies sous forme de fichiers des données de courant (u,v) en fonction du temps (toutes les heures).

| Sous- dossier | Information sur les livrables |
|--|---|
| CartesianFlow2DfromHYCOM <i>Format :</i> Date, Heure (UTC), Vitesse U (m/s), Vitesse V (m/s) | 17 immersions fournies (de 0 m à 80 m tous les 5m) Fichiers: HYCOM_MED_B.UTC_XXm.txt |

Annexe 5 : Cartes de la circulation générale et saisonnières en Méditerranée Ouest (ZEE française)



LEGENDE :

- Courants de dérive en situation dépressionnaire
- Courants de dérive en situation anticyclonique
- Courants de densité permanents
- Zone de convection hivernale

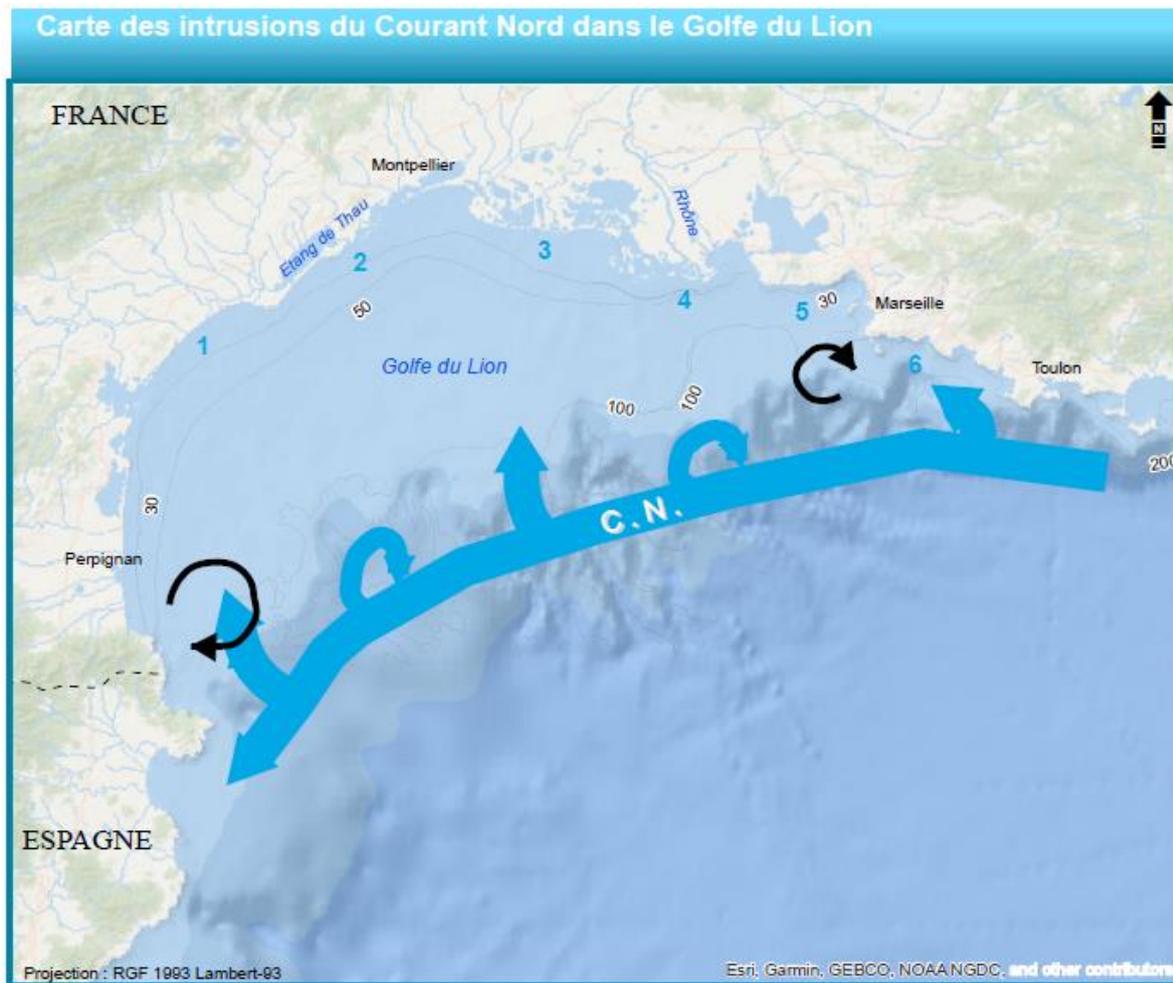
- 1) Courant de dérive par vent de NE (hiver), 24-28 M par jour.
- 2) Courant permanent 36 M par jour; 48 M par jour par vent d'Est.
- 3) Courant permanent 24 M par jour; 48 à 60 M par jour par vent de NE.
- 4) Courant de dérive par vent de NW (printemps et automne), 7,2 à 36 M par jour.
- 5) Courant de dérive par vent de Nord, 48 M par jour.
- 6) Courant de dérive par vent de SW (hiver), 14,5 à 19 M par jour.
- 7) Courant de dérive par vent de NE, 5 à 14,5 M par jour.
- 8) Courant de dérive:
 - par vent de NW, 48 M par jour (portant à l'Est);
 - par vent d'Est, 60 à 72 M par jour (portant à l'Ouest);
 - par vent d'Ouest, 96 M par jour (portant à l'Est).
- 9) Courant de dérive par vent de NE, 2,5 à 12 M par jour (été et automne).
- 10) Courant de dérive par vent de Nord (automne et hiver), 5 à 19 M par jour.
- 11) Courant de dérive par vent de NW (hiver et printemps) 10 à 14,5 M par jour.
- 12) Courant permanent 18 M par jour.
- 13) Courant de dérive par vent de Nord (hiver et printemps), 17 à 29 M par jour
- 14) Courant de dérive par vent de NE (automne et hiver), 48 à 60 M par jour.
- 15) Courant de dérive par vent de SW (automne et hiver).

Sources: Shom

Réalisation: Shom - Juin 2023

0 100 200 300 Km

0 50 100 150 Nq



Légende :

— isobathes

➡ Courant Nord et intrusions

⤿ Structures tourbillonnaires temporaires

1 2 ... Zones d'upwellings (remontées d'eaux)

Sources: Shom

Réalisation: Shom - Juin 2023

