



Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes – Unité Littoral –  
Laboratoire Environnement Ressources d’Arcachon

Ganthy Florian, Rigouin Loïc, Auby Isabelle, Lissardy Muriel

Juin 2022

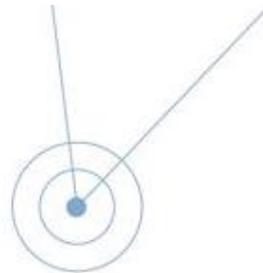
Rapport ODE/LITTORAL/LER-AR/22.015

# IDHEBARC 2018-2021 : Bilan final

Secteur des Jacquets



© Ifremer, Muriel Lissardy





## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport :</b> IDHEBARC 2018-2021 : Bilan final – Secteur des Jacquets	
<b>Référence interne :</b> ODE/LITTORAL/LER-AR/22.015  <b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Date de publication :</b> Juin 2022  <b>Langue(s) :</b> Français
<b>Résumé/ Abstract :</b> <p>Le projet IDHEBARC s’intéresse à l’impact potentiel des travaux maritimes (nettoyage des friches ostréicoles, dragage des ports, ...) sur les herbiers de zostères du Bassin d’Arcachon. Ce projet pluriannuel comporte des actions de modélisation hydrosédimentaire visant à cartographier l’intensité des impacts potentiels, et un suivi de l’évolution de l’emprise et du recouvrement des herbiers et de la composition de leur fond sédimentaire.</p> <p>Ce rapport présente les résultats 2018, 2019, 2020 et 2021 du suivi réalisé dans le secteur des Jacquets (Bassin d’Arcachon), pour lequel les travaux d’entretien du Domaine Public Maritime ont été réalisés en février et mars 2019, puis en 2020.</p>	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Travaux maritimes, herbiers de zostères, Bassin d’Arcachon	
<b>Comment citer ce document :</b> Gantry F., Rigouin L., Auby I., Lissardy M. (2021). IDHEBARC 2018-2021 : Bilan final – Secteur des Jacquets. ODE/LITTORAL/LER-AR/22.015	
<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>	
<b>DOI :</b>	

<b>Commanditaire du rapport</b> : Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon	
<b>Nom / référence du contrat</b> :	
<input checked="" type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> : Projet IDHEBARC	
<b>Auteur(s) / Adresses mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, Laboratoire</b>
Florian Ganthy / <a href="mailto:florian.ganthy@ifremer.fr">florian.ganthy@ifremer.fr</a>	ODE/UL/LER/AR
Loïc Rigouin / <a href="mailto:loic.rigouin@ifremer.fr">loic.rigouin@ifremer.fr</a>	ODE/UL/LER/AR
Isabelle Auby / <a href="mailto:isabelle.auby@ifremer.fr">isabelle.auby@ifremer.fr</a>	ODE/UL/LER/AR
Muriel Lissardy / <a href="mailto:muriel.lissardy@ifremer.fr">muriel.lissardy@ifremer.fr</a>	ODE/UL/LER/AR
<b>Encadrement(s)</b> : Elvire Antajan	
<b>Destinataire</b> : Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon	
<b>Validé par</b> : Elvire Antajan	

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Contexte .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation de l'impact potentiel des travaux et choix des sites suivis .....</b>	<b>9</b>
2.1	Méthodes .....	9
2.2	Résultats de la modélisation et positionnement des sites suivis .....	10
<b>3</b>	<b>Suivi de l'emprise des herbiers à proximité de la zone traitée .....</b>	<b>12</b>
3.1	Méthodes .....	12
3.2	Résultats .....	13
3.2.1	Emprise des herbiers de zostères avant travaux : automne 2018 .....	13
3.2.2	Emprise des herbiers de zostères après travaux : automne 2019 .....	13
3.2.4	Emprise des herbiers de zostères après travaux : automne 2020 .....	15
3.2.5	Emprise des herbiers de zostères après travaux sur le secteur sud : été 2021 .....	16
3.2.6	Évolution de l'emprise entre 2018 et 2019 .....	17
3.2.7	Évolution de l'emprise entre 2019 et 2020 .....	19
3.2.8	Évolution de l'emprise entre 2020 et 2021 pour la partie sud-ouest du secteur ..	22
3.2.9	Évolution de l'emprise entre 2018 et 2020 .....	23
<b>4</b>	<b>Suivi du recouvrement des herbiers .....</b>	<b>26</b>
4.1	Méthodes .....	26
4.2	Résultats .....	27
4.2.1	Grille témoin (Hautebelle) .....	27
4.2.2	Grille Jacquets Nord .....	30
4.2.3	Grille Jacquets Sud .....	33
4.2.4	Évolution du recouvrement des herbiers entre 2018, 2019, 2020 et 2021 .....	36
<b>5</b>	<b>Suivi des sédiments .....</b>	<b>37</b>
5.1	Méthodes .....	37
5.2	Résultats .....	39
5.2.1	Caractérisation et évolution du substrat sédimentaire .....	39
5.2.2	Évolution des sédiments superficiels .....	40
<b>6</b>	<b>Suivi de l'éclairement à la surface des herbiers .....</b>	<b>45</b>
6.1	Méthodes .....	46
6.2	Analyse des données .....	46
6.2.1	Traitement des données de hauteur d'eau .....	46
6.2.2	Traitement des données issues des capteurs de lumière .....	47
6.3	Résultats .....	50
<b>7</b>	<b>Conclusion sur le suivi 2018-2021 .....</b>	<b>57</b>

<b>8</b>	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Annexe 1 : Résultats des analyses statistiques sur l'évolution du taux de recouvrement des zostères.....</b>	<b>60</b>

## 1 Contexte

En 2018, le SIBA a sollicité le Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon-Anglet (LER/AR) pour élaborer et mettre en œuvre des protocoles destinés à étudier l'impact des futurs travaux maritimes sur l'état des herbiers de zostères localisés dans les zones adjacentes à ces opérations et proposer, le cas échéant, des solutions alternatives et/ou des mesures compensatoires.

Plusieurs opérations ont débuté en 2018, dont une localisée dans le secteur des Jacquets, en zone intertidale, ayant pour but de réhabiliter une vingtaine d'hectares du Domaine Public Maritime occupé par des friches ostréicoles (Figure 1). Ces friches sont notamment composées de matériaux anthropiques (chantiers, poches, ...), qui doivent être ramenés à terre, et de coquilles d'huîtres, dont une partie est enfouie sur site lors du nivellement de la zone par damage à l'aide d'un chenillard marinisé.

Après une phase d'essai réalisée sur une petite surface (6,3 ha) en 2018, les travaux sur l'ensemble de la zone ont été réalisés en février-mars 2019. Au cours du mois d'août 2020, des travaux complémentaires ont été entrepris au sud-ouest de la zone présentée dans l'encadré de la figure 1.

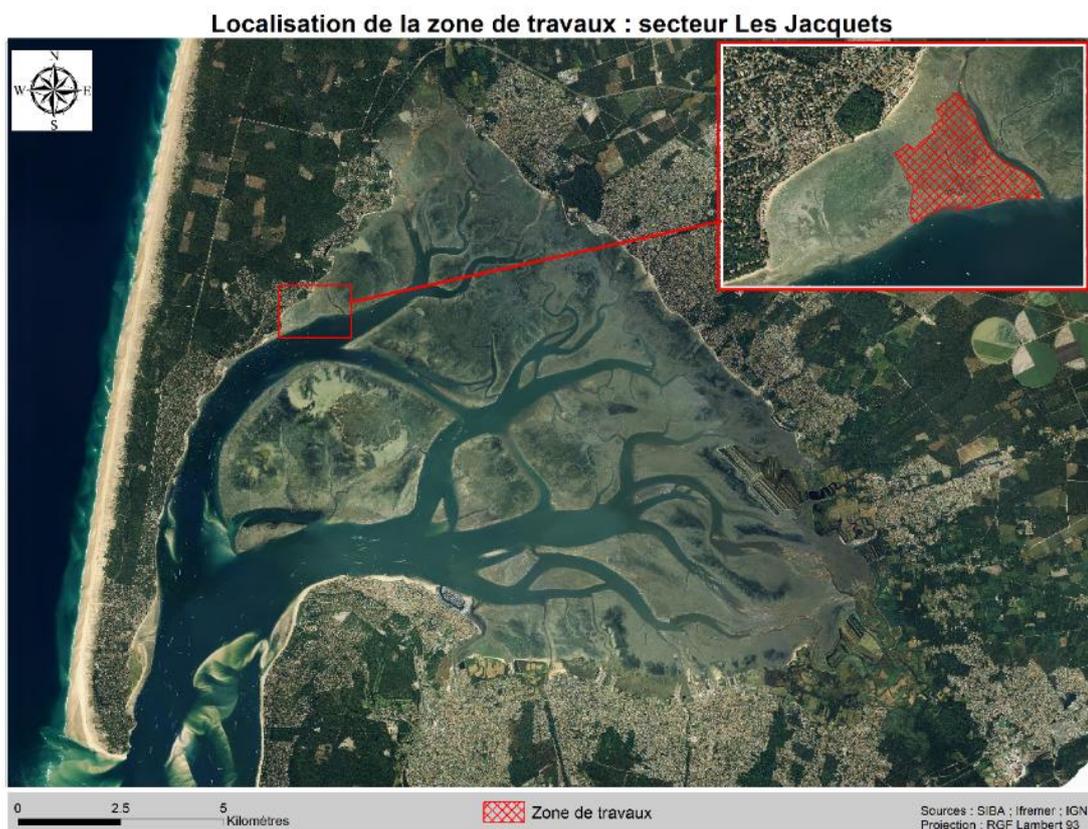


Figure 1 : Carte de localisation de la zone nettoyée

Afin de participer au suivi environnemental de l'impact de ces travaux, le LER/AR a élaboré une stratégie de surveillance des herbiers de zostères naines situés à proximité de cette zone, en s'appuyant sur les résultats du modèle hydro-sédimentaire pour choisir le site témoin (non impacté) et deux sites potentiellement impactés par les mouvements de sédiment fins générés par cette opération.

Les suivis mis en œuvre à partir de l'automne 2018 concernent :

- les herbiers de zostères (délimitation de l'emprise des herbiers autour du chantier, mesure des taux de recouvrement sur les trois sites),
- les caractéristiques sédimentaires dans les herbiers,
- l'éclairement reçu par les herbiers.

Ce document décrit les méthodes utilisées et présente les résultats obtenus depuis le début du suivi.

## 2 Modélisation de l'impact potentiel des travaux et choix des sites suivis

La position des sites de mesure du recouvrement des herbiers (potentiellement fortement, faiblement ou non impactés) situés à proximité de la zone de travaux a été déterminée sur la base de simulations numériques obtenues en utilisant le modèle MARS3D, décrit dans les paragraphes suivants.

### 2.1 Méthodes

La plateforme de modélisation hydro-sédimentaire MARS (Model for Application at Regional Scale ; Lazure et Dumas, 2008) a été développée par l'Ifremer afin de simuler l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire depuis des échelles régionales jusqu'à des échelles très locales. Le module hydrodynamique calcule le niveau de la surface libre, la courantologie et les caractéristiques de la turbulence et intègre un module décrivant explicitement les interactions entre la végétation benthique (ici les herbiers de zostères naines, *Z. noltei*, et de zostères marines, *Z. marina*) et l'hydrodynamique (Kombiadou *et al.*, 2014). Le module de transport sédimentaire (Le Hir *et al.*, 2011) décrit les principaux processus qui contrôlent le transport et la dynamique des sédiments cohésifs et non-cohésifs dans la colonne d'eau, et l'érosion de mélanges sédimentaires.

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 2), 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 3 secondes.

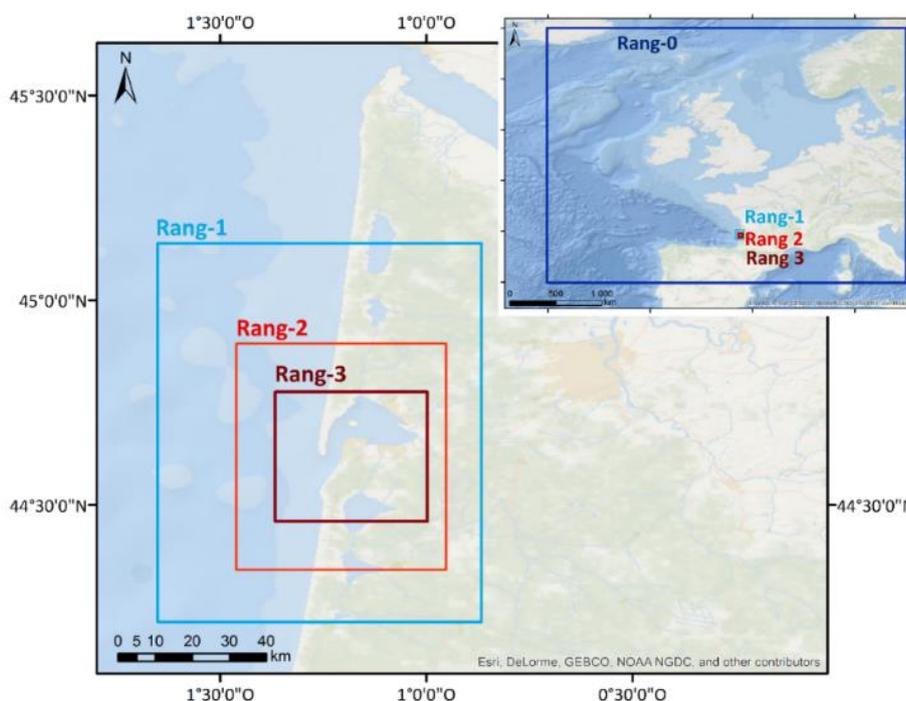


Figure 2 : Emprises spatiales des différents rangs du modèle MARS3D appliqué au Bassin d'Arcachon (Le système de coordonnées est ici le WSG84).

Pour simuler l'effet des travaux, on introduit dans le modèle un rejet d'eau chargée de sédiment en un point donné, puis on calcule le facteur de dilution au cours du temps. Dans notre cas, un débit liquide du rejet de  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a été choisi : il s'agit d'un compromis entre l'effet potentiel du rejet d'eau sur les courants locaux et les concentrations rejetées. Le rejet d'eau chargée de trois classes sédimentaires (sables moyens, sables fins et vases) est réalisé dans la couche de fond. Les simulations réalisées sont relativement schématiques dans la mesure où la dynamique sédimentaire naturelle n'est pas prise en compte. Ainsi, mis à part les sédiments rejetés au point considéré, aucun autre sédiment n'est présent dans le domaine de simulation. Les concentrations calculées correspondent donc aux seules conséquences des travaux.

Un total de six simulations a été réalisé, chacune prenant en compte un point de rejet différent (Figure 3, de A à F,) et localisé dans l'emprise de la zone de travaux. Le rejet est effectué autour de la basse mer (période des travaux), lorsque la hauteur d'eau sur le point considéré est comprise entre 0 et 1 mètre, durant 16 marées consécutives en période de vive-eau. Après la fin du rejet, la simulation est poursuivie durant 6 jours (période au bout de laquelle l'impact des travaux sur les concentrations en matières en suspension devient négligeable). Pour chaque simulation, le percentile 75 des concentrations au fond (entre 0 et 0,5 m) est calculé en chaque maille du modèle pour la durée totale de la simulation. Les valeurs obtenues sont ensuite normalisées par la valeur maximale atteinte localement, de sorte à obtenir une carte représentant l'impact potentiel défini entre 0 (pas d'impact) et 10 (impact maximum). Les résultats des six simulations (six points de rejet) sont ensuite moyennés afin d'obtenir une carte globale de l'impact des travaux (Figure 4).

## 2.2 Résultats de la modélisation et positionnement des sites suivis

D'après les résultats du modèle, l'impact des travaux serait maximal en bordure de la côte dans la partie nord et diminuerait graduellement en direction du chenal d'Arès. Au sud-ouest, l'impact des travaux serait assez faible (Figure 3).

Les trois sites de suivi du recouvrement des zostères naines ont été placés en fonction de l'emprise des herbiers dans la zone, et de l'intensité des impacts modélisés. Le site de référence correspond à la station « Hautebelle témoin » suivie annuellement dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (Auby *et al.*, 2018a). Sur ce site, aucun impact des travaux n'est mis en évidence par le modèle. Le site « Jacquets Nord » subit potentiellement un impact assez fort. Enfin, d'après les résultats du modèle, les herbiers du site « Jacquets Sud » subissent un impact modéré.

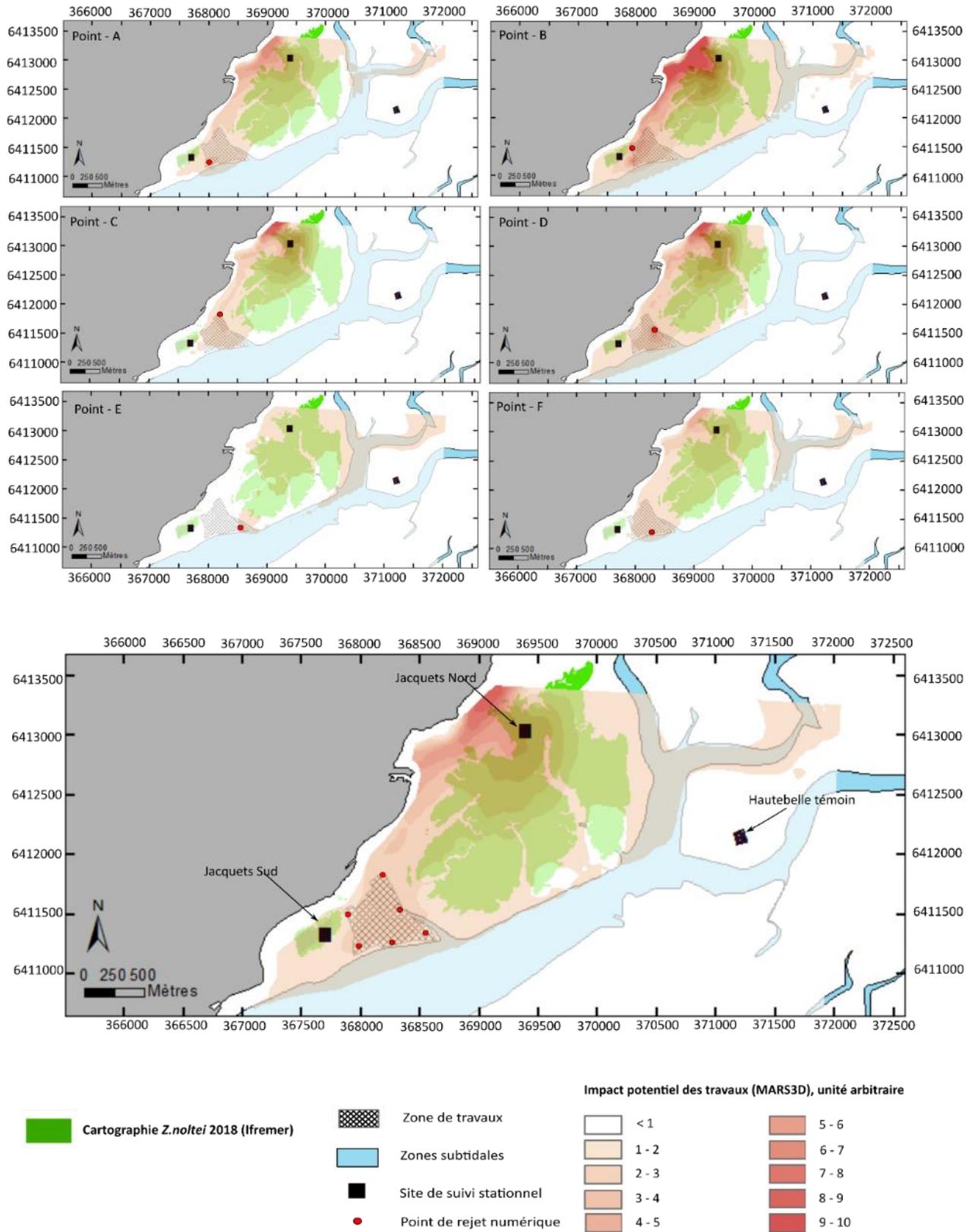


Figure 3 : Résultats des travaux de modélisation (MARS 3D) sur le secteur des Jacquets

### 3 Suivi de l’emprise des herbiers à proximité de la zone traitée

L’emprise des zostères dans la zone de travaux a été cartographiée au début de l’automne précédant les opérations (2018) et après les travaux, à l’automne 2019 et 2020.

#### 3.1 Méthodes

En **2018**, le contournage du petit herbier sud-ouest et des limites hautes de l’herbier nord-est a été réalisé par cheminement sur l’estran au moyen d’un DGPS Trimble. Les limites ont ensuite été post-traitées par correction différentielle à partir des stations de référence de l’IGN afin d’obtenir une précision de positionnement sub-métrique. Pour la partie Nord-Ouest du secteur, les limites basses de l’herbier ont été numérisées à partir de l’image aérienne acquise par le SIBA en aout 2018. Ces limites ont ensuite été traitées sous SIG (ArcMap et QGIS), permettant de générer l’enveloppe des herbiers de *Zostera noltei*.

En **2019 et 2020**, le levé GPS a été réalisé sur les mêmes zones qu’en 2018 et selon les mêmes méthodes. Certaines des limites basses d’herbier (difficiles d’accès) n’ont pas fait l’objet de levés au cours de ces deux années ; dans ce cas les limites numérisées en 2018 ont été utilisées pour réaliser les cartes d’emprise 2019 et 2020.

En **2021**, seul l’herbier situé au sud du secteur a été suivi. Pour cela un levé GPS a été réalisé sur l’emprise cet herbier ainsi qu’un survol drone lors de la même marée.

## 3.2 Résultats

### 3.2.1 Emprise des herbiers de zostères avant travaux : automne 2018

La figure 4 présente l'emprise des herbiers de la zone à l'automne 2018.

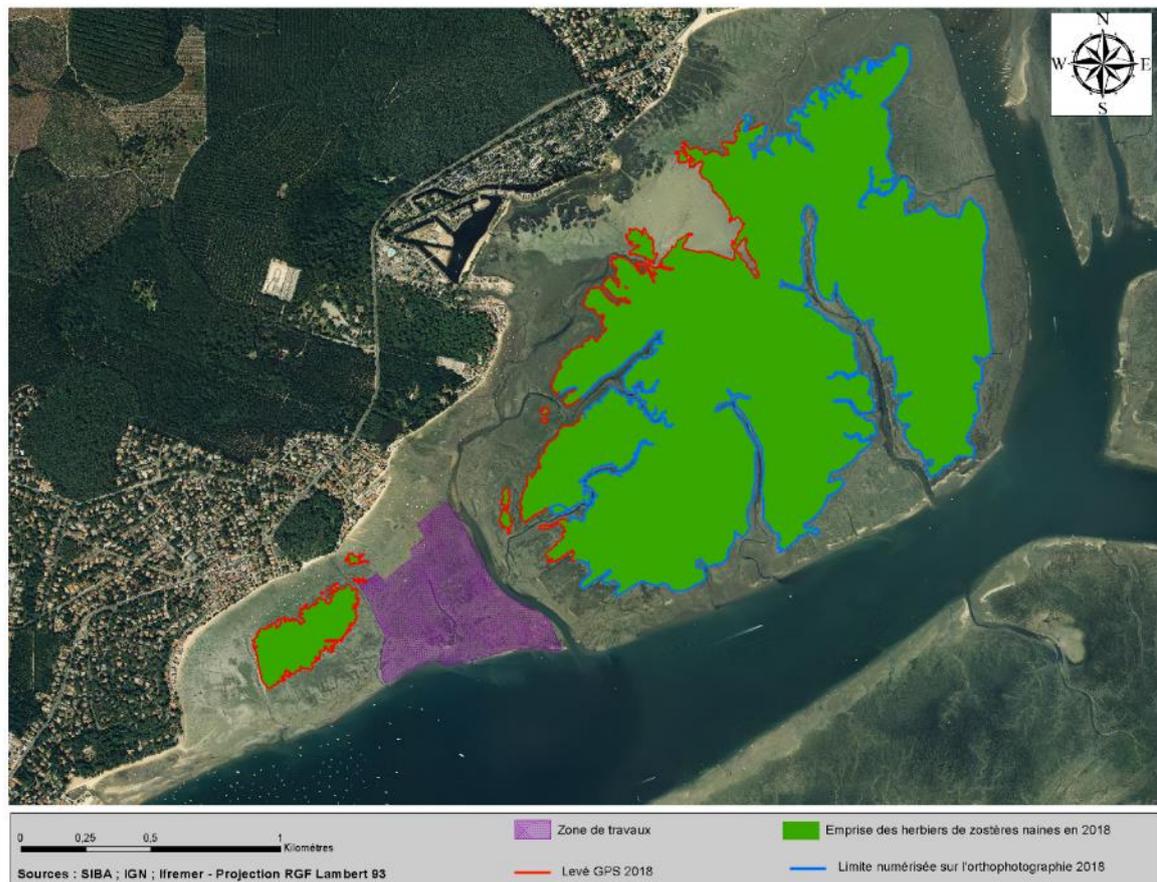


Figure 4 : Carte de l'emprise des herbiers de *Zostera noltei* à l'automne 2018.

### 3.2.2 Emprise des herbiers de zostères après travaux : automne 2019

La figure 5 présente l'emprise des herbiers de la zone à l'automne 2019.

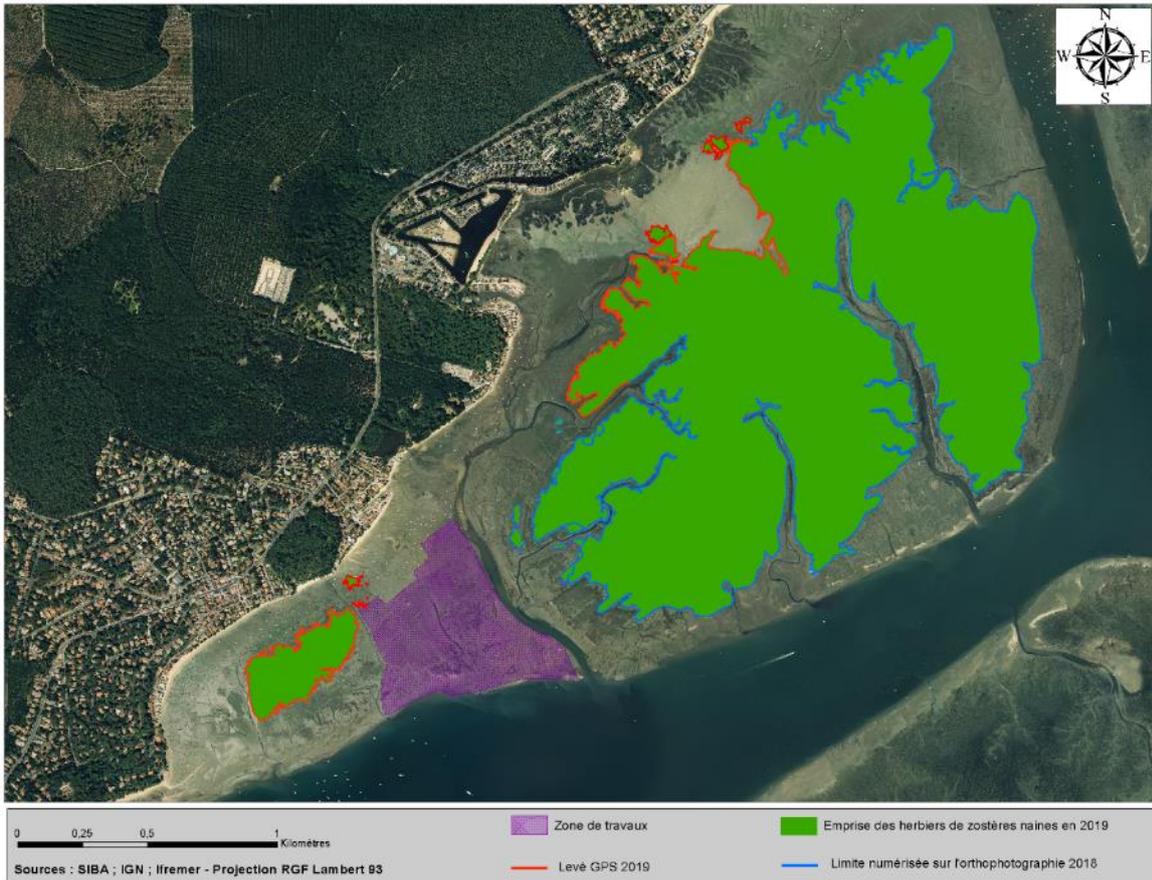


Figure 5 : Carte de l'emprise des herbiers de *Zostera noltei* à l'automne 2019.

### 3.2.4 Emprise des herbiers de zostères après travaux : automne 2020

La figure 6 présente l'emprise des herbiers de la zone à l'automne 2020.

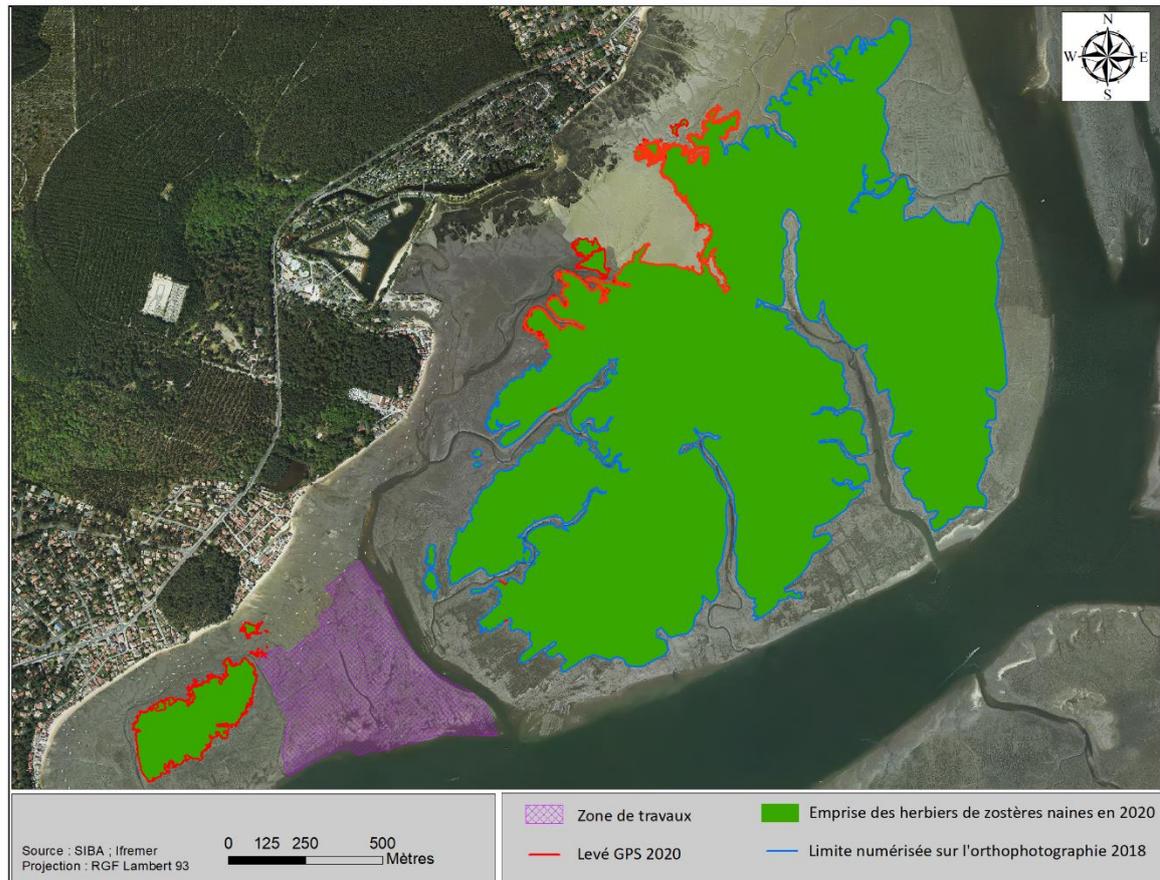


Figure 6 : Carte de l'emprise des herbiers de *Zostera noltii* à l'automne 2020.

### 3.2.5 Emprise des herbiers de zostères après travaux sur le secteur sud : été 2021

La figure 7 présente l'emprise des herbiers de la zone à l'été 2021.

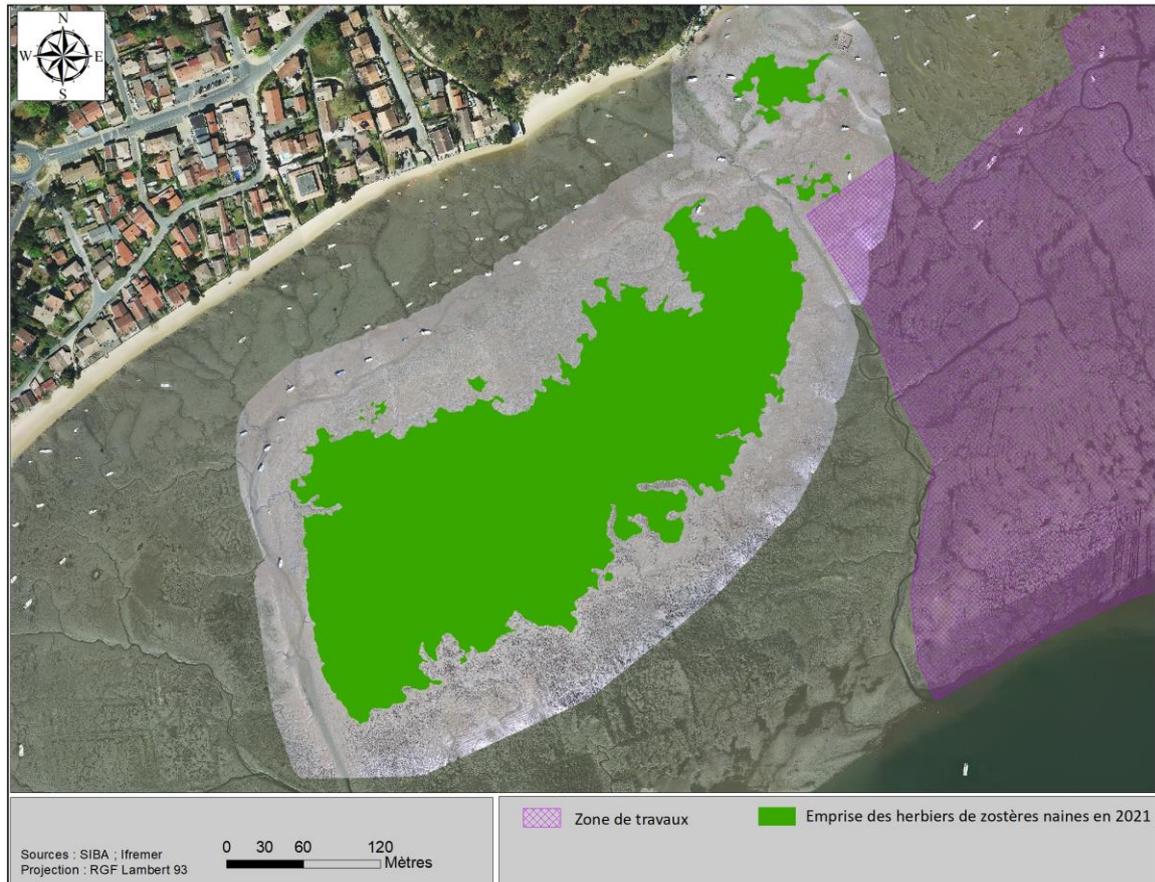


Figure 7 : Carte de l'emprise des herbiers de *Zostera noltii* à l'été 2021.

### 3.2.6 Évolution de l'emprise entre 2018 et 2019

Les figures 8 à 10 présentent l'évolution des emprises d'herbier entre 2018 et 2019 pour les limites levées sur le terrain.

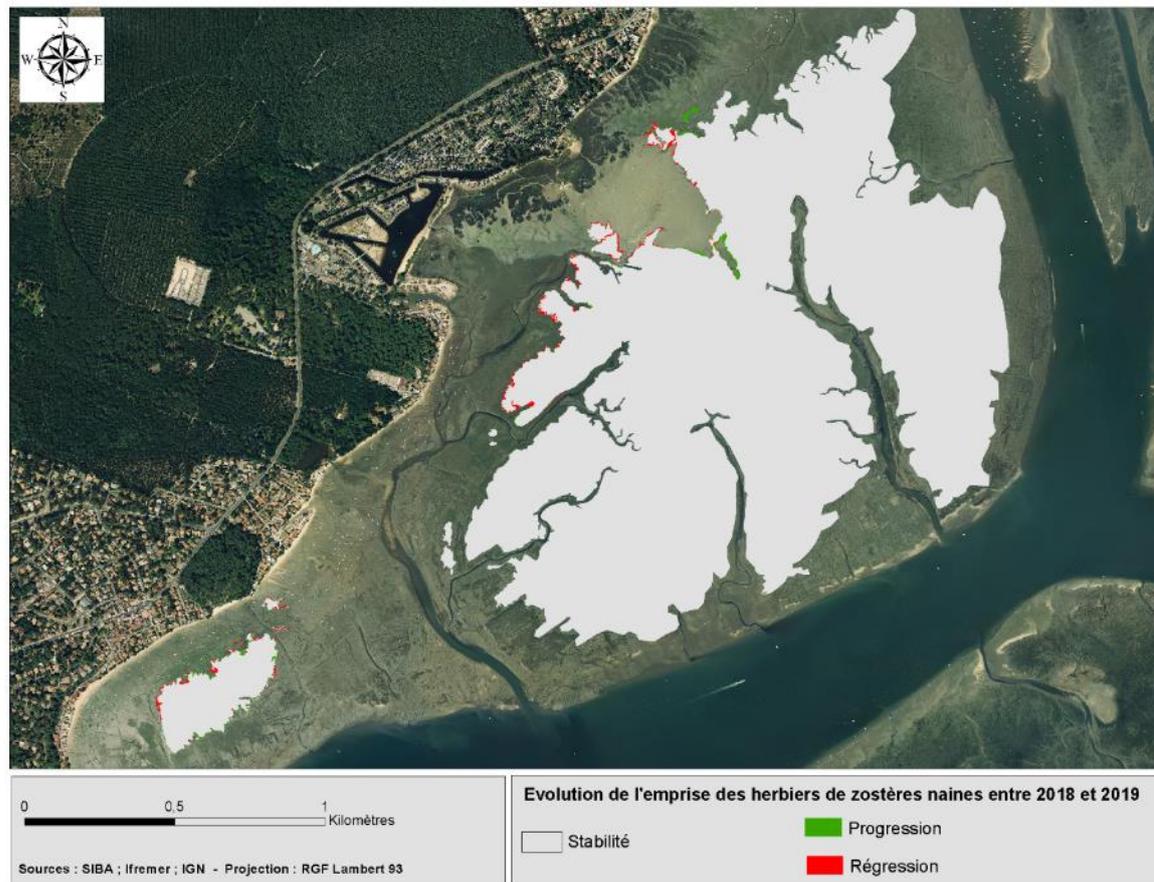


Figure 8 : Évolution de l'emprise des herbiers de *Zostera noltei* entre 2018 et 2019.

L'analyse spatiale de l'évolution de la position des limites levées en 2018 et 2019 permet de mettre en évidence une légère évolution de leur position entre les deux années.

Sur l'herbier situé au sud-ouest de la zone de travaux (Figure 9), où la totalité de l'emprise a été cartographiée en 2018 et en 2019, on observe que la position des bords d'herbier les plus côtiers a plutôt reculé (4 à 6 mètres au maximum).

Sur ce même herbier, la limite proche du chenal de Piquey est, selon les cas, restée stable ou s'est un peu étendue (environ 1 mètre en moyenne). Cette stabilité pourrait être expliquée par la présence de récifs d'huitres à proximité directe de l'herbier qui constitueraient une protection naturelle contre l'hydrodynamisme local (Cognat, 2019).

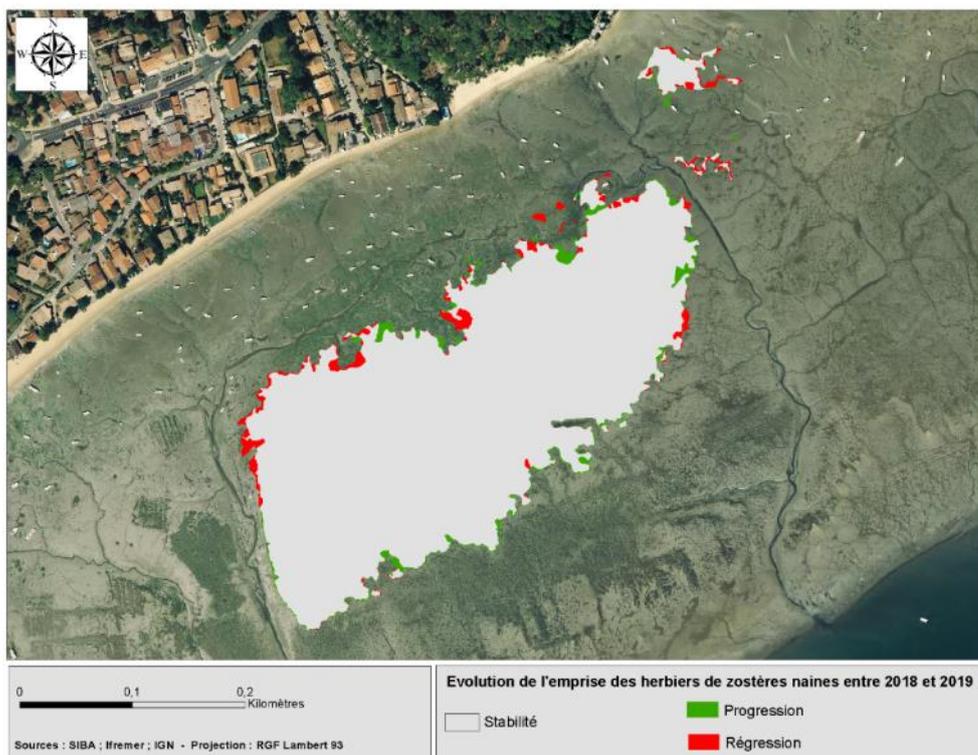


Figure 9 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au sud-ouest de la zone de travaux entre 2018 et 2019.

En ce qui concerne l'herbier situé au nord-est de la zone de travaux (Figure 10), la comparaison de la position des limites côtières levées au cours des deux années montre plutôt un recul (5 à 7 mètres au maximum).

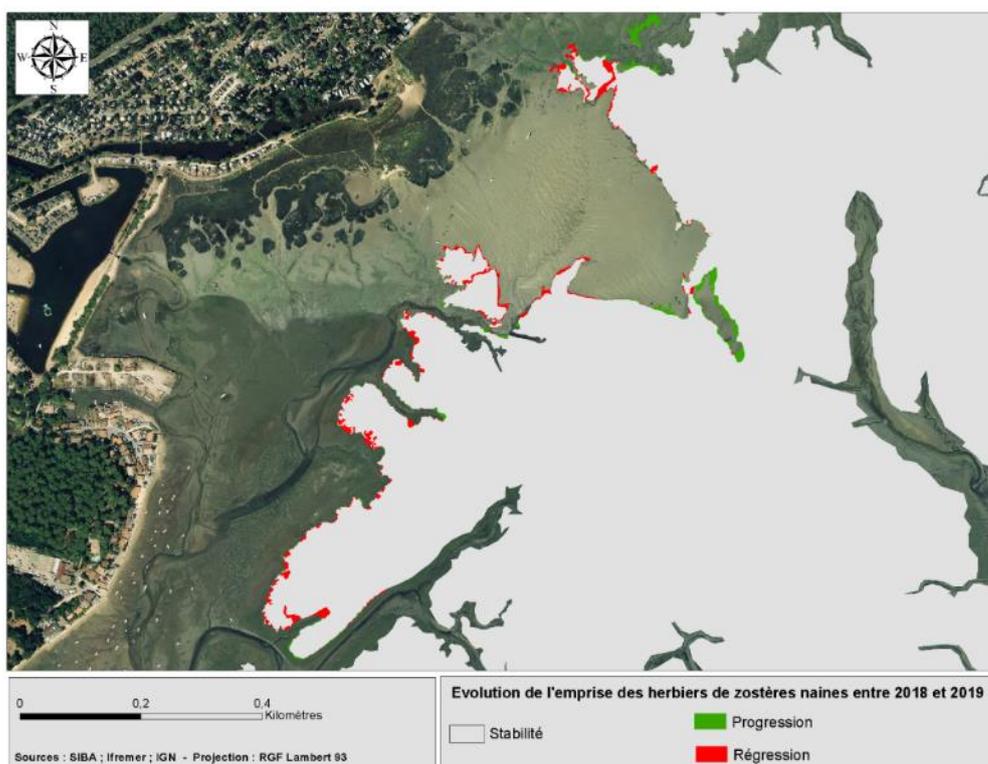


Figure 10 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au nord-est de la zone de travaux entre 2018 et 2019.

### 3.2.7 Évolution de l’emprise entre 2019 et 2020

Les figures 11 à 13 présentent l’évolution des emprises d’herbier entre 2019 et 2020 pour les limites levées sur le terrain.

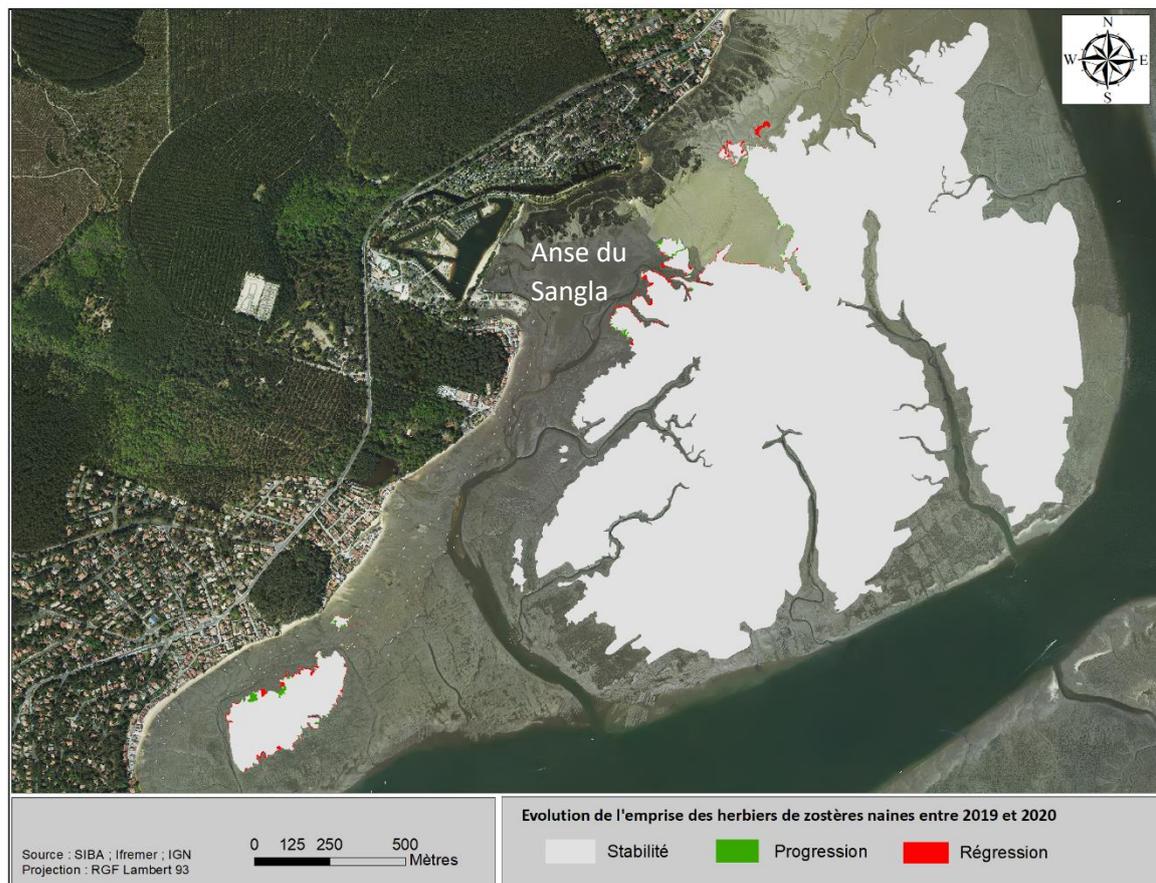


Figure 11 : Évolution de l’emprise des herbiers de *Zostera noltei* entre 2019 et 2020.

L’analyse spatiale de l’évolution de la position des limites levées en 2019 et 2020 permet de mettre en évidence une légère évolution de leur position entre les deux années.

Sur l’herbier situé au sud-ouest de la zone de travaux (Figure 12), où la totalité de l’emprise a été cartographiée en 2019 et en 2020, on observe que la position des bords d’herbier les plus côtiers a reculé par endroits et avancé à d’autres. Cette évolution apparente peut s’expliquer par la présence en abondance de macroalgues en 2020, rendant les limites de l’herbier plus difficilement détectables qu’en 2019.

Sur ce même herbier, la limite proche du chenal de Piquey est restée stable entre 2019 et 2020.

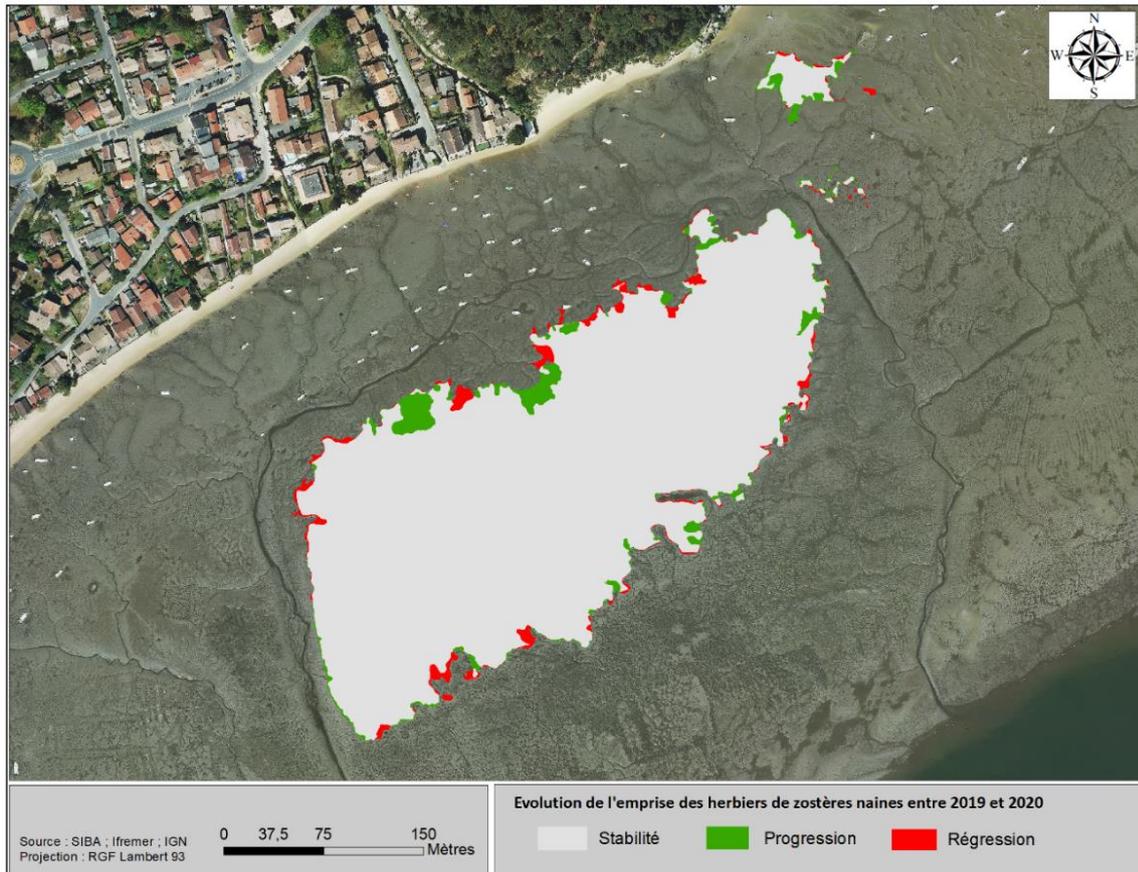


Figure 12 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au sud-ouest de la zone de travaux entre 2019 et 2020.

En ce qui concerne l'herbier situé au nord-est de la zone de travaux (Figure 13), l'évolution de la position des limites côtières levées en 2019 et 2020 montre une stabilité autour du banc de sable de l'Anse du Sangla et un recul de quelques mètres (2 à 6 mètres) sur la majorité des autres limites.

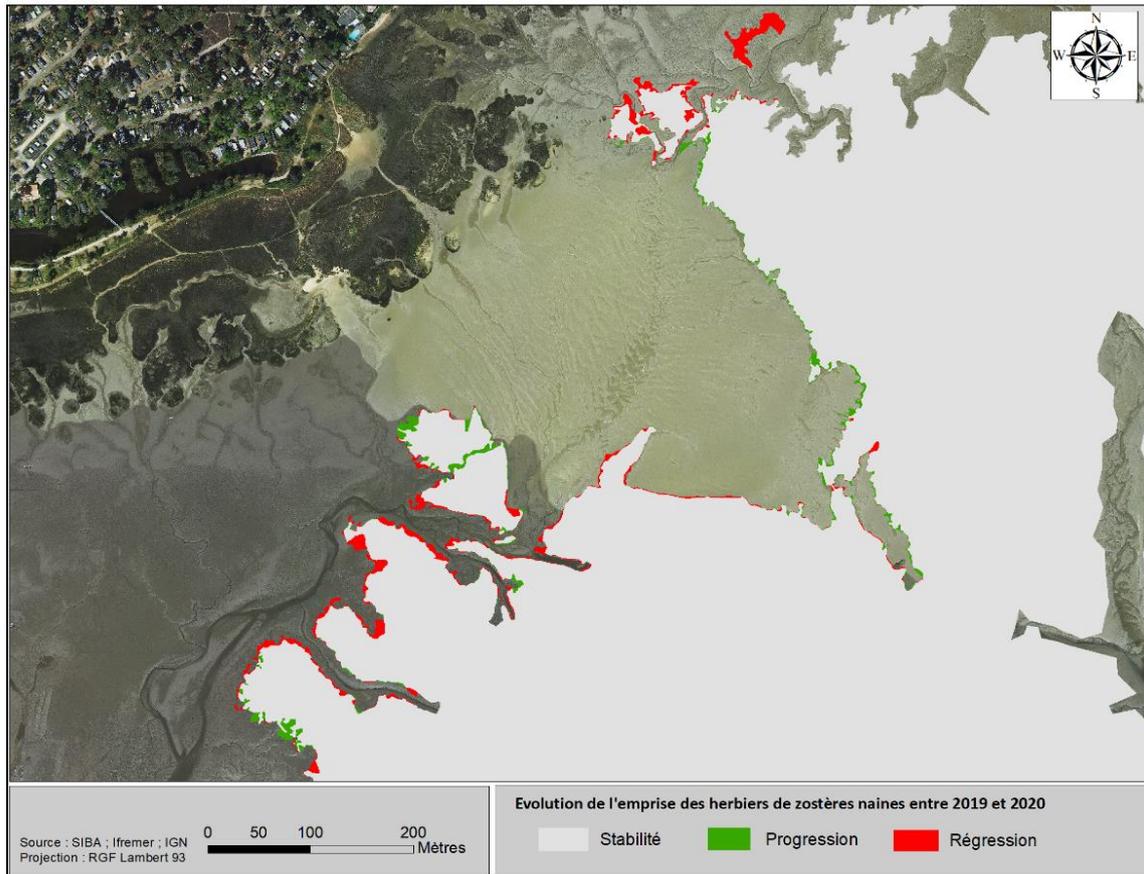


Figure 13 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au nord-est de la zone de travaux entre 2019 et 2020.

### 3.2.8 Évolution de l’emprise entre 2020 et 2021 pour la partie sud-ouest du secteur

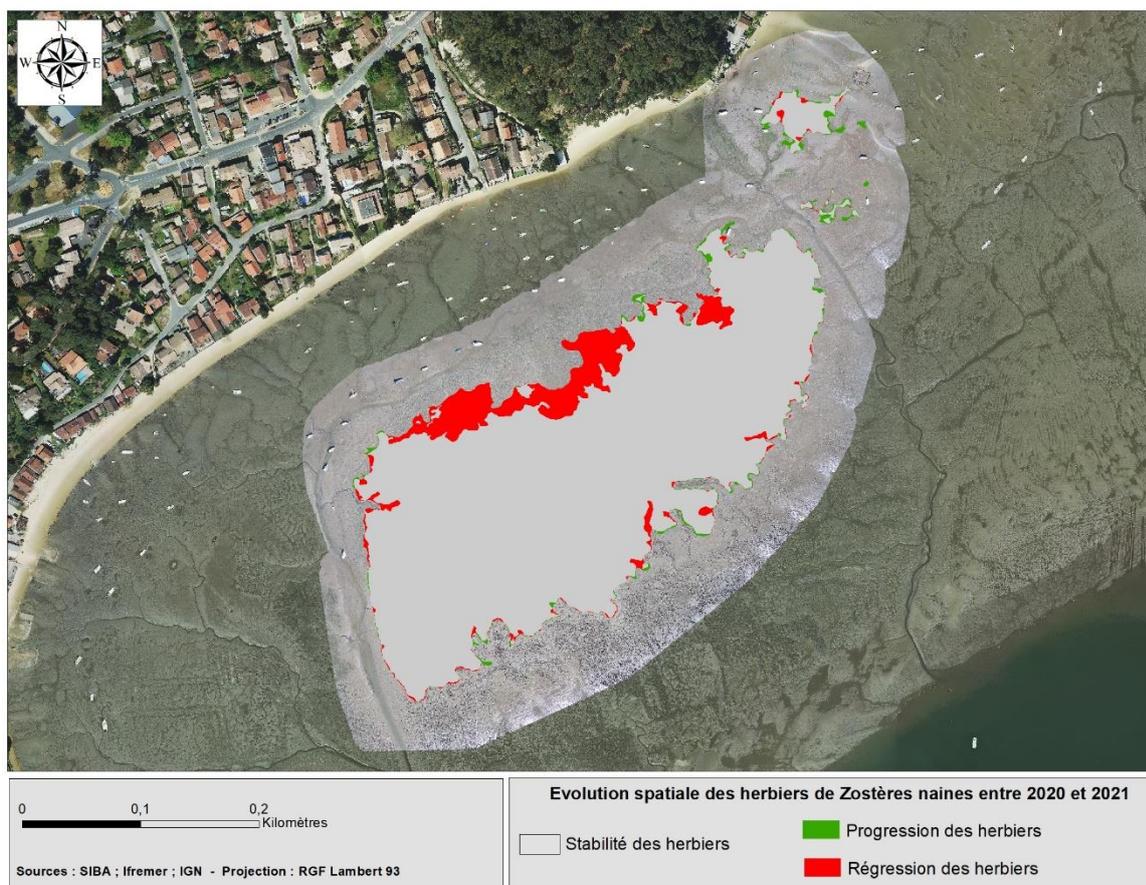


Figure 14 : Évolution de l’emprise de l’herbier de zostères situé au sud-ouest de la zone de travaux entre 2020 et 2021.

Sur l’herbier situé au sud-ouest de la zone de travaux (Figure 14), où la totalité de l’emprise a été cartographiée en 2020 et en 2021, on observe que la position des bords d’herbier les plus côtiers a reculé significativement tandis que la limite proche du chenal de Piquey est restée stable. L’emprise de cet herbier au cours des deux derniers suivis a ainsi perdu environ 7,5 % de sa surface.

### 3.2.9 Évolution de l’emprise de l’herbier entre 2018 et 2020/2021

Les figures 15 et 16 présentent l’évolution globale de l’emprise des herbiers entre 2018 et 2020.

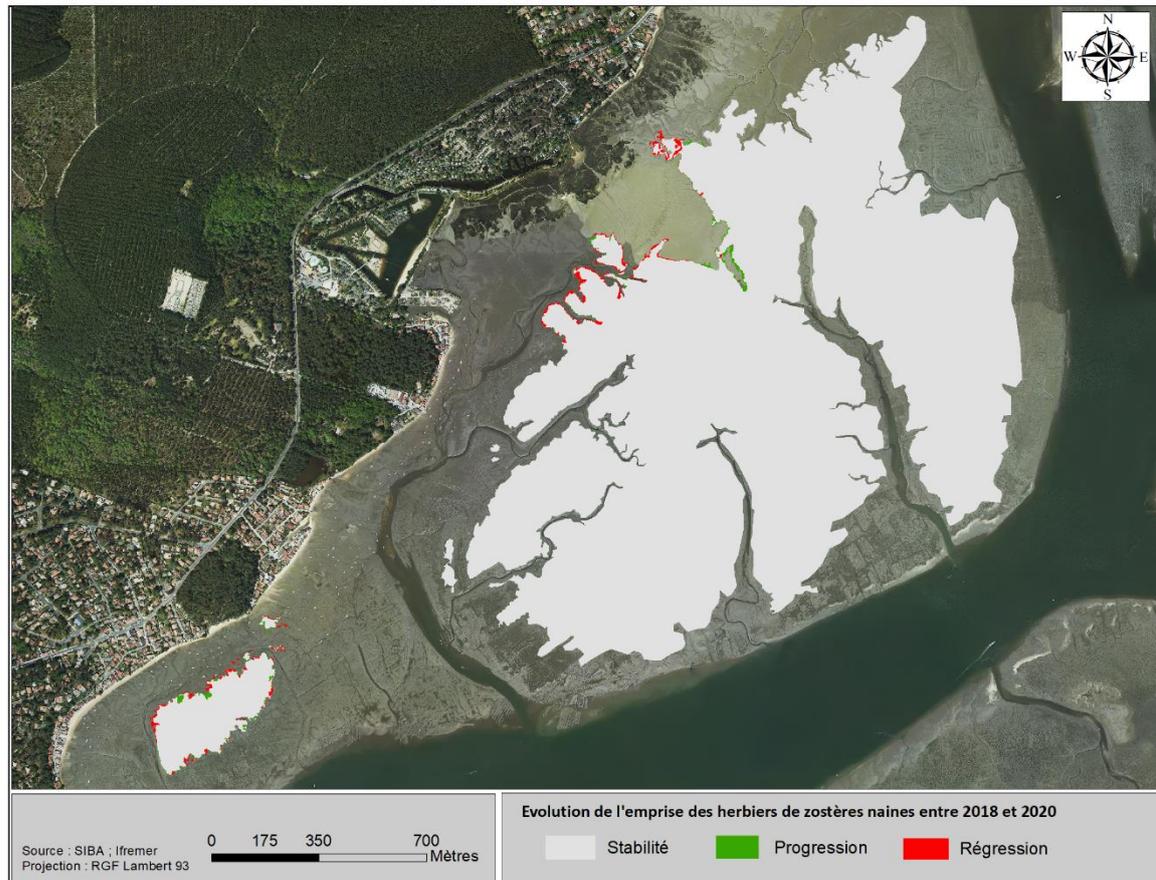


Figure 15 : Évolution de l’emprise des herbiers de *Zostera noltii* entre 2018 et 2020.

Globalement, sur la totalité du secteur prospecté, on observe entre 2018 et 2020, une **régression** de l’emprise des herbiers de **1,18 ha** (plutôt localisée dans les zones hautes) et une **progression** de **0,64 ha**, soit une **régression totale de 0,54 ha**.

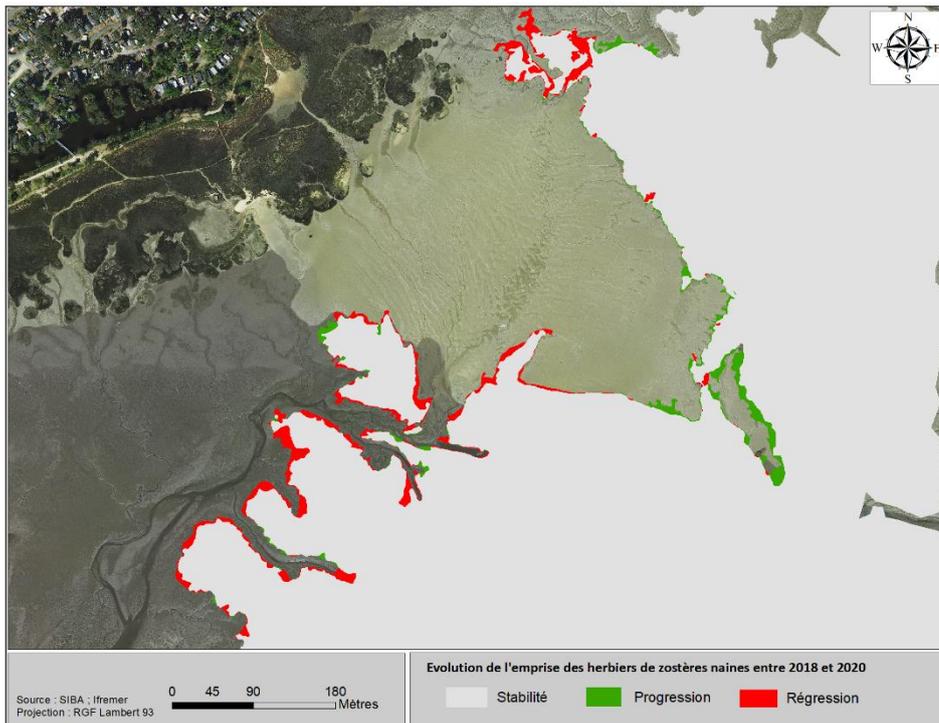


Figure 16 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au nord-est de la zone de travaux entre 2018 et 2020.

En ce qui concerne l'herbier situé au nord-est de la zone de travaux (Figure 16), l'évolution de la position des limites côtières levées en 2018 et 2020 montre une stabilité autour du banc de sable de l'Anse du Sangla, voire une progression au sud du banc de sable et un recul global de quelques mètres (de 5 à 10 mètres) sur le reste de ces limites.

La figure 17 présente l'évolution de l'emprise de l'herbier sud-ouest entre 2018 et 2021.

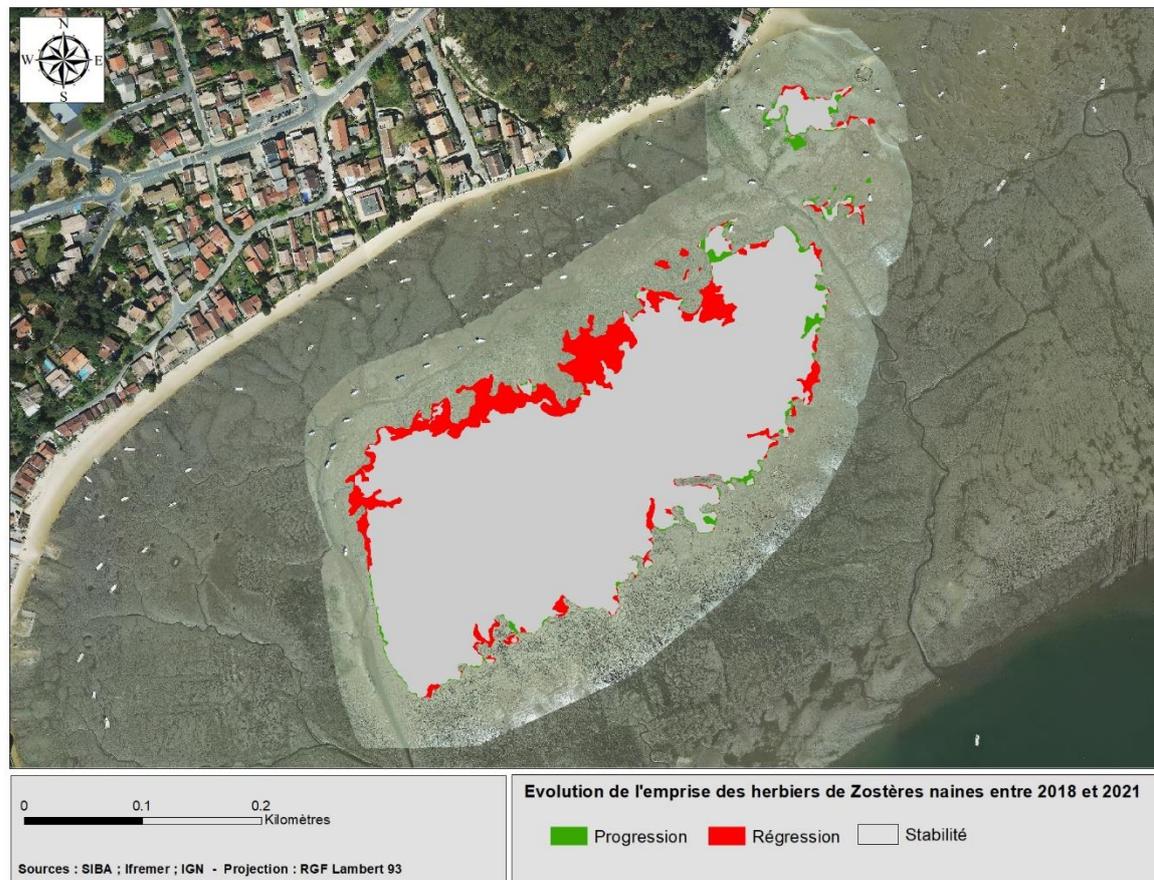


Figure 17 : Évolution de l'emprise de l'herbier de zostères situé au sud-ouest de la zone de travaux entre 2018 et 2021.

Entre 2018 et 2021 on observe que l'emprise de l'herbier situé au sud-ouest de la zone de travaux a eu tendance à diminuer avec une régression de 0,89 ha et une progression de 0.17 ha (figure 17), soit une régression de 0,72 ha correspondant à une perte de surface de 9 % en 4 ans.

L'évolution globale de cet herbier entre 2018 et 2021 se caractérise par un recul de sa limite à la côte (de 5 à 30 mètres au maximum) et par une grande stabilité de sa limite proche du chenal. Cette évolution globale confirme les tendances observées au cours des différents suivis.

## 4 Suivi du recouvrement des herbiers

Le recouvrement sur les trois sites localisés selon les critères expliqués dans le chapitre 2 (Figure 18) a été mesuré en automne 2018, pour établir des conditions initiales. Ces mesures ont été réitérées entre l'été et l'automne en 2019, 2020 et 2021 pour la grille Sud, de manière à déterminer si, et dans quelle mesure, les travaux ont eu un impact sur l'abondance des herbiers environnants. Grâce à l'intégration d'une station de référence, *a priori* non impactée par ces travaux, la variabilité interannuelle « naturelle » est prise en compte dans l'interprétation des résultats obtenus.

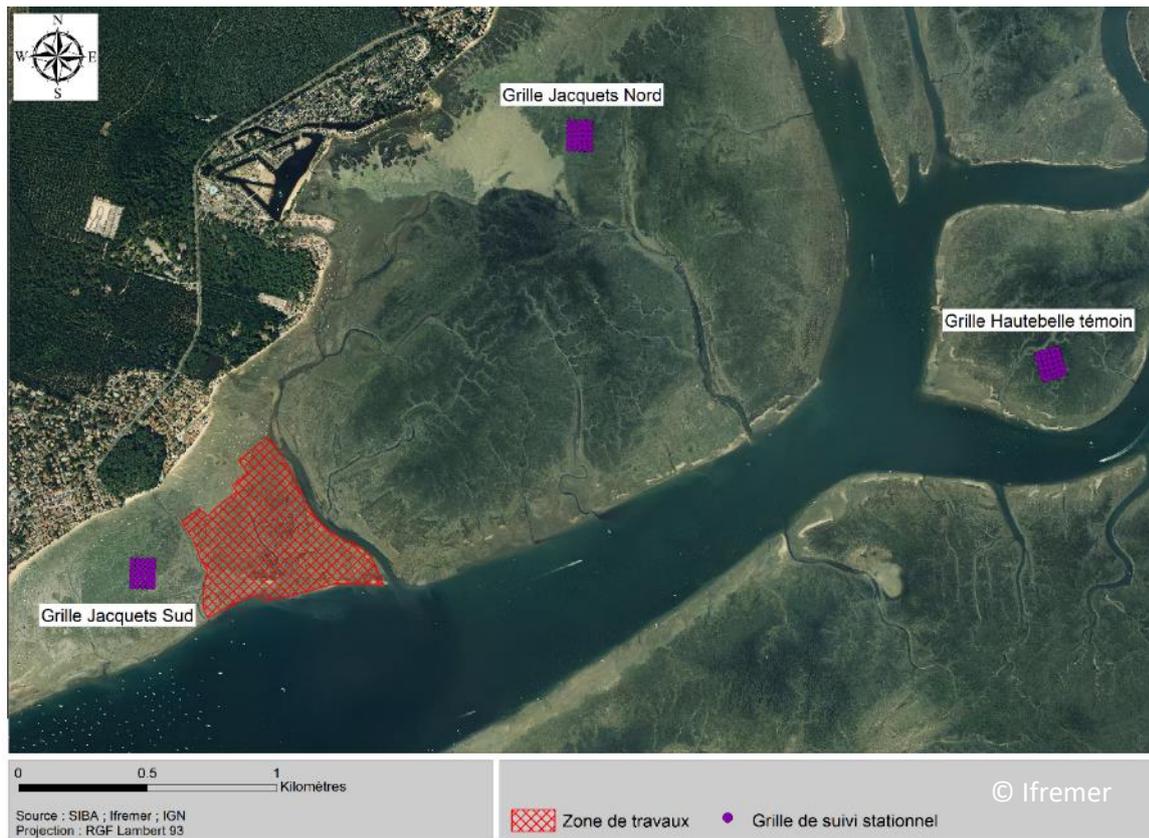


Figure 18 : Carte de positionnement des grilles de suivi stationnel dans le secteur des Jacquets

### 4.1 Méthodes

Dans le cadre de cette étude, le protocole DCE de suivi stationnel des herbiers intertidaux a été appliqué (Auby *et al.*, 2018b). Pour chacun des sites, ce protocole se base sur une estimation du taux de recouvrement par les feuilles de *Zostera noltei* sur une grille constituée de 30 points géoréférencés. Sur chacun des 30 points, un quadrat de 0,25 m<sup>2</sup> est posé et l'estimation visuelle du taux de recouvrement à l'intérieur du quadrat est réalisée en utilisant une échelle constituée de 5 classes (0, 1-25, 26-50, 51-75, 76-99, et 100 %). Par ailleurs, ces quadrats sont photographiés et l'analyse numérique de ces images (logiciel ImageJ) permet de valider ou de corriger les valeurs issues de l'estimation visuelle.

Ces données servent à calculer plusieurs indices (taux de recouvrement moyen, pourcentage de surface colonisée par les zostères) qui permettent de caractériser l'état des herbiers à l'intérieur de leur emprise.

## 4.2 Résultats

Ces résultats présentent les observations recueillies en 2018, 2019, 2020 et 2021.

### 4.2.1 Grille témoin (Hautebelle)

D'après les résultats du modèle hydro-sédimentaire, la grille de suivi se situe en dehors de l'influence des travaux de nettoyage (Figure 3).

En **2018**, le suivi stationnel s'est déroulé le 30 août par un coefficient de marée de 81. Très peu de macroalgues étaient observées sur cet herbier comme en témoigne la photo ci-dessous (Figure 19a).

En **2019**, le suivi stationnel s'est déroulé le 5 août par un coefficient de marée de 91. Contrairement à l'année précédente, ces herbiers étaient colonisés par des macroalgues vertes filamenteuses relativement abondantes (Figure 19b).

En **2020**, le suivi stationnel s'est déroulé le 4 août par un coefficient de marée de 84. Comme en 2019, ces herbiers étaient colonisés par des macroalgues vertes filamenteuses abondantes (Figure 19c).

En **2021**, le suivi stationnel s'est déroulé le 9 août. Comme en 2019 et 2020, ces herbiers étaient colonisés par des macroalgues vertes filamenteuses abondantes (Figure 19d).

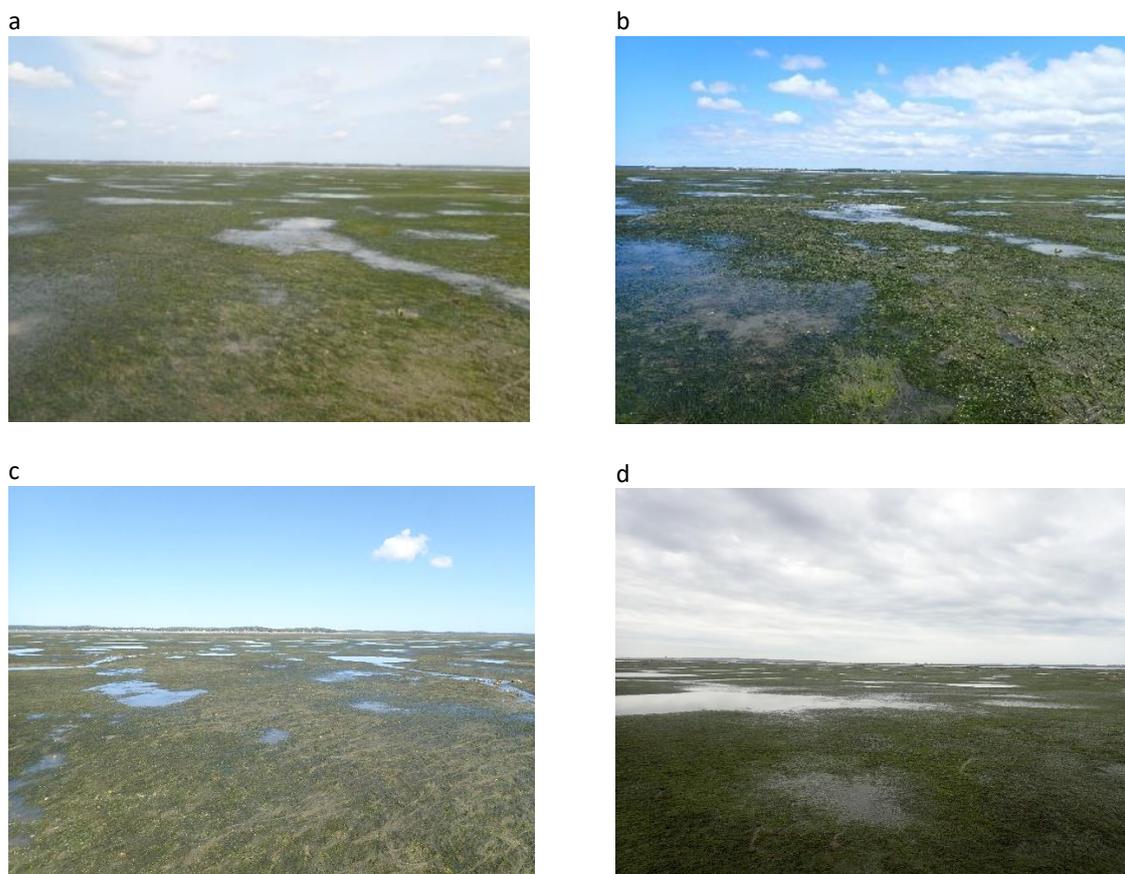


Figure 19 : Vue générale de la station de référence « Hautebelle », (a) en 2018, (b) en 2019, (c) en 2020 et (d) en 2021.

En **2018**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 29 points de la grille (Figure 20a). Le quadrat E5 étant localisé dans une flaque profonde dépourvue de zostères, il n'est pas pris en compte dans les calculs conformément au protocole DCE. Comme cela apparaît sur la figure 20a, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). La majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %) et le recouvrement moyen sur cette grille est estimé à 84 %.

En **2019**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur les 30 points de la grille. Tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée) (Figure 20b). Comme en 2018, la majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %) et le recouvrement moyen sur cette grille est estimé à 86 %.

En **2020**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 29 points de la grille (Figure 20c). Le quadrat C6 étant localisé dans un estey dépourvu de zostères, il n'est pas pris en compte dans les calculs conformément au protocole DCE. Comme cela apparaît sur la figure 18c, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). En 2020, même si la majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %), le recouvrement moyen sur cette grille a diminué et est estimé à 76 %.

En **2021**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 29 points de la grille (Figure 20d). Le quadrat C3 étant localisé dans un estey dépourvu de zostères, il n'est pas pris en compte dans les calculs conformément au protocole DCE. Comme cela apparaît sur la figure 20d, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). En 2021, la majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %), le recouvrement moyen sur cette grille a augmenté et est estimé à 88 %.

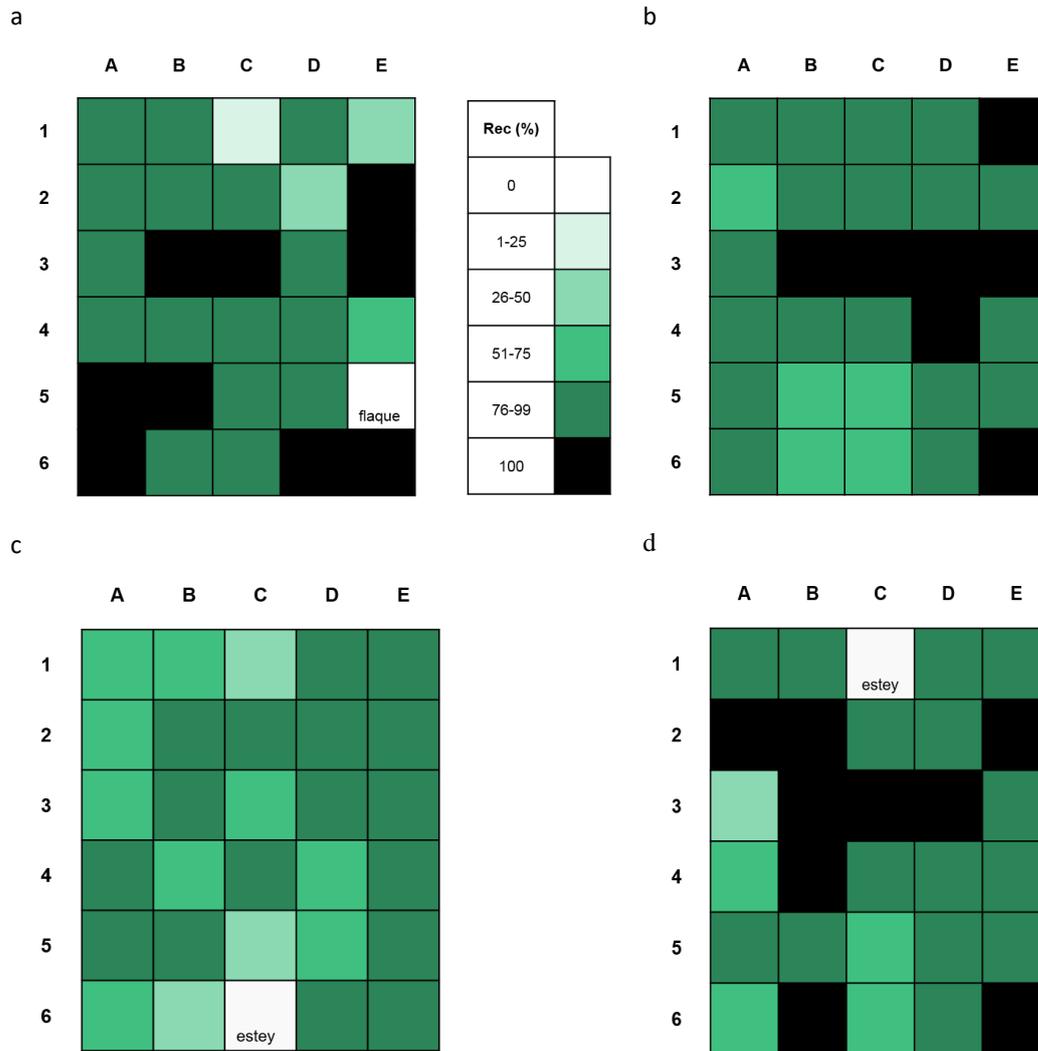


Figure 20 : Taux de recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Hautebelle », (a) en 2018, (b) en 2019, (c) en 2020 et (d) en 2021.

La distribution des recouvrements en fonction des six classes est sensiblement équivalente au cours des deux premières années de suivi, avec une forte majorité de quadrats présentant des recouvrements supérieurs à 75 %. En 2020, les recouvrements restent globalement élevés mais aucun des 30 quadrats ne présente de taux de recouvrement égal à 100 %. En 2021, la distribution des recouvrements redevient similaire à celle des deux premières années de suivi (Figure 21).

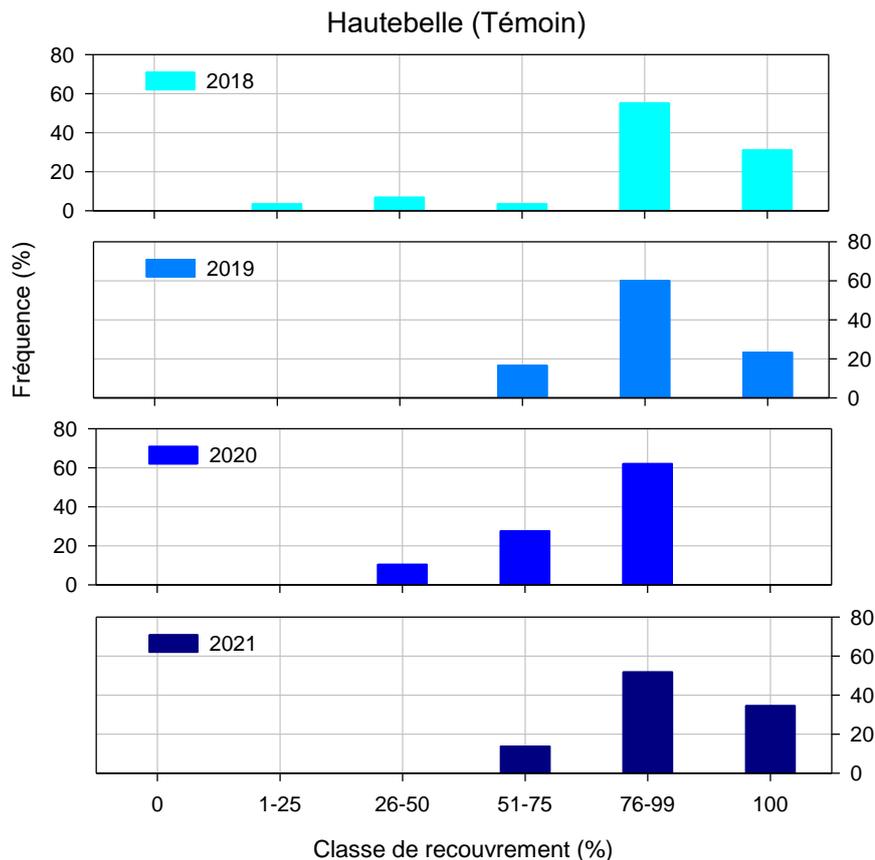


Figure 21 : Distribution du recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Hautebelle » en 2018, 2019, 2020 et 2021.

#### 4.2.2 Grille Jacquets Nord

La grille de suivi se situe à environ 2 kilomètres de la zone nettoyée (Figure 9). D'après les résultats du modèle hydro-sédimentaire, elle est localisée dans la zone potentiellement la plus impactée (Figure 3).

En **2018**, le suivi stationnel s'est déroulé le 24 octobre par un coefficient de marée de 91. Très peu de macroalgues ont été observées sur cet herbier comme en témoigne la photo ci-dessous (Figure 22a).

En **2019**, le suivi stationnel s'est déroulé le 31 juillet par un coefficient de marée de 86. À cette date, à l'inverse de 2018, ces herbiers étaient très fortement colonisés par des macroalgues vertes filamenteuses, comme en témoigne la photo ci-dessous (Figure 22b).

En **2020**, le suivi stationnel s'est déroulé le 01 septembre par un coefficient de marée de 81. À cette date l'herbier était, comme en 2019, colonisé par des macroalgues vertes filamenteuses mais de façon moins marquée, comme en témoigne la photo ci-dessous (Figure 22c).

En **2021**, cette station n'a pas fait l'objet de suivi.

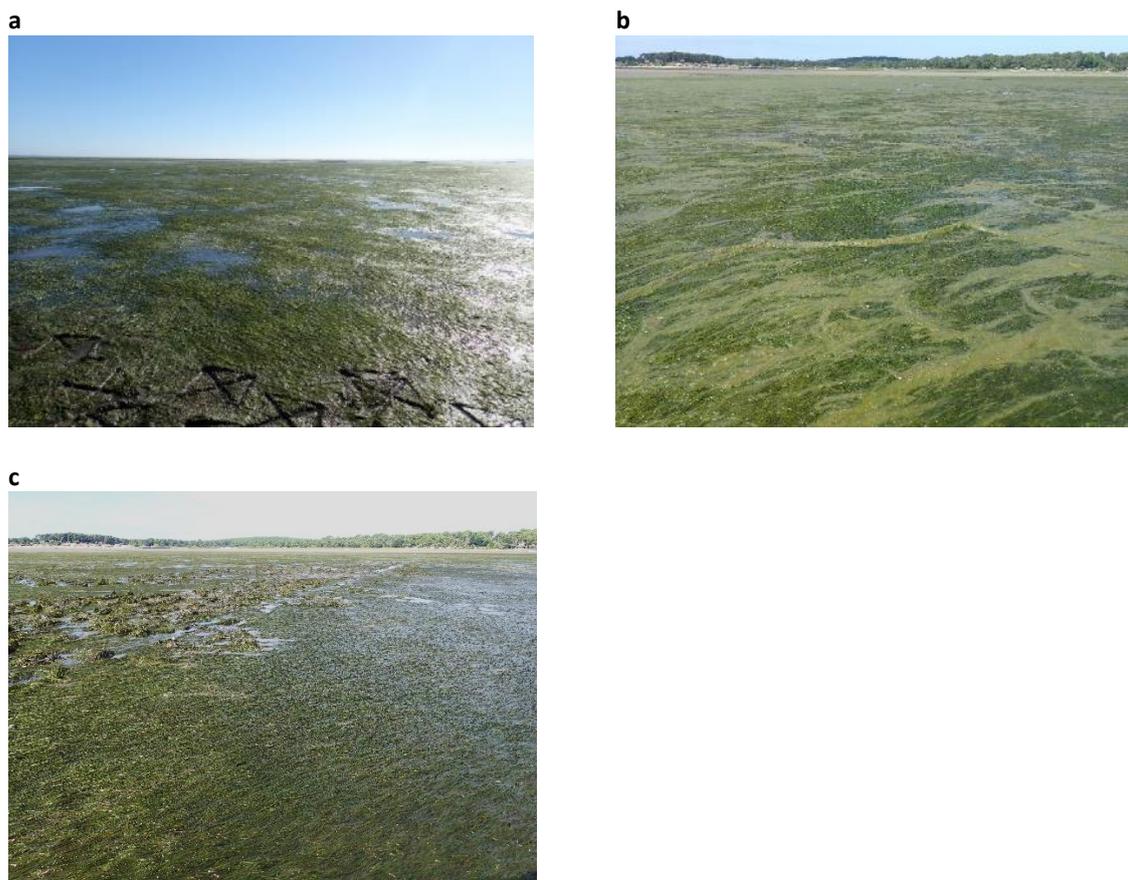


Figure 22 : Vue générale de la station de référence « Jacquets Nord », (a) en 2018, (b) en 2019 et (c) en 2020.

En **2018**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 30 points de la grille. Comme cela apparaît sur la figure 23a, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). La majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 50 %) et le recouvrement moyen sur cette grille est estimé à 75 %.

En **2019**, l'estimation du taux de recouvrement a également pu être réalisée sur 30 points de la grille. Comme cela apparaît sur la figure 23b, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). La majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %) et le recouvrement moyen sur cette grille a augmenté entre 2018 et 2019, atteignant 86 % à la seconde date.

En **2020**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 30 points de la grille. Comme cela apparaît sur la figure 23c, tous les points examinés présentent des zostères (100 % de la surface de la grille colonisée). La majorité des points présentent un fort taux de recouvrement (> 75 %) et le recouvrement moyen sur cette grille est estimé à 84 %.

On peut aussi remarquer que les quadrats des colonnes C, D et E (cœur d'herbier) de la grille de suivi ont vu les taux de recouvrement augmenter par rapport aux deux premières années de suivi alors qu'ils ont diminué dans les quadrats de la colonne A, proche du banc de sable de l'Anse du Sangla. Cette diminution locale peut s'expliquer par l'effet d'une forte perturbation anthropique, une grande partie de ce bord d'herbier ayant été retourné par des pêcheurs de palourdes en 2020 (partie gauche de la photographie de la figure 22c).

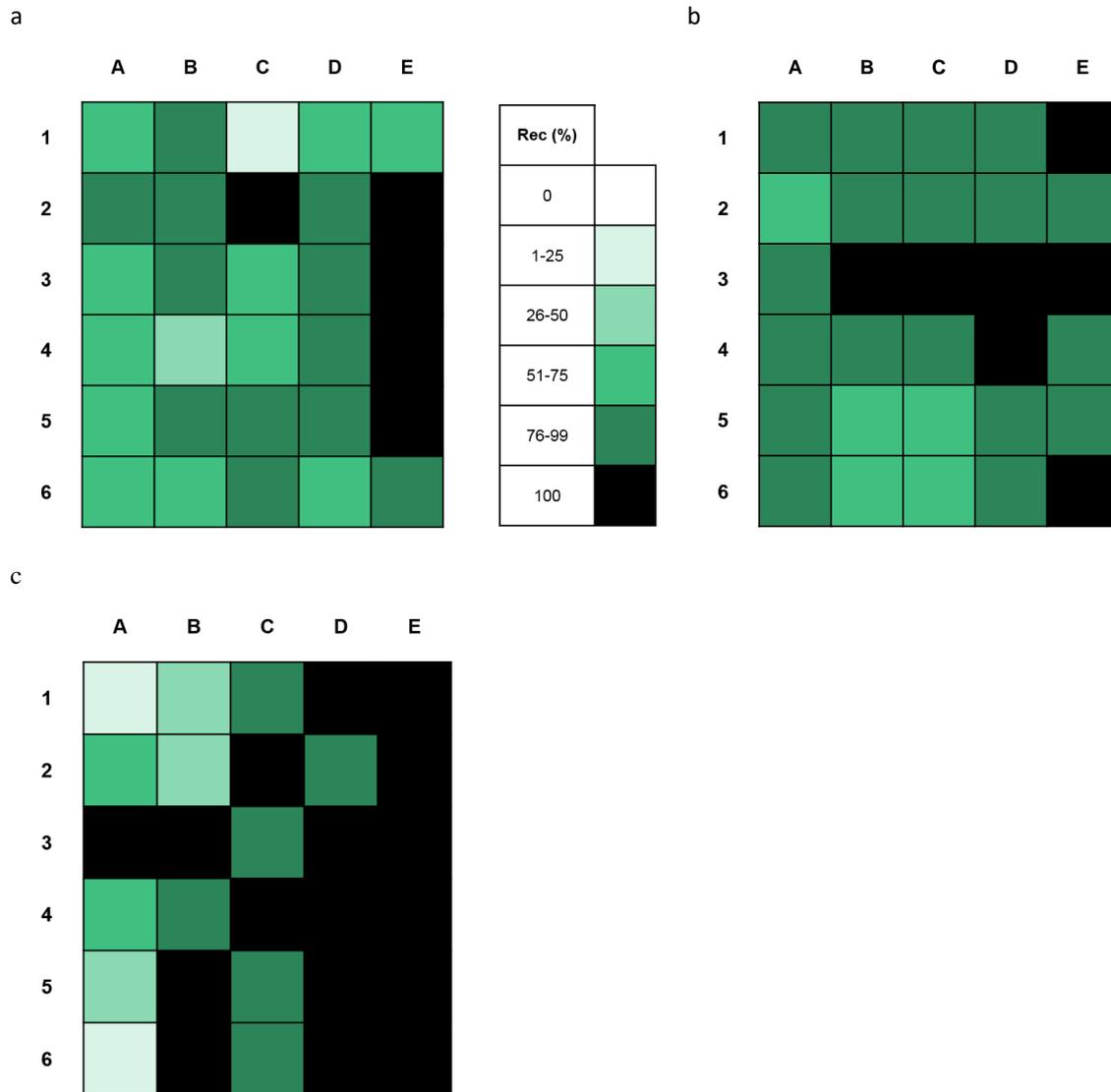


Figure 23 : Taux de recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Jacquets Nord », (a) en 2018, (b) en 2019 et (c) en 2020.

La distribution des recouvrements en fonction des six classes s'est déplacée vers les fortes valeurs entre les deux premières années, indiquant une augmentation des taux de recouvrements entre 2018 et 2019 (Figure 24). Entre 2019 et 2020, on observe à la fois une augmentation de la représentation des faibles classes (explicable par la dégradation d'origine anthropique de la zone correspondant à la colonne A) et de la plus forte classe (amélioration du couvert végétal dans les zones d'herbier ne subissant pas cet impact).

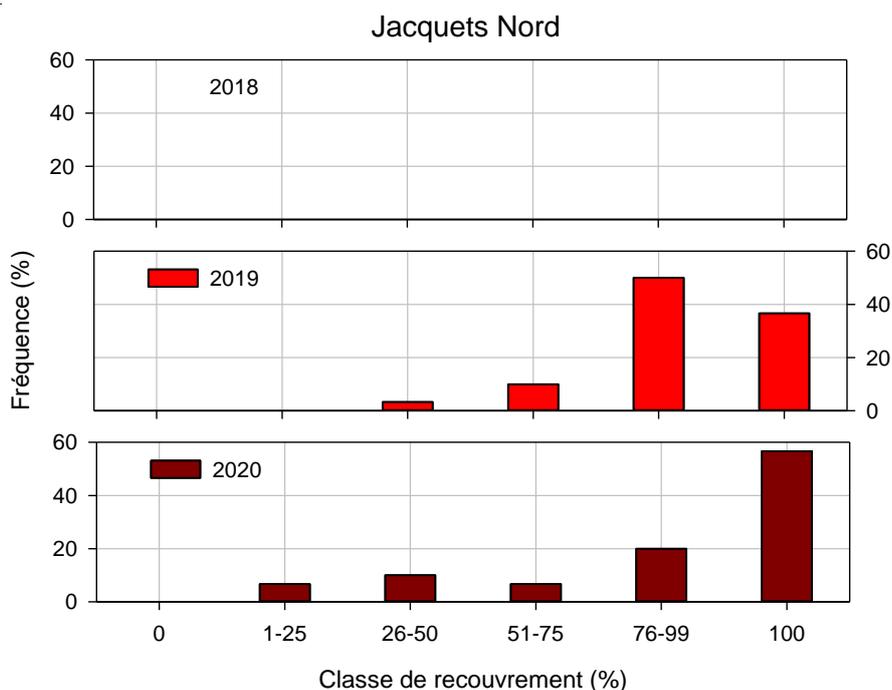


Figure 24 : Taux de recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Jacquets Nord » en 2018, 2019 et 2020.

#### 4.2.3 Grille Jacquets Sud

La grille de suivi se situe à proximité de la zone de travaux (Figure 9), mais dans un secteur potentiellement moins impacté que le précédent d'après les résultats de la modélisation (Figure 3).

En **2018**, le suivi stationnel s'est déroulé le 09 octobre par un coefficient de marée de 107. La présence de macroalgues vertes (entéromorphes) a été observée sur cet herbier comme en témoignent les tâches vert clair sur la photo ci-dessous (Figure 25a).

En **2019**, le suivi stationnel s'est déroulé le 31 juillet par un coefficient de marée de 86. À cette période, les macroalgues étaient rares sur l'herbier, mais les feuilles de zostères étaient épiphytées et couvertes de sédiment fin (Figure 25b).

En **2020**, le suivi stationnel s'est déroulé le 06 août par un coefficient de marée de 81. À cette période, les macroalgues étaient abondantes sur l'herbier (Figure 25c).

En **2021**, le suivi stationnel s'est déroulé le 22 septembre. À cette période, les macroalgues étaient abondantes sur l'herbier (Figure 25d).

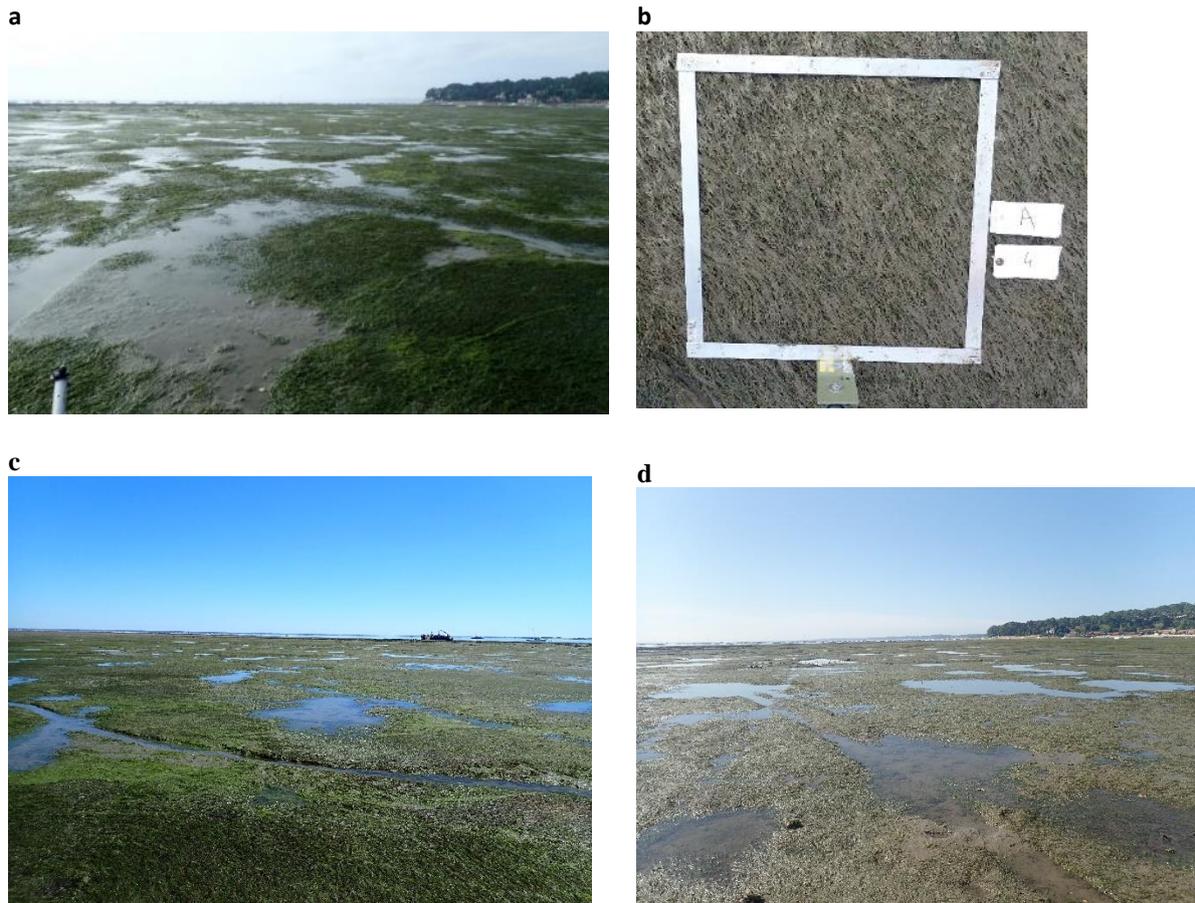


Figure 25 : (a) Vue générale de la station « Jacquets Sud » en 2018, (b) photo d'un cadrat en 2019, (c) vue générale de la station « Jacquets Sud » en 2020 et (d) en 2021.

En **2018**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 29 points de la grille. Le point C5 se trouvant dans un estey, il n'a pas été pris en compte dans les calculs conformément au protocole DCE. Contrairement aux deux autres herbiers, le pourcentage de surface colonisée par les zostères n'est pas ici de 100 %, mais s'en approche, avec 97 % ; de plus les taux de recouvrement y sont plus faibles, avec moins de la moitié des points présentant un recouvrement supérieur à 75 % et un recouvrement moyen s'élevant à 60 % (Figure 26a).

En **2019**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur les 30 points de la grille. Comme en 2018, le pourcentage de surface colonisée par les zostères n'est pas ici de 100 %, mais s'en approche, avec 97 %. Un peu plus de la moitié des points présentent un recouvrement supérieur à 75 % et le recouvrement moyen s'est élevé par rapport à 2018, atteignant 70 % (Figure 26b).

En **2020**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur les 30 points de la grille. Comme en 2018 et 2019, le pourcentage de surface colonisée par les zostères n'est pas ici de 100 %, mais de 93 %. Un tiers des points présentent un recouvrement supérieur à 75 % et le recouvrement moyen a diminué par rapport à 2018 et 2019, et s'élève à 55 % (Figure 26c).

En **2021**, l'estimation du taux de recouvrement a pu être réalisée sur 26 des 30 points de la grille car 3 points sont en dehors de l'herbier et donc non pris en compte dans les calculs suivants (cf.

protocole national DCE). Plus d'un tiers des points présentent un recouvrement inférieur à 50 % et le recouvrement moyen est le plus faible jamais calculé pour cette grille, s'élevant à 50 % (Figure 26d).

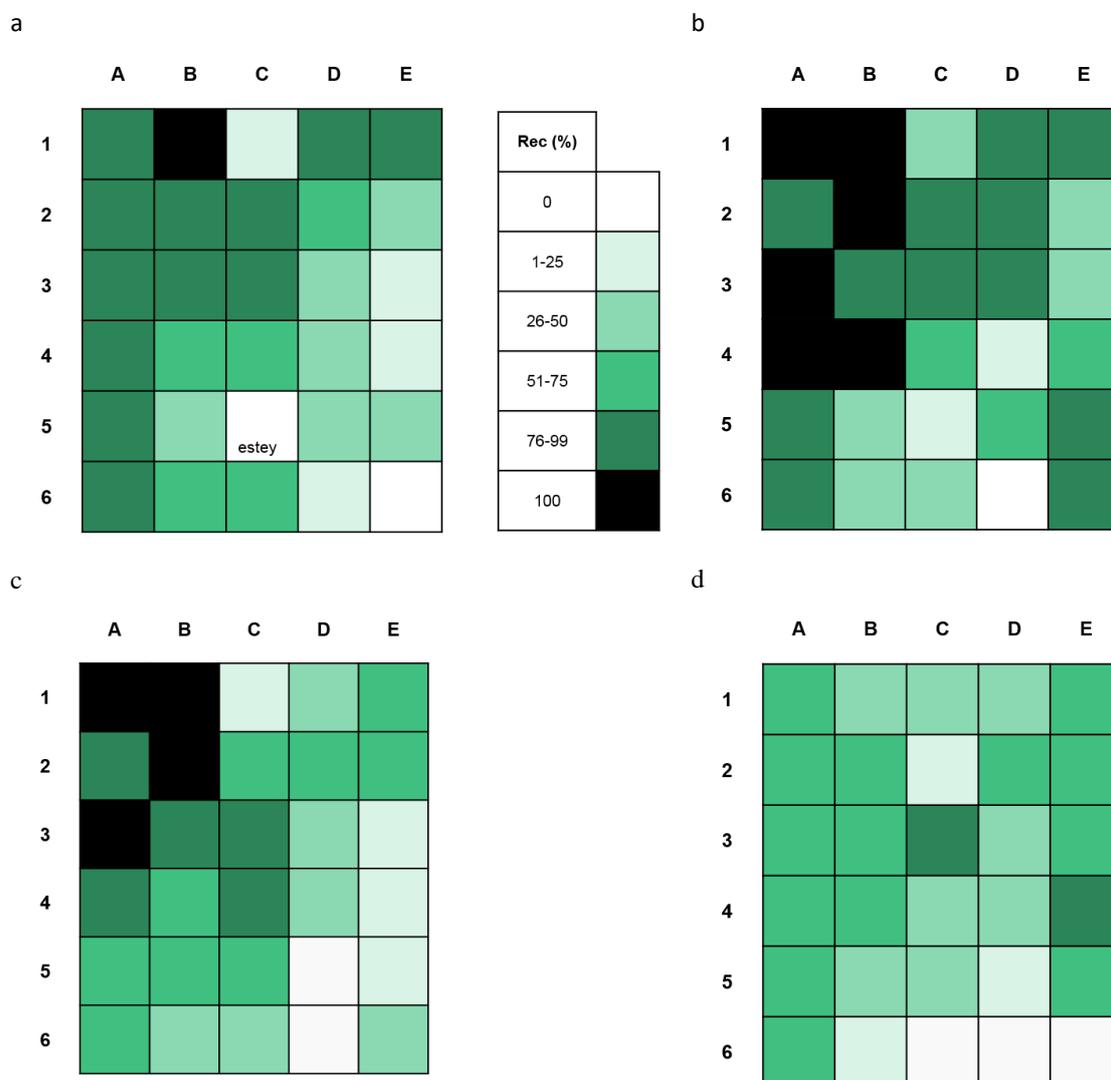


Figure 26 : Taux de recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Jacquets Sud », (a) en 2018, (b) en 2019, (c) en 2020 et (d) en 2021.

La distribution des recouvrements en fonction des six classes est sensiblement équivalente en 2018 et 2019, avec une majorité de quadrats présentant un assez fort recouvrement (76-99 %) mais la classe de plus fort recouvrement est mieux représentée lors de la seconde année (Figure 27). En 2020, la distribution s'est fortement modifiée, avec une majorité de quadrats présentant un recouvrement moyen (26 – 75 %). En 2021, la distribution s'est encore décalée vers les faibles recouvrements, avec une quasi disparition de la représentation des classes de recouvrement supérieur à 75 %.

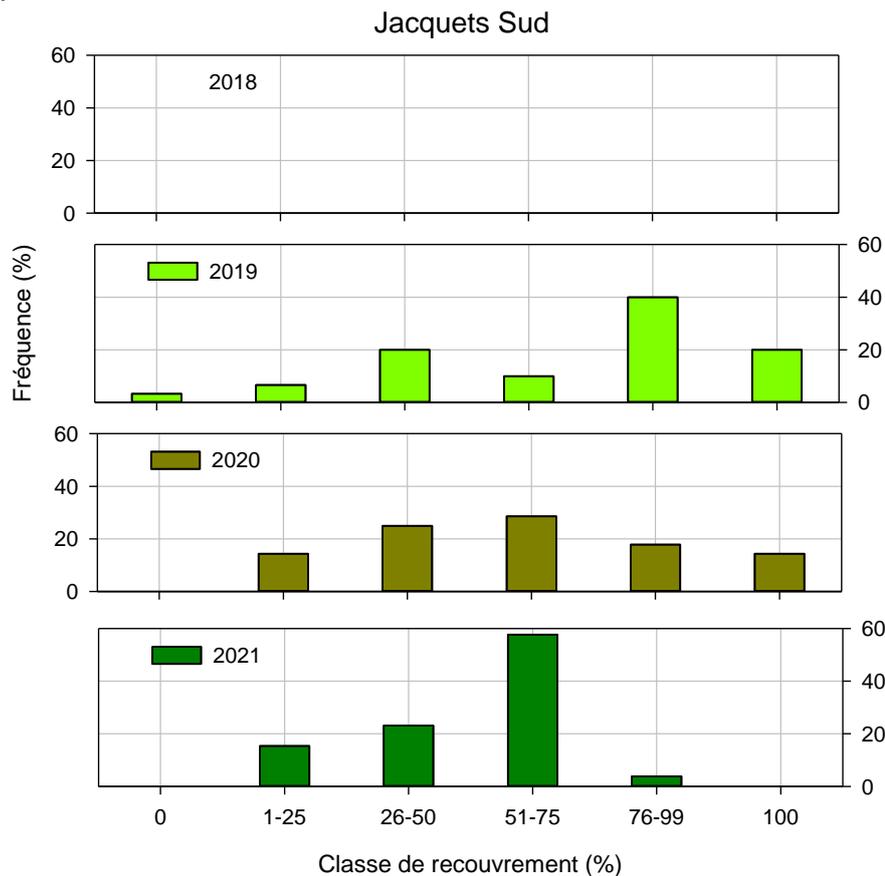


Figure 27 : Distribution du recouvrement des zostères sur les 30 points de la station « Jacquets Sud » en 2018, 2019, 2020 et 2021.

#### 4.2.4 Évolution du recouvrement des herbiers entre 2018, 2019, 2020 et 2021

Pour chaque grille, les données de taux de recouvrement aux trois dates ont été comparées en utilisant le test statistique de Kruskal-Wallis (ANOVA à un facteur sur rangs), suivi, dans le cas où l'analyse indique une différence significative, d'un test *post hoc* de comparaison multiple (Procédure de Dunn) permettant de conclure sur les différences entre années. Les résultats de ces analyses sont présentés en détail dans l'annexe 1.

Ces analyses indiquent que les taux de recouvrements sur la grille « Hautebelle (Témoin) » ne sont pas significativement différents entre 2018 (avant travaux) et 2019, mais ont significativement décru entre 2018 et 2020 puis se sont accrus entre 2020 et 2021. Globalement, on n'observe pas de différences significatives des taux de recouvrement entre 2018 et 2020 d'une part et entre 2018 et 2021 d'autre part (Figure 28).

Le recouvrement des zostères de la grille « Jacquets Nord » ne présente pas d'évolution significative entre 2018 et 2019 ni entre 2019 et 2020. Par contre, les résultats d'analyse statistique indiquent que les zostères présentent un plus fort recouvrement en 2020 qu'en 2018.

Sur la grille « Jacquets Sud », seules deux années présentent des recouvrements significativement différents : 2019 et 2021.

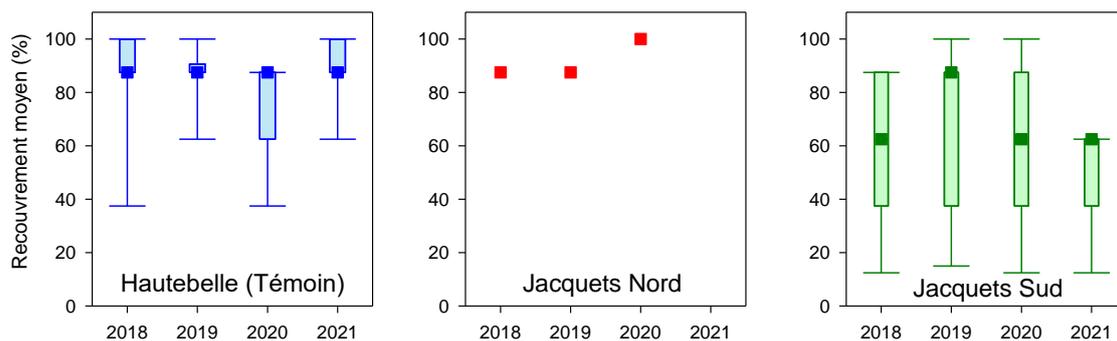


Figure 28 : Boîtes à moustaches<sup>1</sup> présentant le recouvrement des zostères (%) sur les trois grilles au cours des quatre années.

## 5 Suivi des sédiments

Les caractéristiques sédimentaires des trois sites sont suivies au cours du temps de manière à déterminer l'impact des travaux sur la composition des sédiments et notamment à mettre en évidence des phénomènes de sédimentation liés aux travaux.

### 5.1 Méthodes

L'analyse du sédiment des herbiers est conduite en utilisant deux types de stratégies :

- **Caractérisation du sédiment des herbiers des trois sites :**

Lors de chaque campagne de suivi stationnel du taux de recouvrement des herbiers (cf. §4), trois carottes de sédiment sont prélevées sur l'emprise de la grille, à l'aide d'un carottier de 9 cm de diamètre sur 5 cm de profondeur. Ces carottes sont ensuite regroupées et homogénéisées avant d'être traitées par tamisage (Figure 29) suivant le protocole décrit par Garcia *et al.* (2014). Le traitement statistique est réalisé à l'aide du logiciel GRADISTAT (Blott et Pye, 2001). Ces données permettent de caractériser les sédiments de chaque grille en fonction des critères granulométriques : pourcentage relatif de sable et de vase, diamètre médian, modes granulométriques.

<sup>1</sup> Les boîtes représentent la distribution de 50% des valeurs situées entre le premier (25%) et le troisième (75%) quartile. Le symbole carré représente la valeur du second (50% = médiane) quartile. La barre verticale (moustache) supérieure (respectivement inférieure) relie le haut (respectivement bas) de la boîte à la valeur observée la plus élevée (respectivement moins) en deçà d'une limite égale au troisième (respectivement premier) quartile plus (respectivement moins) 1,5 fois la distance interquartile (différence entre le 3ème et le 1er quartile).



Figure 29 : Colonne de tamis normalisée AFNOR sur tamiseuse Retsch

- **Suivi du sédiment superficiel dans les herbiers :**

Afin d'étudier les possibles modifications des sédiments superficiels liées aux travaux, trois prélèvements de sédiments superficiels (< 0,5 cm, correspondant au dépôt le plus récent) sont réalisés aux quatre coins de chaque grille, soit 12 prélèvements par grille. Ces prélèvements sont réalisés à chaque campagne de suivi stationnel du taux de recouvrement des herbiers (cf. §4), mais également 1 mois avant le début des travaux, et quelques jours avant le début et après la fin des travaux. Les échantillons sont analysés pour déterminer leur teneur en eau et leur granulométrie (granulomètre laser de type « Malvern »). Les grandeurs calculées sont : la fraction vaseuse (< 63  $\mu\text{m}$ ) et le diamètre médian, permettant de caractériser la nature des sédiments (vase, sables), et la densité sèche qui est un témoin de l'état de consolidation du sédiment superficiel. Afin d'évaluer dans quelle mesure les sédiments superficiels ont évolué (ou non) entre les différents suivis, 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 indique une différence significative, d'un test *post hoc* de comparaison multiple (Procédure de Tukey) permettant de conclure sur les différences entre années.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 Caractérisation et évolution du substrat sédimentaire

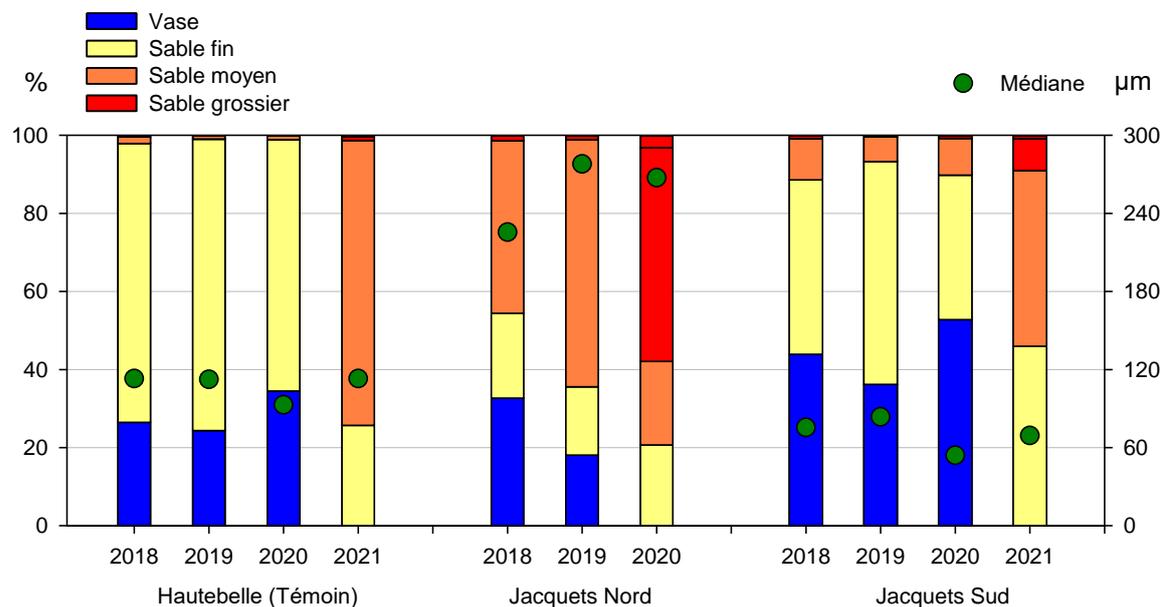


Figure 30 : Caractérisation granulométrique des sédiments des grilles suivies.

#### Hautebelle (Témoin)

En **2018**, l'analyse granulométrique par tamisage du sédiment de l'herbier de ce site révèle que ce sédiment est constitué de 73,5% de sables (dont une forte majorité de sables fins) et de 26,5 % de vases, avec une médiane de 111,3 µm (Figure 30).

En **2019**, ses caractéristiques ont peu évolué, avec 75,6% de sables dominés par les sables fins et de 24,4 % de vases, et une médiane de 112,4 µm.

En **2020**, le sédiment s'y est légèrement envasé, comme en témoigne la diminution de la médiane (92,8 µm). Il est composé avec 65,5% de sables dominés à part égale par les sables fins et très fins et de 34,5 % de vases.

En **2021**, ce sédiment retrouve des caractéristiques proches de celles observées en 2018 et 2019, avec 74,3 % de sables dominés par les sables fins et de 25,7 % de vases, et une médiane de 113 µm.

Selon la classification de Folk et Ward (1957) ce sédiment peut être qualifié, en **2018**, **2019** et **2021**, de « sable très fin » et de « limon très grossier » en **2020**.

#### Jacquets Nord

En **2018**, l'analyse granulométrique par tamisage du sédiment de l'herbier de ce site révèle que ce sédiment est constitué de 67,2 % de sables (dominés par les sables moyens) et de 32,7 % de vases, avec une médiane de 225 µm.

En **2019**, le substrat de ce site s'est ensablé par rapport à l'année précédente. Le sédiment présente une médiane de 278,0 µm et il est composé de 81,8 % de sables (dont, comme en 2018, une forte majorité de sables moyens) et de 18,1% de vases.

En **2020**, les caractéristiques de ce substrat se sont peu modifiées par rapport à l'année précédente. La médiane s'élève à 267,3 µm. La proportion de sables, toujours dominés par les sables moyens, atteint 78,1% et la teneur en vases 20,7 %.

Selon la classification de Folk et Ward (1957) ce sédiment peut être qualifié en **2018** de « sable très fin » et de « sable fin » en **2019** et **2020**.

### Jacquets Sud

En **2018**, l'analyse granulométrique par tamisage du sédiment de l'herbier de ce site révèle que ce sédiment est constitué de 56,1 % de sables (dominés par les sables fins) et de 43,9 % de vases, avec une médiane de 75  $\mu\text{m}$ .

En **2019**, on observe un léger ensablement de ce site et la médiane est de 83,6  $\mu\text{m}$ . Ce sédiment est alors constitué de 63,8 % de sables (dominés par les sables très fins) et de 36,2 % de vases.

En **2020**, comme à Hautebelle, on observe un envasement du substrat par rapport à l'année précédente. La médiane s'élève à 54,0  $\mu\text{m}$ . La proportion de sables (dominés, comme en 2019 par les sables très fins) n'est plus que de 47,0 % et la teneur en vase s'est fortement élevée, atteignant 52,8 %.

En **2021**, également comme à la station Hautebelle, la proportion de sable (toujours dominés par les sables très fins) a augmenté par rapport à l'année précédente ; elle atteint 53,9 %. La médiane a également augmenté et s'élève à 63,9  $\mu\text{m}$ .

Selon la classification de Folk et Ward (1957) ce sédiment peut être qualifié, pour les quatre années, en « limon très grossier ».

### 5.2.2 Évolution des sédiments superficiels

Pour les trois grilles suivies, la fraction vaseuse entre le suivi stationnel de **2018 (Sta-0)** et le suivi de janvier **2019 (S1)**, 1 mois avant les travaux) n'a pas significativement évolué (Figure 31). Entre les suivis **S1** et **S2** (février **2019**, juste avant le début des travaux), la fraction vaseuse a significativement diminué pour la grille Témoin (Hautebelle), tandis que pour les grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud, elle n'a pas significativement changé. Pour les grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud (Figure 31b et 31c), la fraction vaseuse n'a pas significativement évolué entre les suivis **S2** et **S3**, c'est-à-dire entre le début et la fin des travaux. Pour la grille Témoin (Figure 31a), une augmentation significative de la fraction vaseuse est observée entre le suivi **S2** et le stationnel **2019 (Sta-1)**. Une augmentation significative est également observée pour la grille Jacquets Sud (Figure 31c) entre la fin des travaux (**S3**) et le stationnel **2019 (Sta-1)**, alors que pour la grille Jacquets Nord, la tendance entre ces deux suivis est à la diminution. Entre le stationnel 2019 (**Sta-1**) et le stationnel 2020 (**Sta-2**), aucune évolution significative n'est observée pour les grilles Témoin (Hautebelle) et Jacquets Sud, tandis que pour la grille Jacquets Nord, la fraction vaseuse a significativement augmenté, passant de 45 % en 2019 à près de 70 % en 2020. Enfin, entre le stationnel 2020 (**Sta-2**) et 2021 (**Sta-3**), la fraction vaseuse a diminué sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'elle n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

Au cours de la totalité du suivi, soit entre l'été **2018 (Sta-0)** et l'été **2021 (Sta-3)**, la fraction vaseuse a diminué sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'elle n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

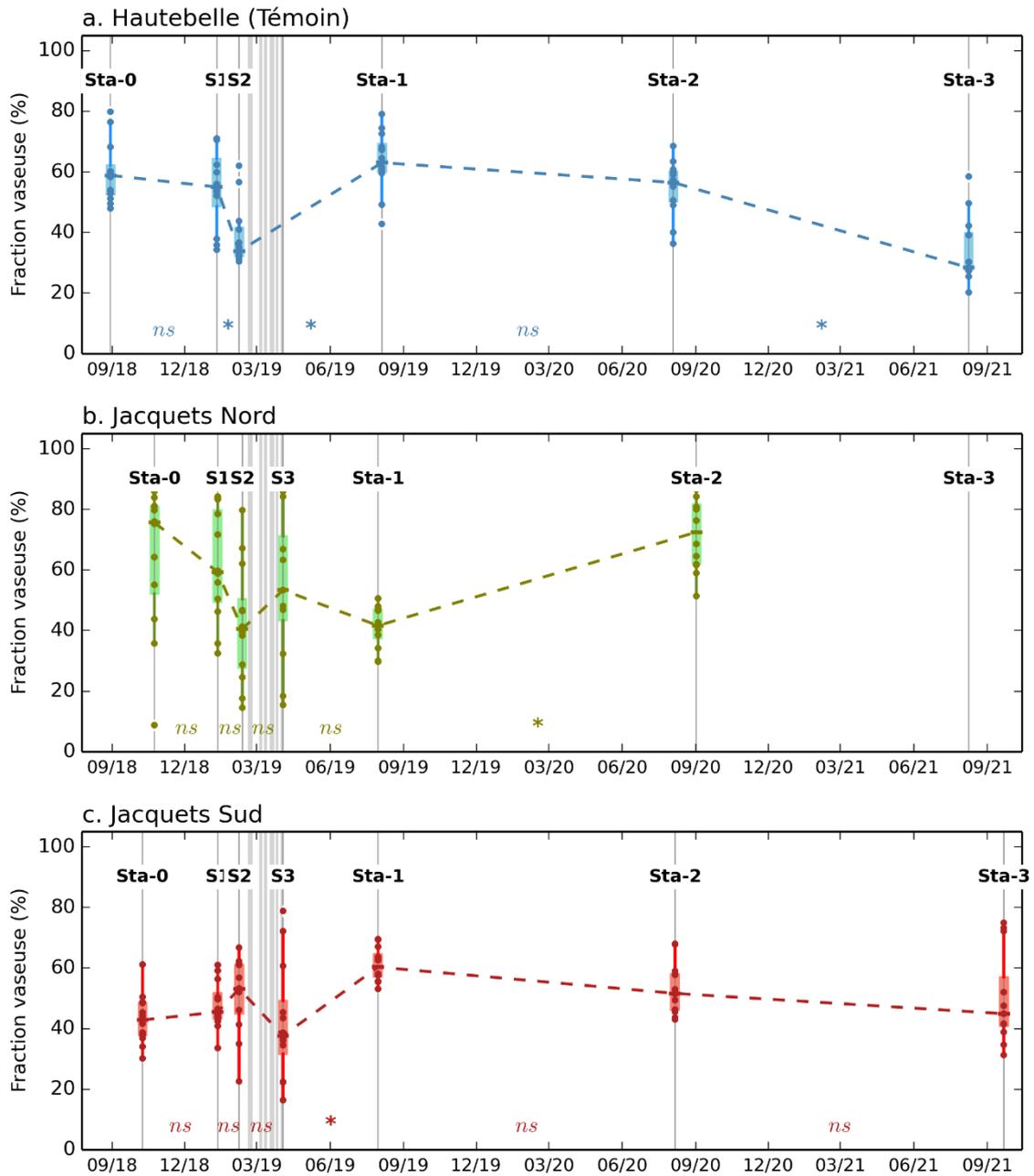


Figure 31 : Évolution temporelle de la fraction vaseuse pour les trois grilles suivies : (a) grille témoin (Hautebelle), (b) grille Jacquets Nord et (c) grille Jacquets Sud. Pour chaque grille, les noms Sta-0, Sta-1, Sta-2 et Sta-3 se réfèrent aux prélèvements réalisés lors des suivis stationnels, tandis que les noms S1, S2 et S3 se réfèrent aux prélèvements réalisés avant et après les travaux. Les rectangles gris entre S2 et S3 correspondent aux périodes de travaux. Entre chaque suivi est également indiqué si les différences entre deux suivis sont significatives (\*) ou non (n.s.).

Pour les trois grilles suivies, le diamètre médian entre le suivi stationnel de **2018 (Sta-0)** et le suivi de janvier **2019 (S2)**, 1 juste avant le début des travaux) n'a pas significativement évolué (Figure 31). Pour la grille Hautebelle (Témoin), le diamètre médian a significativement diminué entre le suivi **S2** et le stationnel **2019 (Sta-1)**. Entre la fin des travaux (**S3**) et le stationnel **2019 (Sta-1)**, le diamètre médian n'a pas évolué significativement pour la grille Jacquets Nord, tandis qu'il a significativement diminué pour la grille Jacquets Sud. Entre le stationnel 2019 (**Sta-1**) et le stationnel 2020 (**Sta-2**), aucune évolution significative n'est observée pour les grilles Hautebelle (Témoin) et Jacquets Sud, tandis que pour la grille Jacquets Nord le diamètre médian a

significativement diminué. Enfin, entre le stationnel 2020 (**Sta-2**) et 2021 (**Sta-3**), le diamètre médian a augmenté sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'il n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

Au cours de la totalité du suivi, soit entre l'été **2018 (Sta-0)** et l'été **2021 (Sta-3)**, le diamètre médian a augmenté sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'il n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

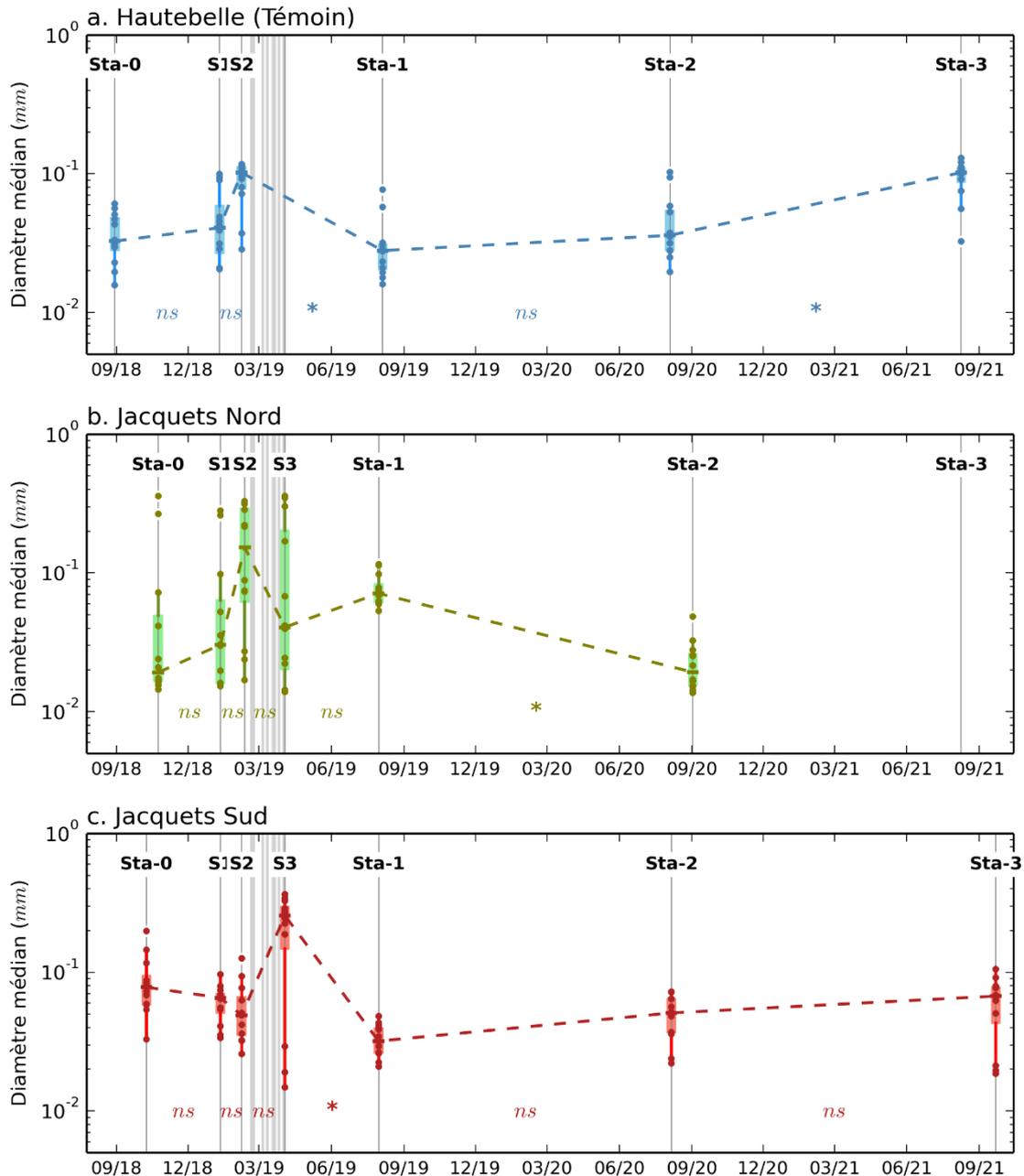


Figure 32 : Évolution temporelle du diamètre médian pour les trois grilles suivies : (a) grille témoin (Hautebelle), (b) grille Jacquets Nord et (c) grille Jacquets Sud. Pour chaque grille, les noms Sta-0, Sta-1 et Sta-2 se réfèrent aux prélèvements réalisés lors des suivis stationnels, tandis que les noms S1, S2 et S3 se réfèrent aux prélèvements réalisés avant et après les travaux. Les rectangles gris entre S2 et S3 correspondent aux périodes de travaux. Entre chaque suivi est également indiqué si les différences entre deux suivis sont significatives (\*) ou non (n.s.).

Pour les trois grilles suivies, la densité sèche entre le suivi stationnel de **2018 (Sta-0)** et le suivi de janvier **2019 (S1)**, 1 mois avant les travaux) n'a pas significativement évolué (Figure 33). Entre les suivis **S0** et **S1** (février 2019, juste avant le début des travaux), la densité sèche a significativement augmenté pour la grille Hautebelle (Témoin), tandis que pour les grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud, elle n'a pas significativement changé. Pour les grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud, la densité sèche n'a pas significativement évolué entre les suivis **S2** et **S3**, c'est-à-dire entre le début et la fin des travaux. Pour la grille Hautebelle (Témoin), la densité sèche a significativement diminué entre le suivi **S2** et le stationnel **2019 (Sta-1)**. Entre la fin des travaux (**S3**) et le stationnel **2019 (Sta-1)**, la densité sèche n'a pas évolué significativement pour la grille Jacquets Nord, tandis qu'elle a significativement diminué pour la grille Jacquets Sud. Entre le stationnel **2019 (Sta-1)** et le stationnel **2020 (Sta-2)**, aucune évolution significative n'est observée pour les grilles (Hautebelle) (Témoin) et Jacquets Nord, tandis que pour la grille Jacquets Sud, la densité sèche a augmenté (de  $520 \text{ kg.m}^{-3}$  à  $750 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Enfin, entre le stationnel 2020 (**Sta-2**) et 2021 (**Sta-3**), la densité sèche a augmenté sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'elle n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

Au cours de la totalité du suivi, soit entre l'été **2018 (Sta-0)** et l'été **2021 (Sta-3)**, la densité sèche a augmenté sur la grille Témoin (Hautebelle), alors qu'elle n'a pas changé significativement sur la grille Jacquets Sud.

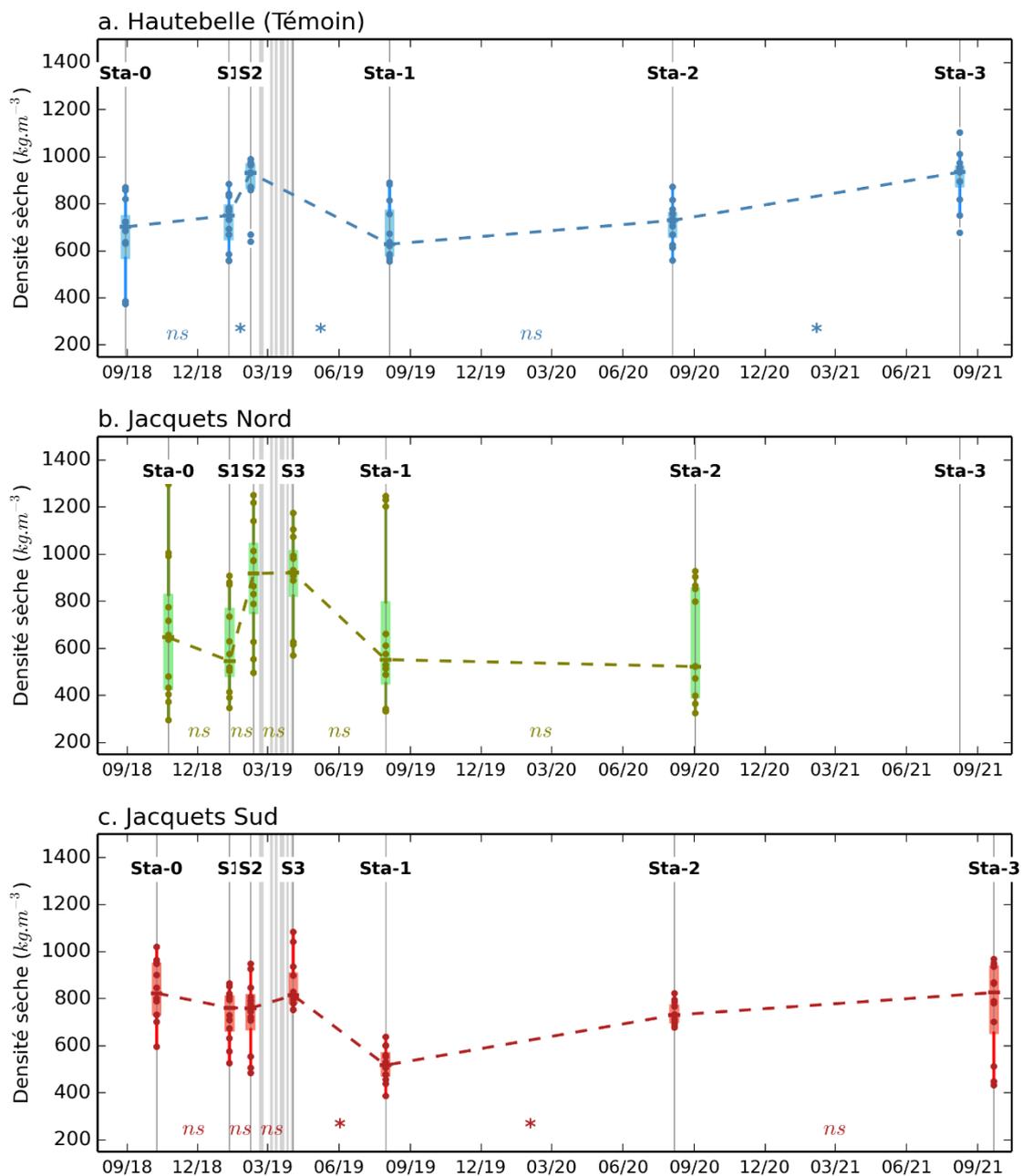


Figure 33 : Évolution temporelle de la densité sèche pour les trois grilles suivies : (a) grille témoin (Hautebelle), (b) grille Jacquets Nord et (c) grille Jacquets Sud. Pour chaque grille, les noms Sta-0, Sta-1 et Sta-2 se réfèrent aux prélèvements réalisés lors des suivis stationnels, tandis que les noms S1, S2 et S3 se réfèrent aux prélèvements réalisés avant et après les travaux. Les rectangles gris entre S2 et S3 correspondent aux périodes de travaux. Entre chaque suivi est également indiqué si les différences entre deux suivis sont significatives (\*) ou non (n.s.).

Au regard de l'évolution des paramètres sédimentaires présentés ci-dessus, et ce malgré l'importante variabilité des mesures, il apparaît que les sédiments superficiels de la grille Témoin (Hautebelle) tendent à être plus vaseux et moins denses en période estivale qu'en période hivernale. Cette tendance saisonnière serait induite d'une part par la saisonnalité du forçage par les mers de vents (provoquant une remise en suspension des particules les plus fines), et d'autre part, à l'évolution saisonnière de la biomasse épigée des zostères, qui permet, en période printanière et estivale, le piégeage des sédiments fins (Ganthy *et al.*, 2013).

En ce qui concerne la grille Nord, malgré une tendance à la diminution de la fraction vaseuse (associée à une augmentation de la densité sèche) durant l'automne et le début de l'hiver, qui pourrait être attribuée à l'érosion des particules fines au cours des tempêtes, il apparaît que durant la période printanière et le début de l'été, les sédiments demeurent plutôt sableux, indiquant une absence de piégeage de sédiment fins et/ou des apports en sables. Il est en effet à noter qu'au cours des visites de terrain sur cette station, il a été observé en février et en avril, qu'un petit banc de sable localisé initialement à quelques dizaines de mètres de la bordure ouest de la grille avait migré et s'en était rapproché. Ainsi, l'augmentation de la teneur en sables des sédiments de la grille Jacquets Nord entre les suivis stationnels de 2018 (**Sta-0**) et de 2019 (**Sta-1**), d'origine naturelle, a pu masquer l'effet des travaux qui aurait dû se traduire par une augmentation de la fraction vaseuse et une diminution de la densité sèche. Ensuite, la poursuite de la migration du banc de sable entre les suivis stationnels de 2019 (**Sta-1**) et de 2020 (**Sta-2**), associée à des herbiers bien développés (pour les points non impactés par la pêche à pied) semble pouvoir expliquer l'augmentation des teneurs en vase et la diminution du diamètre médian observée sur cette période.

Enfin, en ce qui concerne la grille Jacquets Sud, la relative stabilité des paramètres sédimentaires entre l'été 2018 et le début du printemps 2019 semble pouvoir être expliquée par sa situation plus abritée du clapot. Entre avril et juillet, l'augmentation de la fraction vaseuse et la diminution de la densité sèche pourraient être attribuées au développement saisonnier des herbiers de cette zone. Cependant, les valeurs de densité sèche atteintes en juillet 2019 (de l'ordre de  $450 \text{ kg.m}^{-3}$ ) sont particulièrement faibles, qui plus est lorsqu'on les compare aux valeurs d'octobre 2018 (de l'ordre de  $800 \text{ kg.m}^{-3}$ ). En effet, des valeurs inférieures à  $500 \text{ kg.m}^{-3}$  sont représentatives de vases fluides et fraîchement déposées. Les observations de terrain de juillet 2019 confirment l'hypothèse de ce dépôt récent : les feuilles de zostères étaient recouvertes d'une fine couche de vase (2 à 4 mm d'épaisseur environ). Les causes purement naturelles ne semblent donc pas suffisantes pour expliquer en totalité la présence de cette vase. Il est en effet probable que les sédiments de la zone où les travaux ont été réalisés (située à quelques centaines de mètres de la grille), après avoir été déstabilisés par les travaux, aient été remis en suspension petit à petit au gré des cycles de marée et se soient déposés au niveau de l'herbier de la grille. Cette hypothèse est d'ailleurs étayée par les mesures d'éclairement réalisées et présentées dans la partie suivante. Enfin, il apparaît qu'entre les suivis stationnels de 2019 (**Sta-1**), de 2020 (**Sta-2**) et de 2021 (**Sta-3**), les sédiments superficiels tendent à redevenir plus sableux, sans pour autant revenir à des caractéristiques similaires à celles observées en 2018. On peut supposer qu'une partie de la vase fluide observée en 2019 a été érodée durant l'hiver 2019-2020, et/ou que la poursuite de travaux dans la zone ait conduit à de nouveaux apports en vase fluide, mais dans une moindre quantité par rapport à celle observée en 2019.

## 6 Suivi de l'éclairement à la surface des herbiers

Ce suivi a pour objet d'évaluer la part de la turbidité liée aux activités de dragage. La méthode proposée pour détecter l'éventuel effet des travaux sur la disponibilité de la lumière nécessaire à la photosynthèse repose d'une part sur la comparaison entre site de référence et sites potentiellement impactés, et d'autre part sur la détection d'évènements de faible luminosité ne pouvant être attribués à des coups de vent. Ces mesures visent à caractériser les possibles modifications de l'éclairement subaquatique liées aux travaux de nettoyage.

## 6.1 Méthodes

Deux capteurs (HOBO-UA) fixés sur un support sont positionnés respectivement à 5 et 30 cm du sédiment et mesurent en continu (une mesure toutes les 10 minutes) la lumière et la température (Figure 32). Un troisième capteur (HOBO-UL) mesure la pression absolue, qui permet de renseigner la hauteur d'eau au niveau du point de mesure. La comparaison des données issues des deux capteurs de lumière permet de calculer un proxy de la turbidité des eaux au-dessus des herbiers (Ganthy *et al.*, 2018).

Ces capteurs ont été déployés les 11 et 12 janvier 2019 sur les trois sites de suivi et sont restés en place jusqu'au début du mois d'août 2019.

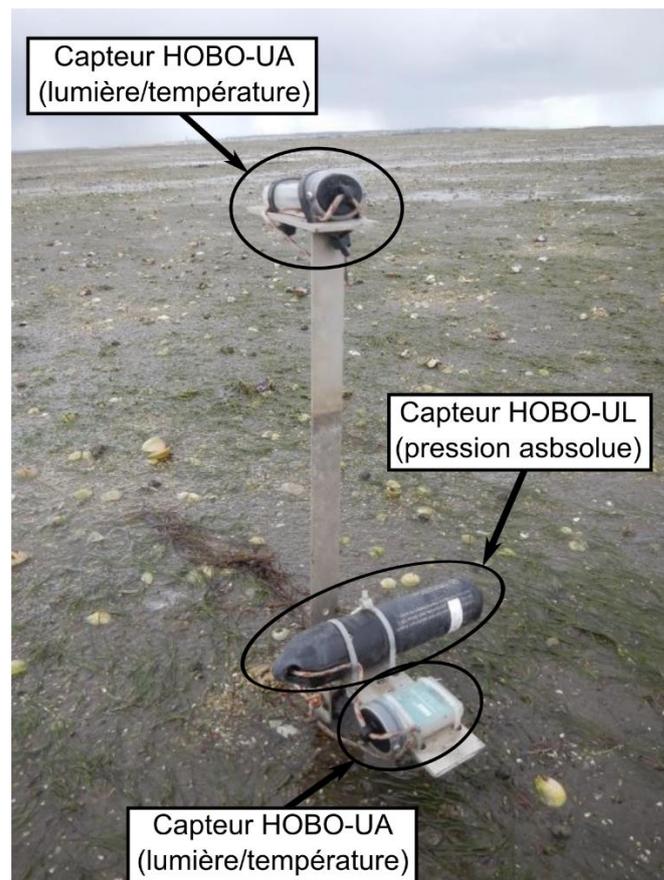


Figure 34 : Instrumentation du site Jacquets Nord avec les capteurs de lumière et le capteur de pression.

## 6.2 Analyse des données

### 6.2.1 Traitement des données de hauteur d'eau

La première étape du traitement consiste à corriger la pression mesurée par le capteur HOBO-UL (exprimée en kPa) de l'effet de la pression atmosphérique locale. En effet, la variation de pression atmosphérique dans la région Aquitaine peut engendrer des erreurs dans l'estimation de la hauteur d'eau pouvant être supérieures à 50 cm. Pour réaliser la correction, les données journalières de pression atmosphérique (exprimée en hPa) mesurée à la Station Météo France du Cap Ferret sont utilisées. Elles sont tout d'abord converties en kPa, puis interpolées linéairement afin d'obtenir une série temporelle correspondant à la série temporelle des mesures du capteur

HOBO-UL. Le capteur étant un capteur de pression absolue, la correction consiste à simplement retirer la valeur de pression atmosphérique de la valeur mesurée.

La pression ( $P$ , préalablement convertie en Pa) est ensuite convertie en hauteur d'eau ( $H_{eau}$ , exprimée en mètre) selon la relation :

$$H_{eau} = P / (g \times \rho_{eau})$$

Où  $g$  est la constante d'accélération de la gravité ( $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ) et  $\rho_{eau}$  la masse volumique de l'eau de mer ( $\text{kg.m}^{-3}$ ). Les capteurs HOBO-UL étant dotés d'un capteur de température, la masse volumique de l'eau de mer est donc calculée à partir de la température mesurée et de la salinité calculée en interpolant les mesures hebdomadaires en surface relevées au point Jacquets du réseau ARCHYD. La relation classiquement utilisée permettant le calcul de  $\rho_{eau}$  en fonction de la salinité ( $S$ ) et de la température ( $T$ , °C) s'écrit :

$$\rho_{eau} = 1000 + 1.455 \times cl - 0.0065 \times (T - 4 + 0.4 \times cl)^2$$

Avec  $cl$  la chlorinité :

$$cl = (S - 0,03) / 1,805$$

Les hauteurs d'eau ainsi calculées permettent d'une part de traiter les données de lumière, et d'autre part, couplées aux données de direction du vent (Météo France, station du Cap Ferret) et aux données bathymétriques du Bassin (données SIBA, 2016), de calculer le fetch instantané (c'est-à-dire la distance sur l'eau au-dessus de laquelle le vent souffle pour générer des vagues).

### 6.2.2 Traitement des données issues des capteurs de lumière

Les données de lumière ( $\text{lumens.m}^{-2}$ ) sont tout d'abord filtrées de manière à supprimer les périodes où le capteur considéré est exondé. Pour cela, un seuil de hauteur d'eau de 0,05 m au-dessus du capteur HOBO-UA est appliqué, et toutes les données de lumière pour lesquelles la hauteur d'eau est inférieure à cette valeur sont supprimées.

Dans un second temps, les données mesurées durant la nuit sont également supprimées. Pour cela, l'angle zénithal du Soleil ( $\theta_{soleil}$ ) est calculé à partir des paramètres astronomiques classiques : date, heure, latitude et longitude. Les détails de calcul ne sont pas présentés dans ce rapport mais une bonne description peut en être trouvée dans Reda et Andreas (2008).

L'étape suivante consiste à déterminer le coefficient d'atténuation lumineuse ( $k$ , sans unité) en fonction du temps. Ce coefficient qui dépend de la quantité de matière dissoute colorée, et de la matière particulaire en suspension (sédiment, phytoplancton) sera par la suite utilisé comme un proxy de la turbidité. Son calcul est effectué à partir de la loi de Beer-Lambert qui s'écrit sous la forme suivante :

$$I_z = I_{z0} \times e^{-k \times (z)}$$

Où  $I_z$  est l'énergie lumineuse reçue à la profondeur  $z$  et  $I_{z0}$  est l'énergie lumineuse reçue en surface (à  $z=0$ ).

Par construction, cette formulation utilise un coefficient d'atténuation moyen pour la colonne d'eau située entre la surface et la profondeur  $z$ . Il est à noter que dans sa forme classique, l'angle d'incidence des rayons lumineux n'est pas pris en compte.

Dans le cas où des mesures d'intensité lumineuse sont réalisées simultanément à des profondeurs différentes, il est possible de calculer la valeur moyenne du coefficient d'atténuation entre deux niveaux de mesures (cf. Figure 35) en modifiant (afin de prendre en compte l'angle d'incidence des rayons lumineux) et en inversant la loi classique décrite ci-dessus. Ainsi, si l'on considère que

l'on dispose de deux mesures d'énergie lumineuse,  $I_0$  et  $I_1$ , avec  $I_1$  mesurée plus proche de la surface que  $I_0$ , la valeur de  $k$  s'écrit alors :

$$k = -\frac{\ln(I_0/I_1)}{L_0 - L_1}$$

Où  $L_0$  et  $L_1$  sont les distances parcourues, depuis la surface, par les rayons lumineux dont l'énergie est mesurée respectivement en  $I_0$  et  $I_1$  ; ces distances sont calculées au moyen de l'équation suivante :

$$L_i = \frac{H_{eau} - z_i}{\cos(\theta_{eau})}$$

Où  $i$  correspond à l'indice de la mesure (0 ou 1 dans cet exemple, Figure 26), et  $\theta_{eau}$  est l'angle des rayons lumineux par rapport à la verticale, calculé tel que :

$$\theta_{eau} = \arcsin\left(\frac{n_{air}}{n_{eau}} \times \theta_{soleil}\right)$$

Où  $n_{air}$  et  $n_{eau}$  sont les indices de réfraction de l'air (1,0) et de l'eau (1,33), et  $\theta_{soleil}$  est l'angle zénithal.

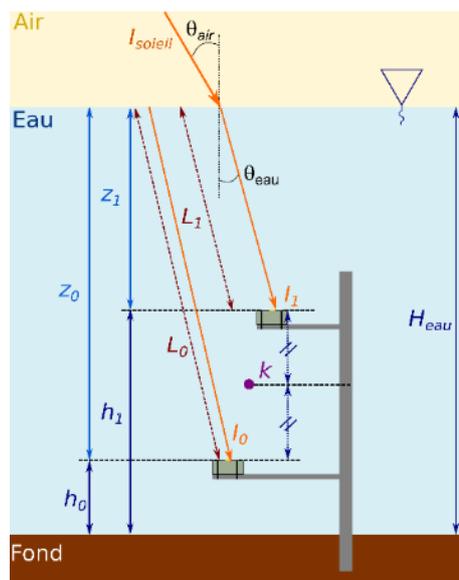


Figure 35 : Schéma représentant la disposition des capteurs de lumière et les différentes grandeurs utilisées pour le calcul du coefficient d'atténuation ( $k$ ).

Afin d'estimer également le coefficient  $k$  entre le capteur le plus haut et la surface, l'intensité lumineuse de sub-surface est estimée selon la formulation de Luyten et de Mulder (1992), largement utilisée dans les modèles hydrodynamiques, qui prend en compte le jour et l'heure, la position (latitude et longitude), ainsi que la nébulosité. Pour cette étude, les données de nébulosité proviennent des résultats du modèle numérique Arome de Météo-France.

En raison du dysfonctionnement du capteur de lumière localisé à 5 cm au-dessus du fond sur la grille Jacquets Nord, le choix a été fait, afin de pouvoir comparer les données sur les différents sites, de n'utiliser que les données issues des capteurs localisés à 30 cm au-dessus du fond, c'est-

à-dire celles pour lesquelles le coefficient d'atténuation a été obtenu à l'aide de l'estimation de Luyten et de Mulder (1992).

Les séries temporelles de coefficients d'atténuation ainsi obtenues reflètent donc la turbidité de l'eau en fonction du temps. Les coefficients d'atténuation calculés reflètent à la fois les conditions naturelles liées à l'exposition respective des différentes grilles et l'éventuel impact des travaux sur la turbidité locale. Pour mettre en évidence cet impact éventuel, il est nécessaire de s'affranchir de la dynamique naturelle des conditions d'éclairement, supposée similaire entre les différentes grilles. Pour ce faire, les coefficients d'atténuation des deux grilles Jacquets ont été tracés en fonction de ceux calculés sur la grille Témoin, et ce, uniquement pour les mesures réalisées avant les travaux (Figure 36).

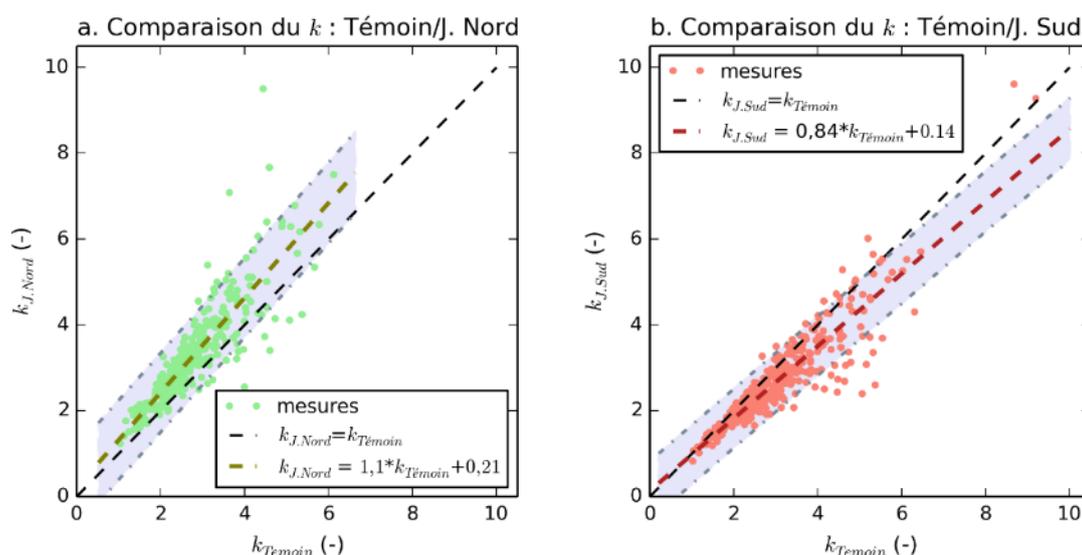


Figure 36 : Comparaison entre les coefficients d'atténuation calculés pour la grille Témoin ( $k_{Témoin}$ ) et (a) la grille Jacquets Nord, et (b) la grille Jacquets Sud. Les relations obtenues y sont également présentées.

Le calcul des relations entre les coefficients d'atténuation de la grille Témoin et des grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud permet d'abord de remarquer que la turbidité (coefficient d'atténuation) tend à être plus forte au niveau de la grille Jacquets Nord qu'au niveau de la grille Témoin (Figure 36a), alors qu'au contraire elle tend à être plus faible au niveau de la grille Jacquets Sud (Figure 36b).

Ensuite, la différence entre l'atténuation mesurée sur la grille considérée (Jacquets Nord ou Jacquets Sud) et celle prédite à partir des relations calculées ci-dessus a été calculée pour l'ensemble de la période de mesure telle que :

$$\Delta k_{J.Nord} = k_{J.Nord} - (1,1 \times k_{Témoin} + 0,21)$$

$$\Delta k_{J.Sud} = k_{J.Sud} - (0,84 \times k_{Témoin} + 0,14)$$

La grandeur  $\Delta k$  permet ainsi de quantifier la dynamique de l'atténuation lumineuse, et donc de la turbidité, au niveau de la grille considérée par rapport à ce qui pourrait être attendu en conditions naturelles (hors travaux). En d'autres termes, des valeurs positives de  $\Delta k$  indiquent une atténuation plus importante qu'attendue, alors que des valeurs négatives indiquent une atténuation plus faible qu'attendue.

Pour les différentes grandeurs calculées, un filtrage a été réalisé à l'aide d'une moyenne glissante sur une fenêtre de 48 h afin d'obtenir une vision plus générale de leur évolution temporelle ; le signal haute fréquence (une donnée toutes les 10 minutes) présentant une extrême variabilité rendant son interprétation difficile.

Enfin, afin d'établir si, pour les différentes grilles et pour les différents paramètres ( $k$  et  $\Delta k$ ), une tendance temporelle existait et était significative, le test dit de Mann-Kendall, modifié d'après Hamed et Rao (1998) a été appliqué.

### 6.3 Résultats

La figure 37 présente l'ensemble des séries temporelles de hauteur d'eau mesurée, au marégraphe d'Eyrac, de vent (vitesse et direction), de coefficients d'atténuation calculés à partir des capteurs de lumière déployés sur les trois grilles suivies, et de turbidité mesurée à proximité de la zone de travaux par les turbidimètres déployés par le SIBA.

Tout d'abord, du point de vue **météorologique**, on peut observer deux périodes tempétueuses (Figure 35a), fin janvier 2019 et mars 2019, présentant des vitesses de vent supérieures à  $12 \text{ m.s}^{-1}$  et atteignant les  $22 \text{ m.s}^{-1}$  (tempête du 29 janvier). Au cours du printemps et du début de l'été (période du 1<sup>er</sup> avril au 31 juillet 2019) les conditions de vent ont été généralement plus calmes, malgré quelques coups de vents présentant des vitesses supérieures à  $10 \text{ m.s}^{-1}$ . Au cours des coups de vents, la direction de ces derniers est généralement comprise entre les secteurs sud-sud-ouest et nord-nord-ouest.

Ensuite, les valeurs des **coefficients d'atténuation** (Figures 37b, 37c et 37d) et de **turbidité** (Figures 37e et 37f) semblent présenter une certaine cyclicité pouvant être reliées aux conditions de marée (cycle morte-eau/vive-eau). Cette cyclicité apparaît toutefois modulée par les conditions d'agitation (clapot), résultant des conditions de vent (vitesses et directions).

Il semble également que les coefficients d'atténuation pour la grille Jacquets Sud (Figure 37d) ont tendance à augmenter entre le début (janvier 2019) et la fin (juillet 2019) de la période de mesure.

Une analyse plus fine des séries temporelles de coefficient d'atténuation permet de remarquer que les pics d'atténuation n'interviennent généralement pas au cours des marées de vive-eau, mais quelques jours après, au début de la période de déchet (le déchet correspondant à la transition entre vive-eau et morte-eau). Une tendance similaire peut être observée en ce qui concerne les coups de vent : le maximum d'atténuation intervient généralement dans les jours qui suivent le coup de vent.

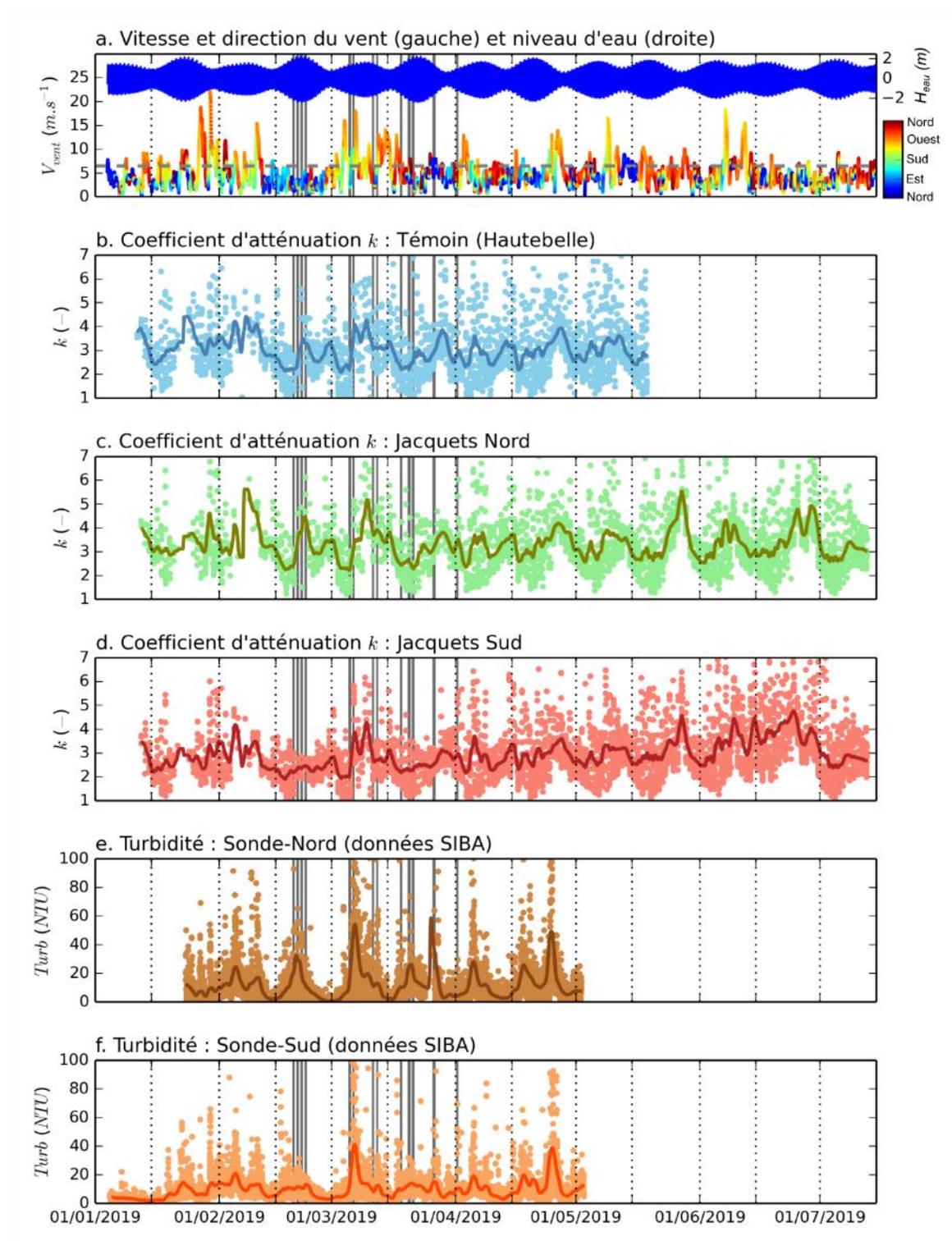


Figure 37 : Séries temporelles (a) de vitesse et direction du vent (données station Météo France du Cap Ferret) et de hauteur d'eau (Prédiction SHOM au marégraphe d'Eyrac), des coefficients d'atténuation estimés pour les grilles (b) Témoins (hautebelle), (c) Jacquets Nord, (d) Jacquets Sud, et résultats des mesures de turbidité réalisées par le SIBA (e) pour la Sonde Nord et (f) pour la sonde Sud. Pour (b) à (f), les points correspondent aux mesures instantanées tandis que la ligne plus épaisse correspond à une moyenne glissante sur une fenêtre de 48 h. Les rectangles gris correspondent aux périodes de travaux.

Par ailleurs, il apparaît que les atténuations les plus importantes ne sont pas nécessairement induites par les coups de vent les plus forts (généralement d'orientation ouest), mais par les coups de vent d'orientation nord ou sud. Ceci peut s'expliquer par la localisation des grilles suivies, protégées à l'ouest par la flèche du Cap Ferret.

Enfin, certains pics d'atténuation et de turbidité semblent intervenir pendant ou consécutivement à des phases de **travaux**. Il apparaît toutefois difficile d'attribuer ces pics au **seul effet des travaux** d'une part, parce qu'ils sont généralement réalisés en période de vive-eau, et d'autre part, parce que le mois de mars a été marqué par de multiples tempêtes.

La figure 38 présente l'ensemble des séries temporelles de vent (vitesse et direction), de hauteur d'eau mesurée au marégraphe d'Eyrac, de fetch, et des différences d'atténuation entre valeurs mesurées et attendues ( $\Delta k$ ). Rappelons que ce dernier paramètre doit être interprété comme une anomalie locale, traduisant une turbidité moins forte qu'attendue (valeurs négative), ou au contraire plus forte qu'attendue (valeurs positives).

En premier lieu, il apparaît que le **fetch** peut être très différent (jusqu'à un facteur 2) entre les grilles Jacquets Nord et Jacquets Sud (Figure 38c), mettant en évidence la différence d'exposition au clapot entre les deux grilles, malgré leur relative proximité.

Comme évoqué précédemment, l'évolution temporelle du paramètre K est marquée par une forte cyclicité liée aux cycles morte-eau/vive-eau. Pour le paramètre  $\Delta k$ , cette cyclicité est fortement estompée (Figures 38d et 38e). Ceci prouve que le calcul de ce paramètre permet effectivement de s'affranchir en grande partie de l'effet des processus régionaux (intervenant simultanément sur les trois grilles suivies) tels que l'augmentation de la turbidité liée aux marées de vive-eau ou aux tempêtes.

Ces figures montrent également que les phases de travaux n'induisent généralement pas d'anomalies positives (turbidité plus forte qu'attendue). Le seul cas pour lequel les travaux semblent avoir généré un effet sur la turbidité (et l'atténuation lumineuse) a concerné la grille Jacquets Nord durant les travaux réalisés entre le 19 et le 23 février 2019, période marquée par des vents faibles.

Toutefois, il faut souligner que le nombre et l'intensité des anomalies négatives (turbidité plus faible qu'attendue) a eu tendance à diminuer au cours de la période de mesure, principalement sur Jacquets Sud, traduisant une augmentation locale de la turbidité au cours de temps (Tableau 1).

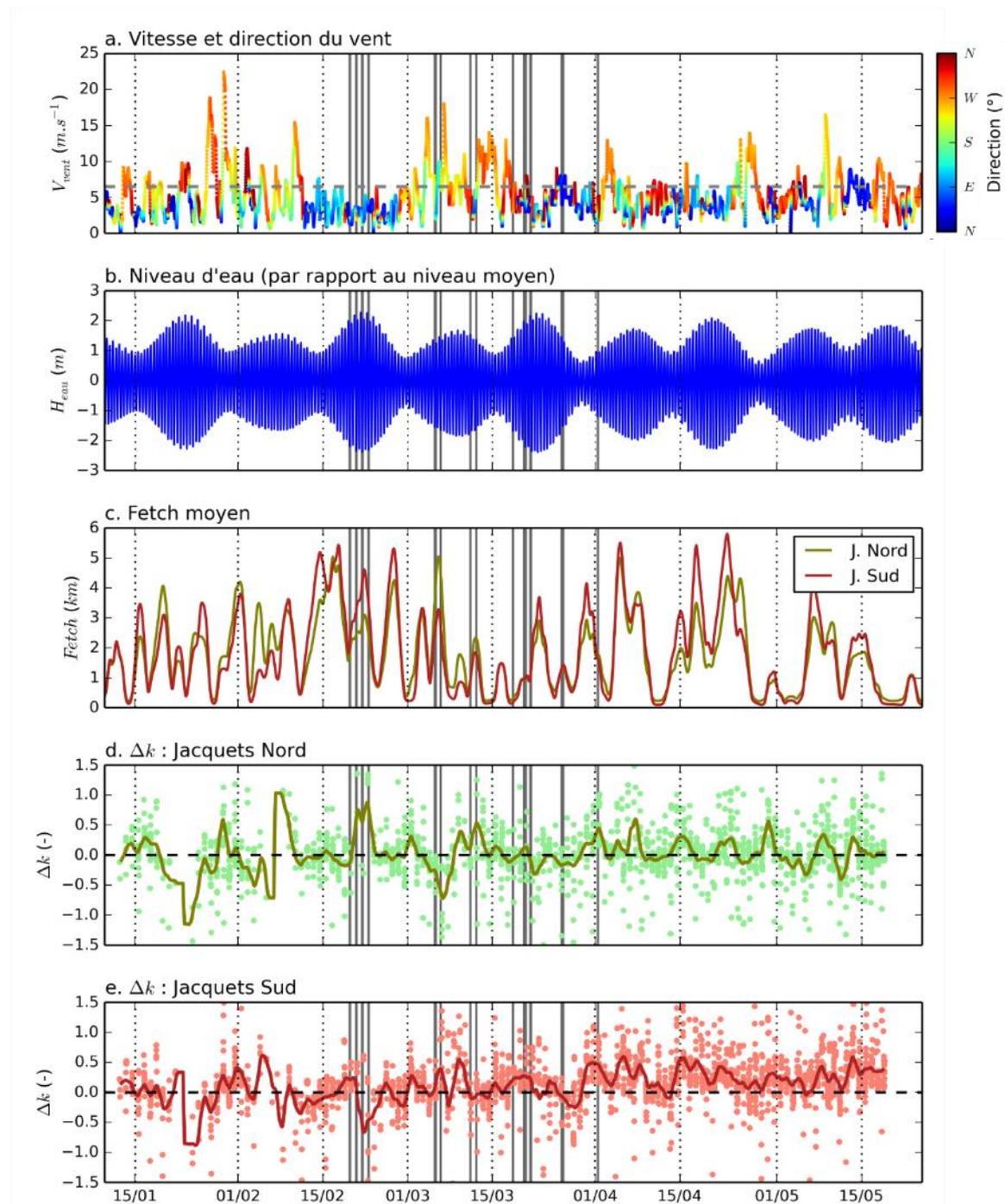


Figure 38 : Séries temporelles (a) de vitesse et direction du vent (données station Météo France du Cap Ferret), (b) de hauteur d'eau (Prédiction SHOM au marégraphe d'Eyrac), (c) du fetch moyen (moyenne glissante de fenêtre 48 h), et des différences d'atténuation estimés pour les grilles (d) Jacquets Nord, (e) Jacquets Sud par rapport à la grille Témoin. Pour (d) et (e), les points correspondent aux mesures instantanées tandis que la ligne plus épaisse correspond à la moyenne glissante (fenêtre de 48 h). Les rectangles gris correspondent aux périodes de travaux.

La distribution des coefficients d'atténuation calculée pour chacune des grilles a été tracée en distinguant les mesures réalisées avant le début des travaux (Figure 39a), pendant la période de travaux (Figure 39b) et après la fin des travaux (Figure 39c). Il apparaît que quelle que soit la période considérée, les coefficients d'atténuation sont en général plus faibles pour la grille Jacquets Sud, moyens pour la grille Témoin et plus forts pour la grille Jacquets Nord.

On peut également remarquer que, pour la grille Jacquets Nord, les coefficients d'atténuation sont plus forts au cours de la période de travaux (Figure 39b), indiquant une turbidité plus élevée. Par ailleurs, on observe une augmentation des coefficients d'atténuation sur la grille Jacquets Sud après la fin des travaux (Figure 39c).

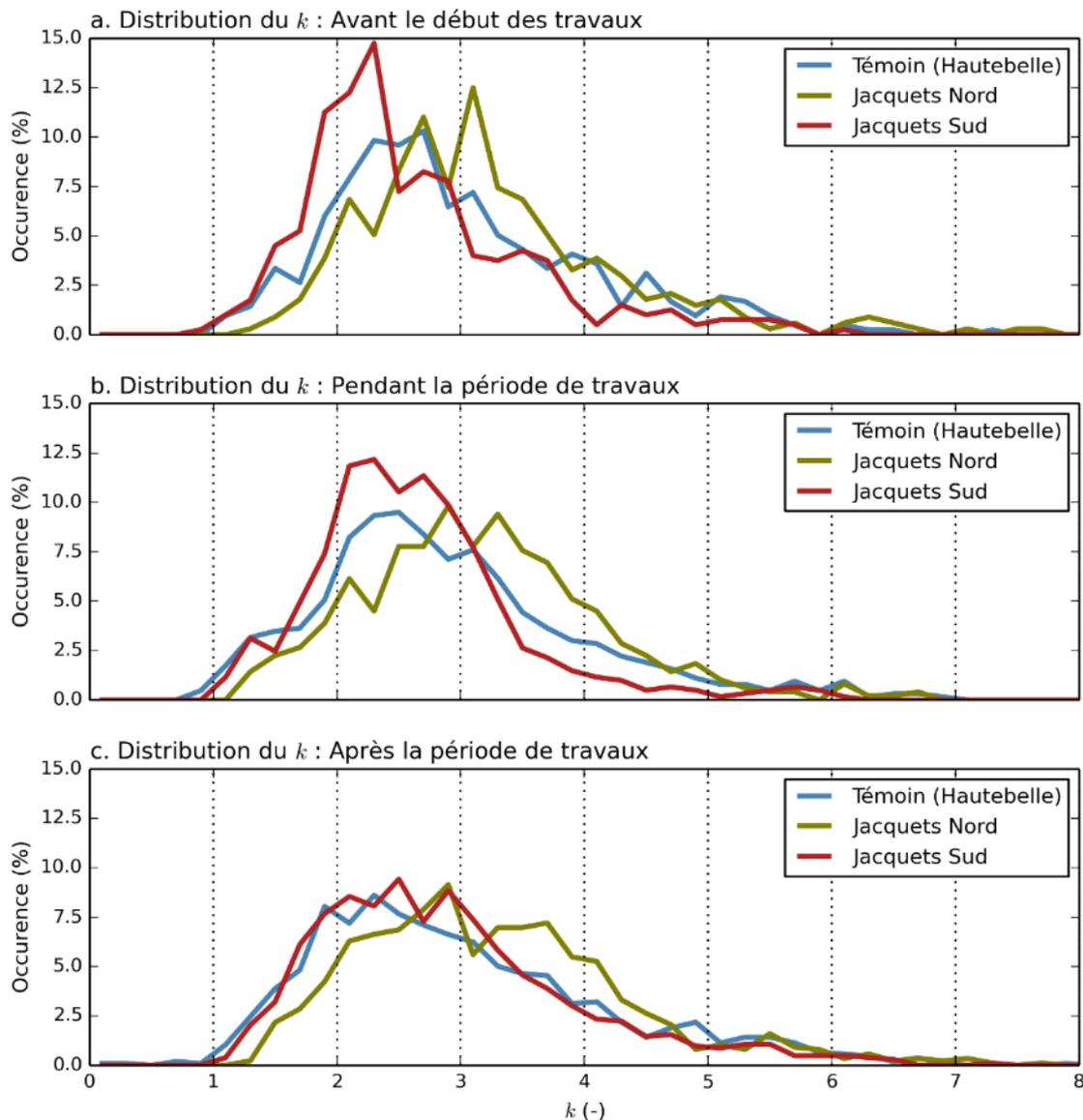


Figure 39 : Distribution du coefficient d'atténuation (k) pour les 3 grilles : avant (a), pendant (b) et après (c) la période de travaux.

Lorsque l'on compare la distribution des anomalies de coefficients d'atténuation ( $\Delta k$ ) pour la grille Jacquets Nord (Figure 40a) pour les différentes périodes (avant, pendant et après travaux), on ne remarque pas de variations importantes ; la distribution des anomalies est centrée sur 0. Cette absence de différence tend à indiquer l'absence d'impact des travaux sur la turbidité au niveau de cette grille.

Au contraire, sur la grille Jacquets Sud (Figure 40b) les anomalies tendent à augmenter au cours du temps, traduisant une augmentation de la turbidité sur cette grille par rapport à la grille Témoïn.

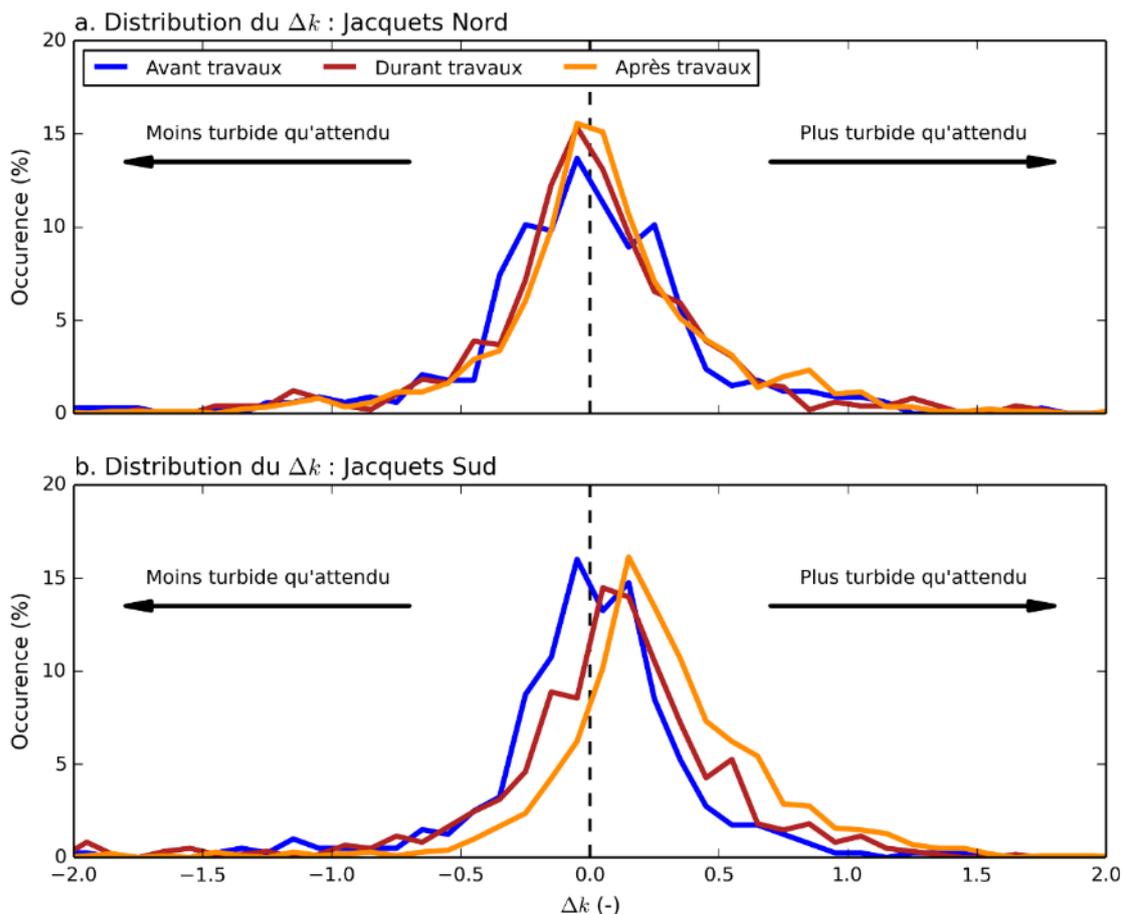


Figure 40 : Distribution de l'anomalie du coefficient d'atténuation ( $\Delta k$ ) avant, pendant et après la période de travaux (a) pour la grille Jacquets Nord et (b) pour la grille Jacquets Sud.

Tableau 1 : Résultats des tests de tendance de Mann-Kendal modifié, pour le coefficient d'atténuation ( $k$ ), l'anomalie du coefficient d'atténuation ( $\Delta k$ ) et la turbidité mesurée. Les valeurs données pour les tendances sont exprimées en unité par mois, ainsi pour  $k$  et  $\Delta k$ , il s'agit de mois<sup>-1</sup>, et pour la turbidité, il s'agit de NTU.mois<sup>-1</sup>.

Variable	Grille ou Sonde	Totalité de la série			Période commune		
		Période	Tendance	$p$ -value	Période	Tendance	$p$ -value
$k$	Témoïn	du 11/02 au 18/05	-0,08	$p < 0,001$	du 23/01 au 02/05	-0,12	$p < 0,001$
	J. Nord	du 12/01 au 12/07	x	$p = 0,31$		-0,08	$p < 0,02$
	J. Sud	du 12/01 au 12/07	+0,14	$p < 0,001$		+0,04	$p < 0,001$
$\Delta k$	J. Nord	du 12/01 au 18/05	+0,04	$p < 0,001$		+0,05	$p < 0,001$
	J. Sud	du 12/01 au 18/05	+0,11	$p < 0,001$		+0,14	$p < 0,001$
Turbidité	Sonde-Nord	du 23/01 au 02/05	+1,19	$p < 0,001$		+1,19	$p < 0,001$
	Sonde-Sud	du 05/01 au 02/05	+1,59	$p < 0,001$	x	$p = 0,55$	

En conclusion, la dynamique de la turbidité étant la résultante de différents processus interagissant à différentes échelles d'espace et de temps, il est **difficile** de quantifier la part relative de l'effet des travaux réalisés par rapport à celui des processus naturels que sont la marée et le clapot, tout du moins à **une échelle de temps événementielle**.

L'analyse des données sur l'ensemble de la période de mesure, et en distinguant les périodes avant, pendant et après travaux, permet toutefois de mettre en évidence des tendances différentes selon les sites.

Ainsi, au niveau de la grille **Jacquets Sud**, une **augmentation des coefficients d'atténuation et de leur anomalie** par rapport à la grille Témoin est observée entre le début des travaux et la fin de la période de mesure. Il est peu probable que ces modifications résultent directement des forçages naturels puisqu'au cours de la période les coups de vent ont été à la fois de moins en moins fréquents et intenses, cette évolution conduisant à la diminution des coefficients d'atténuation sur la grille Témoin (Tableau 1).

Compte-tenu des résultats obtenus en termes de turbidité et d'atténuation lumineuse dans la zone des Jacquets au cours de cette période, le scénario suivant peut être envisagé :

- Au cours des différentes phases de travaux, les déplacements et opérations réalisées par la pelleuse et le chenillard ont fortement déstabilisé les sédiments de la zone.
- Au cours des quelques cycles de marée suivant une intervention, une partie des sédiments superficiels (les plus déstabilisés) ont pu être remis en suspension par les courants de marée et transportés principalement vers l'amont, puisque la majeure partie des opérations se sont déroulées autour de la marée basse, ce qui était prédit par le modèle et semble être confirmé par l'augmentation de l'atténuation lumineuse au cours des travaux observés sur la grille Jacquets Nord.
- Pendant et après la fin des travaux, les sédiments déstabilisés de la zone s'érodent régulièrement, et forment un panache turbide qui va et vient au gré de la marée. La grille Jacquets Sud étant très proche de la zone, elle est impactée par ce panache, comme le montre l'augmentation de l'anomalie d'atténuation lumineuse au cours de la période.
- Une partie des sédiments en suspension peut se déposer sur la zone de la grille Sud, du fait de son faible hydrodynamisme, ce qui est confirmé par les résultats des prélèvements de sédiments superficiels et par les observations de terrain.

## 7 Conclusion sur le suivi 2018-2021

Les différentes observations réalisées **avant** et **après travaux** sur la zone des **Jacquets** permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'emprise des herbiers situés à proximité des travaux a peu évolué, compte-tenu de l'incertitude de mesure.
- Un recul des limites côtières des herbiers (de l'ordre de plusieurs mètres) a toutefois été observé.
- Pour les grilles Hautebelle (Témoin) et Jacquets Sud, le recouvrement n'a pas évolué significativement entre 2018 et 2021, au contraire de la grille Jacquets Nord où il a augmenté entre 2018 et 2020.
- Entre les suivis estivaux de 2018 et de 2021, les différents paramètres des sédiments superficiels n'ont évolué significativement pour les grilles Jacquets Sud et Jacquets Nord, alors que pour la grille Hautebelle (Témoin) la fraction vaseuse a légèrement diminué. Toutefois, des variations saisonnières, liées aux forçages hydrodynamiques et parfois assez marquées, ont pu être mises en évidence sur les trois grilles. Cependant, sur la grille Jacquets Sud, la dynamique naturelle ne semble pas suffisante pour expliquer la variabilité sédimentaire observée.
- La transparence de l'eau au niveau des grilles situées à proximité des travaux, par comparaison avec celle mesurée sur la grille Témoin, n'a pas significativement évolué sur la grille Nord, tandis qu'elle a augmenté sur la grille Sud sans que ceci puisse être expliqué par un effet des forçages naturels.

Deux ans et demi (trois étés) après la fin des opérations de réhabilitation du DPM sur le secteur des Jacquets, les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en évidence un effet délétère de ces travaux sur les herbiers de cette zone, au moins en termes de recouvrement. Le recul de la limite côtière des herbiers (plusieurs mètres) entre les étés 2018 et 2021 peut difficilement être attribué à l'impact des travaux. Bien que ces opérations aient provoqué des modifications locales et ponctuelles de la dynamique sédimentaire (sédiments superficiels et éclaircissement au fond) qui ont pu être mises en évidence, elles ne semblent pas avoir eu d'effets sur les herbiers.

## 8 Références bibliographiques

**Auby I., Oger-Jeanneret H., Gouillieux B., Grall J., Janson A.-L., Maguer M., Rigouin L., Rollet C., Sauriau P.-G., Trut G.** (2018b). Protocoles de suivi stationnel des herbiers à zostères pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). *Zostera marina* - *Zostera noltei*. Rapport Ifremer/ODE/UL/LER/AR/18.017. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00471/58250/>

**Auby I., Oger-Jeanneret H., Rigouin L., Trut G., Cognat M., Ganthy F., Gouriou L., Bujan S., Gouillieux B., Dalloyau S., Feigne C., Pere C., Aubert F.** (2018a). Suivi stationnel (2006-2017) des herbiers de zostères (*Zostera noltei* et *Zostera marina*) et calcul de l'indicateur « Angiospermes » (2017) dans la masse d'eau côtière FRFC06. Arcachon amont - Bassin Hydrographique Adour-Garonne. RST /ODE/UL/LER/AR/18-010. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00451>

**Blott S.J., Pye K.** (2001). Gradistat : a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237-1248. [http://www.geo.mtu.edu/~raman/Ashfall/Syllabus/Entries/2009/6/21\\_GSD\\_files/GRADISTAT.pdf](http://www.geo.mtu.edu/~raman/Ashfall/Syllabus/Entries/2009/6/21_GSD_files/GRADISTAT.pdf)

**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, Université de Bordeaux, 305 pp.

**Dauvin J.C., Bellan G., Bellan-Santini D., Castric A., Comolet-Tirman J., Francour F., Gentil F., Girard A., Gofas S., Mahé C., Noël P., de Reviers B.** (1993). Typologie des Znieff-Mer. Liste des paramètres et des biocénoses de côtes françaises métropolitaines. Museum National d'Histoire Naturelle, Paris : 44p.

**Folk, R. L., & Ward, W. C.** (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26.

**Ganthy F., Rigouin L., Cognat M., Auby I** (2018). Preliminary investigation on the use of HOBO® Pendant light sensors as low-cost turbidimeters : The good, the bad and the ugly. Poster. ISOBAY 16 - XVth International Symposium of Oceanography of the Bay of Biscay. 5-7 June 2018, Anglet, France.

**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.

**Garcia A., Desroy N., Le Mao P., Miossec L.** (2014). Protocole de suivi stationnel des macroinvertébrés benthiques de substrats meubles subtidiaux et intertidaux dans le cadre de la DCE - Façades Manche et Atlantique - Rapport AQUAREF 2014. Rapport AQUAREF 2014. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00269/38067/>

**Hamed K.H., Rao A.R.** (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204 :182-196.

**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 applications at regional scale (MARS). *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>

**Le Hir P., Cayocca F., Waeles B.** (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. Continental Shelf Research S135-S149.

**Luyten P., De Mulder T.** (1992). A module representing surface fluxes of momentum and heat. MUMM's contribution of MAST-0050-C Technical Report, 9, 1-30.

**Reda I., Andreas A.** (2008). Solar position algorithm for solar radiation application. Rapport du National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-560-34302, 40 pp.  
<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>

## 9 Annexe 1 : Résultats des analyses statistiques sur l'évolution du taux de recouvrement des zostères

### Grille Hautebelle (Témoin)

#### One Way Analysis of Variance

mercredi, mars 16, 2022, 11:17:12

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Failed (P < 0.050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

#### Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks

mercredi, mars 16, 2022, 11:17:12

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

Dependent Variable:

Group	N	Missing	Median	25%	75%
Hau-2018	30	1	87.500	87.500	100.000
Hau-2019	30	0	87.500	87.500	90.625
Hau-2020	30	1	87.500	62.500	87.500
Hau-2021	30	1	87.500	87.500	100.000

H = 14.750 with 3 degrees of freedom. (P = 0.002)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.002)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Dunn's Method) :

Comparison	Diff of Ranks	Q	P<0.05
Hau-2021 vs Hau-2020	27.483	3.085	Yes
Hau-2021 vs Hau-2019	6.406	0.725	No
Hau-2021 vs Hau-2018	2.897	0.325	Do Not Test
Hau-2018 vs Hau-2020	24.586	2.760	Yes
Hau-2018 vs Hau-2019	3.509	0.397	Do Not Test
Hau-2019 vs Hau-2020	21.077	2.386	No

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

## Grille Jacquets Sud

### One Way Analysis of Variance

mercredi, mars 16, 2022, 11:45:23

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Failed (P < 0.050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

### Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks

mercredi, mars 16, 2022, 11:45:23

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

Dependent Variable:

Group	N	Missing	Median	25%	75%
JacS-2018	30	1	62.500	37.500	87.500
JacS-2019	30	0	87.500	37.500	87.500
JacS-2020	30	1	62.500	37.500	87.500
JacS-2021	27	1	62.500	37.500	62.500

H = 8.206 with 3 degrees of freedom. (P = 0.042)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.042)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Dunn's Method) :

Comparison	Diff of Ranks	Q	P<0.05
JacS-2019 vs JacS-2021	24.363	2.751	Yes
JacS-2019 vs JacS-2020	14.715	1.710	No
JacS-2019 vs JacS-2018	11.663	1.355	Do Not Test
JacS-2018 vs JacS-2021	12.700	1.423	No
JacS-2018 vs JacS-2020	3.052	0.352	Do Not Test
JacS-2020 vs JacS-2021	9.648	1.081	Do Not Test

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

## Grille Jacquets Nord

### One Way Analysis of Variance

lundi, avril 12, 2021, 17:16:57

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Failed (P < 0.050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

### Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks

lundi, avril 12, 2021, 17:16:57

**Data source:** Data 1 in rec%JAC\_2018\_2019\_2020

Group	N	Missing	Median	25%	75%
JacN-2018	30	0	0.875	0.625	0.875
JacN-2019	30	0	0.875	0.875	1.000
JacN-2020	30	0	1.000	0.813	1.000

H = 8.819 with 2 degrees of freedom. (P = 0.012)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.012)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparison	Diff of Ranks	q	P<0.05
JacN-2020 vs JacN-2018	524.500	3.666	Yes
JacN-2020 vs JacN-2019	69.500	0.486	No
JacN-2019 vs JacN-2018	455.000	3.180	No

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.