

Evaluation de l'impact de travaux d'arrachage de spartines anglaises sur la dynamique hydro-sédimentaire dans le Bassin d'Arcachon : Secteurs de Lanton et d'Arès

Expertise Ifremer n° 22-057 préparée par Florian Ganthy¹.

Relecture et validation par Romaric Verney² et Elvire Antajan¹

Cette expertise a été réalisée conformément au processus interne P9 ('produire des expertises et fournir des avis') certifié ISO-9001 et selon la charte de l'expertise et de l'avis de l'Ifremer. Les experts ayant réalisé l'expertise ont indiqué l'absence de liens d'intérêt avec le demandeur et le sujet de la demande.

N/Réf. Ifremer/ODE/LITTORAL/LERAR 22-057

¹ Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes / Unité Littoral / Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon

² Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes / Unité Dynamique des Écosystèmes Côtiers / Laboratoire Dhysed



1 Contexte

Au mois d'octobre 2022, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA) a sollicité l'Ifremer (Laboratoire Environnement et Ressources d'Arcachon, LER/AR) afin qu'il réalise une expertise sur l'impact de travaux d'arrachage de spartines anglaises dans le Bassin d'Arcachon, sur la dynamique hydro-sédimentaire des secteurs concernés.

La spartine anglaise est une espèce allochtone envahissante se développant de manière importante au niveau des schorres de deux communes du Bassin d'Arcachon : Arès et Lanton (**Figure 1**). En réponse, le SIBA y a entrepris des travaux d'arrachage mécanique au cours de l'hiver 2022-2023 dans le but de limiter la prolifération de cette plante.

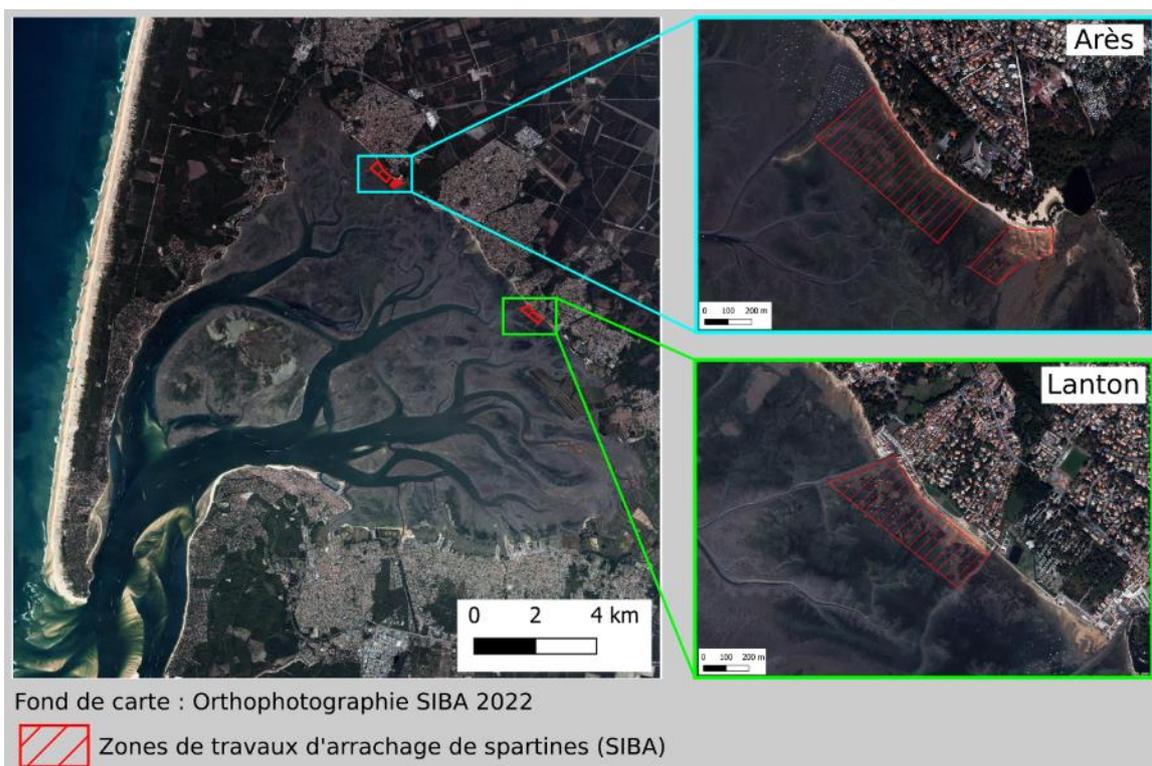


Figure 1 : (a.) Localisation des deux secteurs dans lesquels des travaux d'arrachage de spartines anglaises ont été réalisés, (b.) zoom sur la zone de travaux pour le secteur d'Arès et (c.) zoom sur la zone de travaux pour le secteur de Lanton.

Les spartines, comme de nombreuses espèces de végétation benthique, jouent un rôle d'obstacles aux courants et contribuent à l'atténuation des vagues (Möller *et al.*, 1999). Le ralentissement des courants au sein des patchs de spartine peut également conduire à leur accélération entre les patchs par effet de chenalisation de l'écoulement (Temmerman *et al.*, 2005 ; 2007). Ces modifications des vitesses de courants induites par la présence de spartines peuvent avoir des répercussions sur la dynamique sédimentaire (Bouma *et al.*, 2005 ; Temmerman *et al.*, 2007) : augmentation du dépôt et protection contre l'érosion au sein des patchs, érosion accrue sur le pourtour des patchs, modification des caractéristiques des sédiments superficiels. Ainsi, les travaux d'arrachage des spartines pourraient, du fait de la suppression de l'effet d'obstacle, avoir un impact sur l'hydrodynamique des zones concernées et sur la dynamique sédimentaire associée.

Par ailleurs, les travaux d'arrachage étant réalisés mécaniquement (pelleteuse), il est probable qu'ils conduisent à une augmentation de la remise en suspension locale des sédiments et donc de la turbidité, du fait de la déstabilisation et de la perte de cohésion du substrat sédimentaire par le passage des engins.

Dans ce contexte, le SIBA a sollicité l'Ifremer pour évaluer l'impact de ces travaux d'arrachage sur :

- les caractéristiques des sédiments superficiels (secteurs d'Arès et de Lanton),
- la turbidité (secteurs d'Arès et de Lanton),
- les vitesses de courant (secteur d'Arès seulement).

Ce document présente le protocole de suivi et les résultats obtenus suite aux travaux d'arrachages qui ont été réalisés entre le 24 novembre 2022 et le 14 décembre 2022 pour le secteur d'Arès et entre le 19 décembre 2022 et le 11 janvier 2023 pour le secteur de Lanton.

2 Effets des travaux d'arrachage sur les sédiments superficiels

2.1 Méthodologie

Afin d'étudier les possibles modifications des sédiments superficiels liées aux travaux d'arrachage, deux transects (côte-large) ont été définis pour chaque secteur (**Figure 2**).

Pour le secteur d'Arès (**Figure 2a.**), la position des transects a été définie de sorte à avoir un transect dans la zone de travaux et un second se trouvant en dehors de la zone de travaux en guise de référence. Pour le secteur de Lanton (**Figure 2b.**), cette stratégie n'a pas été retenue, en raison du fait que les patchs de spartines présentaient une distribution très hétérogène, et que définir le transect de référence hors de la zone de travaux aurait nécessité de le placer sur l'autre rive, soit du chenal d'accès au port de Taussat (au nord), soit du chenal correspondant à l'exutoire de la Berle de Cassy (au sud), zones jugées trop éloignées de la zone de travaux et présentant potentiellement des conditions hydrodynamiques différentes ne permettant pas l'établissement d'un transect de référence. Le choix a donc été fait de placer les deux transects dans la zone de travaux.

Le long de chacun des transects, trois points de prélèvement ont été déterminés. Pour chaque point, trois prélèvements de sédiments superficiels (<0.5 cm) ont été réalisés avant puis après les travaux d'arrachage. Le but de ce suivi n'étant pas de quantifier l'effet des travaux sur les sédiments des patchs de spartines, mais sur les sédiments du secteur, les points de suivi ont été volontairement placés en dehors de patch de spartines.

Pour le secteur d'Arès, les prélèvements ont été réalisés le 22 octobre 2022 (avant travaux) et le 20 janvier 2023 (37 jours après travaux), tandis que pour le secteur de Lanton, les prélèvements ont été réalisés le 22 octobre 2022 (avant travaux) et le 03 février 2023 (23 jours après travaux).

Les échantillons prélevés ont été analysés afin de déterminer leur teneur en eau et leur granulométrie (granulomètre laser de type « Malvern »). Les grandeurs calculées sont : la fraction vaseuse (<63 μm) et le diamètre médian, permettant de caractériser la nature des sédiments (vase, sable), et la densité sèche, qui, à nature de sédiment comparable, est un témoin de l'état de consolidation des sédiments superficiels.

Afin d'évaluer dans quelle mesure les sédiments superficiels ont évolué (ou non) suite aux travaux, des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées. Compte-tenu de la distribution des échantillons, la variante non paramétrique dite de Kruskal-Wallis a été employée, suivie, dans le cas où l'analyse indiquait une différence significative, d'un test *post-hoc* de comparaison multiple (Procédure de Turkey) permettant de conclure sur les différences avant/après travaux.

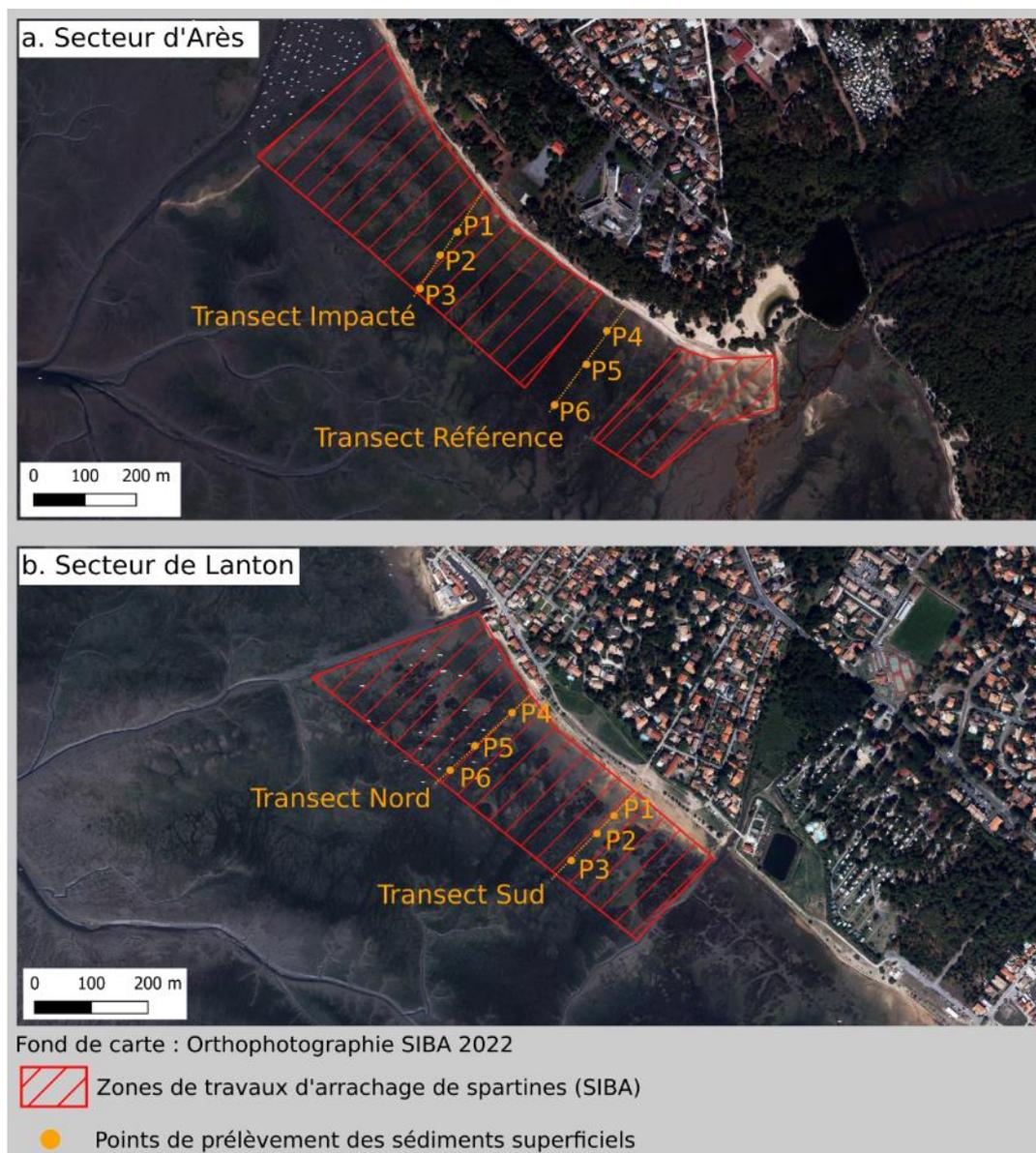


Figure 2 : Localisation des transect et des points de prélèvement des sédiments superficiels : pour (a.) le secteur d'Arès et (b.) le secteur de Lanton.

2.2 Résultats pour le secteur d'Arès

Les résultats du suivi des sédiments superficiels pour le secteur d'Arès sont présentés dans la **figure 3**. On remarque que pour l'ensemble des points de suivi (P1-P6), la fraction vaseuse diminue significativement entre le prélèvement réalisé avant les travaux et celui réalisé après les travaux (**Figure 3a.**). Conjointement, le diamètre médian (**Figure 3b.**) et la densité sèche (**Figure 3c.**) ont plutôt tendance à augmenter, l'ensemble des paramètres traduisant un enrichissement en sable.

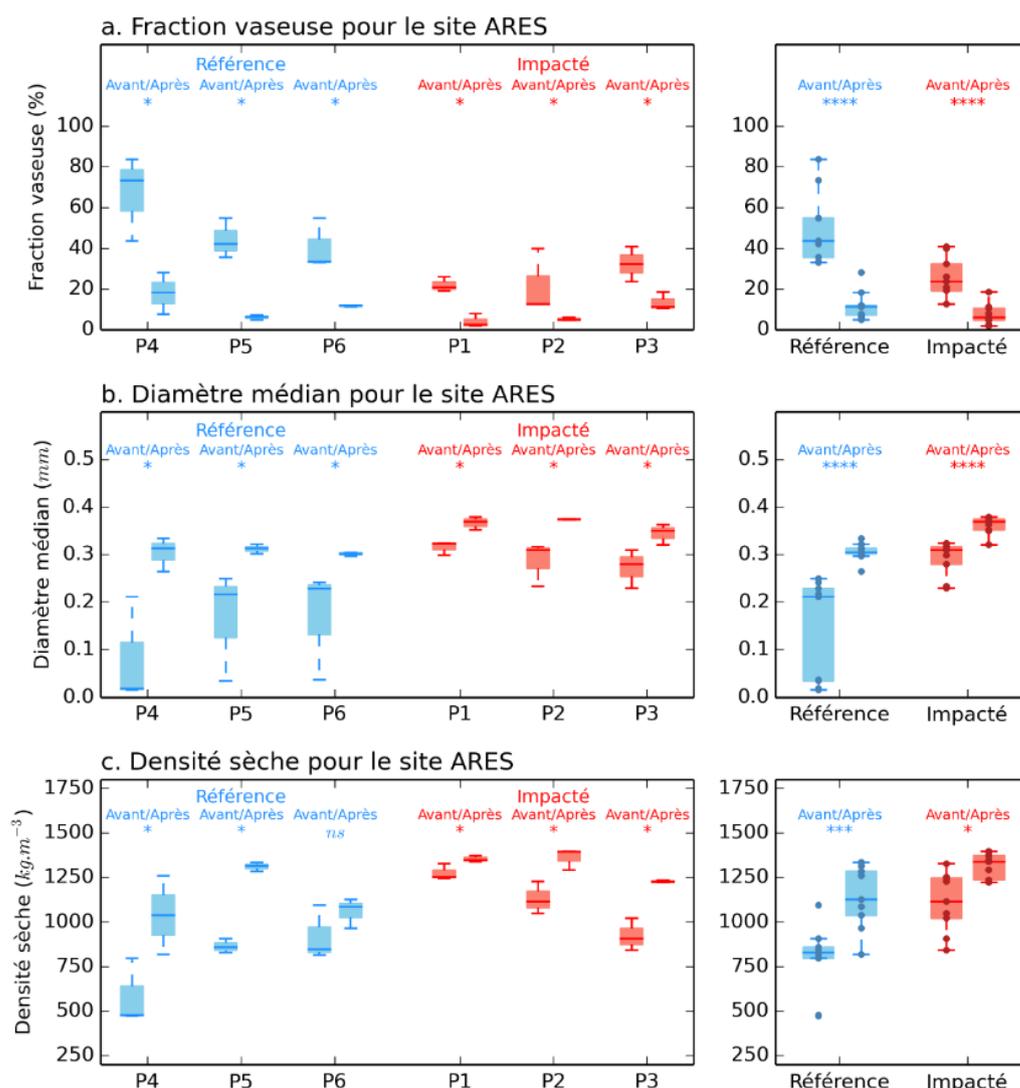


Figure 3 : Comparaison des caractéristiques des sédiments superficiels entre avant (Pré) et après (Post) les travaux pour les points du transect de référence (bleu) et ceux du transect impacté (rouge), pour le secteur d'Arès, et pour (a.) la fraction vaseuse, (b.) le diamètre médian et (c.) la densité sèche. Les étoiles indiquent le niveau de significativité : **** : $p < 0.001$, *** : $p < 0.005$, ** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, ns : $p > 0.05$.

D'un point de vue statistique, pour les trois paramètres, des différences significatives entre les deux transects (effet de site) et entre les prélèvements avant et après travaux (effet temporelle) sont mesurées ($p < 0.001$ dans les deux cas). Cependant l'interaction entre les deux effets n'est pas significative ($0.16 \leq p \leq 0.61$). Ce résultat indique que **l'effet des travaux sur les caractéristiques des sédiments superficiels est négligeable vis-à-vis de la variabilité spatio-temporelle naturelle**. En effet, les différences avant/après travaux, que l'on observe tant pour le transect de référence que pour le transect impacté, peuvent être expliquées par des processus naturels. Tout d'abord, entre le prélèvement avant les travaux et celui effectué après les travaux, plusieurs coups de vent intenses ont eu lieu. L'agitation générée a ainsi pu éroder les particules les plus fines, conduisant à l'enrichissement en sable (et à l'augmentation du diamètre médian) que l'on observe. D'autre part, la majorité des prélèvements ont été réalisés dans les herbiers de zostères au milieu desquels

poussent les patches de spartine. Or, le cycle de croissance saisonnier des herbiers est connu pour modifier les caractéristiques des sédiments superficiels (Ganthy *et al.*, 2013) : les sédiments au sein des herbiers sont plus vaseux en été et en automne et plus sableux en hiver et au printemps.

2.3 Résultats pour le secteur de Lanton

Les résultats du suivi des sédiments superficiels pour le secteur de Lanton sont présentés dans la **figure 4**. Contrairement aux résultats obtenus pour le secteur d'Arès, aucune tendance générale d'évolution avant/après travaux ne semble se dégager (pour aucun des paramètres).

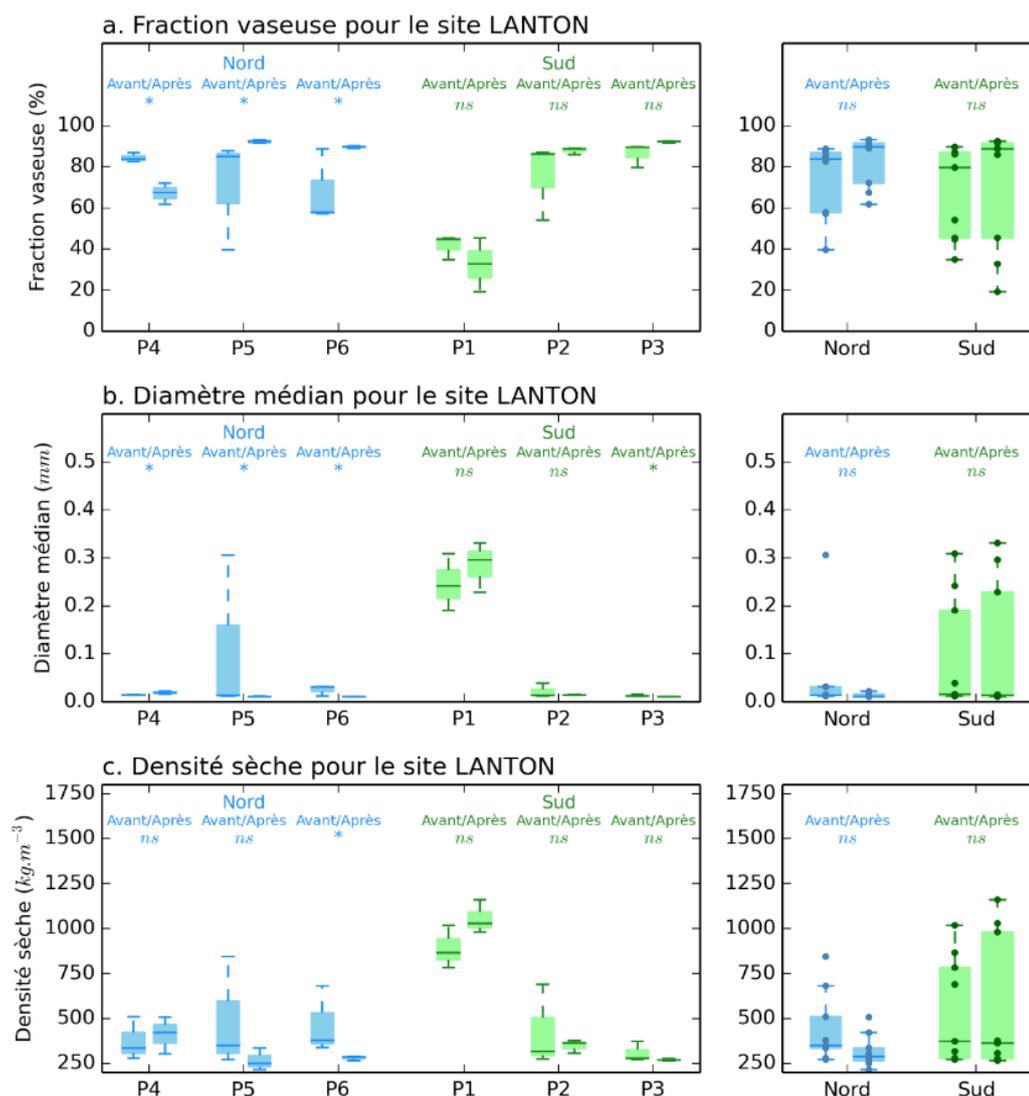


Figure 4 : Comparaison des caractéristiques des sédiments superficiels entre avant et après les travaux pour les points du transect de référence (bleu) et ceux du transect impacté (rouge), pour le secteur de Lanton, et pour (a.) la fraction vaseuse, (b.) le diamètre médian et (c.) la densité sèche. Les étoiles indiquent le niveau de significativité : **** : $p < 0.001$, *** : $p < 0.005$, ** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, ns : $p > 0.05$.

D'un point de vue statistique, même si à l'échelle d'un point de mesure (trois prélèvements), certaines évolutions (avant/après travaux) sont significatives ($p < 0.05$), à l'échelle des transects (trois points, neuf prélèvements), aucune évolution n'est significative. Il n'existe pas non plus de

différence significative entre les deux transects. De ce fait, **aucun effet des travaux ne peut ainsi être détecté.**

3 Effets des travaux d'arrachage sur la turbidité

3.1 Méthodologie

Afin de suivre l'impact potentiel des travaux d'arrachage sur la turbidité locale, des turbidimètres optiques (NKE Wisens-TBD) ont été déployés sur les deux secteurs, dans ou à proximité immédiate de la zone de travaux (**Figure 5**). Ces instruments sont également dotés d'un capteur de pression permettant d'obtenir le niveau d'eau et d'un balais permettant de maintenir propre le capteur optique.



Figure 5 : Localisation des points de suivi de la turbidité : pour (a.) le secteur d'Arès et (b.) le secteur de Lanton.

Pour le secteur d'Arès, le turbidimètre a été déployé le 17 novembre 2022, soit 7 jours avant la première marée de travaux, puis retiré le 20 janvier 2023, soit 26 jours après la dernière marée de travaux.

Pour le secteur de Lanton, le turbidimètre a été déployé une première fois le 17 novembre 2022, soit près d'un mois avant la première marée de travaux. Les travaux sur ce secteur ayant dû être interrompus et repoussés, le turbidimètre a été retiré de son support le 22 décembre, puis remis le 06 janvier 2023 avant d'être retiré définitivement le 20 janvier 2023, soit 9 jours après la dernière marée de travaux.

Pour les deux secteurs, les turbidimètres ont été placés de sorte à mesurer la turbidité à une vingtaine de centimètres au-dessus du fond. Leur cadence de mesure a été fixée à 30 secondes, avec une acquisition en continu.

3.1.1 Traitements et filtrage des données brutes

Les données brutes de pression ont tout d'abord été corrigées de la variation de la pression atmosphérique à l'aide des données horaires issues de la station Météo-France du Cap-Ferret puis converties en hauteur d'eau au-dessus du fond. Les données de turbidité et de hauteur d'eau ont ensuite été filtrées sur la base de la hauteur d'eau, avec un seuil fixé à 10 cm au-dessus du capteur ; c'est-à-dire que toutes les données pour lesquelles la hauteur d'eau au-dessus du fond était inférieure à la hauteur du capteur plus 10 cm ont été supprimées.

Les données filtrées de pression et de turbidité ont été moyennées sur une fenêtre de 10 minutes. Ces séries temporelles ont ensuite été tracées, accompagnées de la vitesse et de la direction du vent afin d'offrir une vue synoptique de la période de suivi (cf. **Figure 6** et **Figure 9** pour les secteurs d'Arès et de Lanton respectivement).

Enfin, dans le but de fournir une vue plus synthétique (cf. **Figure 7** et **Figure 10** pour les secteurs d'Arès et de Lanton respectivement), les données de turbidité moyennées (toutes les 10 minutes) ont été moyennées pour chaque marée (c'est-à-dire pour chaque période d'inondation). La hauteur d'eau au moment de la pleine mer a également été calculée pour chaque marée et utilisée comme un *proxy* du marnage, lui-même *proxy* des vitesses des courants de marée. La vitesse et la direction du vent ont elles aussi été moyennées pour chaque marée (entre 1 heure avant l'inondation et le moment de l'exondation) afin d'obtenir un *proxy* des conditions d'agitation (clapot).

3.1.2 Quantification de l'effet des travaux sur la turbidité

Afin de déterminer l'effet des travaux sur la turbidité, et en l'absence de mesures de référence simultanée et non impactées par les travaux, une méthode statistique basée sur des régressions linéaires multiples (RLM) a été employée. Le but de cette méthode est de différencier, dans le signal de turbidité mesuré, la part attribuable aux forçages naturels (clapot, courant de marée) et la part attribuable aux travaux.

La première étape a consisté à établir un modèle prédictif de la turbidité (à partir des données moyennées par marée) basé sur les forçages naturels (vitesse et direction du vent et hauteur d'eau de pleine mer). Pour obtenir ce modèle prédictif, seules les données récoltées avant le début des travaux ont été utilisées. Plusieurs RLM ont été testées en modifiant le nombre et l'ordre des variables forçantes (vitesse et direction du vent et hauteur d'eau de pleine mer) ; la variable à prédire étant la turbidité moyenne (par marée). Pour les deux secteurs, le modèle offrant les meilleurs résultats (la meilleure prédiction de la turbidité moyenne) est celui n'intégrant que la

vitesse et la direction du vent, ce qui signifie que, pour ces deux zones, la turbidité est principalement contrainte par l'agitation liée au vent tandis que l'effet des courants de marée est négligeable.

Dans un second temps, le modèle ainsi obtenu a été utilisé dans le but de prédire la turbidité pour différentes périodes de temps : totalité de la série temporelle, avant, pendant et après les travaux (cf. **Figure 8** et **Figure 11** pour les secteurs d'Arès et de Lanton respectivement). Pour chacune de ces périodes de temps, la régression linéaire des turbidités mesurées *versus* prédites permet d'obtenir plusieurs informations :

- la pente de la droite de régression permet d'établir si un forçage supplémentaire (*i.e.* les travaux) joue un rôle : ainsi si la turbidité mesurée est supérieure à la turbidité prédite (pente > 1) cela signifie que la part de turbidité non prédite par le modèle peut être imputable aux travaux.
- la comparaison statistique des pentes (réalisée à l'aide d'une analyse de covariance, ANCOVA) permet d'établir si le potentiel forçage supplémentaire (*i.e.* les travaux) a un effet significatif ou négligeable.
- le coefficient de détermination (R^2) pour les différentes périodes (avant/pendant/après) peut être utilisé comme un *proxy* de la contribution du vent sur la turbidité : plus le R^2 est proche de 1, plus la contribution du vent est importante, et plus le R^2 est faible plus la variabilité des mesure peut être expliquée par d'autres forçages (*e.g.* les travaux).

3.2 Résultats pour le secteur d'Arès

Les résultats haute-fréquence (toutes les 10 minutes) du suivi de la turbidité sur le secteur d'Arès sont présentés dans la **Figure 6**. On peut tout d'abord remarquer, que durant le suivi, la période avant-travaux est caractérisée par des vitesses de vent relativement fortes (généralement > 7 m.s⁻¹, **Figure 6a**) orientées secteurs Ouest à Nord-Ouest. Dans le même temps on observe des turbidités également assez fortes (> 100 NTU, **Figure 6c**) associées à ces épisodes venteux. Durant la période de travaux, principalement entre le 30 novembre et le 15 décembre, les conditions venteuses sont nettement plus calmes (vitesse < 7 m.s⁻¹) associées à des turbidités relativement faibles (< 50 NTU. Enfin, à partir du 20 décembre et jusqu'à la fin de la série (le 20 janvier), on retrouve des conditions venteuses assez énergétiques, associées à des niveaux de turbidité assez élevés.

Lorsque l'on compare les séries temporelles de hauteur d'eau (**Figure 6b**) à l'échelle des cycles morte-eau/vive-eau et de turbidité (**Figure 6c**), il ne semble pas y avoir de lien direct entre ces deux paramètres, la vitesse et la direction du vent apparaissent prépondérantes sur la variabilité des niveaux de turbidité. Ceci a d'ailleurs été évoqué précédemment ; en effet, pour les données moyennées par marée, le meilleur modèle prédictif obtenu est celui n'intégrant que la vitesse et la direction du vent.

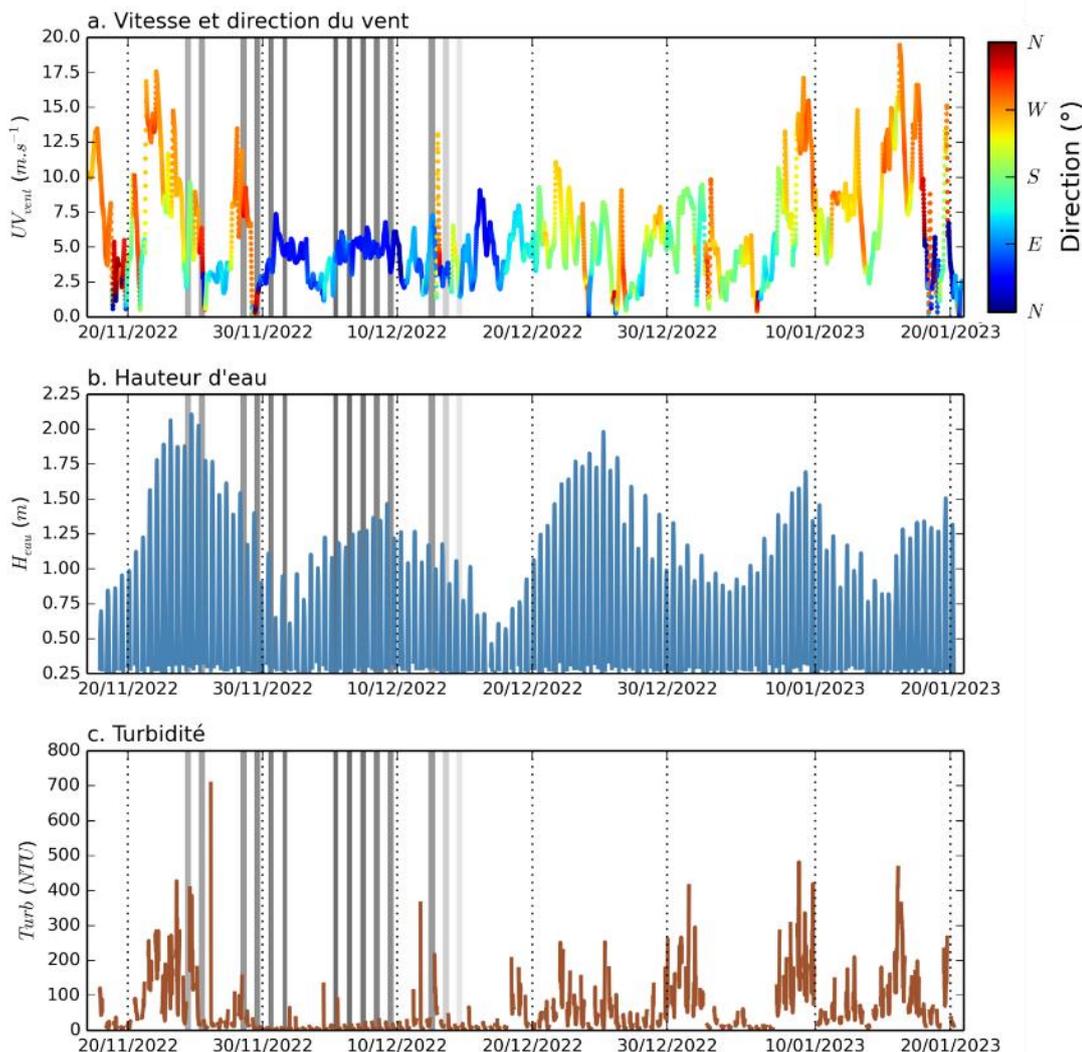


Figure 6 : Série temporelles haute fréquence (10 minutes) pour le secteur d'Arès de (a.) vitesse et direction du vent, (b.) hauteur d'eau et (c.) turbidité. Les barres verticales en niveaux de gris correspondent aux périodes de travaux ; plus le gris est foncé, plus les travaux étaient proches du turbidimètre.

Ensuite, la **figure 7** présente les données moyennée par marée. En ce qui concerne les turbidités prédites à partir des vitesses et directions du vent (**Figure 7c.**), on remarque que les pics de turbidités associés à des évènements venteux semblent mieux prédits au début de la période de mesure (avant les travaux) et à la fin de celle-ci (à partir du 10 janvier 2023, soit un mois après la fin des travaux) ; les pics de turbidités prédits étant bien souvent sous-estimés par le modèle statistique sur la période s'étendant approximativement du 12 décembre 2022 au 10 janvier 2023.

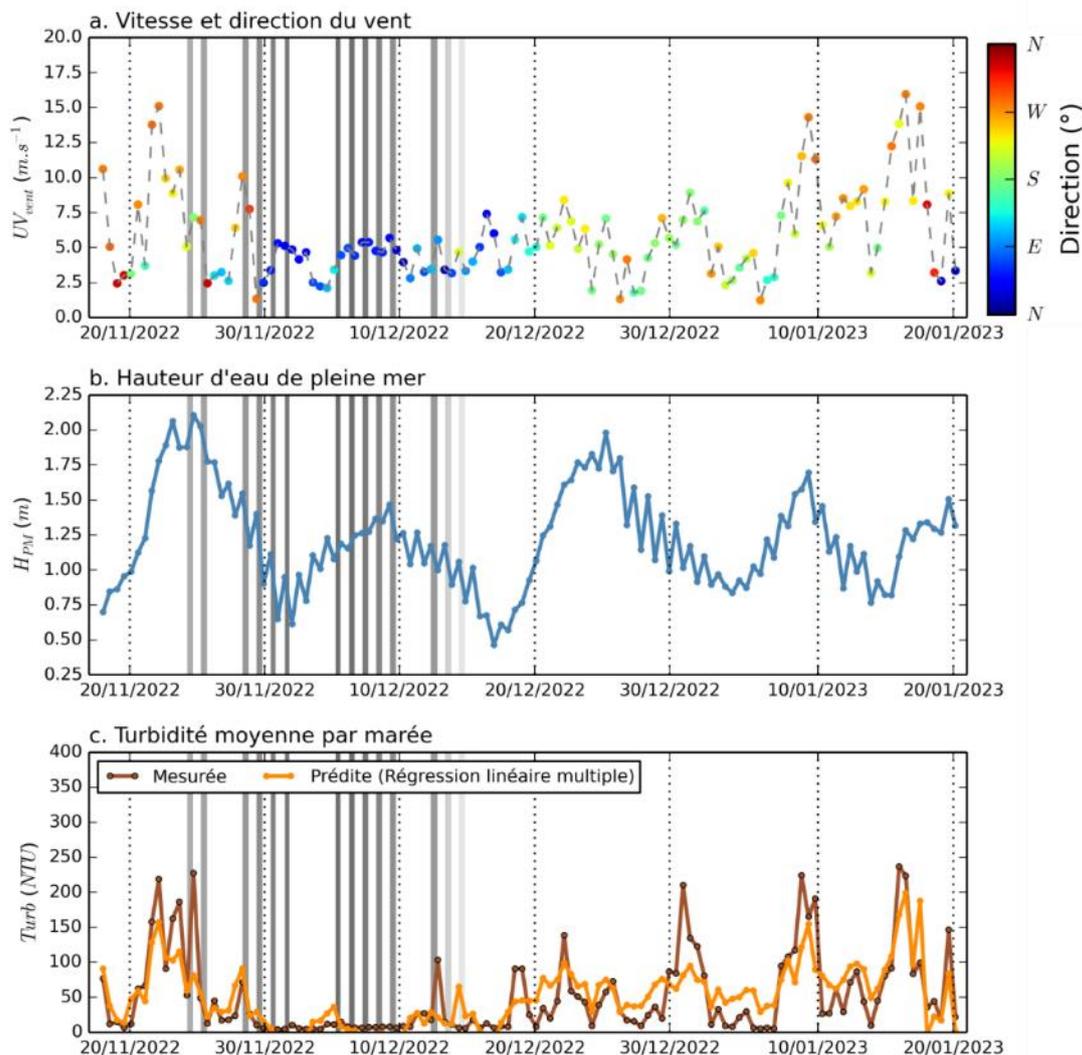


Figure 7 : Série temporelles (moyenne par marée) pour le secteur d'Arès de (a.) vitesse et direction du vent, (b.) hauteur d'eau à la pleine mer et (c.) turbidité moyenne par marée. Les barres verticales en niveaux de gris correspondent aux périodes de travaux ; plus le gris est foncé, plus les travaux étaient proches du turbidimètre.

La comparaison des turbidités prédites et mesurées (**Figure 8a**) pour les trois périodes de temps testées (avant, pendant et après les travaux) et les droites de régressions associées montrent tout d'abord que pour chacune des périodes testées, il existe un lien fort ($p < 0.002$ dans les trois cas) entre la prédiction et la mesure. Ceci indique que quelle que soit la période considérée (avant/pendant/après travaux), la variabilité de la turbidité est principalement liée au vent. L'analyse de covariance (ANCOVA) réalisée confirme ces observations. En effet, il apparaît que les différences de pente sont significatives ($p < 0.005$) pour les couples avant/pendant et avant/après, ce qui indique que statistiquement **les travaux d'arrachage des spartines sur le secteur d'Arès ont pu avoir un effet sur la turbidité, se traduisant par des turbidités légèrement plus fortes pendant et après les travaux par rapport à la période de mesure avant les travaux. Cependant, compte tenu de l'incertitude liée au modèle, cet effet des travaux apparaît faible par rapport au forçage naturel.** Pour la comparaison pendant/après, l'ANCOVA indique que les pentes ne sont pas statistiquement différentes.

Enfin, lorsque l'on regarde l'évolution des coefficients de détermination (R^2) prédiction/mesure, en tant que *proxy* de la contribution du vent sur la turbidité, pour différentes périodes (**Figure 8b.**), il apparaît que, après une forte diminution de la contribution du vent entre avant et pendant les travaux, suivie d'une stabilité entre pendant les travaux et les 10 premiers jours après les travaux, celle-ci tend à ré-augmenter progressivement (R^2 de l'ordre de 0.4 dans les 10 premiers jours après la fin des travaux, et de l'ordre de 0.7 plus de 30 jours après la fin des travaux). Ainsi, pendant les travaux et dans les 10 jours qui suivent leur fin, les conditions de vent sont faibles si bien que la variabilité de la turbidité n'est pas liée au vent mais à d'autres forçages non pris en compte dans le modèle tels que les courants de marée ou bien l'effet des travaux. Par la suite, les vitesses de vent augmentent et donc sa contribution sur la turbidité tend à redevenir prépondérante.

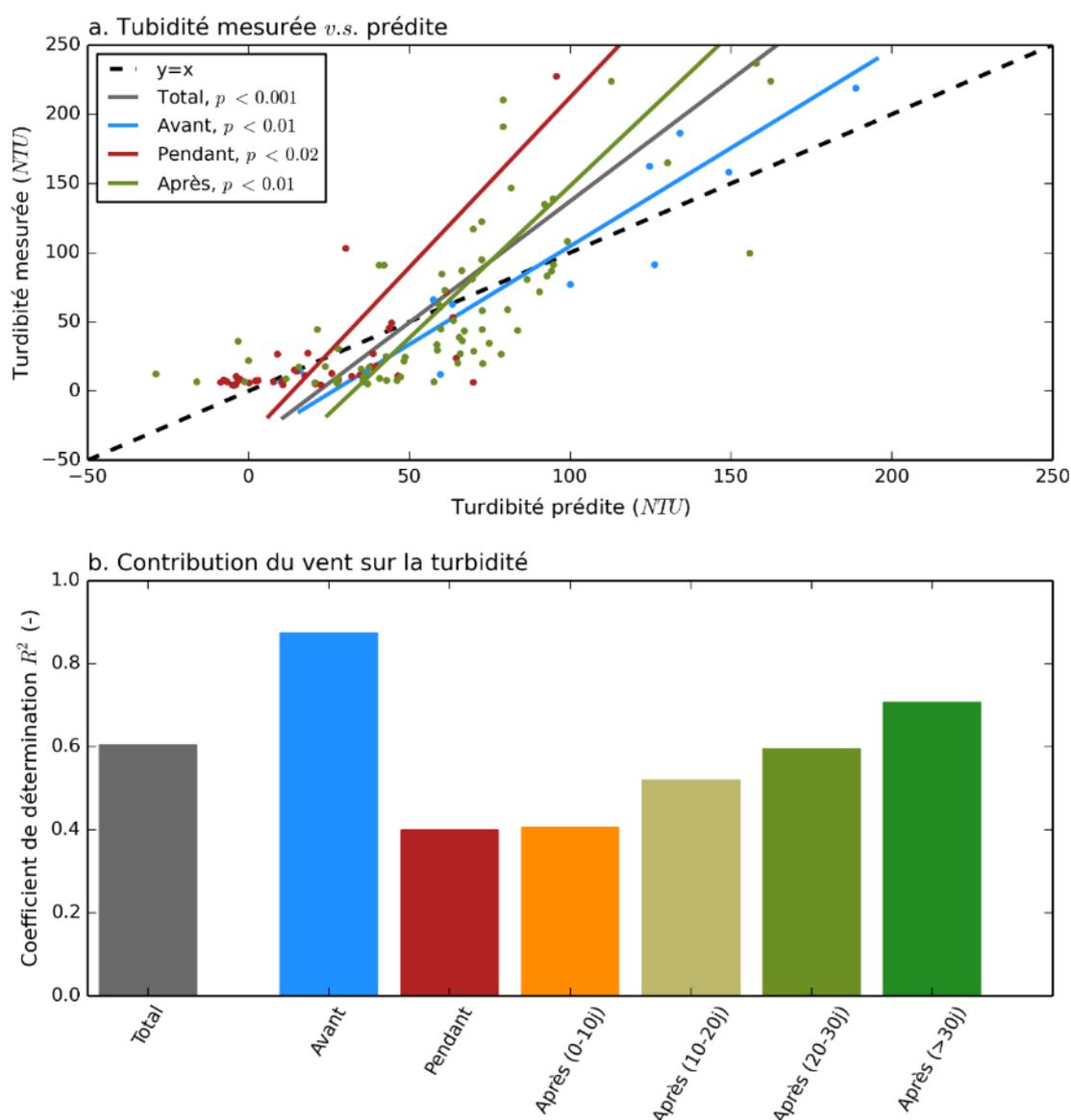


Figure 8 : Analyse statistique de l'effet des travaux sur la turbidité pour le secteur d'Arès : (a.) turbidité mesurée versus prédite pour les différentes périodes testées, et droites de régression associées et (b.) coefficient de détermination (R^2) des régressions mesure/prédiction en tant que *proxy* de la contribution du vent sur la turbidité.

3.3 Résultats pour le secteur de Lanton

Les résultats haute-fréquence (toutes les 10 minutes) du suivi de la turbidité sur le secteur de Lanton sont présentés dans le **Figure 9**. Comme observé pour le secteur d'Arès, les niveaux de turbidité sont fortement dépendants de la vitesse et de la direction du vent.

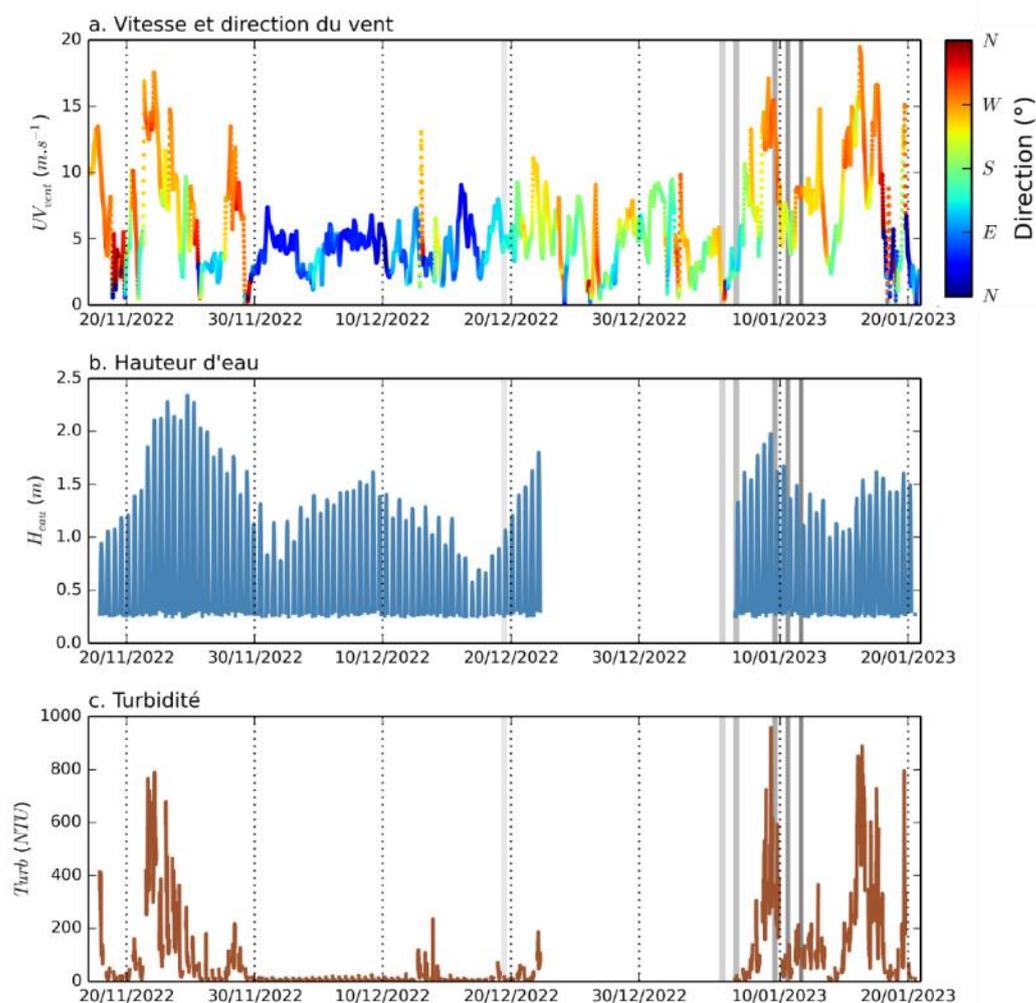


Figure 9 : Série temporelles haute fréquence (10 minutes) pour le secteur de Lanton de (a.) vitesse et direction du vent, (b.) hauteur d'eau et (c.) turbidité. Les barres verticales en niveaux de gris correspondent aux périodes de travaux ; plus le gris est foncé, plus les travaux étaient spatialement proches du turbidimètre.

Ensuite, la **figure 10** présente les données moyennées par marée. En ce qui concerne les turbidités prédites à partir de la vitesse et de la direction du vent (**Figure 10c.**), on remarque que les pics de turbidités associés à des événements venteux semblent bien prédits, quelle que soit la période considérée (avant, pendant ou après les travaux). Ainsi, il ne semble pas que les travaux aient eu un impact sur les niveaux de turbidité, ce qui est confirmé par l'analyse statistique (**Figure 11**), présentée plus loin.

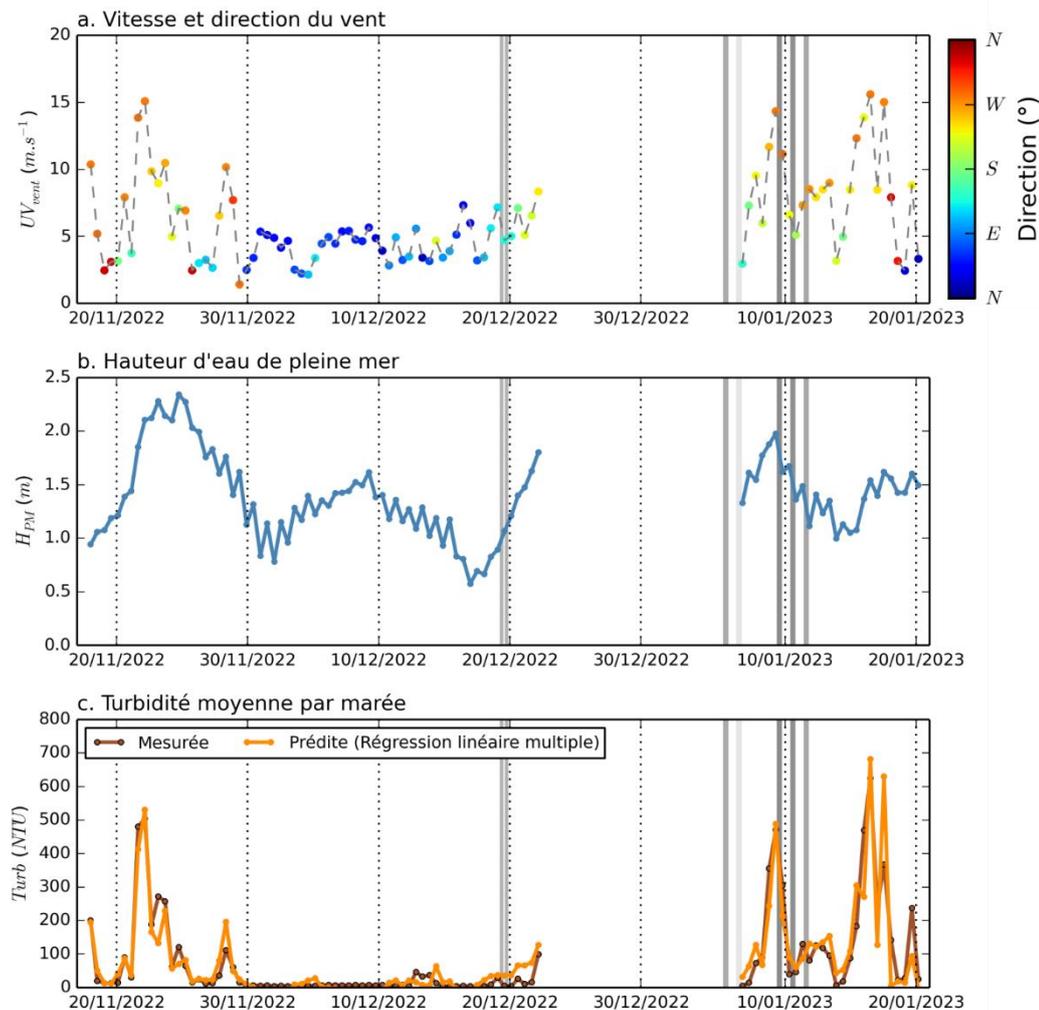


Figure 10 : Série temporelles (moyenne par marée) pour le secteur de Lanton de (a.) vitesse et direction du vent, (b.) hauteur d'eau à la pleine mer et (c.) turbidité moyenne. Les barres verticales en niveaux de gris correspondent aux périodes de travaux ; plus le gris est foncé, plus les travaux étaient proches du turbidimètre.

Tout comme pour le secteur d'Arès, la comparaison des turbidités prédites et mesurées (**Figure 11a.**) pour les trois périodes de temps testées (avant, pendant et après les travaux) et les droites de régressions associées montrent tout d'abord que, pour chacune des périodes testées, il existe un lien important ($p < 0.01$ dans les trois cas) entre la prédiction et la mesure. Ceci indique que quelle que soit la période considérée (avant/pendant/après travaux), la variabilité de la turbidité est principalement liée au vent. La comparaison visuelle des pentes des droites de régression ne semble toutefois indiquer aucun changement dans la relation prédiction/mesure entre les périodes considérées. L'analyse de covariance (ANCOVA) réalisée confirme ces observations : il n'existe pas de différences significatives entre les pentes. Ceci implique **que les travaux d'arrachage des spartines sur le secteur de Lanton n'ont eu aucun effet significatif sur la turbidité.**

Enfin, lorsque l'on regarde l'évolution des coefficients de détermination (R^2) prédiction/mesure, en tant que *proxy* de la contribution du vent sur la turbidité, pour différentes périodes (**Figure 11b.**), il apparaît que, même si les valeurs diminuent légèrement entre avant, pendant et après les travaux, la contribution du vent demeure importante ($R^2 > 0.75$).

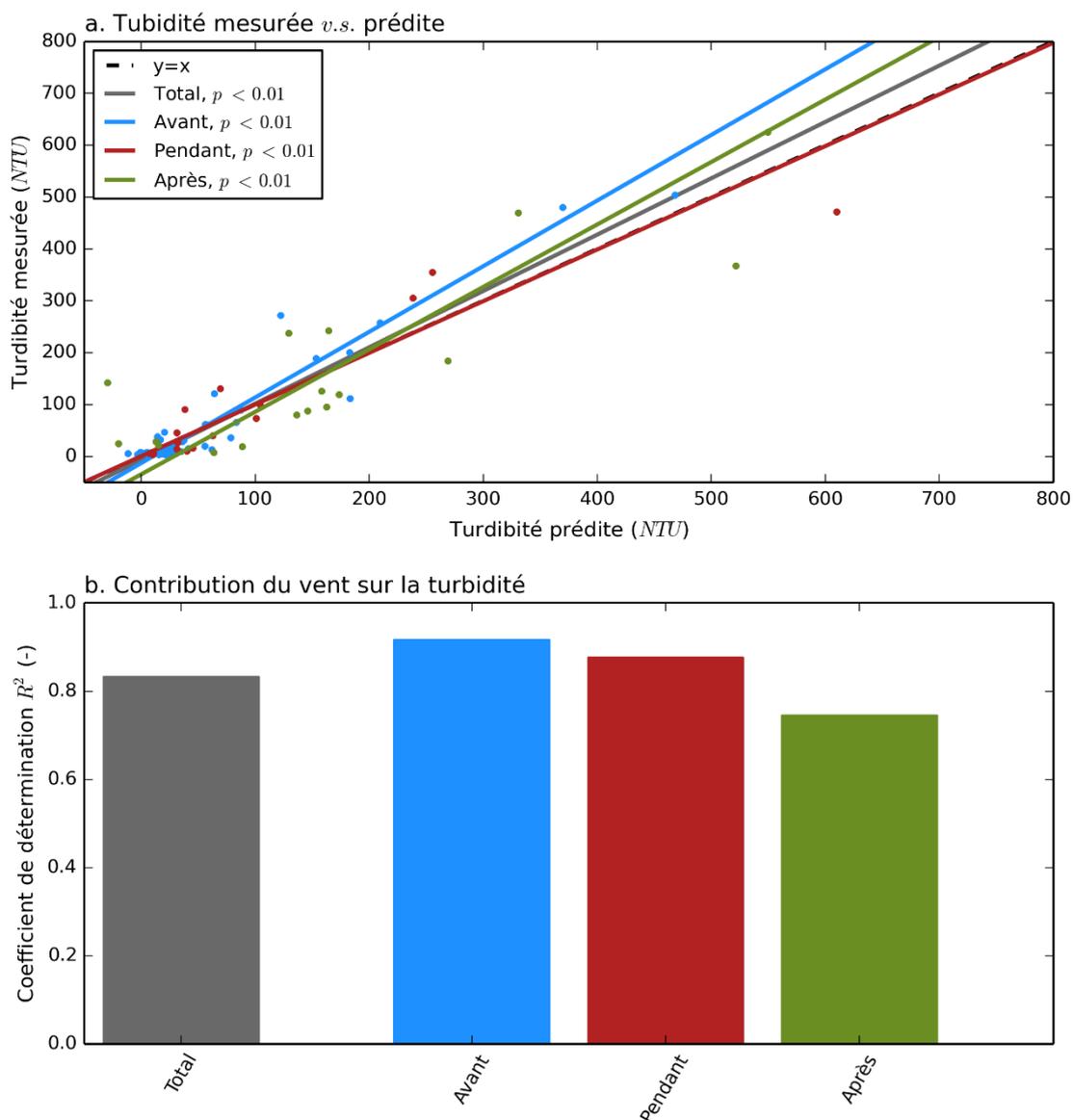


Figure 11 : Analyse statistique de l'effet des travaux sur la turbidité pour le secteur de Lanton :
 (a.) turbidité mesurée versus prédite pour les différentes périodes testées, et droites de régression associées et (b.) coefficient de détermination (R^2) des régressions mesure/prédiction en tant que *proxy* de la contribution du vent sur la turbidité.

4 Effets des travaux d'arrachage sur les courants de marée

Afin de suivre l'impact potentiel des travaux d'arrachage sur les vitesses de courants sur le secteur d'Arès, un courantomètre acoustique (ADV, Nortek® Vector) doté d'un capteur de pression a été déployé à deux reprises (une fois avant et une fois après les travaux) au sein de la zone de travaux (Figure 12).



Figure 12 : Localisation du point de suivi de la vitesse des courants sur le secteur d'Arès.

Le premier déploiement (avant travaux) a eu lieu du 25 au 30 octobre 2022, tandis que le second (après travaux) a eu lieu du 22 au 27 décembre 2022. Ces deux périodes avaient été choisies au préalable pour leurs coefficients de marée similaires.

Pour chacun des déploiements, la cadence de mesure a été fixée à 4 Hz, par salves de 2 minutes, espacées de 13 minutes. L'ADV était placé sur un support en aluminium, de manière à ce que la mesure de courant soit réalisée à une vingtaine de centimètres au-dessus du fond.

Entre les deux déploiements, le support sur lequel était fixé l'ADV n'a pas été retiré, de manière à ce que les changements potentiels de vitesse de courant ne puissent pas être induits par une position différente (que ce soit horizontale que verticale) du capteur entre les deux déploiements.

Remarque : Dans cette partie dédiée à l'effet des travaux sur les vitesses de courant, un nombre important de traitements a dû être réalisé, générant de nombreux résultats intermédiaires. Ainsi, contrairement aux parties précédentes, qui étaient divisées en une première sous-partie présentant les méthodes et une seconde présentant les résultats, dans cette partie les méthodes et les résultats intermédiaires associés seront présentés étape par étape dans le but de faciliter la compréhension du lecteur.

4.1 Traitement et filtrage des données brutes

Les données brutes de pression ont tout d'abord été corrigées de la variation de la pression atmosphérique à l'aide des données horaires issues de la station Météo-France du Cap-Ferret puis converties en hauteur d'eau au-dessus du fond. Les données de vitesse et de hauteur d'eau ont ensuite été filtrées sur la base de la hauteur d'eau, avec un seuil fixé à 10 cm au-dessus du capteur ; c'est-à-dire que toutes les données pour lesquelles la hauteur d'eau au-dessus du fond est inférieure à la hauteur du capteur plus 10 cm ont été supprimées.

Une phase de filtrage additionnel a ensuite été effectuée : suppression des données pour lesquelles l'amplitude du signal était inférieure à 80 counts, suppression des données pour lesquelles le rapport signal sur bruit (SnR) était inférieur à 20 dB, suppression des données pour lesquelles la corrélation était inférieure à 60 counts, et enfin suppression des « spikes » (valeurs aberrantes) selon la méthode Min/Max décrite par Cea *et al.* (2007).

Une fois cette phase de filtrage des données brutes réalisée, les hauteurs d'eau et les trois composantes de vitesse (U – Ouest/Est, V – Sud/Nord et W – vertical) ont été moyennées pour chaque salve. A noter qu'au sein d'une salve, si la proportion de données valides était inférieure à 80 %, la salve était supprimée. La norme horizontale des vitesses de courant (UV) a ensuite été calculée.

Les données de hauteur d'eau filtrées (très haute fréquence, 4 Hz) ont également été utilisées afin de calculer les paramètres des vagues, notamment la hauteur significative des vagues, pour chacune des salves.

Une synthèse des résultats de vitesse et direction du vent, de hauteur d'eau, de vagues et de vitesses des courants est présentée **figure 13**. Si l'on compare visuellement les résultats entre les deux périodes, on remarque tout d'abord qu'en termes de vitesses et de direction du vent (**Figures 13a.** et **13d.**), la période avant travaux est marquée par des vents plutôt faibles à modérés ($\sim 4\text{-}5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) de secteurs oscillant principalement entre le Sud-Sud-Est et le Nord-Est, tandis que la période après travaux est plutôt marquée par une alternance de vents faibles ($< 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et de vents plus forts (jusqu'à $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) à dominante d'Ouest (de Nord-Nord-Ouest à Sud-Sud-Ouest). En termes de hauteurs de vagues (**Figures 13b.** et **13e.**), il apparaît globalement que la période avant travaux a été plus énergétique (bien que les hauteurs de vagues restent faibles, $< 0.15 \text{ m}$) que la période après travaux. Enfin, en ce qui concerne les vitesses de courant (**Figures 13c.** et **13f.**), on observe clairement que les courants sont bien plus faibles avant qu'après les travaux ($< 0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ avant travaux et jusqu'à $0.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ après).

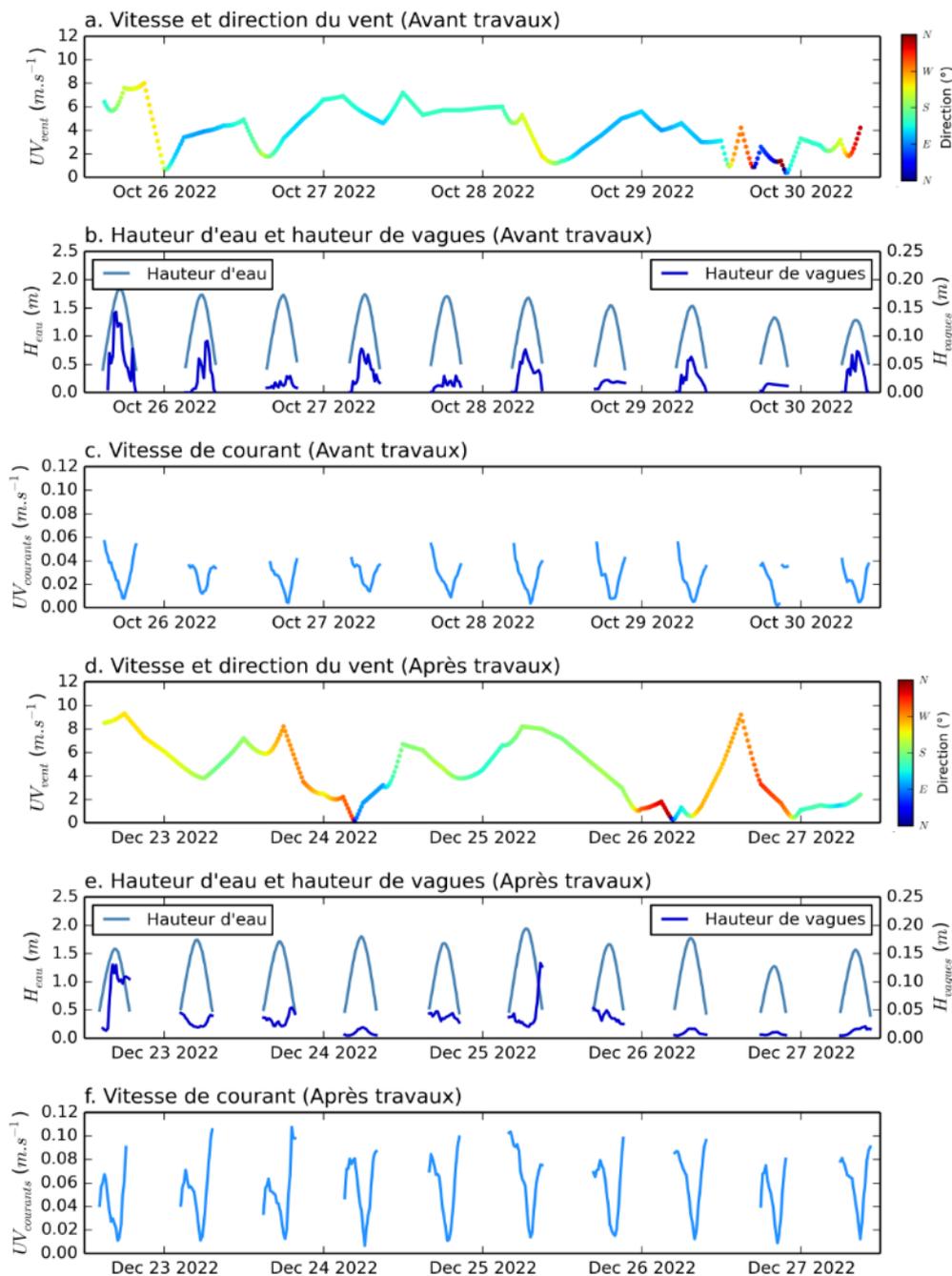


Figure 13 : Série temporelles de vitesse et direction du vent (a. et d.), de hauteur d’eau et hauteur de vagues (b. et e.) et de vitesse des courants (c. et f.) mesurées à Arès, avant les travaux (a., b. et c.) et après les travaux (d., e., f.).

4.2 Quantification de l’effet des travaux sur les vitesses

Outre l’effet des travaux d’arrachage des spartines anglaises, différents processus peuvent participer à l’augmentation après travaux des courants mesurés :

- Les différences de vitesses et de direction des vents : il convient donc de vérifier s’il existe une relation entre la vitesse et la direction du vent et celles des courants.

- La variabilité saisonnière du développement des herbiers de zostères naines : Cognat (2019) a mis en évidence des différences importantes de vitesses de courants, à l'échelle du Bassin d'Arcachon, selon le stade de développement saisonnier des herbiers : les vitesses sur les estrans sont significativement plus fortes lorsque les herbiers sont faiblement développés (caractéristiques hivernales ; correspondant au suivi après travaux) que lorsqu'ils sont à leur développement maximum en fin d'été/début d'automne (correspondant au suivi avant travaux).
- La variabilité saisonnière du développement des schorres (biomasse) : tout comme pour les herbiers de zostères, il est probable que ce processus joue un rôle sur les courants à proximité des schorres. Cependant, du fait de leur faible extension par rapport à celle des herbiers et du fait de la plus faible amplitude saisonnière des caractéristiques de ces espèces, ce rôle pourrait être minime.

Ainsi, dans le but de quantifier au mieux l'effet des travaux d'arrachage des spartines anglaises sur les vitesses de courants, différents tests et post-traitements ont été réalisés.

4.2.1 Estimation de la contribution du vent

En premier lieu, l'existence d'une relation entre la vitesse et la direction du vent et celles des courants a été testée. Pour cela, pour chacune des deux composantes horizontales (Ouest-Est et Sud-Nord), les vitesses de courants ont été tracées en fonction des vitesses de vent et une relation linéaire a été recherchée (**Figure 14**). Il s'est avéré qu'il n'existait aucune relation significative entre la vitesse du vent et celle des courants.

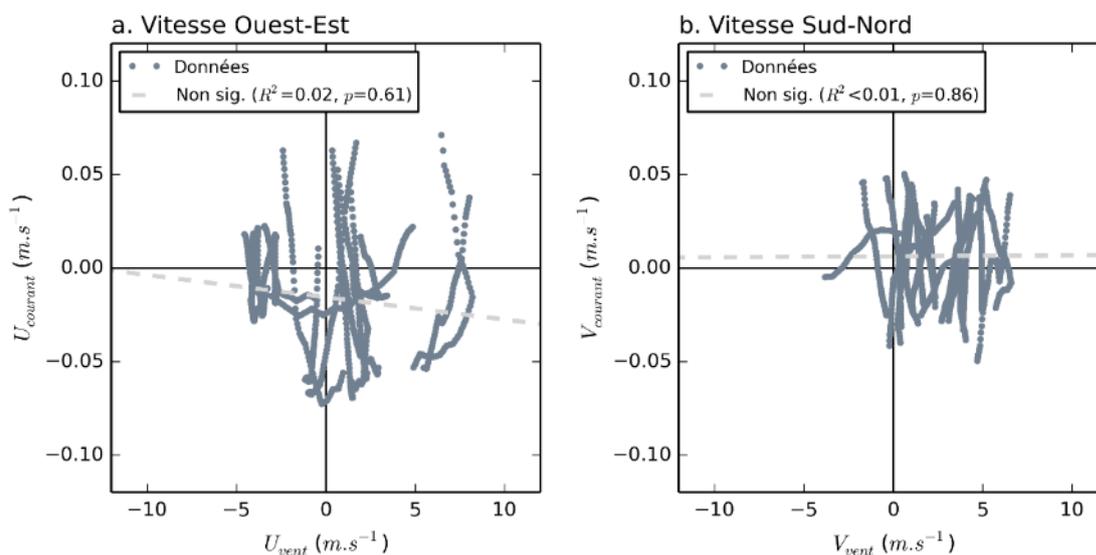


Figure 14 : Relation entre les vitesses de vent et celles de courants selon la composante Ouest-Est (a.) et Sud-Nord (b.).

4.2.2 Estimation de la contribution des herbiers de zostères

Dans un second temps, l'effet potentiel de la variabilité saisonnière du développement des herbiers zostères a été quantifié. Pour ce faire, le modèle hydrodynamique MARS3D (Lazure et Dumas, 2008) appliqué au Bassin d'Arcachon a été utilisé. Le modèle intègre en effet un module

décrivant explicitement les interactions entre les herbiers de zostères et l'hydrodynamique (Kombiadou *et al.*, 2014).

Le modèle MARS3D utilise le principe des modèles gigognes, qui consiste à construire une série de modèles emboîtés, d'emprise décroissante et de résolution croissante. Pour le cas du Bassin d'Arcachon, quatre modèles (rangs) sont ainsi construits (**Figure 15**), avec des résolutions respectives de 2500, 500, 235 et 65 mètres. Les rangs 0, 1 et 2 sont utilisés en 2 dimensions (2D), afin d'optimiser les temps de calculs (pas de temps respectifs de 300, 120 et 20 secondes), tandis que le rang-3 est utilisé en 3D avec 15 niveaux sur la verticale et un pas de temps de 5 secondes.

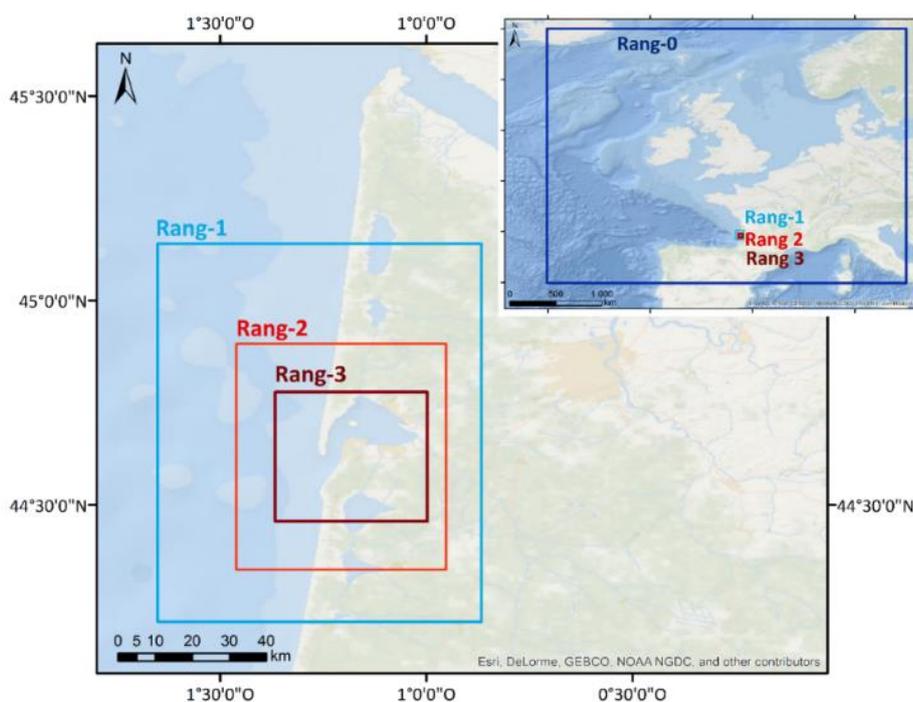


Figure 15 : Emprises spatiales des différents rangs du modèle MARS3D appliqué au Bassin d'Arcachon.

Pour chacun des deux déploiements du courantomètre (avant et après travaux), le modèle a été lancé en conditions réalistes de marée, de vent, de débit des cours d'eau, et de développement des herbiers de zostères. Les vitesses de courants simulées ont été extraites du rang le plus résolu (Rang-3, 65 m de résolution) au point où le courantomètre avait été déployé et à une hauteur de 20 cm au-dessus du fond.

Les série-temporelles de vitesse ainsi obtenue seront utilisées par la suite en guise de « référence ».

4.2.3 Association des marées avant/après travaux

Ensuite, dans le but de comparer les vitesses avant et après travaux, des correspondances entre les marées avant et après travaux ont été recherchées sur la base de la hauteur d'eau mesurée. Ainsi, pour neuf des dix marées mesurées avant travaux, une correspondance a été trouvée avec une marée mesurée après travaux. Pour chacune de ces neuf marées, le vecteur temporel a été modifié de manière à être exprimé en heure et à avoir pour origine l'heure de la pleine mer.

Les résultats pour les neuf marées sont présentés ci-après à titre informatif (**Figures 16 à 18**). D'une manière générale, on remarque que les vitesses mesurées et modélisées suivent des

tendances comparables : les vitesses modélisées sont plus fortes après les travaux qu'avant, ce qui implique que la variabilité avant/après est principalement liée au stade de développement des herbiers de zostères.

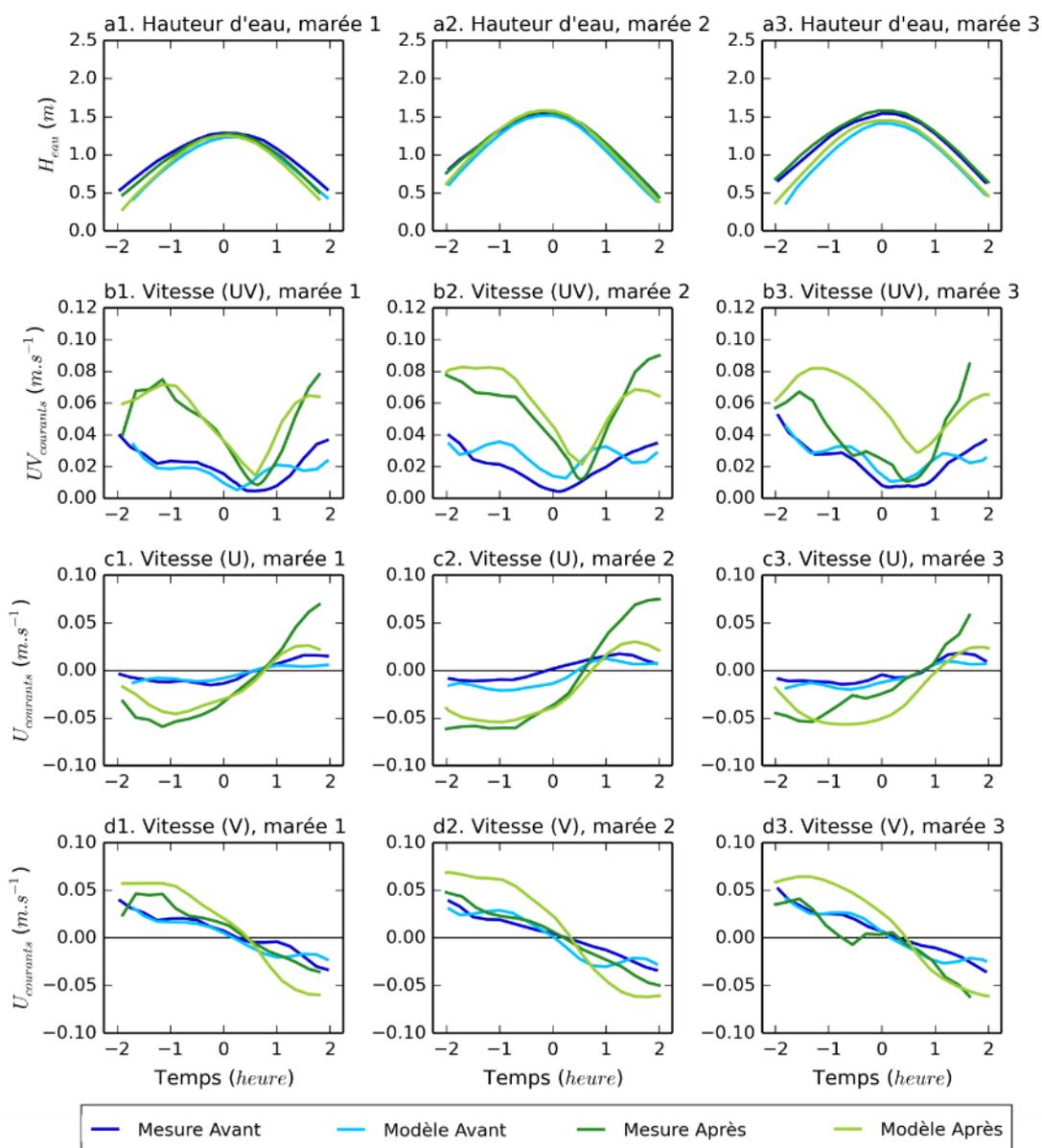


Figure 16 : Résultats des associations de marées pour les marées 1 à 3 : (a_x) hauteurs d'eau, (b_x) norme des vitesses de courants, (c_x) vitesses de courant pour la composante Ouest-Est, et (d_x) vitesses de courants pour la composante Sud-Nord.

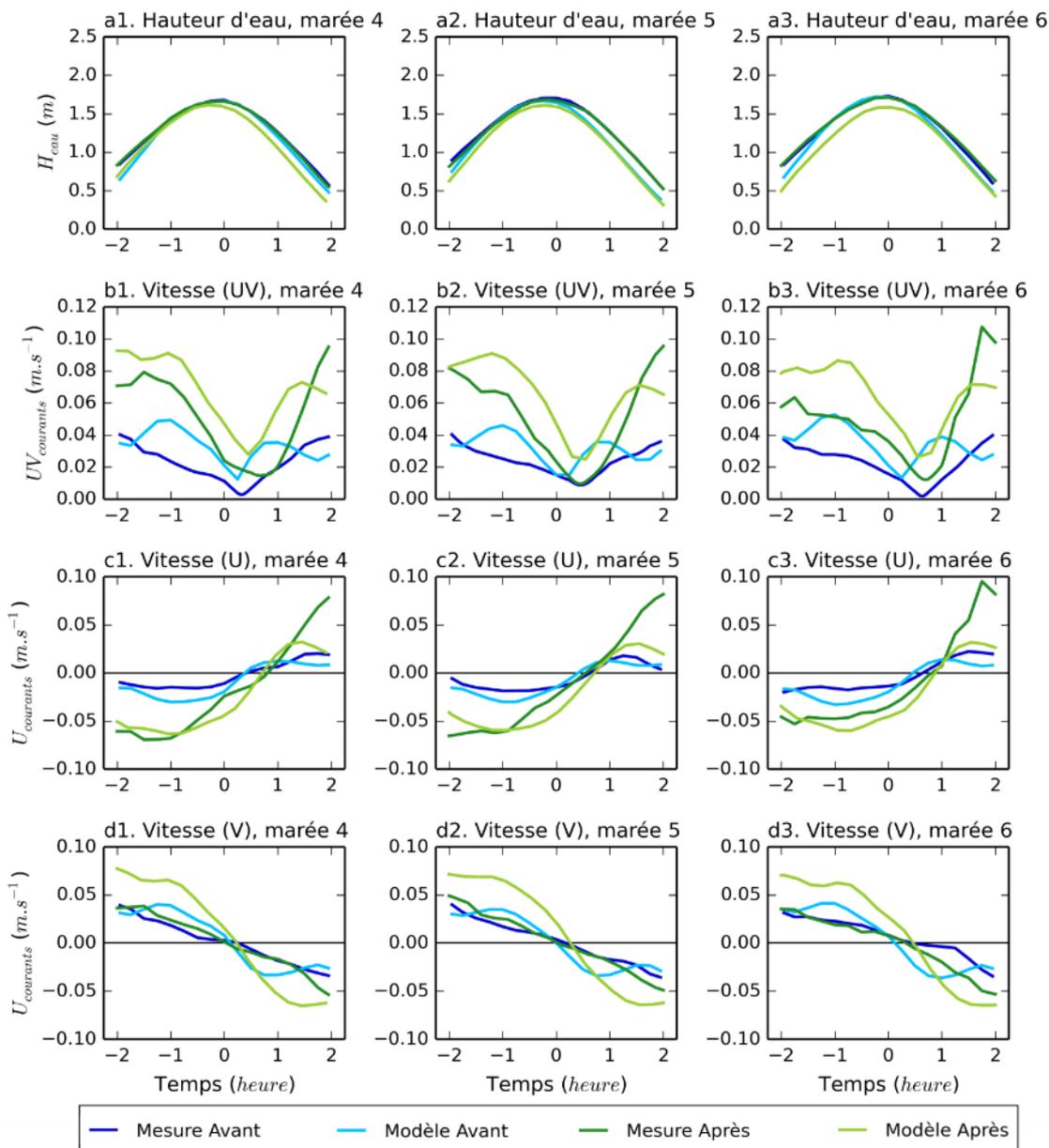


Figure 17 : Résultats des associations de marées pour les marées 4 à 6 : (a_x) hauteurs d'eau, (b_x) norme des vitesses de courants, (c_x) vitesses de courant pour la composante Ouest-Est, et (d_x) vitesses de courants pour la composante Sud-Nord.

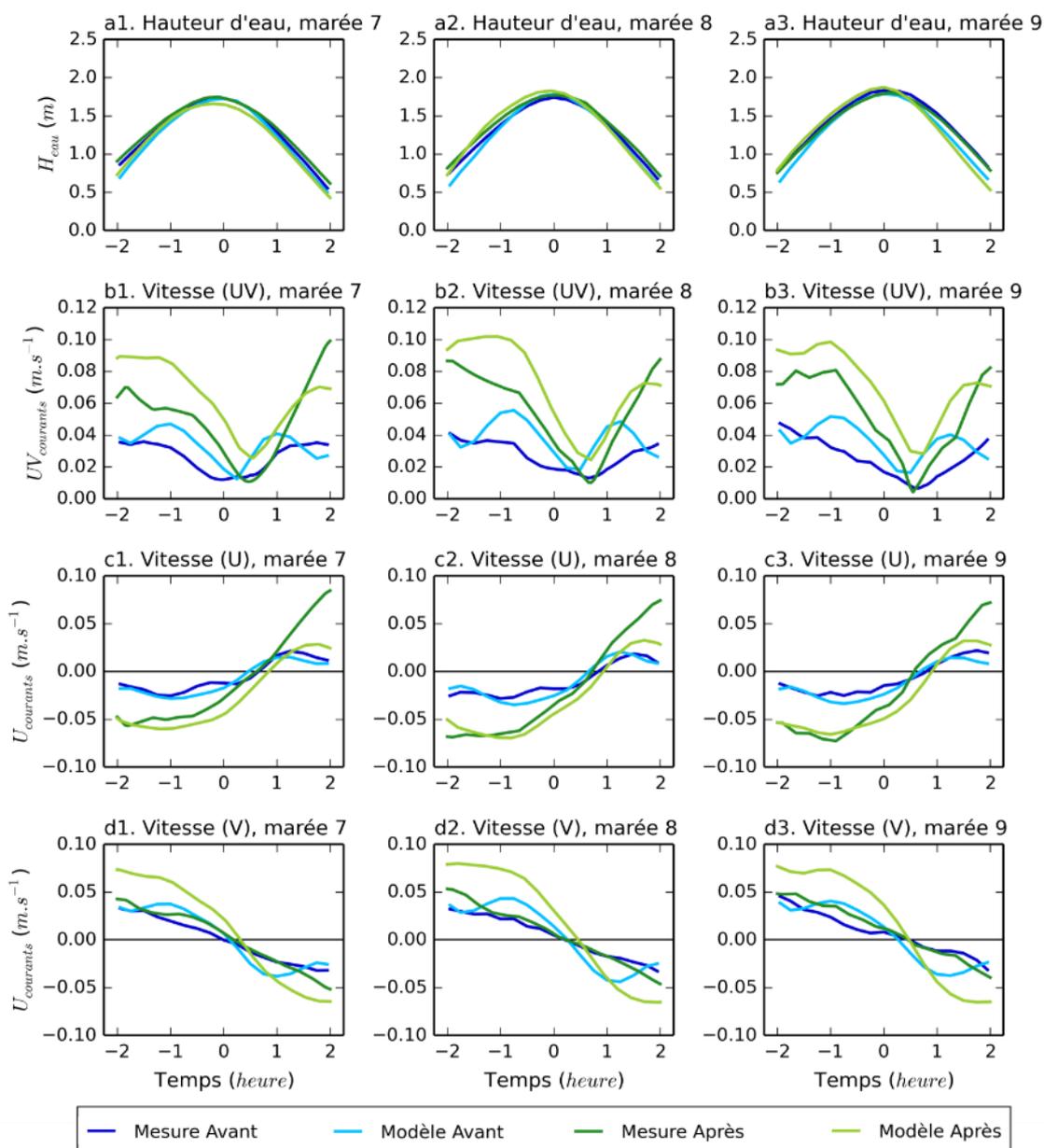


Figure 18 : Résultats des associations de marées pour les marées 7 à 9 : (a_x) hauteurs d'eau, (b_x) norme des vitesses de courants, (c_x) vitesses de courant pour la composante Ouest-Est, et (d_x) vitesses de courants pour la composante Sud-Nord.

Les données de hauteur d'eau et de vitesses mesurées et simulées à chaque instant de la marée ont ensuite été moyennées sur l'ensemble des neuf marées de manière à obtenir un cycle de marée « typique » (**Figure 19**). On remarque tout d'abord, pour les normes des vitesses (**Figure 19b.**), que les vitesses avant travaux modélisées sont assez proches des vitesses mesurées en début et en fin de marée, ainsi qu'au moment de l'étales des courants, mais qu'elles sont un peu plus fortes que les vitesses mesurées au milieu du flot et au milieu du jusant. Il apparaît que ces différences sont principalement induites par la composante Sud-Nord (**Figure 19d.**). Ensuite, en ce qui concerne les données après travaux, les vitesses modélisées sont quasiment systématiquement plus fortes que les vitesses mesurées (**Figure 19b.**) et comme pour les vitesses avant travaux, la différence entre vitesses mesurées et simulées est plus importante pour la composante Sud-Nord (**Figure 19d.**) que pour la composante Ouest-Est (**Figure 19c.**), à l'exception

de la dernière heure de jusant. Le fait que les vitesses simulées soient sensiblement plus fortes que les vitesses mesurées semble pouvoir être attribué à l'effet des schorres et autres patches de spartines présents dans le secteur et ses alentours et qui ne sont pas, à l'heure actuelle, pris en compte dans le modèle hydrodynamique.

Enfin, comme évoqué précédemment, tout comme pour les vitesses mesurées, les vitesses simulées sont sensiblement plus fortes après qu'avant les travaux, ce qui confirme que la variabilité saisonnière du développement des herbiers de zostères contribue à l'augmentation des vitesses mesurées après les travaux d'arrachage des spartines anglaises.

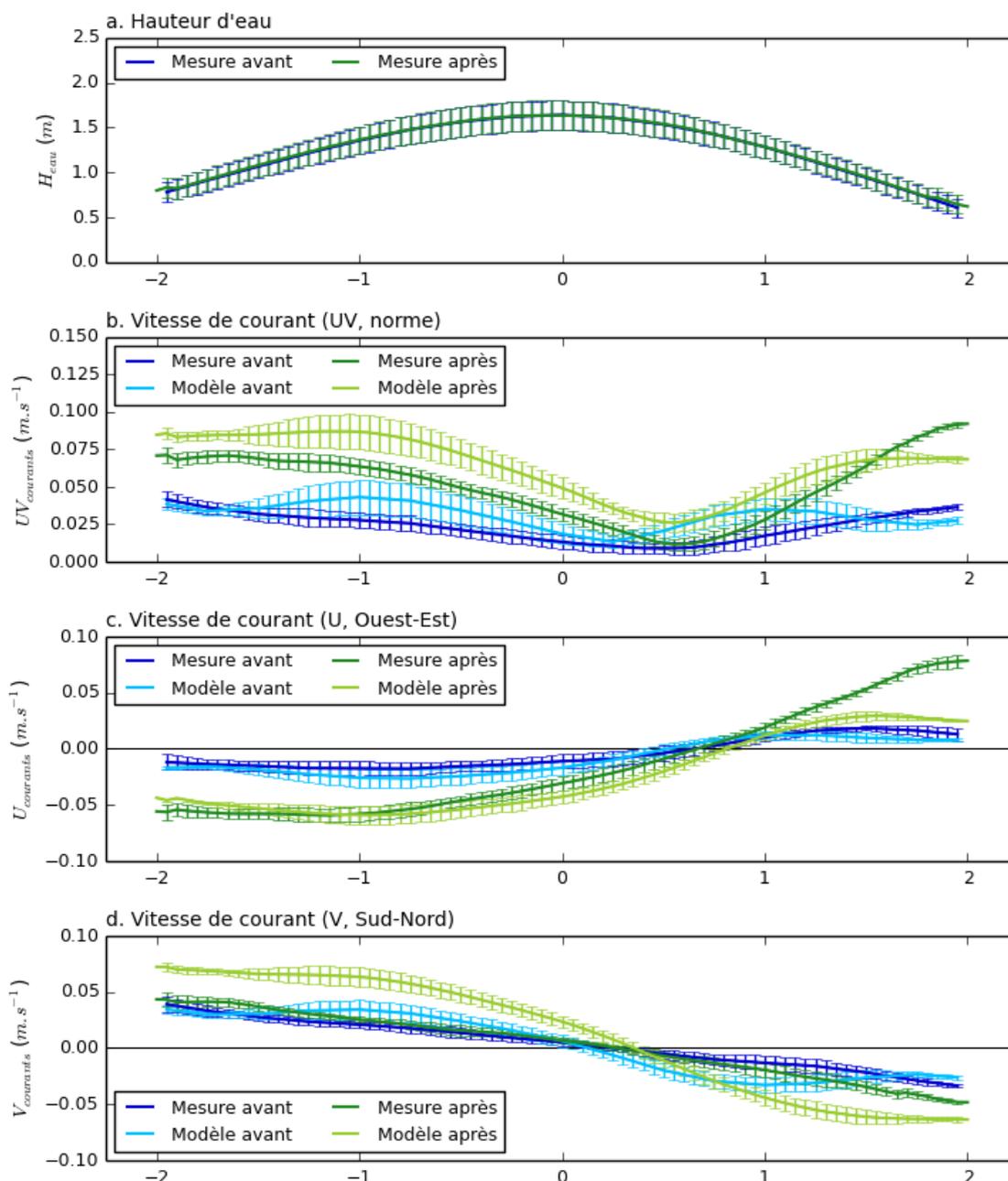


Figure 19 : Moyenne et écart-type des données mesurées et simulées sur les neuf marées : (a.) hauteurs d'eau, (b.) norme des vitesses de courants, (c.) vitesses de courant pour la composante Ouest-Est, et (d.) vitesses de courants pour la composante Sud-Nord.

4.2.4 Analyses statistiques complémentaires

Afin d'aller plus loin dans la caractérisation d'un effet potentiel des travaux d'arrachage des spartines sur les vitesses de courant de la zone, les vitesses simulées ont été tracées en fonction des vitesses mesurées pour les données avant et après travaux, accompagnées de leurs droites de régression (**Figure 20a.**), la valeur des coefficient de détermination de ces droites de régression est également présentée (**Figure 20b.**). Il apparaît tout d'abord que, dans le cas avant travaux comme dans le cas après travaux, il existe une relation forte ($p < 0.001$) entre les vitesses simulées et mesurées. On remarque toutefois que le R^2 est sensiblement plus fort après les travaux. Ceci semble indiquer que le modèle est plus à-même de reproduire la variabilité des vitesses de courants dans les conditions après travaux. Outre le fait qu'après les travaux la variabilité des vitesses couvre une plus grande gamme de valeurs, l'addition de deux processus peut également contribuer à expliquer ce comportement du modèle, sans pouvoir déterminer leur contribution relative :

- Les spartines et les schorres du secteur et de ses alentours sont plus développés en fin d'automne (avant travaux) et de ce fait ont un impact plus important sur l'hydrodynamique qu'en hiver (après travaux), impact que le modèle ne reproduit pas puisque les schorres n'y sont pas pris en compte.
- Les travaux d'arrachage qui ont conduit à la suppression d'une partie du rôle d'atténuation joué par les schorres et les spartines.

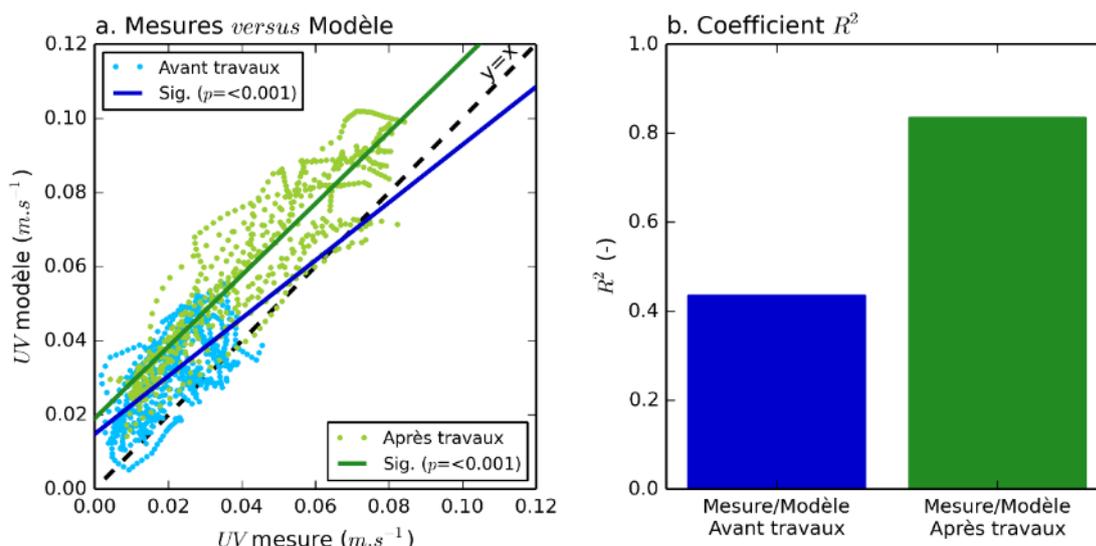


Figure 20 : (a.) Régression linéaire des vitesses mesurées *versus* simulées avant et après les travaux, et (b.) coefficients de détermination (R^2) associé.

Ensuite, afin de déterminer si les processus cités ci-dessus ont un impact significatif global, les vitesses mesurées et simulées après travaux ont été tracées en fonction des vitesses mesurées et simulées avant travaux, accompagnées de leurs droites de régression (**Figure 21**). Il apparaît dans les deux cas (vitesses mesurées et vitesses simulées), qu'une relation forte ($p < 0.001$) relie les vitesses avant et après travaux. La comparaison des pentes des droites de régression (réalisée à l'aide d'une analyse de covariance, ANCOVA) met en évidence une différence significative ($p < 0.001$) entre l'évolution des vitesses avant/après travaux mesurée et celle des vitesses

simulées, ce qui tend à confirmer l'existence d'un effet statistiquement significatif mais de faible ampleur (1) d'une évolution naturelle des caractéristiques des schorres et/ou (2) des travaux d'arrachage des spartines sur les vitesses de courant.

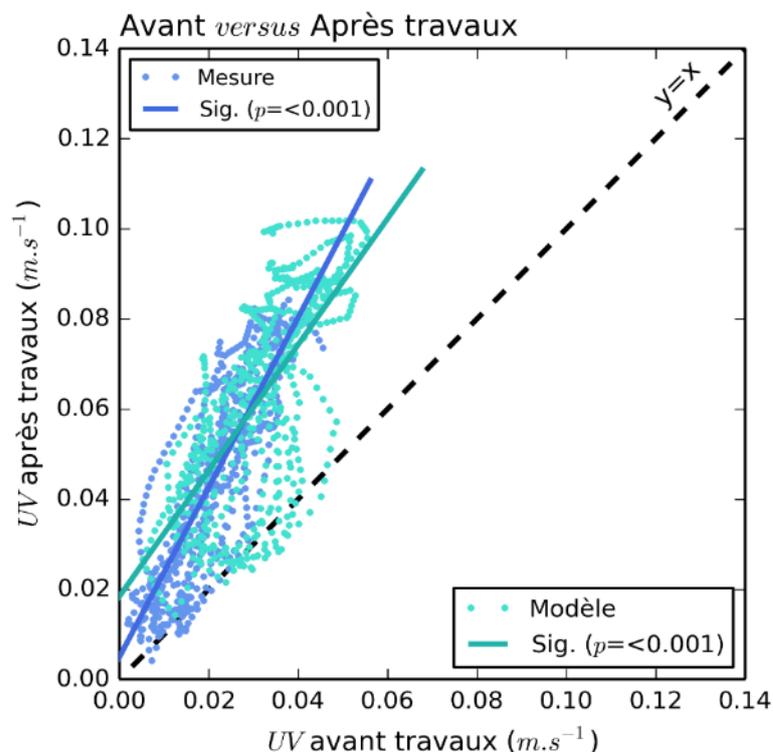


Figure 21 : Relations entre les vitesses avant travaux et après travaux pour les vitesses mesurées et les vitesses simulées.

4.2.4.1 Calcul de « l'effet spartines »

Enfin, « l'effet spartines » sur l'hydrodynamique a été quantifié en termes de réduction ou d'augmentation des vitesses par la présence des spartines, tel que :

$$E_{\text{spartine}} = 100 \times (UV_{\text{mesures}} - UV_{\text{modèle}}) / UV_{\text{modèle}}$$

Cette grandeur, exprimée en %, est négative lorsque la présence des spartines conduit à une réduction des vitesses de courants et positive lorsqu'il s'agit d'une augmentation des vitesses. Elle a été calculée pour les données avant et après travaux (**Figure 22a.**), la différence entre les deux rendant compte de l'addition des effets de l'évolution naturelle des caractéristiques des spartines entre les deux périodes de mesure et de l'effet des travaux. Toutefois, les résultats de Proença (2019) semblant indiquer que la variation des caractéristiques des spartines demeure limitée sur la période de temps entre les deux suivis (un mois et demi seulement), il a été considéré que la contribution de cette évolution saisonnière naturelle sur les taux d'atténuation / d'augmentation des vitesses devait être faible voire négligeable. De ce fait, la différence entre les taux d'atténuation / d'augmentation des vitesses avant travaux et après travaux a été considérée comme étant majoritaire induite par les travaux d'arrachage (**Figure 22b.**). Une analyse de variance (ANOVA ; variante de Kruskal-Wallis) a permis de déterminer pour chaque moment de la

marée et pour l'ensemble du cycle de marée, si la variation des taux de réduction / d'augmentation des vitesses avant/après travaux (*i.e.* donc l'effet des travaux) était statistiquement significative.

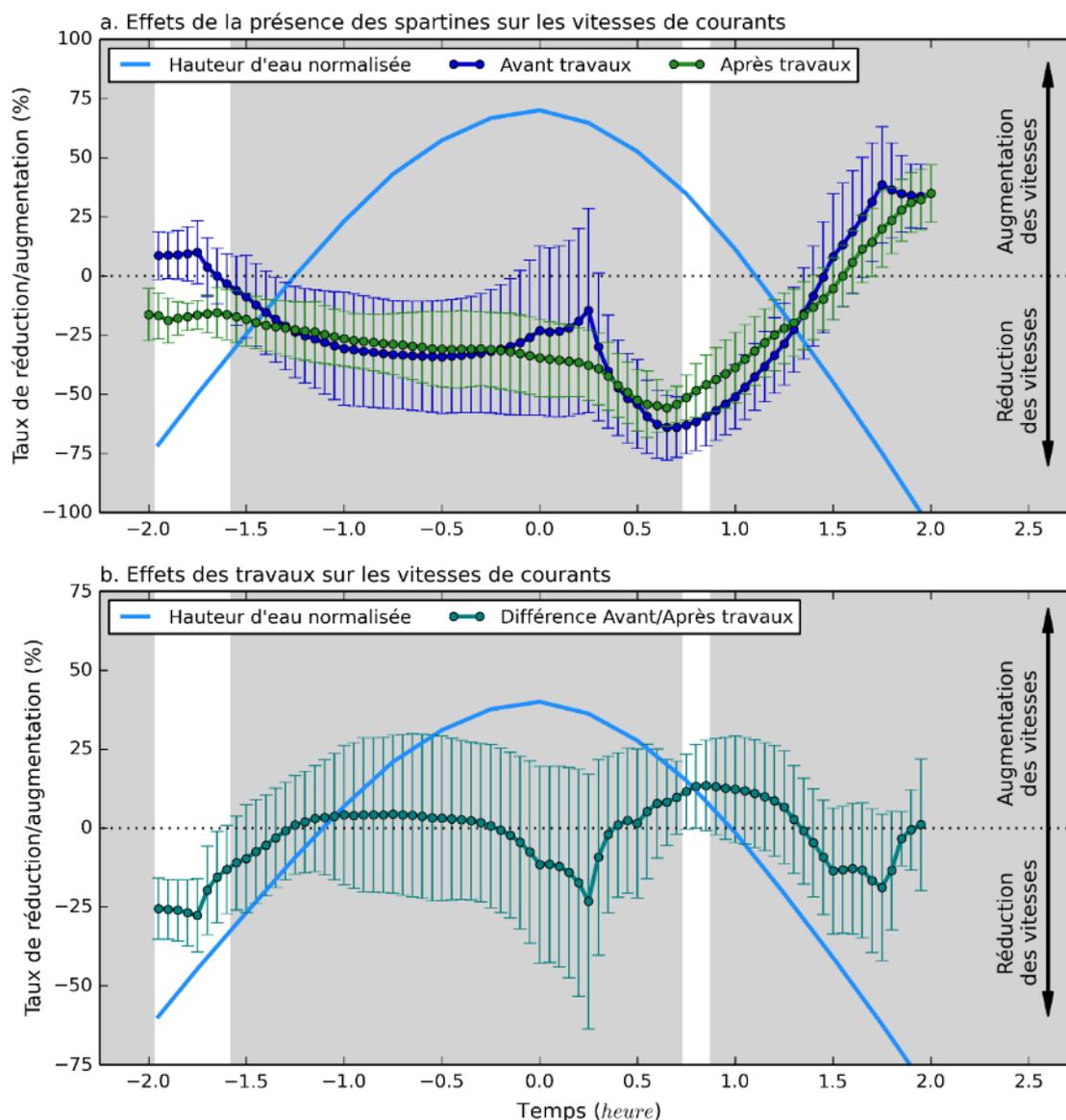


Figure 22 : (a.) Taux de réduction / d'augmentation des vitesses de courants liés à la présence des spartines avant et après travaux, et (b.) différences entre les taux de réduction / d'augmentation des vitesses entre avant et après les travaux. Les zones grisées correspondent aux résultats de l'ANOVA pour lesquels la différence avant-après n'est pas significative ($p \geq 0.05$) tandis que les zone blanche correspondent à des différences significatives ($p < 0.05$).

Les résultats obtenus indiquent tout d'abord que l'effet de la présence des spartines se traduit majoritairement par une atténuation des courants, excepté durant la première demi-heure de flot (avant travaux) et la dernière demi-heure de jusant (avant et après travaux) au cours de laquelle les vitesses sont accélérées par rapport à une configuration où il n'y aurait pas de spartine (**Figure 22a**). Cette accélération des courants lorsque la hauteur d'eau est faible peut être attribué à l'effet de chenalisation induit par les patches de spartine (Temmerman *et al.*, 2005 ; 2007).

En ce qui concerne l'effet des travaux sur les vitesses de courants (**Figure 22b.**), il apparaît tout d'abord que suite à l'arrachage des spartines, les vitesses ont tendance à être atténuées (jusqu'à -25 %) durant la première demi-heure de flot, durant la première demi-heure de jusant et durant la dernière demi-heure de jusant, tandis que le reste du temps, la suppression des spartines anglaises a plutôt conduit à une légère augmentation des courants (entre +5 et +15 %). Cependant, seules les différences mesurées au début de flot et entre 0.65 et 0.75 heure après la pleine mer sont statistiquement significatives ($p < 0.05$). D'un point de vue de l'ensemble d'un cycle de marée, les différences ne sont pas significatives ($p = 0.25$).

Pour conclure, même si **à certains moments de la marée un effet significatif des travaux a été mis en évidence**, se traduisant aussi bien par une diminution (au début du flot) que par une augmentation (au début du jusant) des vitesses, **à l'échelle d'un (ou plusieurs) cycle de marée, l'effet des travaux d'arrachage des spartines semble négligeable** sur le secteur d'Arès.

5 Conclusions

Cette expertise avait pour objectif d'établir et de quantifier l'impact de travaux d'arrachage de spartines anglaises réalisés dans le bassin d'Arcachon (secteurs d'Arès et de Lanton) sur les dynamiques hydro-sédimentaires, à savoir, les caractéristiques des sédiments superficiels, la turbidité et la vitesse des courants. Les principales conclusions tirées des données dans les parties précédentes sont synthétisées dans le tableau suivant :

Paramètre / Secteur	Secteur d'Arès	Secteur de Lanton
Caractéristiques des sédiments superficiels	Effet négligeable au regard de la dynamique naturelle	Aucun effet
Turbidité	Effet faible au regard de la variabilité naturelle	Aucun effet
Vitesses des courants	Effet négligeable	Sans objet

6 Bibliographie

Bouma, T.J., De Vries, M.B., Low, E., Kusters, L., Herman, P.M.J., Tónczos, I.C., Temmerman, S., Hesselink, A., Meire, P., van Regenmortel, S. (2005). Flow hydrodynamics on a mudflat and in saltmarsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations. *Hydrobiologia*, 540, 259-274.

Cea, L., Puertas, J., Pena, L. (2007). Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in Fluids*, 42, 333-348.

Cognat, M. (2019). Rôle des facteurs environnementaux et des interactions biomorphodynamiques sur l'évolution spatio-temporelle des herbiers de zostères dans une lagune mésotidale. *Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux*, 305 pp.

Ganthy, F., Sottolichio, A., Verney, R. (2013). Seasonal modification of tidal flat sediment dynamics by seagrass meadows of *Zostera noltii* (Bassin d'Arcachon, France). *Journal of Marine Systems*, 109-110, S233-S240.

Kombiadou, K., Ganthy, F., Verney, R., Plus, M., Sottolichio, A. (2014). Modelling the effects of *Zostera noltei* meadows on sediment dynamics: application to the Arcachon lagoon. *Ocean Dynamics*, 64, 1499-1516.

Lazure, P., Dumas, F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for application at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, 31, 233-250.

Möller, I., Spencer, T., French, J.R., Legett, D.J., Dixon, M. (1999). Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modelling study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, 411-426.

Proença, B (2019). Invasion mechanisms of *Spartina anglica* in salt marshes of the Bay of Arcachon and consequences for native vegetation species. *Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux*, 202 pp.

Temmerman, S., Bouma, T.J., Govers, G., Wang, Z.B., De Vries, M.B., Herman, P.M.J. (2005). Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: Three-dimensional modeling for a tidal marsh. *Journal of Geophysical Research*, 110, F04019.

Temmerman, S., Bouma, T.J., Van de Koppel, J., Van der Wal, D., De Vries, M.B., Herman, P.M.J. (2007). Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35(7), 631-634.