

SEABOOST

RAPPORT FINAL

ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE RESTAURATION D'UN HERBIER DE ZOSTERES NAINES (PROJET DYNAREST)

1er juin 2022



SOMMAIRE

Résumé	6
Liste des figures	7
Liste des Tables	13
1. Contexte de l'étude	15
1.1 Contexte global	15
1.1.1 Le Parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis : un espace côtier riche et diversifié	15
1.1.2 L'herbier de zostères naines : une espèce emblématique porteuse de fonctionnalités écologiques importantes	15
1.1.3 Une volonté forte des acteurs gestionnaires de développer des connaissances et des projets en faveur de la protection de cette espèce	16
1.2 Le contexte spécifique de la Fosse de Loix	16
1.2.1 Zone d'étude	16
1.2.2 Contexte de l'étude : Travaux relatifs au transfert des eaux usées	19
2. Prestation 1 : Evolution historique de l'herbier	22
2.1 Objectifs	22
2.2 Données et méthodes	22
2.2.1 Zone d'étude	22
2.2.2 Images exploitées	23
2.2.2.1 Description technique des capteurs exploités	23
2.2.2.2 Année 2000	24
2.2.2.3 Année 2018	24
2.2.2.4 Drone	25
2.2.2.5 Archives argentiques	26
2.2.2.6 Ortholittorales	26
2.2.3 Synthèse des données historiques collectées	27
2.2.4 Cartographie par photo-interprétation	27
2.2.5 Cartographie par classification d'image	30
2.2.5.1 Méthodologie	30
2.2.5.2 Mise en œuvre pratique	31
2.2.5.2.1 Echantillonnage	31
2.2.5.2.2 Choix du classifieur	32
2.2.5.2.3 Régularisation spatiale	32
2.2.5.3 Préparation des données de référence	33
2.2.5.3.1 Taux de recouvrement SPOT 2000 et 2018 sur l'herbier de la fosse de Loix	33
2.2.5.3.2 Cartographie drone 2020	33
2.2.5.4 Correction des couches livrées après validation	35
2.2.6 Analyse de l'évolution spatio-temporelle des enveloppes d'herbier	35
2.2.6.1 Méthodologie	35
2.2.6.2 Mise en œuvre pratique	35
2.2.7 Analyse des forçages	35
2.2.7.1 Contexte	35
2.2.7.2 Analyse des états de mer	36
2.2.7.3 Submersions marines	39
2.2.7.4 Turbidité naturelle	39

2.2.7.5	Turbidité anthropique	42
2.3	Résultats	44
2.3.1	Evaluation de la classification	44
2.3.1.1	Taux de recouvrement pour l'année 2000 et 2018	44
2.3.1.2	Détection de la présence d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 2020	45
2.3.2	Distribution spatiale des enveloppes d'herbier à zostères naines et taux de recouvrement associés	46
2.3.2.1	Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 1979	46
2.3.2.2	Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 1987	48
2.3.2.3	Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 2000	50
2.3.2.4	Taux de recouvrement pour l'année 2000 (analyse SPOT)	52
2.3.2.5	Taux de recouvrement pour l'année 2018 (analyse SPOT)	55
2.3.2.6	Enveloppes d'herbier de zostères naines et taux de recouvrement associés à partir de l'image drone pour l'année 2020	58
2.3.3	Résultats de l'analyse spatio-temporelle des enveloppes et taux de recouvrement d'herbier	60
2.3.3.1	1979 - 1987	65
2.3.3.2	1987 et 1989	66
2.3.3.3	1989 et 1997	67
2.3.3.4	1987 et 2000	68
2.3.3.5	1997 et 2000	69
2.3.3.6	2000 et 2006	71
2.3.3.7	2006 et 2014	73
2.3.3.8	2014 et 2018	74
2.3.3.9	2018 et 2020	75
2.3.4	Indicateurs d'impact	78
2.3.4.1	Modification de la surface de l'herbier	80
2.3.4.2	Modification des taux de recouvrement de l'herbier	83
2.3.4.3	Modification du réseau de drainage de l'herbier	84
2.4	Synthèse de l'analyse de l'évolution historique des herbiers dans la fosse de Loix, quels nouveaux apports pour évaluer la restauration	89
3.	Prestation 2 : synthèse et analyse bibliographique, ingénierie de restauration des herbiers de zostères naines	91
3.1	Enjeux et contexte de réalisation de l'étude	91
3.1.1	Objectifs	91
3.1.2	Méthode et moyens de réalisation de l'étude	91
3.1.2.1	Méthode	91
3.1.2.2	Limites de réalisation de l'étude	92
3.2	Les herbiers de zostère : biologie et réglementation applicable	93
3.2.1	Description biologique des espèces	93
3.2.1.1	Zostera noltei : zostère naine	93
3.2.1.2	Zostera marina : zostère marine	95
3.2.1.3	Modes d'expansion et de reproduction	95
3.2.1.4	Paramètres d'influence : lumière, vague, courant, charge en nutriments, prédation	96
3.2.1.5	Les boucles de rétroaction existantes	97
3.2.1.6	Prérequis à la restauration	98
3.2.1.7	Transfert des protocoles de restauration	98
3.2.2	Cadre réglementaire applicable aux herbiers de zostère naine	99

3.3	Caractérisation générale des protocoles de restauration appliqués aux herbiers de zostères naines	99
3.3.1	Géographie des projets	100
3.3.2	Contextes d'exécution des protocoles de restauration	101
3.3.3	Origine de la dégradation des herbiers	101
3.4	Inventaire comparatif des protocoles de restauration déployés et analyse des conditions de succès et d'échec de chaque protocole et caractérisations conclusives pour l'herbier	102
3.4.1	Description générale des techniques de restauration des herbiers	102
3.4.2	Inventaire des méthodes de transplantation des herbiers	102
3.4.3	Inventaire des méthodes de restauration des herbiers par ensemencement	104
3.4.4	Méthodes de restauration et protocoles en cours de développement	105
3.4.4.1	Le projet SEA ART porté par l'Université technique de Braunschweig	105
3.4.4.2	Les Roselières, Seaboost	106
3.4.5	Inventaire comparatif des méthodes de restauration des herbiers : fiches Projet et analyse des conditions de succès et d'échec	107
3.4.5.1	Transplantation de plants d'herbier avec rhizome	108
3.4.5.2	Transplantation de plants fixés sur un cadre métallique	110
3.4.5.3	Méthode du rhizome horizontal	112
3.4.5.4	Transplantation par ancrage du plant sur une coquille d'huitre	114
3.4.5.5	Transplantation de plants fixés sur une pierre allongée	118
3.4.5.6	Transplantation de plants cultivés en nurserie	120
3.4.5.7	Transplantation de plants avec rhizome dans des structures 3D	122
3.4.5.8	Transplantation de mottes d'herbier prélevées manuellement	123
3.4.5.9	Transplantation de mottes d'herbier excavées	125
3.4.5.10	Ensemencement à la volée	128
3.4.5.11	Ensemencement mécanique	130
3.4.5.12	Ensemencement par un système de bouées	132
3.4.5.13	Ensemencement avec des sacs en toile de jute	134
3.4.5.14	Ensemencement avec des sacs en toile de jute remplis de sédiments	136
3.4.5.15	Ensemencement avec des sacs en toile de jute attachés à une ligne (méthode BOSSline)	139
3.4.5.16	Ensemencement dans des pots	142
3.4.6	Bilan de l'analyse comparative des protocoles de restauration	144
3.4.7	Synthèse des méthodes de restauration des herbiers	146
3.4.7.1	Méthodes de transplantation	147
3.4.7.2	Méthodes d'ensemencement	149
3.4.7.3	Points d'attention particuliers relatifs aux protocoles de restauration des herbiers	151
3.5	Catalogue des conditions indispensables aux déploiements de protocoles de restauration au sein du périmètre du Parc	153
3.5.1	Les herbiers de zostère naine au sein du Parc	153
3.5.1.1	Localisation des zones d'herbier de zostères naines au sein du Parc	153
3.5.1.2	Identification des contextes environnemental et hydrosédimentaire des zones d'herbier de zostères naines du Parc	154
3.5.2	Activités et pressions exercées sur les herbiers du Parc	155
3.5.3	Recommandation de mesures de maîtrise des pressions au sein du Parc	158
3.5.4	Conditions requises pour l'application de mesures de restauration des herbiers de zostère au sein du Parc	161
3.6	Compilation des mesures dites « compensatoires connues » voire déployées et prospectives/perceptives possibles	161

3.6.1.1	Réglementation applicable	162
3.6.1.2	Le cas de la compensation en mer	164
3.6.1.3	Le cas complexe des mesures compensatoires pour les herbiers de zostères : la mise en œuvre de mesures d'accompagnement	165
3.6.1.4	Inventaire des mesures d'accompagnement déployées	166
3.7	Synthèse : Déroulement de la séquence ERC dans le cadre de travaux et conditions d'applications au sein du périmètre du Parc	167
4.	<i>Prestation 3 : Analyse de la dynamique de restauration passive de l'herbier de Loix</i>	171
4.1	Suivi de la restauration par acquisition d'images par drone	171
4.1.1	Matériel et méthodologie	171
4.1.2	Résultats	175
4.2	Suivi de la restauration selon le protocole DCE stationnel	179
4.2.1	Méthodologie	179
4.2.1.1	Stratégie générale d'échantillonnage	179
4.2.1.2	Calendrier des opérations de suivi	180
4.2.1.3	Positionnement des stations	180
4.2.1.4	Estimation du taux de recouvrement	186
4.2.1.5	Prélèvement et analyse des sédiments	187
4.2.1.6	Prélèvements des macroalgues	190
4.2.2	Résultats	191
4.2.2.1	Suivi global	191
4.2.2.2	Taux de recouvrement	193
4.2.2.3	Macroalgues	204
4.2.2.4	Sédiments	207
4.2.2.4.1	Matière organique	207
4.2.2.4.2	Granulométrie	208
4.2.2.4.3	Analyse critique des résultats DCE	212
4.3	Analyse de la capacité de restauration et proposition d'indicateur	213
4.3.1	Liste de l'ensemble des pressions naturelles et anthropiques	213
4.3.2	A l'échelle de la fosse de Loix	216
4.3.2.1	Synthèse des principaux résultats	216
4.3.2.2	Conclusion quant à la dynamique de l'herbier	216
4.3.2.3	Réflexion sur les indicateurs	218
4.3.2.3.1	Proximité aux chenaux d'écoulement préférentiels	218
4.3.2.3.2	Proximité à un herbier sain	219
4.3.2.3.3	Influence de la pente	220
4.3.2.4	Restauration de l'herbier	220
ANNEXE 1 – liste des mots clés Utilisés pour la recherche bibliographique		225
ANNEXE 2 - CARTE – Nature des fonds superficiels et dynamiques sédimentaires		226
ANNEXE 3 – CARTE - les masses d'eau dce au sein du parc et les sage littoraux		227

RESUME

Le contexte actuel du Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des pertuis (PNM EGMP) et les mesures prises à l'échelle européenne permettent de soutenir une dynamique en faveur du développement des connaissances et de projets de préservation des écosystèmes. A ce titre, les herbiers de zostères du PNM EGMP constituent un sujet privilégié sur lequel développer les connaissances en vue d'une concrétisation future de projets de préservation (maintien du bon état de conservation) et d'éventuels projets de restauration de ces derniers.

En 2018, des travaux relatifs à la mise en place de conduites de transfert des eaux usées entre les communes de Loix et Ré et de la Couarde-sur-Mer ont fait l'objet d'un arrêté (arrêté préfectoral N° 18-EB-0449) et ont entraîné une dégradation de l'herbier de zostères naines (*Zostera noltei*). Le suivi de la restauration de ce herbier d'environ 40 ha constitue, dans la dynamique de développement des connaissances relatives aux dynamiques de restauration des herbiers et aux processus en jeu, un site expérimental pour l'étude de ces sujets. Au-delà du développement de connaissances, il s'agit de pouvoir appuyer par la suite les gestionnaires, dans l'entreprise d'actions de restauration et/ou de compensation mais aussi apporter un cadre de réflexion et de perspectives visant à mieux suivre la restauration de ces habitats ayant subi une pression.

La première prestation de cette étude permet de dresser l'évolution historique des herbiers dans le secteur suivant les différentes classes de densité au regard d'une proposition d'indicateurs d'impact. Cette section alimente la connaissance de la dynamique des herbiers en lien avec les travaux de pose de canalisation.

La deuxième prestation consiste en une analyse bibliographique permettant (1) d'identifier les facteurs environnementaux contrôlant la croissance des herbiers, (2) de réaliser un état des lieux des différentes méthodes et protocoles de restauration des herbiers et (3) de dresser un inventaire comparatif des ces techniques afin de proposer des techniques appropriées dans le contexte du Parc. Cette partie a permis l'identification de mesures d'évitement et de réduction des impacts ainsi que d'accompagnement pour les collectivités locales.

Enfin, la troisième prestation vise à évaluer l'état de santé des herbiers (taux de recouvrement et de colonisation, densité, hétérogénéité) et à mieux comprendre l'évolution de l'environnement physique du secteur par l'intermédiaire du protocole DCE. Cette section permet de caractériser l'impact local des travaux sur l'état de santé des herbiers de zostère naine. Une importante hétérogénéité des états de santé de l'herbier sur le secteur a été mesurée. Les facteurs qui contrôlent la croissance de l'herbier tels que la teneur en matière organique ou la quantité de macroalgues présentent aussi une importante variabilité spatiale. Les résultats de cette troisième partie couplés au résultats de la première partie ont permis de mettre en évidence des variations topographiques induites par les travaux avec notamment la modification du réseau drainage. Cette dernière prestation ouvre les discussions sur l'impact topographique de ce type de travaux. Lors de prochains travaux de cette nature, un suivi haute résolution (survol drone avec deux capteurs RVB embarqués) de l'évolution topographique de la zone permettrait d'infirmier ou de confirmer les observations réalisées dans cette étude.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la masse d'eau Pertuis Breton (FRGC53) et des stations suivies (Atlas DCE Loire Bretagne).....	17
Figure 2 : Etat écologique de la masse d'eau Pertuis Breton (2020, masse d'eau FRGC53, envlitifremer).....	18
Figure 3 : Plan de recollement des conduites dans la vasière (Syndicat des eaux de Charente-Maritime, 2019).....	19
Figure 4 : Image drone d'avril 2019 (G. Garbaye). Flèche noire : trace de la pelle amphibie. Flèche orange : trace des conduites.....	21
Figure 5. Emprise du site d'étude, secteur de la fosse de Loix sur l'île de Ré, au sein du parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis.....	23
Figure 6. Emprise de l'image satellite SPOT 4 du 20/07/2000 exploitée pour l'analyse des taux de recouvrement de l'herbier dans la fosse de Loix dans le cadre du projet DYNAREST porté par le parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.....	24
Figure 7. Emprise de l'image satellite SPOT 6 du 14/08/2018 exploitée pour l'analyse des taux de recouvrement de l'herbier dans la fosse de Loix dans le cadre du projet DYNAREST porté par le parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.....	25
Figure 8. Emprise de l'image drone de 2020 exploitée pour l'analyse de l'enveloppe d'herbier et des taux de recouvrement associés dans la fosse de Loix avec un zoom sur une portion de l'image.....	26
Figure 9. Photographies argentiques historiques analysées dans le cadre de DYNAREST, datant de gauche à droite, du 13/08/1979, du 29/09/1987 et du 29/08/2000.....	26
Figure 10. Emprises et échelles de digitalisation, secteur de la fosse de Loix.....	29
Figure 11. Extrait d'une des photographies historiques analysées dans le cadre de DYNAREST aux deux échelles de digitalisation utilisées, à gauche : l'échelle 1 :500 représentée par un rectangle rouge sur la figure 6, à droite : l'échelle 1 :150, représentée en pointillés noirs sur la figure 6.....	29
Figure 12. Localisation des canalisations réalisées en 1984 et 2018 sur la fosse de Loix.....	30
Figure 13. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement utilisée dans DYNAREST.....	31
Figure 14. Répartition des relevés de terrain réalisés dans le cadre DE DYNAREST et exploités pour l'analyse de l'image drone sur la fosse de Loix. Relevés réalisés les 17, 21 et 22 septembre 2020.....	34
Figure 15. Répartition des échantillons d'apprentissage par classe pour l'analyse de l'image drone 2020 sur la fosse de Loix dans le cadre De DYNAREST.....	34
Figure 16. Séries temporelles (1958 – 2016) des mesures de hauteur de houle au niveau de la bouée Oléron (données BoBWA-H / HOMERE). Les droites en pointillés vert représentent (du haut vers le bas) Hs, 10ans, Hs 2/3 et Hs 2/5. Les cercles rouges représentent le pic des périodes de tempêtes et leur taille est proportionnelle à la durée de l'évènement (extrait de Casagec Ingénierie, 2017).....	36
Figure 17. Comparaison entre les pics de vagues mesurés par la bouée Oléron Large du réseau Candhis (Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ) et la série temporelle (2015 – 2016) des mesures de hauteur de houle au niveau de la bouée Oléron (données source BoBWA-H /HOMERE). Les cercles rouges représentent le pic des périodes de tempêtes et leur taille est proportionnelle à la durée de l'évènement (extrait de Casagec Ingénierie, 2017). Les triangles représentent les pics de plus de 4 m relevés sur la BD Candhis, numérotés dans l'ordre chronologique. La couleur des pics révèle le degré de concordance entre les deux jeux de données.....	37
Figure 18. Propagation à l'approche de l'île de Ré de houles d'ouest (Hs = 1,6m / Tp = 10s / Dirp =N278) à gauche et houle de sud-ouest (Hs = 2,6m / Tp = 14s / Dirp =N270), à droite (extrait de Casagec Ingénieries, 2017).....	39

Figure 19. Cas de figure extrêmes de la distribution spatiale et des niveaux de MES dans les pertuis (cartes moyennes basées sur des données VIIRS, extrait de Lafon et al. (2018)	40
Figure 20. Exemples emblématiques de distributions de la turbidité de surface au nord de l'île de Ré. 1 : patrons typiques de turbidité observés entre mi-mars et début novembre ; 3 : situation observée tout au long de l'année ; 6 : situation toujours observée entre mi-octobre et mi-avril, d'après Lafon et al. (2018)	41
Figure 21. Exemples emblématiques de distributions de la turbidité de surface au nord de l'île de Ré. 1 situation observée entre mi-mars et début novembre pour des coefficients de marée dans 75% des cas inférieurs à 65 ; 2 : situation observée entre mi-mars et début novembre pour des coefficients de marée dans 75% supérieurs à 60, d'après Lafon et al. (2018)	41
Figure 22. Champs de matières en suspension obtenus par analyse d'images satellitaires. A. Image source VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) acquise le 18/02/2015, résolution spatiale : 750 m, pics de vague de Hsig 3 m, marée de grande vive-eau (103); B. Image source Landsat-8 acquise le 15/04/2014, résolution spatiale : 30 m, pics de vague de Hsig 1,1 m, marée de grande vive-eau (93).	43
Figure 23. Matrices de confusion de la prédiction des taux de recouvrement par classification d'image Spot pour l'année 2000 (à gauche mode bal, à droite mode nobal)	44
Figure 24. Matrices de confusion de la prédiction des taux de recouvrement par classification d'image Spot pour l'année 2018 (à gauche mode bal, à droite mode nobal)	44
Figure 25. Matrices de confusion de la classification de l'image drone 2020 (à gauche mode bal, à droite mode nobal)	45
Figure 26. Présentation d'un extrait du résultat de classification par Random Forest sur une portion de la fosse de Loix à partir de l'image drone 2020. A gauche, un zoom sur l'image drone à droite, les classes prédites	46
Figure 27. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus dans le cadre du projet Dynarest par photo-interprétation de l'image du 13/08/1979 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix, sur le territoire du parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis	47
Figure 28. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus dans le cadre du projet Dynarest par photo-interprétation de l'image du 29/09/1987 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix , sur le territoire du parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis	49
Figure 29. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus dans le cadre du projet Dynarest par photo-interprétation de l'image du 29/08/2000 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix, sur le territoire du parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis	51
Figure 30. Répartition des surfaces occupée par les herbiers pour les trois taux de recouvrement DCE obtenus par analyse de l'image SPOT de 2000 dans la fosse de Loix	52
Figure 31. Cartographie des enveloppes d'herbier en fonction du taux de recouvrement obtenue par le traitement de l'image SPOT de 2000 sur la fosse de Loix, à gauche : composition colorée Proche Infra Rouge, Rouge, Vert, à droite : résultat de la classification	52
Figure 32. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus par analyse de l'image SPOT du 20/07/2000 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix.....	54
Figure 33. Répartition des surfaces des trois taux de recouvrement SPOT 2018 dans l'ensemble de la fosse de Loix (Parc Naturel Marins de l'Estuaire de la Gironde et de le la Mer des Pertuis)	55
Figure 34. Répartition des taux de recouvrement prédits dans DYNAREST à l'intérieur des enveloppes de zostères naines prédites dans CartoHeco à partir de l'image SPOT de 2018 sur totalité de la fosse de Loix.....	55

Figure 35. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus par analyse de l'image SPOT du 14/08/2018 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix.....	57
Figure 36. Répartition des surfaces des trois taux de recouvrement drone 2020 dans la fosse de Loix.....	58
Figure 37. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus par analyse de l'image drone de 2020 sur le secteur de la fosse de Loix	59
Figure 38. Emprise de l'acquisition drone de 2020 et du secteur d'analyse restreint autour de la zone de travaux - Secteur de la fosse de Loix	60
Figure 39. Evolution de la surface totale d'herbier dans la fosse de Loix, secteur restreint et hors secteur restreint discriminés (la résolution des images source est exprimée entre parenthèses associée à l'année d'acquisition). Pour 2000 et 2020, nous avons retenu les sources de données les plus fiables et/ou plus précises sur le plan de la résolution spatiale.	61
Figure 40. Evolution de la surface d'herbier dans la fosse de Loix, à l'intérieur du secteur restreint, au total et en tenant compte du taux de recouvrement (la résolution des images source est exprimée entre parenthèses associée à l'année d'acquisition). Pour 2000 et 2020, nous avons retenu les sources de données les plus fiables et/ou plus précises sur le plan de la résolution spatiale.	61
Figure 41. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1979 (0.5 m) et 1987 (0.5 m) sur la fosse de Loix	66
Figure 42. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1987 (0.5 m) et 1989 (20 m) sur la fosse de Loix	67
Figure 43. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1989 (20 m) et 1997 (20 m) sur la fosse de Loix	68
Figure 44. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1987 (0.5 m) et 2000 (0.5 m) sur la fosse de Loix	69
Figure 45. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1997 (20 m) et 2000 (20 m) sur la fosse de Loix	70
Figure 46. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 1997 (20 m) et 2000 (0.5 m) sur la fosse de Loix	71
Figure 47. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2000 (20 m) et 2006 (10 m) sur la fosse de Loix	72
Figure 48. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2000 (0.5 m) et 2006 (10 m) sur la fosse de Loix	73
Figure 49. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2006 (10 m) et 2014 (2 m) sur la fosse de Loix.....	74
Figure 50. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2014 (2 m) et 2018 (6 m) sur la fosse de Loix.....	75
Figure 51. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2018 (6 m) et 2020 (3 m) sur la fosse de Loix.....	76
Figure 52. Evolution des surfaces et taux de recouvrement d'herbier de zostères naines entre 2018 (6 m) et 2020 (0.025 m) sur la fosse de Loix.....	77
Figure 53. Emplacement des canalisations de 1984 et 2018 sur l'image de 2018, la Pléiades de 2020 et l'acquisition drone de 2020.....	77
Figure 54. Découpage de la zone d'étude en sous-zones afin de faciliter l'interprétation.....	78
Figure 55. Série temporelle d'images très haute résolution utilisée dans l'analyse des impacts des travaux de 1984 et 2018 sur la fosse de Loix.....	79
Figure 56. En haut : Colonisation des traces de véhicule par de l'herbier visible sur l'image drone de 2020, en bas : superposition de 4 stations terrain réalisées par Seaboost en 2020 sur l'image drone.....	81

Figure 57. Secteurs d'apparition et disparition d'herbier en dehors du secteur retreint	82
Figure 58. Recolonisation de l'herbier dans l'emplacement de la canalisation de 1984	83
Figure 59. Secteurs présentant une modification des taux de recouvrement de l'herbier.....	84
Figure 60. Secteurs avec une modification des taux de recouvrement en dehors du périmètre restreint.....	86
Figure 61. Apparition d'un micro-chenal au niveau de la canalisation de 1984.....	87
Figure 62. Modification du réseau de drainage à proximité de la canalisation de 1984	88
Figure 63 : nomenclature courante pour decrire les caracteristiques des phanerogames marines.....	93
Figure 64 : Cartographie des herbiers de zosteres naines au sein du pnm egmp.....	94
Figure 65 : Localisation des herbiers de zostères marines au sein du pnm egmp	95
Figure 66 : schema a l'echelle de Zostera noltei et zostera marina	98
Figure 67 : Localisation des projets de restauration des herbiers de zostere.....	100
Figure 68 : Schema du systeme d'herbier artificiel sea-art. Source : (Villanueva & Taphorn, 2019)	106
Figure 69: Vue de face d'une ligne de roselière (seaboost, Joffrey Capet)	107
Figure 70: Photographie du dispositif Seaboost en cours d'expérimentation au sein du Parc Naturel marin du Bassin d'Arcachon, (seaboost, Alexandre Musnier, le 19/10/2020)	107
Figure 71 : Localisation des grandes zones d'herbiers de zostères naines au sein du parc naturel marin de l'estuaire de la gironde et mers des pertuis.....	153
Figure 72 : Cartographie des vitesses maximales des courants de maree sur les secteurs d'herbier du parc	154
Figure 73: Representation des bathymetries au sein du par cet sur les secteurs d'herbiers	155
Figure 74: Schéma de la sequence erc.	162
Figure 75: Zone de survol globale divisée en 4 secteurs se chevauchant + 1 zone localisée. (Source : Mathis Cognat , adapté de Lilian Marolleau, DYNAREST)	172
Figure 76 : Photographie du drone utilisé pour le survol (crédit photo : lilian marolleau de reflet du monde)	173
Figure 77 : Schéma de principe relatif à l'indice de végétation par difference normalisé (source : aerial-shop)	173
Figure 78 : Réflectance en fonction de la longueur d'onde pour diffrents etats de santé de plantes	174
Figure 79 : Zone de survol par drone (environ 40 Ha).....	175
Figure 80: Orthomosaïque du secteur de la station A (cf. le paragraphe concernant le suivi stationnel) acquise avec le capteur : (a.) RVB (b.) multi spectral GNDVI (c.) multi spectral OSAVI et (d.) multi spectral NDVI.	176
Figure 81 : Emprise de l'image drone de 2020 exploitee pour l'analyse de l'enveloppe d'herbier et des taux de recouvrement associes dans la fosse de loix avec un zoom sur une portion de l'image	177
Figure 82 : Cartographie des enveloppes de zosteres naines et taux de recouvrement associes obtenus par analyse de l'image drone de 2020 sur le secteur de la fosse de loix	178
Figure 83 : Repartition des surfaces des trois taux de recouvrement drone 2020 dans la fosse de loix.....	178
Figure 84 : Exemple de grille d'échantillonnage dans un herbier de Zostera noltei (Auby et al., 2018)	181
Figure 85: Localisation des stations positionées dans le cadre du projet dynarest – Création des grilles sous QGIS. PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis.....	182
Figure 86: Emprise de la grille et localisation des points de la station A (Projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	183

Figure 87: Emprise de la grille et localisation des points de la station B (Projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	184
Figure 88: Emprise de la grille et localisation des points de la station C (Projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	185
Figure 89 : Emprise de la grille et localisation des points de la station D (Projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	186
Figure 90: Photographies de quadrat (à gauche) avec et (à droite) sans macroalgue – Station C point E3 (crédit photo : Mathis Cognat le 17/09/2020, DYNAREST- PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	186
Figure 91: Ajustement des paramètres de teinte, de saturation et de luminosité sous Image J pour la point A2 de la station A. Projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis.....	187
Figure 92: Prélèvement d'un échantillon de sédiment pour analyse de teneur en matière organique (crédit photo : Alice Gavaille le 17/09/2020, projet DYNAREST - PARC Naturel marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis).....	188
Figure 93 : Vues d'ensemble de la station A (crédit photo : Mathis Cognat le 18/09/2020, DYNAREST).....	192
Figure 94 : Vues d'ensemble de la station B (crédit photo : Mathis Cognat le 18/09/2020, DYNAREST).....	192
Figure 95 : Vues d'ensemble de la station C (crédit photo : Mathis Cognat le 17/09/2020, DYNAREST).....	193
Figure 96 : Vues d'ensemble de la station D, station témoin (crédit photo : Mathis Cognat le 17/09/2020, DYNAREST).....	193
Figure 97 : Photographies de la station A réalisées dans le cadre du protocole DCE. Photographie prise en (a) A1 en direction de F5, (b) A5 en direction de F1, (c) F1 en direction de A5 et (d) F5 en direction de A1.....	196
Figure 98 : Spatialisation du taux de recouvrement pour la station A.....	196
Figure 99 : Comparaison des taux de recouvrement relevés sur le terrain et ceux extraits de l'image drone 2020.....	197
Figure 100 : Photographies de la station B réalisées selon le protocole DCE. Photographie prise en (a) A1 en direction de F5, (b) A5 en direction de F1, (c) F1 en direction de A5 et (d) F5 en direction de A1.....	198
Figure 101 : Comparaison des taux de recouvrement relevés sur le terrain et ceux extraits de l'image drone 2020.....	199
Figure 102 : Photographies de la station C réalisées dans le cadre du protocole DCE. Photographie prise en (a) A1 en direction de F5, (b) A5 en direction de F1, (c) F1 en direction de A5 et (d) F5 en direction de.....	200
Figure 103 : Spatialisation du taux de recouvrement pour la station C.....	200
Figure 104 : Comparaison des taux de recouvrement relevés sur le terrain et ceux extraits de l'image drone 2020.....	201
Figure 105 : Photographies de la station D réalisées dans le cadre du protocole DCE. Photographie prise en (a) A1 en direction de F5, (b) A5 en direction de F1, (c) F1 en direction de A5 et (d) F5 en direction de A1.....	202
Figure 106 : Spatialisation du taux de recouvrement pour la station D.....	202
Figure 107 : Comparaison des taux de recouvrement relevés sur le terrain et ceux extraits de l'image drone 2020.....	203
Figure 108 : Taux de recouvrement et dispersion des valeurs pour les 4 stations suivies.....	204
Figure 109 : Presence/absence et pourcentage de biomasse (par rapport à la plus forte valeur mesurée) de macroalgues vertes sur la grille de points échantillonnés sur la station A (- : Absence ; X : présence non échantillonnée ; valeurs : présence échantillonnée).....	205

Figure 110 : presence/absence et pourcentage de biomasse (par rapport à la plus forte valeur mesurée) de macroalgues vertes sur la grille de points échantillonnés sur la station B (- : Abscence ; X : presence non échantillonnée ; valeurs : présence échantillonnée).....	206
Figure 111 : presence/absence et pourcentage de biomasse (par rapport à la plus forte valeur mesurée) de macroalgues vertes sur la grille de points échantillonnés sur la station C (- : Abscence ; X : presence non échantillonnée ; valeurs : présence échantillonnée).....	206
Figure 112 : presence/absence et pourcentage de biomasse (par rapport à la plus forte valeur mesurée) de macroalgues vertes sur la grille de points échantillonnés sur la station D (- : Abscence ; X : presence non échantillonnée ; valeurs : présence échantillonnée).....	207
Figure 113 : Répartition massique des particules en fonction de leur diamètre pour les stations B, C et D (Projet DYNAREST – Parc Naturel Marin de l'estuaire de la gironde et de la mer des pertuis)	211

LISTE DES TABLES

Tableau 1. Synthèse des données utilisées pour l'analyse de l'évolution de l'herbier de Loix (Ile de Ré) dans le cadre de DYNAREST	28
Tableau 2. Nombre de tempêtes et Hs max mesurées entre 2010 et 2016 (données BoBWA-H / HOMERE) et 2016 – 2020 (données Candhis, campagne Oléron Large)	38
Tableau 3. Surfaces couvertes en hectare et nombre de polygones associés pour chacun des trois taux de recouvrement d'herbier dans la fosse de Loix pour l'année 1979	48
Tableau 4. Surfaces couvertes en hectare et nombre de polygones associés pour chacun des trois taux de recouvrement d'herbier dans la fosse de Loix pour l'année 1987	50
Tableau 5. Surfaces couvertes en hectare et nombre de polygones associés pour chacun des trois taux de recouvrement d'herbier dans la fosse de Loix pour l'année 2000	50
Tableau 6. Surfaces couvertes en hectare et nombre de polygones associés pour chacun des trois taux de recouvrement d'herbier dans la fosse de Loix pour l'année 2000 à partir d'une image SPOT	53
Tableau 7. Surfaces couvertes en hectare et nombre de polygones associés pour chacun des trois taux de recouvrement d'herbier dans la fosse de Loix pour l'année 2018 à partir d'une image SPOT	56
Tableau 8. Surface des enveloppes par taux de recouvrement de l'herbier de zostères naines de l'ensemble des données utilisées pour l'analyse sur la fosse de Loix, dans le périmètre restreint autour de la zone de travaux. Les surfaces sont exprimées en hectares.....	62
Tableau 9. Surface des enveloppes de l'herbier de zostères naines de l'ensemble des données utilisées pour l'analyse sur la fosse de Loix, dans le périmètre de l'acquisition de l'image drone 2020. Les surfaces sont exprimées en hectares.....	62
Tableau 10. Evolution des surfaces et taux de recouvrement associés de l'herbier entre 1978 et 2020 sur la fosse de Loix pour les images de haute résolution à très haute résolution (Surfaces indiquées en hectares).....	63
Tableau 11. Evolution des surfaces des enveloppes d'herbier de zostères naines entre 1979 et 2020 sur l'emprise d'acquisition de l'image drone 2020 dans la fosse de Loix pour les images de haute résolution à très haute résolution (Surfaces indiquées en hectares)	65
Tableau 12 : definition des descripteurs et niveau de qualification	144
Tableau 13 : evaluation qualitative et comparative des méthodes des protocoles de restauration des herbiers.....	145
Tableau 14: Activités et pressions potentielles exercées sur les herbiers dans les 3 secteurs du parc présentant des herbiers de zostere	156
Tableau 15: mesures de gestion pour l'évitement et la reduction des impacts sur les herbiers de zostère.....	158
Tableau 16: mesures a mettre en oeuvre par un porteur de projet dans le cadre de la de la séquence ERC	165
Tableau 17: inventaire de mesures d'accompagnement.....	166
Tableau 18: mesures d'evitement et de reduction des impacts des activités menees au sein du parc.....	168
Tableau 19: Paramètres météorologiques et de marées lors des acquisitions de données sur le terrain	180
Tableau 20: Localisation et paramètres relatifs à l'échantillonnage de la station A.....	182
Tableau 21 : Localisation et paramètres relatifs à l'échantillonnage de la station B.....	183
Tableau 22: Localisation et paramètres relatifs à l'échantillonnage de la station C.....	184
Tableau 23: Localisation et paramètres relatifs à l'échantillonnage de la station D	185
Tableau 24 : Valeurs attribuées aux différentes classes de recouvrement.....	187
Tableau 25: Code échantillon des analyses granulométrique réalisées.....	188
Tableau 26: Code échantillon des analyses en matière organique réalisées	188

Tableau 27: Code échantillon des prélèvements en macroalgues	190
Tableau 28 : Taux de recouvrement	195
Tableau 29 : Matrice de confusion obtenue pour la comparaison des taux de recouvrement prédits et ceux obtenus sur le terrain pour la station A	197
Tableau 30 : Matrice de confusion obtenue pour la comparaison des taux de recouvrement prédits et ceux obtenus sur le terrain pour la station B.....	199
Tableau 31 : Matrice de confusion obtenue pour la comparaison des taux de recouvrement prédits et ceux obtenus sur le terrain pour la station C	201
Tableau 32 : Matrices de confusion obtenues pour la comparaison des taux de recouvrement prédits et ceux obtenus sur le terrain	203
Tableau 33 : Moyennes et écarts-types des taux de recouvrement pour chacune des stations .	204
Tableau 34 : Poids sec (g) de macroalgues moyennées par station.....	207
Tableau 35 : Teneurs en matière organique (%) (en jaune les valeurs abérantes non prises en compte dans le calcul des moyennes et des écarts-types).....	208
Tableau 36 : Résultats sédimentaires issus de la procédure GRAdistat (blott & Pye, 2001).....	210
Tableau 37 : Occurrence, gravité et proposition d'accompagnement pour les causes naturelles et anthropiques de dégradation des herbiers de phanérogames marines	214

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1 Contexte global

1.1.1 Le Parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis : un espace côtier riche et diversifié

Le Parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis (PNM EGPM) constitue un espace côtier diversifié caractérisé par six estuaires dont celui de la Gironde, trois pertuis et une zone ouverte sur l'océan. Cette situation d'interface implique la rencontre au sein du parc d'écosystèmes variés, placés sous l'influence des eaux du panache de la Gironde et des eaux salées de l'océan. Des côtes sableuses, des zones d'estran et des vasières sont particulièrement observées.

Cette diversité d'écosystèmes permet d'héberger une diversité d'espèces de manière permanente ou transitoire avec notamment une avifaune riche ainsi que certaines espèces emblématiques telles que l'anguille et l'esturgeon.

L'ensemble des mouvements d'eaux douce et salée assure la connectivité écologique entre les espaces pour les différentes espèces hébergées et en transit. Ces mouvements permettent une circulation des espèces entre leurs zones de vie, variables au cours de leur cycle de développement et des relations trophiques étroites existent entre ces différentes espèces.

Les écosystèmes du Parc sont les supports, par ailleurs, de nombreuses activités anthropiques – pêche, conchyliculture, plaisance, etc – dont le développement doit s'inscrire dans une logique de préservation durable de ces écosystèmes.

1.1.2 L'herbier de zostères naines : une espèce emblématique porteuse de fonctionnalités écologiques importantes

Les vasières qui couvrent de larges zones d'estran sont des zones privilégiées pour l'installation et le développement d'herbiers marins, notamment de zostères naines. Cette dernière porte des fonctionnalités multiples et constitue une espèce ingénier des écosystèmes – c'est-à-dire dont la présence modifie le milieu et dont les fonctionnalités qu'elle assure permet de maintenir le développement de d'autres espèces dans ce milieu. L'herbier de zostères supporte notamment une fonctionnalité essentielle de zone de nurserie pour de nombreuses espèces de poissons et d'amphihalins. Les herbiers de zostères sont par la même occasion des zones privilégiées pour l'alimentation de l'avifaune en particulier.

Les herbiers de zostères jouent également un rôle dans la stabilisation des sols, la rétention sédimentaire et le contrôle des phénomènes d'érosion par une atténuation de la houle et des courants. Dans ce contexte d'estuaire, où les matières en suspension sont nombreuses, l'herbier intervient en particulier dans la clarification des eaux en favorisant la rétention des particules en suspension.

1.1.3 Une volonté forte des acteurs gestionnaires de développer des connaissances et des projets en faveur de la protection de cette espèce

Le contexte actuel du PNM EGMP et les mesures prises à l'échelle européenne permettent de soutenir une dynamique en faveur du développement des connaissances et de projets de préservation des écosystèmes.

- La création du PNM EGMP en 2015 donne lieu à un plan de gestion défini pour 15 ans (2018-2033). Ce contexte du PNM EGMP favorise en particulier les projets relatifs à l'amélioration des connaissances et à la mise en œuvre concrète de projets et d'expérimentation liés à la préservation du milieu marin au travers notamment de la réduction, la restauration et la compensation des impacts des activités et usages en dernier recours.
- L'Office Français de la Biodiversité est en charge de la mise en œuvre de Natura 2000 en mer sous le pilotage de la direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du Ministère de la transition écologique et solidaire. A ce titre, l'OFB coordonne le Projet européen Life intégré Marha, visant à faire progresser la mise en œuvre de la directive européenne « Habitats Faune Flore », qui définit la politique de Natura 2000. Le projet « Life Marha » se concentre exclusivement sur les habitats naturels marins listés dans cette directive et porte sur la France métropolitaine. Huit habitats sont plus particulièrement ciblés. Il s'agit des bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine, des herbiers, des estuaires, des replats boueux ou sableux exondés à marée basse, des lagunes côtières, des grandes criques et baies peu profondes, des récifs et des grottes marines submergées ou semi-submergées. L'objectif du projet est d'améliorer l'état de conservation de ces habitats naturels marins tout en mobilisant l'ensemble des parties prenantes de Natura 2000 en mer et en utilisant différentes sources de financements. Le Life Marha a démarré le 01/11/2017 et prendra fin le 31/12/2025. Sa mise en œuvre est assurée conjointement par l'OFB et onze autres partenaires.

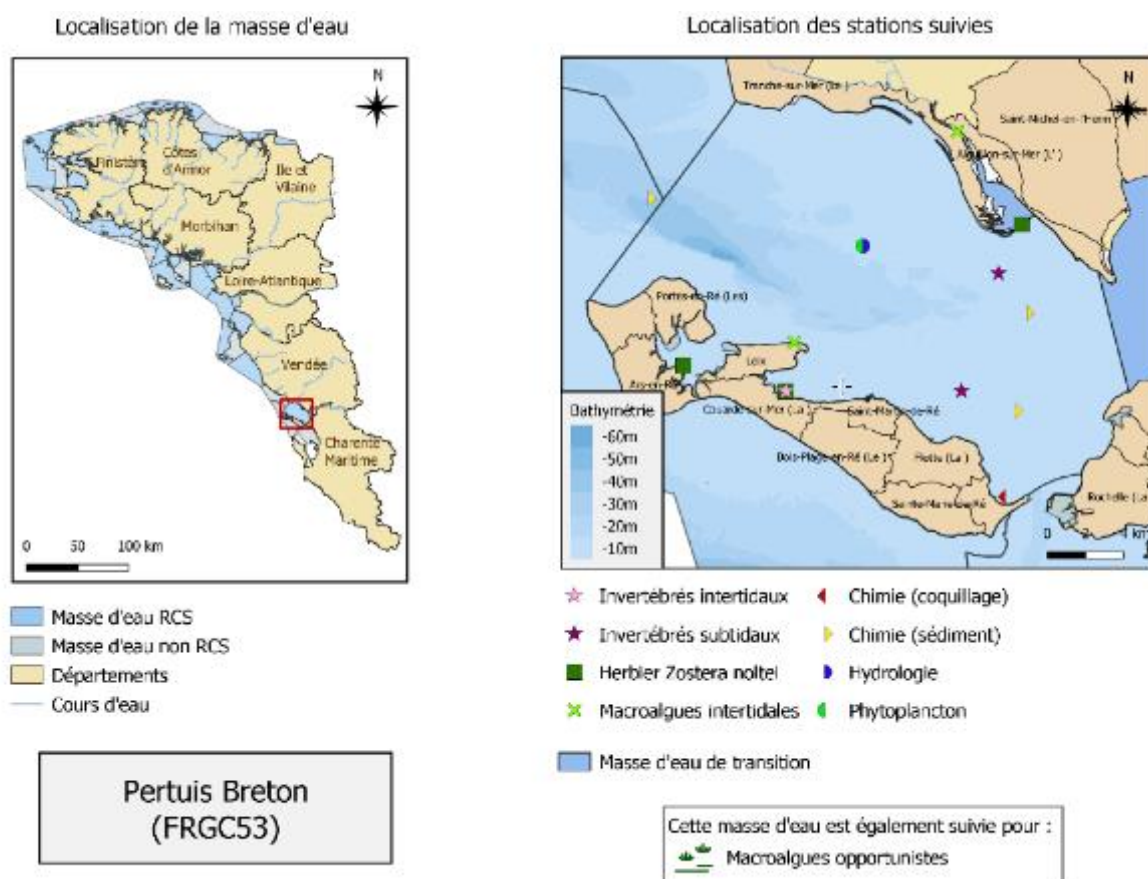
A ce titre, les herbiers de zostères du PNM EGMP constituent un sujet privilégié sur lequel développer les connaissances en vue d'une concrétisation future de projets de préservation (maintien du bon état de conservation) et d'éventuels projets de restauration de ces derniers.

En 2018, des travaux relatifs à la mise en place des conduites de transfert des eaux usées entre les communes de Loix et Ré et de la Couarde-sur-Mer ont fait l'objet d'un arrêté (arrêté préfectoral N° 18-EB-0449) et ont entraîné une dégradation de l'herbier de zostères naines. Le suivi de la restauration de cette zone d'herbier constitue, dans la dynamique de développement des connaissances relatives aux dynamiques de restauration des herbiers et aux processus en jeu, un site expérimental pour l'étude de ces sujets. Au-delà du développement de connaissances, il s'agit de pouvoir appuyer par la suite les gestionnaires, dans l'entreprise d'actions de restauration et/ou de compensation mais aussi apporter un cadre de réflexion et de perspectives visant à mieux suivre la restauration de ces habitats ayant subi une pression.

1.2 Le contexte spécifique de la Fosse de Loix

1.2.1 Zone d'étude

La Fosse de Loix s'inscrit dans la masse d'eau côtière « FRGC53 - Pertuis Breton » de type C3 – Côte vaseuse modérément exposée. Cette masse d'eau de 325 km², bien que soumise aux houles de nord-ouest, est relativement abritée du fait de sa localisation entre la façade nord-est de l'île de Ré et le continent (Figure XX). Sa profondeur moyenne est inférieure à 10 m mais peut dépasser 55 m dans la Fosse de Chevarache. Les fonds sont principalement vaseux à sablo-vaseux avec présence de sables dunaires et de graviers au nord de la masse d'eau. L'amplitude des marées est comprise entre 1 et plus de 6 m (régime macrotidal). La zone intertidale représente moins de 20% de la surface de la masse d'eau mais est toutefois bien présente sur l'île de Ré et la côte vendéenne avec quelques zones rocheuses, des vasières et plages sableuses (Atlas DCE Loire-Bretagne, 2020, masse d'eau FRGC53, envlit-ifremer).



Sources : IFREMER, SHOM, Océau, AELB, OpenStreetMap

FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA MASSE D'EAU PERTUIS BRETON (FRGC53) ET DES STATIONS SUIVIES (ATLAS DCE LOIRE BRETAGNE)

En 2019, l'état écologique global de cette masse d'eau est considéré comme bon d'après le bilan provisoire sur les résultats acquis dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

Etat chimique		Etat écologique					
Niveau de confiance		Niveau de confiance					
Etat chimique		Etat biologique		Etat hydromorphologique		Etat physico-chimique	
Substances de état chimique	(I)	Phytoplancton	(I)	Hydromorphologie	(E)	Température	(I)
		Flore autre que phytoplancton				Oxygène dissous	(I)
		Angiospermes	(I)			Nutriments	(I)
		Macroalgues intertidales	(I)			Transparence	(I)
		Macroalgues subtidales	(NP)				
		Macroalgues opportunistes	(I)				
		Invertébrés benthiques					
		Invertébrés benthiques intertidaux	(I)				
		Invertébrés benthiques subtidaux	(I)				

Etat écologique ou global		Etat chimique	
Non pertinent		Non pertinent	
Inconnu		Inconnu	
Très bon		Bon	
Bon		Mauvais	
Moyen			
Médiocre			
Mauvais			
Inférieur au très bon état			

DI - Données insuffisantes

DNP - Descripteur non prospecté dans cette masse d'eau

ENS - Elément de qualité non suivi

IND - Indicateur non défini

NP - Indicateur non pertinent (absent ou non représentatif)

NS - Pas de contrôle de surveillance dans cette masse d'eau

E - Classement basé sur un avis d'expert

I - Classement basé sur l'indicateur

Niveau de confiance

1: faible

2: moyen

3: élevé

gris : pas d'information

FIGURE 2 : ETAT ECOLOGIQUE DE LA MASSE D'EAU PERTUIS BRETON (2020, MASSE D'EAU FRGC53, ENVLIT-IFREMER)

Le secteur de La Fosse de Loix (Figure 2) est entièrement endigué et l'estran est de nature sablo-vaseuse. L'impact des tempêtes est faible dans ce secteur abrité des régimes de vent d'ouest responsable des fortes houles dans cette zone géographique.

La masse d'eau FRGC53 présente un bon état chimique, biologique et physico-chimique (Figure 2). Par dire d'expert, l'état hydromorphologique est inférieur au très bon état (Figure 2).

1.2.2 Contexte de l'étude : travaux relatifs au transfert des eaux usées

En 2018 (mars et mai 2018), le Syndicat des Eaux de Charente-Maritime a mis en place deux conduites de transfert des eaux usées sur l'estran entre les communes de Loix en Ré et de La Couarde-sur-Mer (Figure 3). Les anciennes conduites (mises en place en 1984) défectueuses n'ont pas été déposées et sont donc présentes à proximité immédiate du tracé des nouvelles. La pose de ces conduites, enfouies entre 1m et 2,5m, sur 1400 m, a dégradé un herbier de zostères naines, habitat particulier à enjeu majeur de préservation pour le Parc naturel marin estuaire de Gironde et de la mer des Pertuis.



FIGURE 3 : PLAN DE RECOLLEMENT DES CONDUITES DANS LA VASIERE (SYNDICAT DES EAUX DE CHARENTE-MARITIME, 2019).

Le Tableau 1 ci-après, extrait du dossier de déclaration au titre de la Loi sur l'Eau déposé par le Syndicat des eaux de Charente-Maritime, donne une appréciation des surfaces potentiellement impactées au niveau du tracé des conduites. La quantification des impacts a été réalisée sur la base d'une cartographie de l'herbier réalisée en 2013 par la Communauté de communes de l'Île de Ré. Une bande tampon de 10m a été retenue. Les surfaces considérées, dans le dossier et présentées dans le tableau, ne prennent en compte que partiellement les surfaces d'herbiers dégradées ou détruites pour le passage des engins.

TABLEAU 1 : EVALUATION DES SURFACES POTENTIELLEMENT IMPACTEES PAR LE PROJET (SYNDICAT DES EAUX DE LA CHARENTE-MARITIME, COMPLEMENTS DES INVENTAIRES REALISES SUR LA ZONE DE TRAVAUX, 2018).

	Herbiers à faible densité	Herbiers à densité moyenne	Herbiers à forte densité
Surface dans la fosse de Loix en 2013 (ha)	42	48	84

Surface potentiellement impactée (ha)	0,34	0,57	0,08
---------------------------------------	------	------	------

Les travaux, soumis à déclaration au titre de la Loi sur l'Eau, ont fait l'objet d'un arrêté préfectoral n°18-EB-0449 et d'un arrêté modificatif n°18-EB-1123 fixant en particulier les modalités de suivis des impacts du projet sur l'herbier de zostères naines en particulier.

L'arrêté préfectoral précise qu'afin de vérifier la recolonisation des herbiers à zostères naines, un suivi par un écologue devra être réalisé sur le tracé des nouvelles canalisations et au niveau du balisage maritime mis en place pendant les travaux (ragage des bouées et ancrés).

Les suivis devront réalisés aux périodes suivantes :

- à la fin du chantier ;
- 2 ans après la fin des travaux soit au printemps de l'année 2020 ;
- 5 ans après la fin des travaux soit au printemps de l'année 2023.

Ce suivi devra être réalisé selon le même protocole que celui adopté pour l'état initial (analyse photographies aériennes et passage d'un drone) [...]. Si à l'issue du dernier, il apparaît que la recolonisation des herbiers n'est pas effective, le bénéficiaire devra proposer des mesures correctives » (arrêté préfectoral n°18-EB-0449). Les rapports de suivis seront remis au prestataire. Ainsi, le projet DYNAREST-noltei contribuera à améliorer :

- la connaissance sur la caractérisation des effets de ce type de travaux en mer ;
- les pratiques en terme de méthodologie de travaux en mer (mesures d'évitement et de réduction visant à préserver l'environnement ;
- le suivi des effets pour mieux les qualifier et les quantifier.

Le maintien de l'état écologique et de la couverture des herbiers de zostères est un des objectifs du plan de gestion du PNM EGMP. Aussi, pour une meilleure connaissance des capacités de restauration de cet habitat suite à une pression anthropique mécanique, le Conseil de gestion du Parc naturel marin a, en date du 9 décembre 2019, approuvé dans son plan d'action 2020, le projet relatif à « l'étude de la capacité de restauration d'un herbier de zostères naines ».

Les conclusions du rapport (G. Garbaye, 2019)¹ d'avril 2019 du syndicat des eaux de la Charente-Maritime relatif au suivi de la recolonisation des herbiers de zostères naines sur la zone de travaux indiquent que les vases ont recouvert les conduites mises en place. En 2019, la trace des conduites est peu visible tandis que celle de la pelle amphibie restent toujours observable.

¹ SYNDICAT DES EAUX DE LA CHARENTE-MARITIME – COMMUNES DE LA COUARDE ET LOIX (17) SUIVI DE RECOLONISATION DES HERBIERS A ZOSTERE NAINE SUR LA ZONE DE TRAVAUX – G. GARBAYE – MAI 2019



FIGURE 4 : IMAGE DRONE D'AVRIL 2019 (G. GARBAYE). FLECHE NOIRE : TRACE DE LA PELLE AMPHIBIE. FLECHE ORANGE : TRACE DES CONDUITES

En raison de la période de la mission (23 avril 2019), il n'est pas possible de distinguer la végétation de l'estran et en particulier d'estimer la repousse des Zostères naines.

On peut cependant estimer à la vue de cette première approche que l'impact de la pose des canalisations a été relativement limité, même si des difficultés techniques sont survenues (G. Garbaye, 2019)¹.

Les observations de la mission du 1er septembre 2019 confirment celles d'avril concernant le recouvrement des conduites mises en place par les vases. En revanche, les traces de la pelle amphibie restent toujours observables. Ce suivi du 1^{er} septembre 2019 (J+ 16 mois des travaux) a également montré que les zostères naines semblaient coloniser les traces. A cette période, le processus de colonisation était à ses débuts et il n'était pas possible d'estimer plus précisément les surfaces regagnées par les zostères sur les zones à faible, moyenne et forte densité.

Cette campagne avait cependant permis d'estimer que l'impact de la pose des canalisations a été limité, même si des difficultés techniques étaient survenues.

2. PRESTATION 1 : EVOLUTION HISTORIQUE DE L'HERBIER

2.1 Objectifs

L'objectif de cette première prestation est d'analyser l'évolution spatio-temporelle, la plus complète possible, de l'emprise spatiale des herbiers de zostères naines sur l'ensemble des estrans de l'île de Ré. Pour ce faire, l'ensemble des données historiques (photographies aériennes anciennes, orthophotographies, images satellites) permettant de spatialiser l'emprise des herbiers en période estivale (développement maximal de la végétation) sont regroupées puis traitées dans le but de dresser des cartographies. Le périmètre temporel de cette analyse s'étend de 1979 et 2020.

Une analyse sera faite en 2020 afin de compléter cette série et spatialiser les changements survenus depuis le chantier réalisé en 2018.

Les cartographies rendront compte du pourcentage de recouvrement des herbiers selon les trois classes DCE :

- recouvrement inférieur à 25 % - Herbier très peu dense : herbier discontinu et très souvent hétérogène avec des tâches disséminées ou des pieds dispersés en faible densité ;
- recouvrement compris entre 25 % et 75 % - Herbier moyennement dense : herbier discontinu présentant une alternance de tâches recouvertes et de zones de substrat nu ;
- recouvrement supérieur à 75 % - Herbier très dense : herbier continu et homogène présentant une forte couverture foliaire.

Le traitement des cartographies obtenues et la projection, à l'aide d'un logiciel SIG (Système d'information géographique), des données herbiers (polygone raster) sur un maillage fin permettra :

- (1) d'estimer et de spatialiser les surfaces perdues et colonisées entre 1979 et 2020 et en particulier, de quantifier l'impact des travaux (1984 et 2018) sur l'évolution de l'emprise (avant/après travaux) des herbiers de zostère naine et leurs taux de recouvrement ;
- (2) de proposer des hypothèses sur les facteurs susceptibles d'avoir influencé dans le temps la dynamique ou la croissance des herbiers dans le secteur de Loix ;
- (3) de faire la synthèse de ces analyses permettant notamment d'identifier les zones susceptibles d'accueillir de futurs projets de restauration ou d'accompagnement écologique d'opérations de travaux potentiels

2.2 Données et méthodes

2.2.1 Zone d'étude

La zone d'étude concerne la fosse de Loix, sur l'île de Ré, elle fait partie du PNMEGMP (Figure 5). L'emprise spatiale étudiée couvre environ 327 ha, constituée d'un substrat propice au développement de l'herbier.

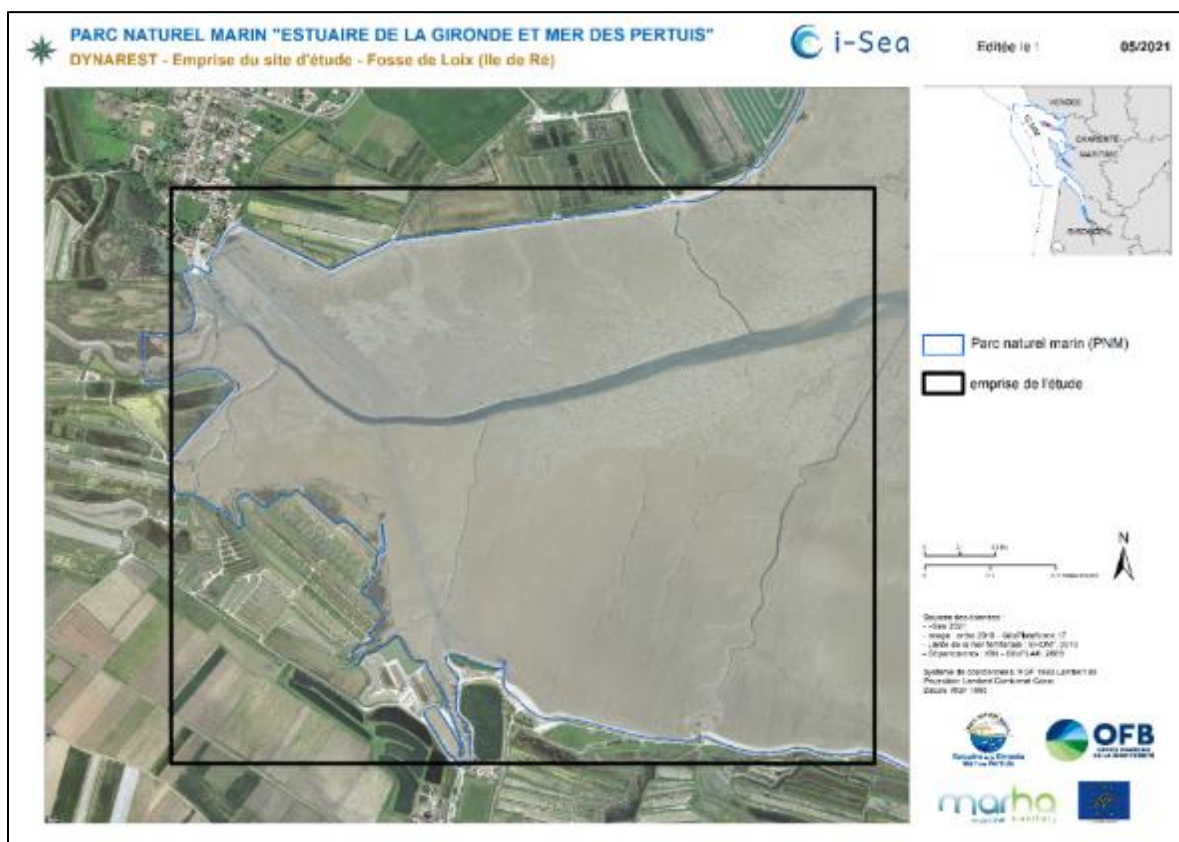


FIGURE 5. EMPRISE DU SITE D'ETUDE, SECTEUR DE LA FOSSE DE LOIX SUR L'ILE DE RE, AU SEIN DU PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

2.2.2 Images exploitées

2.2.2.1 Description technique des capteurs exploités

Les images de trois types de capteurs ont été exploitées. Les descriptions techniques de ces capteurs sont les suivantes :

- SPOT 4 est un satellite équipé d'un capteur multispectral constitué des quatre bandes spectrales, 2 dans le domaine visible (Vert et Rouge), une troisième dans le Proche Infra Rouge et la quatrième dans le Moyen Infra Rouge. Conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales, il a été lancé en 1998. La résolution au sol des pixels SPOT 4 est de 20 m (1 pixel représente une surface au sol de 20 m de côté).
- SPOT 6 et SPOT 7 constituent la constellation de dernière génération des satellites SPOT. Conçus et mis en orbite par Airbus, il s'agit également de satellites munis de capteurs optiques caractérisés par quatre bandes spectrales, dans les longueurs d'onde Bleu, Vert, Rouge et Proche Infrarouge, complétées d'une bande panchromatique. La résolution des pixels au sol est de 6 m en multispectral. La bande panchromatique a une résolution de spatiale de 1,5 m.

- L'image drone a été réalisée par un drone (DJI - Phantom 4 Multispectral) muni du capteur multispectral Six CMOS de 1/2,9 pouce (dont un capteur RGB et cinq capteurs monochromes pour l'imagerie multispectrale). La résolution des pixels au sol est de 2,5 cm.

2.2.2.2 Année 2000

L'image SPOT4 exploitée dans le cadre de cette étude est présentée sur la Figure 6. Il s'agit d'une donnée satellitaire commandée par le PNMEGMP dans le cadre du contrat de recherche et développement relatif à la CARTOgraphie des Habitats bEnthiques COtiers (projet CartoHECo) du Parc. L'image SPOT4 a été acquise le 20/07/2000.

2.2.2.3 Année 2018

L'image SPOT6 exploitée dans le cadre de cette étude est présentée sur la Figure 7. Il s'agit d'une donnée satellitaire commandée par le PNMEGMP (projet CartoHECo). L'image SPOT6 a été acquise le 14/08/2018.



FIGURE 6. EMPRISE DE L'IMAGE SATELLITE SPOT 4 DU 20/07/2000 EXPLOITEE POUR L'ANALYSE DES TAUX DE RECOUVREMENT DE L'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX DANS LE CADRE DU PROJET DYNAREST PORTE PAR LE PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS



FIGURE 7. EMPRISE DE L'IMAGE SATELLITE SPOT 6 DU 14/08/2018 EXPLOITEE POUR L'ANALYSE DES TAUX DE RECOUVREMENT DE L'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX DANS LE CADRE DU PROJET DYNAREST PORTE PAR LE PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

2.2.2.4 Drone

L'image drone exploitée dans le cadre de cette étude est présentée sur la Figure 8. Il s'agit d'une donnée commandée par le PNM dans le cadre du présent contrat. L'image a été acquise entre les 17 et 22 septembre 2020 et a été livrée géoréférencée par Reflet du Monde.

Cette image, résultat de la mosaïque produite par l'ensemble des scènes acquises par le capteur embarqué, présente des problèmes de radiométrie importants. En effet, une grande hétérogénéité en termes de réponses spectrales est observée sur la Figure 8. Une première zone (nord-ouest) semble bien éclairée et les traces de l'acquisition drone sont peu visibles (empreinte au sol de la fauchée du capteur). Par ailleurs, une rupture brutale dans la colorimétrie (une forte impression de « sombre ») est visible où les traces individuelles de l'acquisition sont bien observables. Une zone est ensuite de nouveau bien éclairée comme la première mais cette fois avec l'artefact de traces bien visible. Cette forte hétérogénéité dans la radiométrie de l'image est problématique pour analyser l'image de façon homogène.

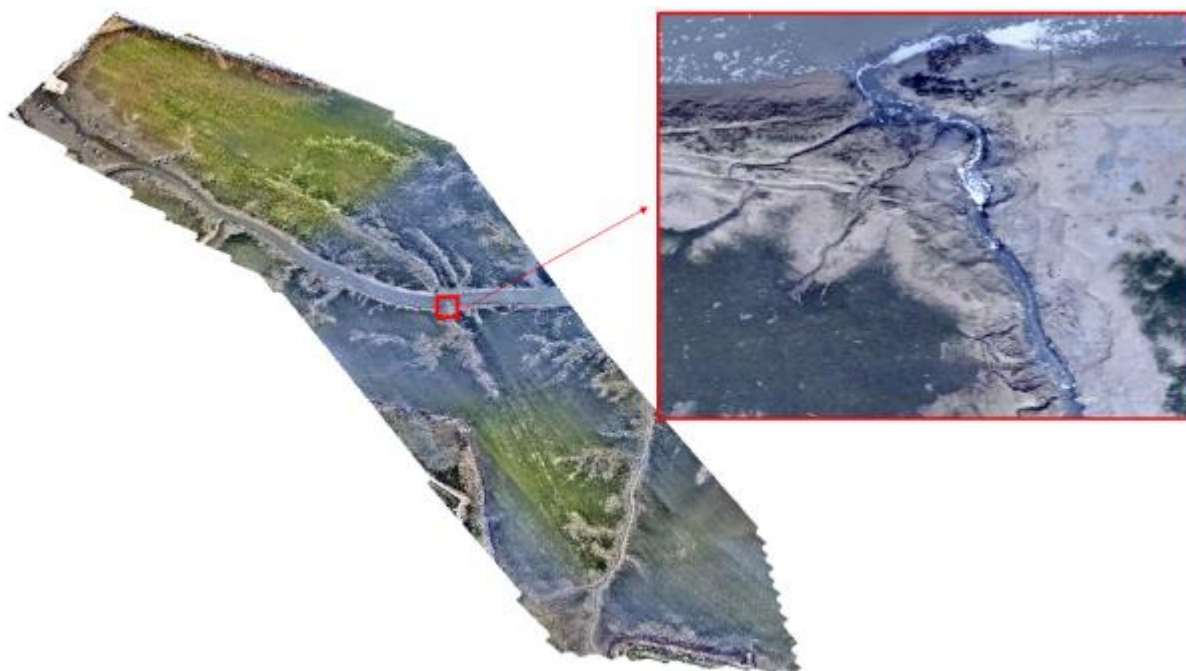


FIGURE 8. EMPRISE DE L'IMAGE DRONE DE 2020 EXPLOITEE POUR L'ANALYSE DE L'ENVELOPPE D'HERBIER ET DES TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES DANS LA FOSSE DE LOIX AVEC UN ZOOM SUR UNE PORTION DE L'IMAGE

2.2.2.5 Archives argentiques

Trois photographies argentiques historiques ont été exploitées dans le cadre de cette étude. Elles ont été téléchargées sur le site Remonter le temps² de l'IGN, puis géoréférencées par i-Sea avec comme image de référence l'orthophotographie de 2018³ d'une résolution de 50 cm.



FIGURE 9. PHOTOGRAPHIES ARGENTIQUES HISTORIQUES ANALYSEES DANS LE CADRE DE DYNAREST, DATANT DE GAUCHE A DROITE, DU 13/08/1979, DU 29/09/1987 ET DU 29/08/2000

2.2.2.6 Ortholittorales

Les ortholittorales V1 et V2 ont été téléchargées de puis le site du ministère⁴. Elles ont été acquises, respectivement en 2000 et 2012, plus précisément le 29/08 pour le survol de 2000.

² <https://remonterletemps.ign.fr/>

³ <https://www.geoplateforme17.fr/telechargement-ortho-2018>

⁴ <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/orthophotographie-du-littoral-r181.html>

2.2.3 Synthèse des données historiques collectées

Toute l'archive cartographique concernant les herbiers sur le secteur du Parc Naturel Marin Gironde et Mer des Pertuis a été rassemblée par i-Sea, en vue de produire une analyse de la dynamique de l'enveloppe surfacique des herbiers de zostères naines. Il s'agit au total de 12 images couvrant la fosse de Loix.

Les données utilisées pour l'analyse sont présentées dans le Tableau 2.

2.2.4 Cartographie par photo-interprétation

A partir des photographies historiques de 1979, 1987 et 2000 géoréférencées, les enveloppes d'herbier ont été digitalisées à deux échelles : (1) au 1/150 en tenant compte du taux de recouvrement dans un périmètre restreint autour de la zone de travaux et (2) au 1/500 sans distinction des taux de recouvrement dans un périmètre élargi. Le secteur restreint couvre environ 52 ha de la fosse de Loix et le secteur élargi s'étend sur environ 327 ha. Les emprises de ces deux zones de digitalisation sont présentées sur la Figure 10. Dans la suite du document, les expressions « fosse de Loix » ou « secteur élargi » et « secteur restreint » ou « périmètre restreint » seront utilisées pour faire référence à ces deux périmètres d'analyse.

La Figure 11 présente un exemple des deux échelles de digitalisation d'un même secteur.

Afin de représenter sur les rendus cartographiques les travaux réalisés en 1984 et 2018, les conduites installées ces deux années ont été tracées, respectivement sur l'archive historique de 1987 et sur l'orthophotographie de 2018. Ces deux tracés sont représentés sur la Figure 12.

TABLEAU 2. SYNTHÈSE DES DONNÉES UTILISÉES POUR L'ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE L'HERBIER DE LOIX (ILE DE RE) DANS LE CADRE DE DYNAREST

Date	Support	Résolution	Niveau d'eau / Coeff.de marée	Archive traitée et bancarisé		Traitement réalisé dans le cadre de DYNAREST		
				Enveloppe	Taux DCE	Enveloppe	Taux DCE	Indicateurs d'impacts
13/08/1979	Ortho- photographie	0.5 m	Horaire de la prise de vue non renseigné			x	x	x
29/09/1987	Ortho- photographie	0.5 m	Horaire de la prise de vue non renseigné			x	x	x
03/10/1989	SPOT 1	20 m	1.65 m	x	x			
22/08/1997	SPOT 1	20 m	1.42 m	x	x			
29/08/2000	Ortholittorale V1	0.5 m	Horaire de la prise de vue non renseigné			x	x	x
20/07/2000	SPOT 4	20 m	1.87 m	x			x	
20/06/2007	SPOT 5	10 m	2.28 m	x	x			
2012	Ortholittorale V2	0.5 m	Horaire de la prise de vue non renseigné					x
12/09/2014	FORMOSAT 2	2 m	1.71 m / 106	x	x			
14/08/2018	SPOT6/7	6 m	1.18 m / 107	x			x	
Avril, août et octobre 2020	Pléiades / Planet multi temporel	3 m	multidates	x	x			
17-22/09/2020	Drone	0.025 m	multidates / vive- eau coeff. min. 87, max. 113			x	x	x



FIGURE 10. EMPRISES ET ECHELLES DE DIGITALISATION, SECTEUR DE LA FOSSE DE LOIX

1:500

1:150



FIGURE 11. EXTRAIT D'UNE DES PHOTOGRAPHIES HISTORIQUES ANALYSEES DANS LE CADRE DE DYNAREST AUX DEUX ECHELLES DE DIGITALISATION UTILISEES, A GAUCHE : L'ECHELLE 1 :500 REPRESENTEE PAR UN RECTANGLE ROUGE SUR LA FIGURE 6, A DROITE : L'ECHELLE 1 :150, REPRESENTEE EN POINTILLES NOIRS SUR LA FIGURE 6.



FIGURE 12. LOCALISATION DES CANALISATIONS REALISEES EN 1984 ET 2018 SUR LA FOSSE DE LOIX

2.2.5 Cartographie par classification d'image

2.2.5.1 Méthodologie

Le modèle de classification pour le traitement de l'image drone de 2020 est entraîné et appliqué pour cartographier l'ensemble des habitats présents sur la zone d'étude, cette stratégie permettant de bien isoler les surfaces d'herbier.

Les classes considérées sont les algues vertes, le biofilm, l'eau, la vase, les trois classes de zostères ainsi qu'une classe « autre » qui rassemble les bateaux, les digues et enrochements. Une base de données photo-interprétée sera donc constituée et servira à l'entraînement d'un modèle de classification Random Forest. La prédiction de cette classification permettra d'extraire les enveloppes des surfaces d'herbier détectées et leurs taux de recouvrement associés. Concernant la cartographie des taux de recouvrement, les classes considérées sont les trois indices DCE, 0-25%, 25-75% et 75-100%.

La méthodologie déployée pour la production de ces cartographies est assez classique en télédétection, une représentation simplifiée est présentée Figure 13. Elle intègre les étapes suivantes :

- Extraction d'information (calcul d'indices de végétation ou pseudo-canaux) : NDVI5: Normalized Difference Vegetation Index ; OSAVI6 : Optimized Soil Adjust Vegetation Index et GNDVI7 : Green Normalized Difference Vegetation Index,
- concaténation des bandes et indices ;
- sélection aléatoire des échantillons (au niveau pixel) pour constituer une base de données d'apprentissage (ou entraînement) et une base de données de test (qui sera utilisée pour évaluer la capacité de prédiction du modèle) ;

⁵ Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti, E.P., and Becker, M.A., eds. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Proceedings from a conference held 10-14 December 1974 at the National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office, Goddard Space Flight Centre, Washington, D.C.* 309-317

⁶ Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107, doi: [10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).

⁷ Buschmann, C., Nagel, E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 14:711-722.

- sélection de la meilleure combinaison d'informations (sélection de variables) ;
- apprentissage du modèle ;
- évaluation du modèle ;
- prédiction de l'ensemble des pixels de l'image ;
- régularisation spatiale.

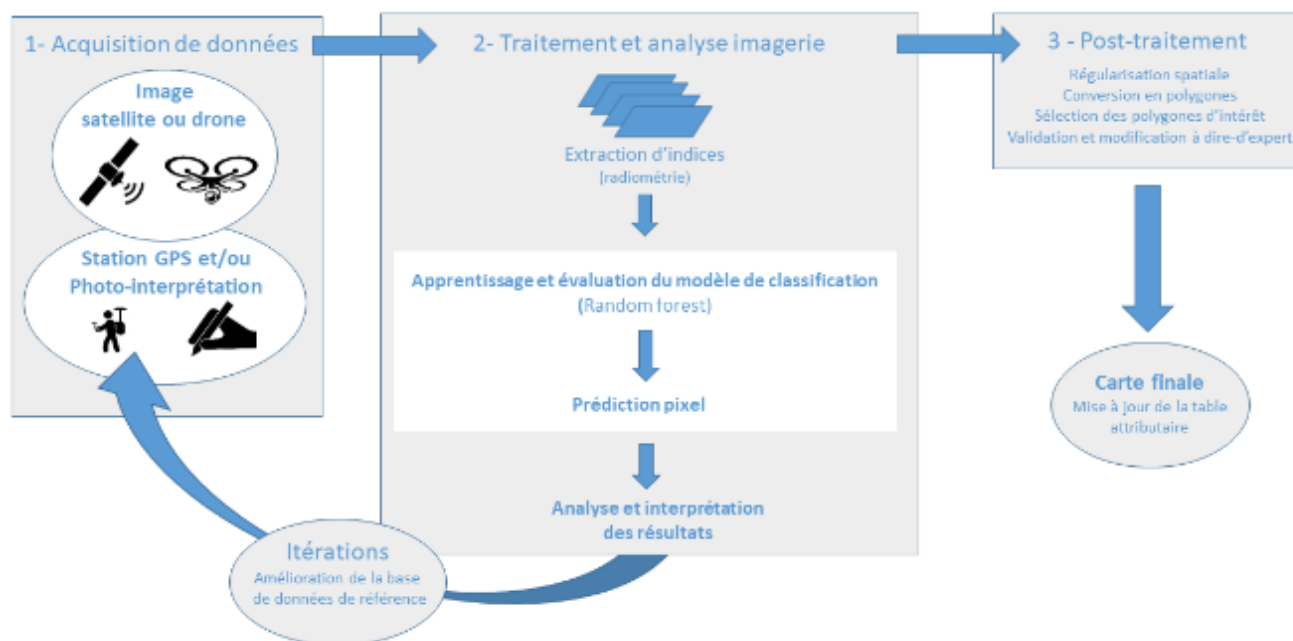


FIGURE 13. SCHEMA FONCTIONNEL DECRIVANT LA METHODE DE TRAITEMENT UTILISEE DANS DYNAREST

Plusieurs itérations sont nécessaires pour aboutir à la cartographie finale. A chaque version produite, une phase de contrôle et d'interprétation est menée par un opérateur expert et de nouveaux échantillons sont ajoutés par photo-interprétation de façon à guider au mieux la version suivante du modèle, soit pour certaines classes difficiles, soit dans certaines zones particulières de l'image. Lorsque l'ajout de nouveaux échantillons ne modifie plus significativement les résultats et qu'un certain niveau de satisfaction est atteint le processus s'arrête et la prédiction finale est post-traitée.

2.2.5.2 Mise en œuvre pratique

2.2.5.2.1 Echantillonnage

Les échantillons d'apprentissage ont été créés par photo-interprétation à partir des images SPOT 2000 et 2018 pour la détermination respective des taux de recouvrement au sein des enveloppes d'herbier réalisées dans le cadre du projet CartoHECo.

Concernant la cartographie de l'herbier réalisée à partir de l'image drone, les échantillons d'apprentissage proviennent à la fois des données collectées sur le terrain par Seaboost, et de polygones réalisés par photo-interprétation sur l'image drone, ils sont repartis au sein de l'ensemble des classes prédéfinies.

Un nombre suffisant d'échantillons par classe est généré afin d'appréhender au mieux la variabilité radiométrique et texturale de chaque classe d'intérêt. Cette étape est cruciale dans notre méthodologie de cartographie. En effet, le niveau de précision de la classification produite (d'un point de vue spatial

et typologique) dépend essentiellement de la qualité et de la représentativité de cette base de données de référence.

Compte tenu de la structure de nos données de référence, nous avons choisi de travailler au niveau pixel (et non polygone) pour la détermination de pixels d'apprentissage et de test. En effet, certaines classes possèdent un nombre réduit de polygones, séparer alors les polygones en apprentissage et test ne permet pas d'appréhender une variabilité suffisante pour bien apprendre à reconnaître la classe considérée. Cette sélection des pixels d'apprentissage et de test au sein des mêmes polygones sera à prendre en compte pour l'interprétation des résultats. La méthode appliquée pour la constitution de la base de données d'apprentissage et la base de données de test est décrite ci-dessous :

- tirage aléatoire au sein des polygones : 50% des pixels pour l'ensemble d'apprentissage et 50% utilisés pour l'ensemble de validation ;
- pour l'apprentissage : Equilibrage du nombre d'échantillons par classe à l'aide du nombre d'échantillons de la plus petite classe ;
- évaluation (test) sur la totalité des pixels de l'ensemble de test.

2.2.5.2.2 Choix du classifieur

Après avoir testé, lors d'études similaires précédentes, les méthodes de classification les plus couramment utilisées en Télédétection (Support Vector Machines (SVM), réseaux de neurones (Multi Layer Perceptron, autres) et Random Forest (ou forêts aléatoires, Pal, 2005⁸, Beguet 2014⁹) nous avons choisi de travailler avec les Random Forest qui apportent un bon compromis entre rapidité, simplicité de paramétrisation et performance.

Les Random Forest ou forêts aléatoires ont été introduites par Breiman (2001)¹⁰. C'est un algorithme d'apprentissage statistique très performant, à la fois pour des problèmes de classification et de régression. L'algorithme appartient à la famille des méthodes d'ensemble de classifieurs. Le principe général de ces méthodes est de construire une collection de classifieurs (prédicteurs) faibles, pour ensuite agréger l'ensemble de leurs prédictions afin d'obtenir un classifieur robuste. Le classifieur faible considéré est un arbre de décision de type Classification and Regression Tree (CART) (Breiman et al., 1984¹¹) dont le principe général est de partitionner récursivement l'espace d'entrée de façon dyadique, puis de déterminer une sous-partition optimale pour la prédiction.

Le paramètre du nombre d'arbres a été fixé à 100 par nœud. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans la section 3 (Résultats). Une fois la classification obtenue, une dernière étape de régularisation spatiale est appliquée.

2.2.5.2.3 Régularisation spatiale

Enfin, une régularisation spatiale par filtre majoritaire est appliquée au résultat de classification. Cette régularisation consiste à affecter à chaque pixel l'étiquette (ou classe) majoritaire (en termes de nombre d'occurrences) dans son voisinage. Le rayon de ce voisinage a été fixé à 2 pixels soit 5 cm (régularisation très légère) pour le traitement de l'image drone, compte tenu de la résolution des images nous ne souhaitons pas gommer les plus petites entités détectées. Cette étape de post-traitement permet simplement d'éliminer une partie du « bruit de classification » tout en conservant bien les formes et contours des entités détectées, cela en vue de la vectorisation de la classe d'intérêt (l'herbier).

⁸ Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222..

⁹ Beguet, B., 2014. Characterization and mapping of forest structure from Very High-Resolution satellite images. PhD Informatics-Image Analysis., University of Bordeaux, ENSEGD-IPB / INRA.

¹⁰ Breiman L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.

¹¹ Breiman L., Friedman, J.H., Olsen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and Regression trees. Wadsworth International Group, Belmont, CA..

Concernant les analyses des taux de recouvrement SPOT 2000 et 2018, aucune régularisation spatiale n'a été effectuée (pixels de 20 et 6 m).

2.2.5.3 Préparation des données de référence

2.2.5.3.1 Taux de recouvrement SPOT 2000 et 2018 sur l'herbier de la fosse de Loix

Pour l'année 2000, les données de référence ont été saisies manuellement sous SIG, à partir de l'image SPOT du 20/07/2000. Ce jeu de données d'apprentissage, nécessaire pour entraîner le modèle, est composé de 61 polygones répartis entre les trois classes prédéfinies : 0-25%, 25-75% et 75-100%.

Pour l'année 2018, les données de référence ont été saisies manuellement sous SIG, à partir de l'image SPOT du 14/08/2018. Ce jeu de données d'apprentissage, est composé de 69 polygones répartis entre les 3 classes prédéfinies : 0-25%, 25-75% et 75-100%.

2.2.5.3.2 Cartographie drone 2020

Une partie des données de référence provient des relevés de terrain réalisés dans le cadre du présent contrat (Figure 14).

Seules les stations réalisées sur l'emprise de l'image drone ont pu être exploitées, les relevés de la grille D n'ont donc pu être exploités que très partiellement (3 stations sur les 30).

Un polygone de 50 cm de rayon a été réalisé automatiquement à partir du centre de chacune des mailles de la grille terrain. Chacun de ces polygones est validé à dire d'expert à partir de l'image drone afin de ne conserver que ceux dont la classe décrite sur le terrain correspond à celle visible sur l'image. Sur les 93 stations situées sur l'emprise de l'image drone, 87 ont été conservées comme source d'évaluation des prédictions.

A ces 87 relevés d'évaluation s'ajoutent des données d'apprentissage photo interprétées directement sur l'image drone. Des polygones ont été ajoutés pour les trois classes de recouvrement d'herbier mais également pour les autres classes présentes sur l'image (algues vertes, biofilm, eau, vase, et la classe « autre » qui rassemble les bateaux, les digues et enrochements). Au total, la combinaison des données terrain et photo interprétées représente une base de données d'apprentissage composée de 752 échantillons. Cette étape est cruciale dans notre méthodologie de cartographie en effet, le niveau de précision de la classification produite dépend directement de la qualité et de la représentativité de cette base de données de référence.

La répartition de ces 752 échantillons dans les différentes classes est présentée Figure 15.

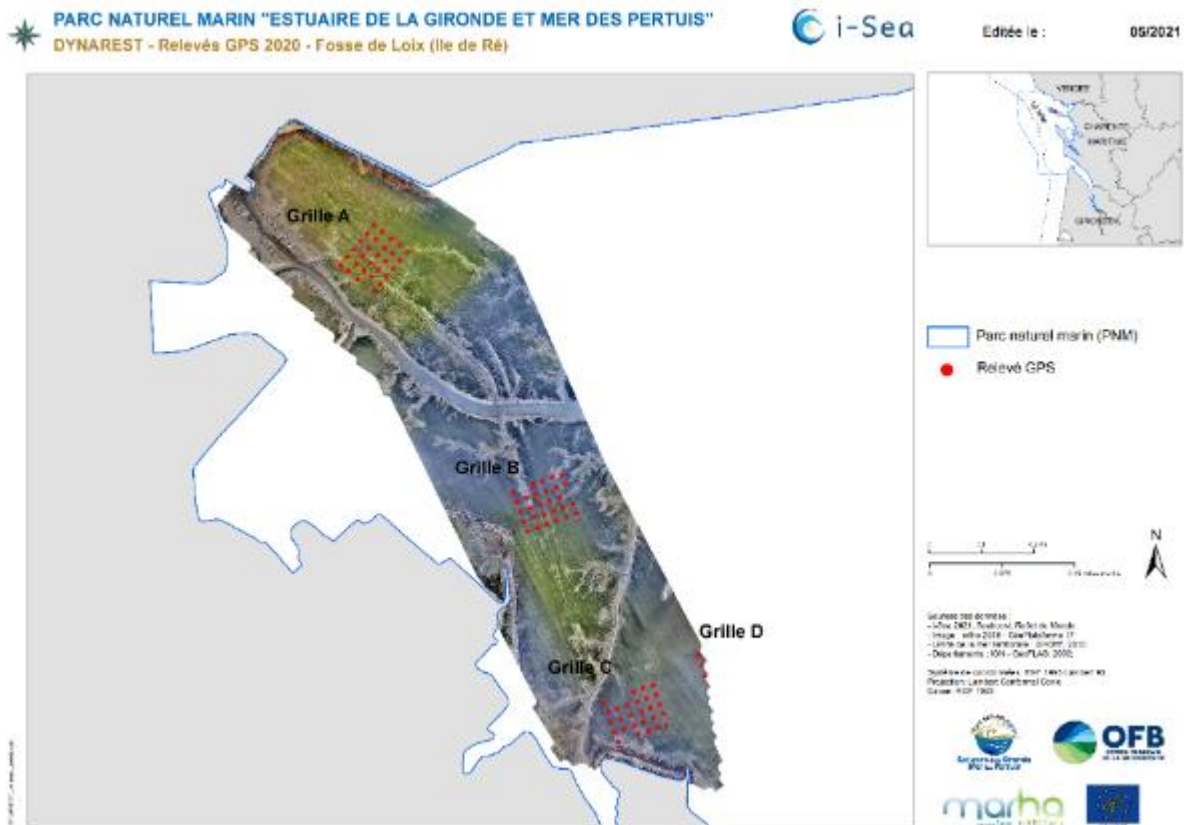


FIGURE 14. REPARTITION DES RELEVÉS DE TERRAIN RÉALISÉS DANS LE CADRE DE DYNAREST ET EXPLOITÉS POUR L'ANALYSE DE L'IMAGE DRONE SUR LA FOSSE DE LOIX. RELEVÉS RÉALISÉS LES 17, 21 ET 22 SEPTEMBRE 2020.

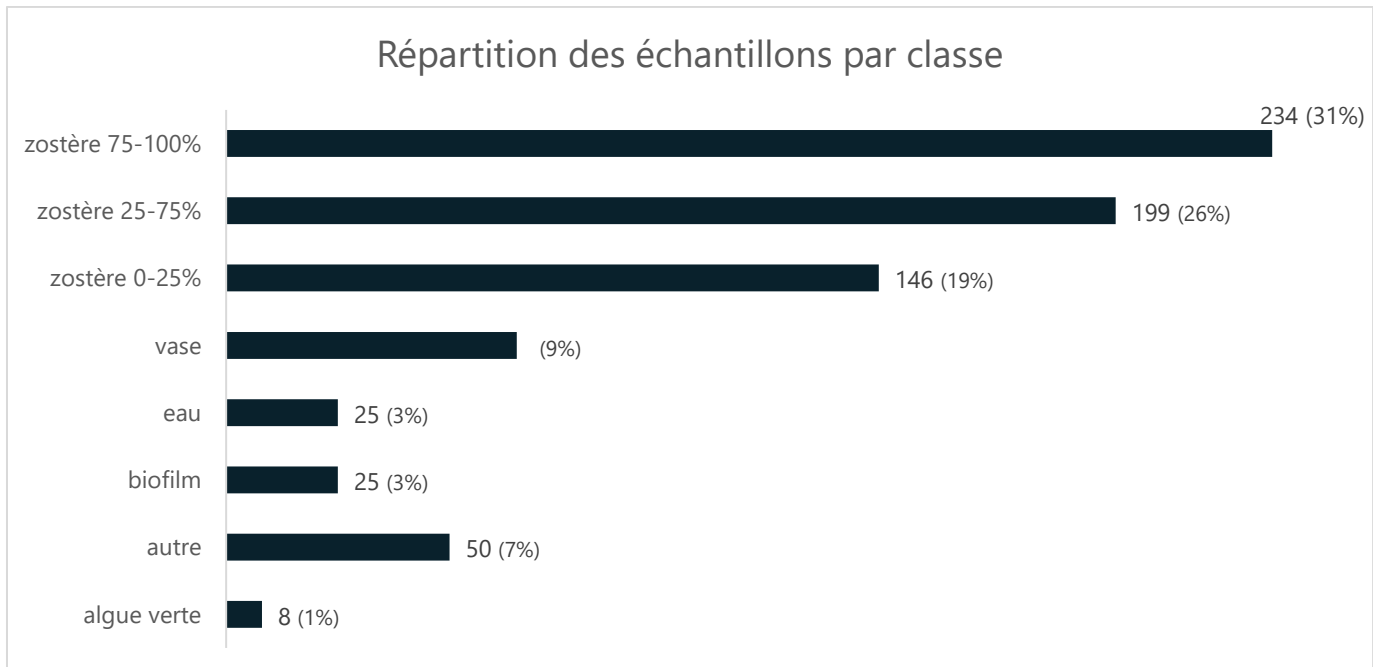


FIGURE 15. REPARTITION DES ÉCHANTILLONS D'APPRENTISSAGE PAR CLASSE POUR L'ANALYSE DE L'IMAGE DRONE 2020 SUR LA FOSSE DE LOIX DANS LE CADRE DE DYNAREST

2.2.5.4 Correction des couches livrées après validation

Le résultat de la prédiction des classes d'intérêt au niveau pixel est converti en shape. Les enveloppes de l'herbier SPOT 2000 et 2018 (CartoHECo) servent de masque afin d'extraire automatiquement les polygones d'intérêt.

Concernant la cartographie de l'herbier réalisée à partir de l'image drone 2020, les polygones des classes « non herbier » sont éliminés automatiquement. Ces résultats, plaqués sur l'image drone de 2020, sont affichés en transparence, afin d'éliminer les polygones qui, à dire d'expert, ne correspondent pas à de l'herbier.

2.2.6 Analyse de l'évolution spatio-temporelle des enveloppes d'herbier

2.2.6.1 Méthodologie

Pour comparer les enveloppes de zostères de 1989 à 2020, seront présentés :

- (1) Une représentation cartographique des secteurs en évolution (apparition, disparition et passage d'un taux de recouvrement à un autre) ;
- (2) Un bilan quantitatif des évolutions secteur par secteur.

2.2.6.2 Mise en œuvre pratique

Un travail d'homogénéisation des données historiques a été réalisé, afin d'avoir un jeu de données comparables sous SIG.

La projection retenue pour l'analyse est le Lambert 93, les couches ayant un système de projection différent ont été reprojetées. Un champ « DATE » a été ajouté aux tables attributaires de chacun des shapes.

La méthode d'analyse consiste à comparer, date à date, les enveloppes d'herbier. Une simple superposition sous SIG des différentes couches ne permet pas d'extraire les informations surfaciques nécessaires. Les polygones des deux couches comparées sont superposés sous SIG et sont fusionnés automatiquement par l'intermédiaire de l'outil « Union ». La couche résultante contient des polygones représentant l'union géométrique de tous les polygones en entrée, ainsi que l'ensemble des champs de la table attributaire. L'étape suivante consiste à ajouter un champ à ce shape qui contient les surfaces de ces polygones fusionnés afin de dresser un bilan des surfaces communes et supplémentaires à chacune des dates.

2.2.7 Analyse des forçages

2.2.7.1 Contexte

De nombreux facteurs peuvent influencer la croissance des herbiers à zostères naines qui pourraient être analysées au travers de trois indicateurs que sont la surface de l'herbier, son taux de recouvrement de l'herbier et son réseau de drainage. Ces facteurs peuvent être classés en deux familles distinctes : les forçages naturels et les pressions anthropiques. Les forçages naturels prépondérants sont de nature biotiques (flore et faune benthiques) et abiotiques :

- L'agitation du plan d'eau ;
- La lumière.

Cette étude se concentre exclusivement sur l'analyse des facteurs abiotiques. Comme l'ensoleillement est une donnée complexe à aborder, et qu'il est compliqué de prendre correctement en compte son

impact sur la dynamique des herbiers, la turbidité de l'eau, facteur d'atténuation par essence du transfert de la lumière dans la colonne d'eau, a été préférée et analysée.

Pour consolider l'analyse de l'agitation du plan d'eau, les états de mer et les épisodes de submersion ont été considérés simultanément. Pour ce qui concerne la turbidité, les connaissances sur la turbidité naturelle dans le secteur de l'île de Ré ainsi que les épisodes de travaux de dragage (turbidité anthropique) seront considérés.

2.2.7.2 Analyse des états de mer

Une synthèse produite pour la Communauté de communes Ile de Ré (Casagec Ingénierie, 2017¹²) qui rapporte la chronique de tempêtes hivernales basée sur l'analyse des bases de données fusionnée BoBWA-H¹³(1958-2002) / HOMERE¹⁴ (1994-2016) au niveau de la bouée Oléron avec la méthode élaborée par Nicolae Lerma et al. (2014)¹⁵.

Le nombre et l'intensité des tempêtes analysées au niveau de la bouée Oléron (données BoBWA-H / HOMERE entre 1958 et 2016) sont les paramètres reportés sur la Figure 16.

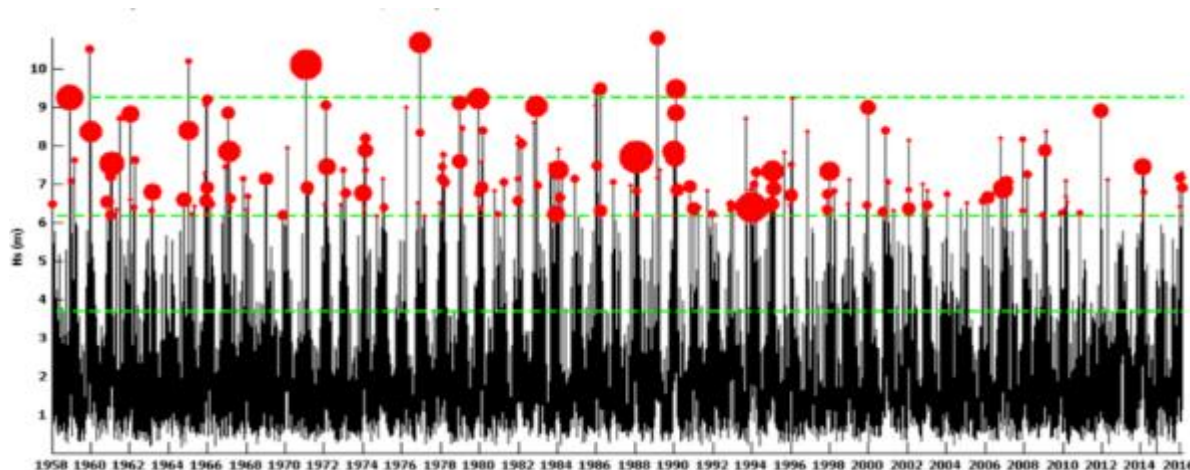


FIGURE 16. SERIES TEMPORELLES (1958 – 2016) DES MESURES DE HAUTEUR DE HOULE AU NIVEAU DE LA BOUEE OLERON (DONNEES BOBWA-H / HOMERE). LES DROITES EN POINTILLES VERT REPRESENTENT (DU HAUT VERS LE BAS) HS, 10ANS, HS 2/3 ET HS 2/5. LES CERCLES ROUGES REPRESENTENT LE PIC DES PERIODES DE TEMPETES ET LEUR TAILLE EST PROPORTIONNELLE A LA DUREE DE L'EVENEMENT (EXTRAIT DE CASAGEC INGENIERIE, 2017)

Cette base de données n'a pas été étendue pour la période récente. Pour compléter cette analyse entre 2016 et 2020, deux bases de données ont été explorées pour déduire le nombre de tempêtes hivernales comme indicateur macroscopique de l'état de mer :

- Les prédictions Windguru (Station France île d'Oléron), inter-calibrées avec les résultats de l'analyse Casagec Ingénierie (2017) sur la période janvier 2012 – mars 2016 ;
- les données CANDHIS¹⁶ (campagne 01704 Oléron Large), inter-calibrées avec les résultats de l'analyse Casagec Ingénierie (2017) sur la période juillet 2014 – mars 2016.

¹² Casagec Ingénierie, 2017. Observatoire du littoral de l'île de Ré. Rapport final de synthèse des résultats 2013-2016. Rapport n° CI-CR-03-A-rev01 Juin 2017, 42 p.

¹³ <http://bobwa.brgm.fr/>

¹⁴ <http://archimer.ifremer.fr/doc/00415/52606/>

¹⁵ Nicolae Lerma, A. et Bulteau, T., avec la collaboration de Mugica, J. 2014. Caractérisation des événements de tempête de l'hiver 2013-2014 pour la côte aquitaine. Rapport BRGM/RP-64020-FR.

¹⁶ <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

La comparaison (inter-calibration) entre données historiques et récentes porte sur un décompte de tous les pics de houle à partir de 4 m, mois par mois. La base de données la plus homogène avec les résultats déjà publiés sera exploitée pour compléter la chronique de tempête déjà établie.

Les prédictions Windguru et l'analyse des modèles BoBWA-H / HOMERE ne sont cohérentes que très partiellement. Les tempêtes de l'hiver 2013-2014 sont mises en valeurs de façon homogène. En revanche, les tempêtes de l'hiver 2015-2016, sont, d'après les prédictions Windguru, très atténuées par rapport à l'analyse BoBWA-H / HOMERE, les vagues ne dépassant jamais le seuil des 6 m et rarement celui des 4 m.

Les mesures de la bouée Oléron large du réseau CANDHIS (Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ) sont, au contraire, très cohérentes avec les données BoBWA-H / HOMERE. La plupart des pics de houle sont transcrits dans les deux bases de données (Figure 17). Sur les 21 pics relevés, 20 sont concordants. Le pic n°13, prédit, n'a pas été mesuré par la bouée. Quatre pics (jaune) montrent un écart entre hauteurs mesurées et prédites. Les écarts sont toujours inférieurs à 1 m. Globalement, ces bases de données sont donc comparables.

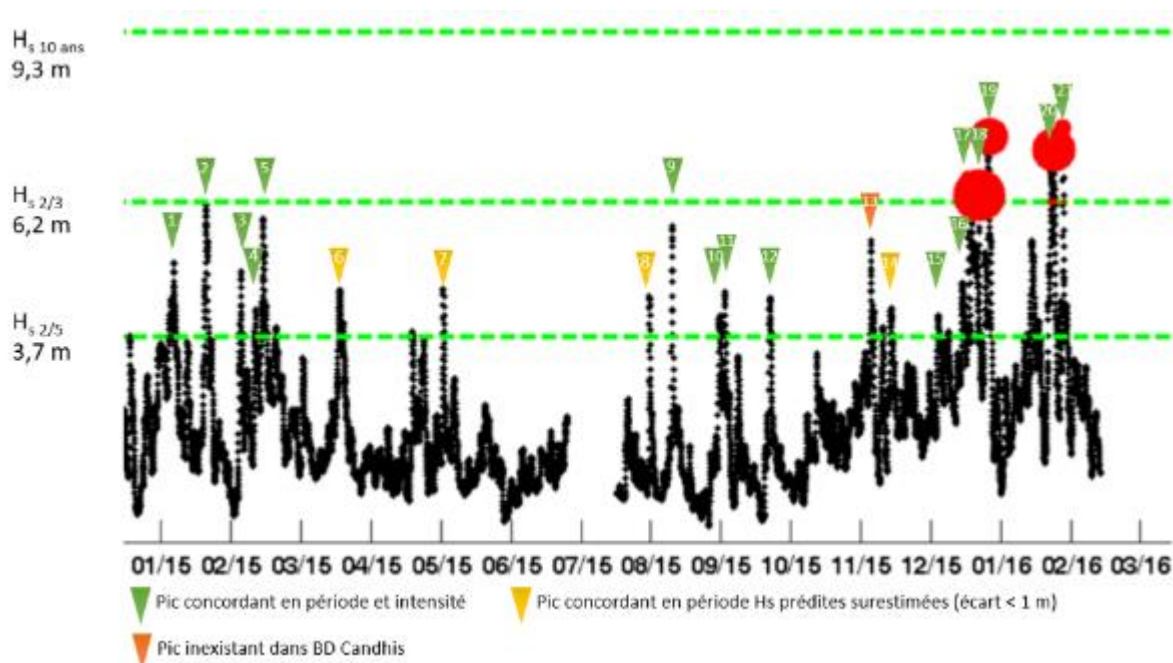


FIGURE 17. COMPARAISON ENTRE LES PICS DE VAGUES MESURES PAR LA BOUEE OLERON LARGE DU RESEAU CANDHIS (CENTRE D'ARCHIVAGE NATIONAL DES DONNEES DE HOULE IN SITU) ET LA SERIE TEMPORELLE (2015 – 2016) DES MESURES DE HAUTEUR DE HOULE AU NIVEAU DE LA BOUEE OLERON (DONNEES SOURCE BOBWA-H /HOMERE). LES CERCLES ROUGES REPRESENTENT LE PIC DES PERIODES DE TEMPETES ET LEUR TAILLE EST PROPORTIONNELLE A LA DUREE DE L'EVENEMENT (EXTRAIT DE CASAGEC INGENIERIE, 2017). LES TRIANGLES REPRESENTENT LES PICS DE PLUS DE 4 M RELEVES SUR LA BD CANDHIS, NUMEROTES DANS L'ORDRE CHRONOLOGIQUE. LA COULEUR DES PICS REVELE LE DEGRE DE CONCORDANCE ENTRE LES DEUX JEUX DE DONNEES

La Figure 16 montre deux périodes distinctes. Entre 1958 et 1990, les tempêtes hivernales sont annuelles, observées plusieurs fois au cours d'un même hiver et parfois d'amplitude exceptionnelle. A partir de 1990, les tempêtes hivernales sont toujours annuelles, mais sont, certains hivers, rarement observées par rapport aux seuils considérés. Ceci indique une diminution de la hauteur des vagues déjà révélée par les

travaux de Dupuis et al. (2006)¹⁷ pour la période 1980 – 2000. Depuis 2010, certains hivers sont marqués par un nombre de tempêtes hivernales parfois très faibles, parfois même inexistantes, toujours par rapport au mode de calcul et de mise en lumière de cet indicateur.

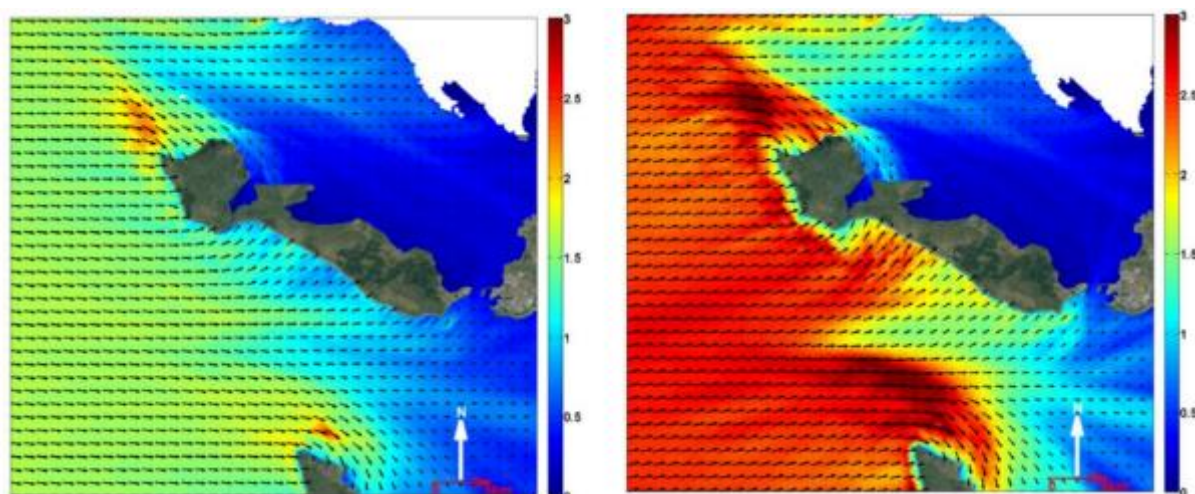
Pour compléter cette analyse, nous avons calculé le nombre de tempêtes entre 2010 et 2020 en indiquant les maxima de H_s atteints au cours de l'hiver considéré (Tableau 3). Il n'y a pas de données pour l'hiver 2016-2017. Entre 2010 et 2018, certains hivers ne sont ponctués d'aucune tempête, ou alors, elles sont parfois représentées en nombre très réduit. Depuis 2017, un rythme régulier s'instaure de 4 à 5 tempêtes hivernales par an, légèrement plus élevé que le nombre moyen mesuré pour la période 1958-2016, de 3,4. Seule véritable rupture dans la série temporelle : le nombre de phénomènes exceptionnels régulier entre 1958 le début des années 90, que l'on n'observe plus depuis lors.

TABLEAU 3. NOMBRE DE TEMPETES ET HS MAX MESUREES ENTRE 2010 ET 2016 (DONNEES BOBWA-H / HOMERE) ET 2016 – 2020 (DONNEES CANDHIS, CAMPAGNE OLERON LARGE)

Hiver	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Nb tempêtes	1	2	0	5	-	5	Nd	5	4	4
H_s max (m)	< 6,5	9		< 8		< 7,5	Nd	< 8	< 7	< 6,5

L'impact des tempêtes dans la fosse de Loix est largement atténué par la dissipation de l'énergie des houles par des effets de réfraction, diffraction et amortissement (Figure 18). Il faut tenir compte de ce phénomène dans notre analyse qui peut avoir tendance à occulter, totalement ou partiellement l'effet potentiel direct de l'agitation du plan d'eau sur l'estran. En revanche, nous pouvons considérer que des tempêtes auront également un effet indirect sur l'estran et potentiellement sur les herbiers de phanérogames. En effet, les tempêtes ont un impact significatif sur la remise en suspension et les flux de matières.

La turbidité est analysée dans la suite du document en considérant préférentiellement les champs de turbidité générés par les périodes les plus énergétiques et en se focalisant sur les impacts perçus dans le secteur de Loix.



¹⁷ Dupuis, H., Michel, D., Sottolichio, A. 2006. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of Marine Systems* 63(3):105-114.

FIGURE 18. PROPAGATION A L'APPROCHE DE L'ÎLE DE RE DE HOULES D'OUEST (HS = 1,6M / TP = 10S / DIRP = N278) A GAUCHE ET HOULE DE SUD-OUEST (HS = 2,6M / TP = 14S / DIRP = N270), A DROITE (EXTRAIT DE CASAGEC INGENIERIES, 2017)

2.2.7.3 Submersions marines

D'après la synthèse produite par Breilh et al. (2014)¹⁸ qui couvre la période 1500 – 2014, l'île de Ré retrace l'historique de submersions marines le plus important à l'échelle des pertuis charentais. Vingt-neuf épisodes de submersion y sont dénombrés depuis le 16^{ième} siècle, dont pas moins de sept épisodes au cours de chacun des deux derniers siècles. Une seule submersion a été enregistrée au 21^{ième} siècle liée à la tempête Xynthia, en 2010. Depuis lors, aucune submersion n'a été observée sur les littoraux Rétais (Bertin, communication personnelle). Entre 1979 et 2020, ce sont trois épisodes de submersion qui sont reportés en octobre 1980 (observé uniquement sur l'île de Ré¹⁹), décembre 1999 (Martin) et février 2010 (Xynthia).

2.2.7.4 Turbidité naturelle

Pour analyser la variabilité naturelle de la turbidité dans le secteur de Loix, à défaut de pouvoir exploiter de longues séries de mesure, une analyse des climats de turbidité réalisée pour Port Atlantique La Rochelle (PALR) pour définir les climats de turbidité à l'échelle des pertuis²⁰ sera valorisée. L'analyse, basée sur 200 images satellite acquises au cours de trois années consécutives (2014-2016), a permis d'isoler neuf cas de figures emblématiques de la distribution spatiale et des teneurs en matières en suspension (MES) dans le secteur de la Rochelle entre la baie de l'Aiguillon au nord et les estrans intertidaux situés au nord de la baie de Marennes Oléron.

Ces neuf cas de figure décrivent cinq schémas distincts pour le pertuis Breton pour chacun desquels une à trois situations spécifiques sont identifiées dans le pertuis d'Antioche. Les cartes moyennes de turbidité de surface (exprimée sous forme de champs de matières en suspension) pour les deux situations les plus extrêmes de faible et forte turbidité sont reportées sur la Figure 19.

¹⁸ Breilh J.F, Bertin, X, Chaumillon E., Giloy, N., Sauzeau, T., 2014. How frequent is storm-induced flooding in the central part of the Bay of Biscay? *Global and Planetary Change* 122, 161–175.

¹⁹ Brunet, R., 1994. *Ars, notre beau village : chronique d'une commune de l'île de Ré au cours de deux siècles d'histoire*, 1135 pp.

²⁰ Lafon, V., Curti, C., Regniers, O., 2018. *Contribution à la connaissance de la dynamique turbide naturelle et au suivi environnemental des travaux de déroctage par l'analyse de données satellite. Rapport pour le marché public d'études n°MP17MP095 du Port Atlantique La Rochelle*, V. 4, 58 p.

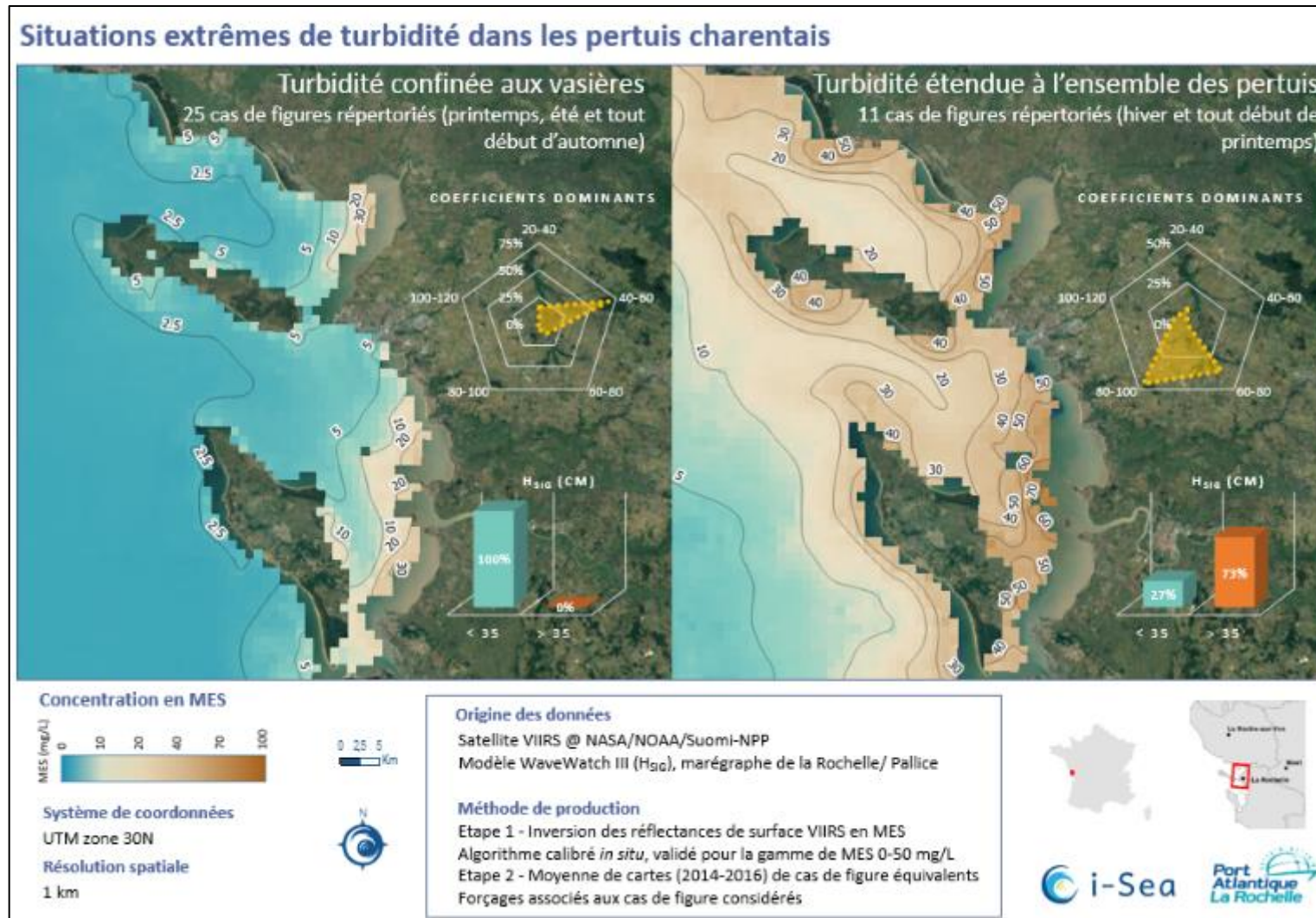


FIGURE 19. CAS DE FIGURE EXTREMES DE LA DISTRIBUTION SPATIALE ET DES NIVEAUX DE MES DANS LES PERTUIS (CARTES MOYENNES BASEES SUR DES DONNEES VIIRS, EXTRAIT DE LAFON ET AL. (2018))

Malgré la faible résolution spatiale des données utilisées pour l'analyse (données VIIRS²¹ d'une résolution spatiale de 750 m), ces cartes montrent qu'en moyenne en période calme, les teneurs en matières en suspension dans la zone de Loix est comprise entre 2,5 et 5 mg/L (valeurs moyennes établies à partir de 25 images).

En période turbide (correspondant à des épisodes plus agités observés pendant l'hiver et en début de printemps), les teneurs en matières en suspension peinent à atteindre des valeurs moyennes supérieures à 20 mg/L et ce, sur toute la façade nord de l'île de Ré. Les valeurs rencontrées en période turbide sur le reste des estrans de la zone des pertuis sont toujours plus élevées, généralement comprises entre 30 mg/L et 50 voir ponctuellement 60 à 70 mg/L (valeurs moyennes établies à partir de 11 images). Cette spécificité est également illustrée sur les Figure 20 et Figure 21 où quelques situations instantanées (observations satellitaires VIIRS) et emblématiques de distribution de MES typiques centrées sur la façade nord de l'île de Ré sont rassemblées.



FIGURE 20. EXEMPLES EMBLEMATIQUES DE DISTRIBUTIONS DE LA TURBIDITE DE SURFACE AU NORD DE L'ILE DE RE. 1 : PATRONS TYPICIQUES DE TURBIDITE OBSERVES ENTRE MI-MARS ET DEBUT NOVEMBRE ; 3 : SITUATION OBSERVEE TOUT AU LONG DE L'ANNEE ; 6 : SITUATION TOUJOURS OBSERVEE ENTRE MI-OCTOBRE ET MI-AVRIL, D'APRES LAFON ET AL. (2018)

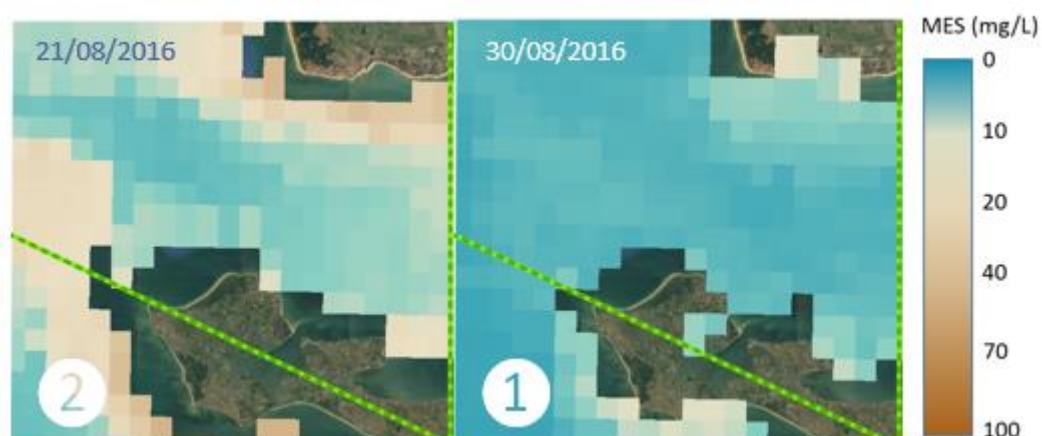


FIGURE 21. EXEMPLES EMBLEMATIQUES DE DISTRIBUTIONS DE LA TURBIDITE DE SURFACE AU NORD DE L'ILE DE RE. 1 SITUATION OBSERVEE ENTRE MI-MARS ET DEBUT NOVEMBRE POUR DES COEFFICIENTS DE MAREE DANS 75% DES CAS INFÉRIEURS À 65 ; 2 : SITUATION OBSERVEE ENTRE MI-MARS ET DEBUT NOVEMBRE POUR DES COEFFICIENTS DE MAREE DANS 75% SUPÉRIEURS À 60, D'APRES LAFON ET AL. (2018)

²¹ Visible Infrared Imaging Radiometer Suite. Ce capteur a été mis en orbite en octobre 2011 à bord du satellite Suomi NPP. Il est, depuis novembre 2017, combiné à un second capteur VIIRS (amélioré). Les images VIIRS brutes contiennent 22 bandes spectrales dont 9 couvrent les longueurs d'onde visibles et infrarouges avec une résolution au nadir de 750 m. La revisite en tout point du globe est de 1 à 2 fois par jour.

Ces deux figures montrent que la masse d'eau sur la côte Nord de l'île de Ré, en particulier dans le secteur d'Ars en Ré, et, dans une moindre mesure parfois au large de la fosse de Loix, est généralement plus claire que dans les zones environnantes, pour des situations de forçages et périodes de l'année pourtant très contrastées.

Deux images complémentaires extraites de cette base de données très exhaustive sont illustrées sur la Figure 22. A gauche (A, Figure 22), une image illustre des conditions agitées (H_{sig} proche de 3 m) par marée de vive-eau (103). Cette image a une résolution faible qui ne permet de distinguer la turbidité que sur la partie la plus orientale sur l'estran de Loix. Dans ce secteur, les pixels ont des valeurs comprises entre 15 et 30 mg/L. L'effet de l'agitation se manifeste par une turbidité relativement élevée sur l'ensemble des pertuis à l'exception du secteur NE Ré très préservé.

A droite (B, Figure 22), une image acquise en vive-eau, pour une période toutefois plus calme est présentée. Cette dernière image illustre l'effet de la marée sur une portion d'estran plus importante. Les valeurs de MES atteignent par endroit 130 mg/L. Elles sont, sur l'estran, partout supérieures à 100 mg/L. Le pertuis breton montre des turbidités très contrastées : très faibles à l'ouest plus fortes à l'ouest, notamment sur les estrans et au débouché de l'estuaire du Lay et de la baie de l'Aiguillon.

Par rapport à l'effet de la marée, ces quelques illustrations ne démontrent pas d'effet particulièrement important de l'agitation du plan d'eau sur la turbidité, mais aucune image n'a été acquise dans des contextes de tempêtes exceptionnelles qui pourrait venir infirmer cette observation. Ces images révèlent toutefois le moteur exceptionnel de la marée sur la remise en suspension de sédiment. Effet qui sera d'autant plus important que le recouvrement des estrans par de la végétation fixée (par exemple) sera plus faible (Ganthy, 2011).

2.2.7.5 Turbidité anthropique

Les travaux les plus significatifs concernent :

- Les deux phases de chantier liées à la pose de canalisation dans la fosse de Loix en 1984 et 2018 ;
- Trois phases de dragage du chenal de Loix en 2006 et 2009, dans les deux cas pour des volumes remis en suspension inférieurs à 5 000 m³, puis en 2014 (juin), pour un volume remis en suspension inférieurs à 10 000 m³.

Depuis 2014, des activités annuelles de dragage peuvent être entreprises pour un volume remis en suspension inférieur à 10 000 m³/an.

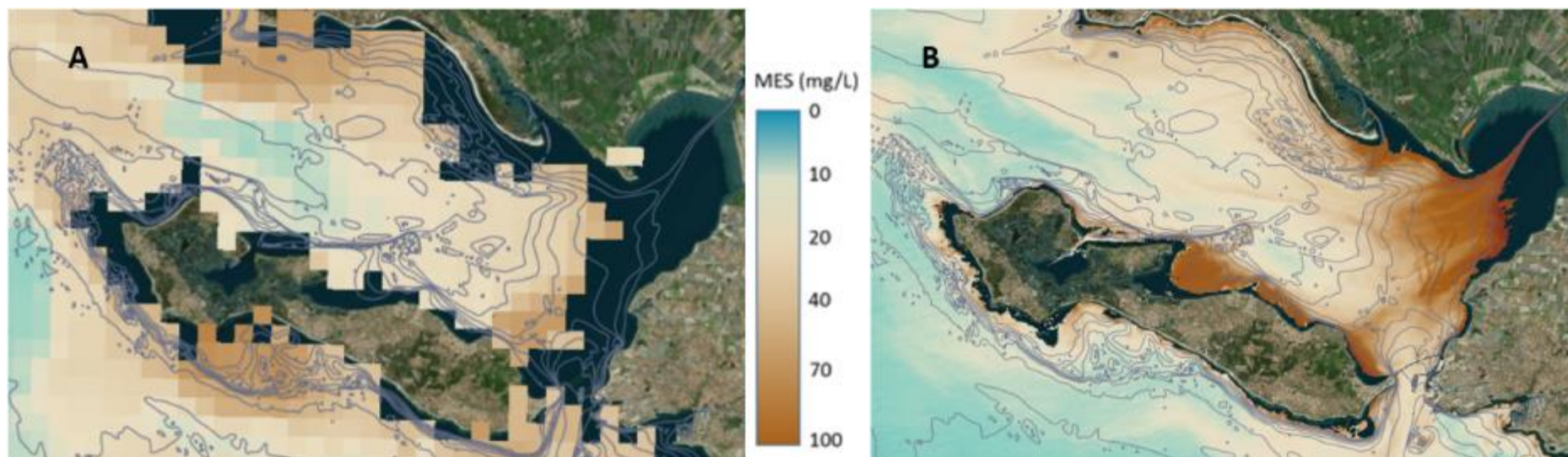


FIGURE 22. CHAMPS DE MATIERES EN SUSPENSION OBTENUS PAR ANALYSE D'IMAGES SATELLITAIRES. A. IMAGE SOURCE VIIRS (VISIBLE INFRARED IMAGING RADIOMETER SUITE) ACQUISE LE 18/02/2015, RESOLUTION SPATIALE : 750 M, PICS DE VAGUE DE HSIG 3 M, MAREE DE GRANDE VIVE-EAU (103); B. IMAGE SOURCE LANDSAT-8 ACQUISE LE 15/04/2014, RESOLUTION SPATIALE : 30 M, PICS DE VAGUE DE HSIG 1,1 M, MAREE DE GRANDE VIVE-EAU (93).

2.3 Résultats

2.3.1 Evaluation de la classification

2.3.1.1 Taux de recouvrement pour l'année 2000 et 2018

Les matrices de confusion présentées dans les Figure 23 et Figure 24 représentent l'évaluation des performances de classification sur l'ensemble de test (ou validation). Les pixels bien classés occupent la diagonale de cette matrice, les autres permettent d'observer et de quantifier les confusions. Il est alors possible d'interpréter la bonne reconnaissance de chaque classe ainsi que les principales erreurs générées. Deux modes d'évaluation sont présentés :

- le mode équilibré (bal) : on sélectionne le même nombre de pixels pour chacune des classes, celui de la plus petite classe. Ainsi les résultats ne sont pas biaisés par un potentiel déséquilibre dans les données ;
- le monde déséquilibré (nobl) : on respecte la distribution des données d'entrées et on sélectionne tous les pixels disponibles pour chacune des classes.

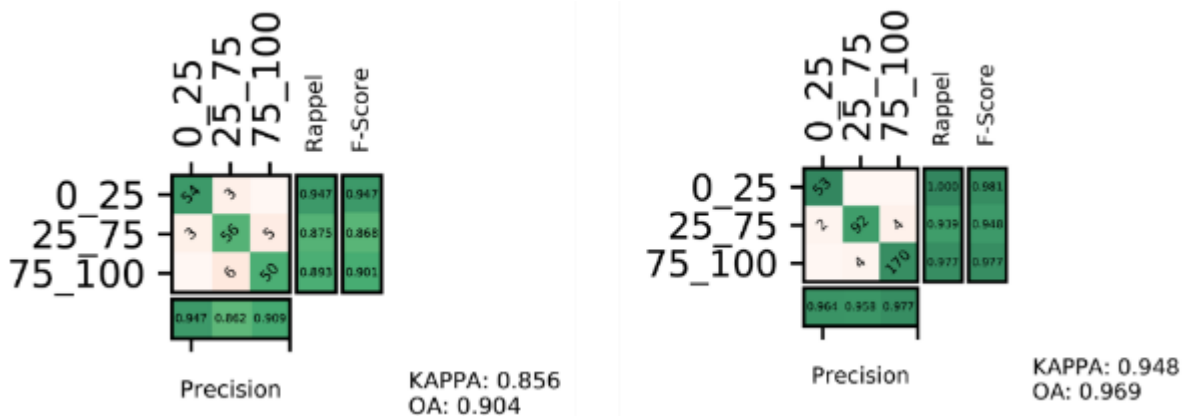


FIGURE 23. MATRICES DE CONFUSION DE LA PREDICTION DES TAUX DE RECOUVREMENT PAR CLASSIFICATION D'IMAGE SPOT POUR L'ANNEE 2000 (A GAUCHE MODE BAL, A DROITE MODE NOBAL)

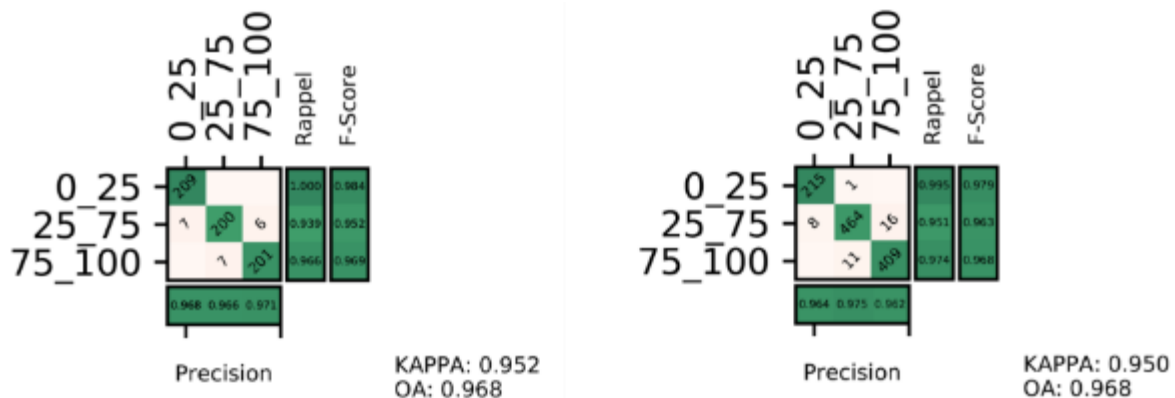


FIGURE 24. MATRICES DE CONFUSION DE LA PREDICTION DES TAUX DE RECOUVREMENT PAR CLASSIFICATION D'IMAGE SPOT POUR L'ANNEE 2018 (A GAUCHE MODE BAL, A DROITE MODE NOBAL)

La précision globale obtenue pour la détection des taux de recouvrement à partir de l'image SPOT de l'année 2000 est de 90% en mode équilibré et de 96% en mode déséquilibré. Cela donne une fourchette de la performance possible du modèle pour bien discriminer les 3 classes considérées. Ces résultats sont

très satisfaisants, les principales confusions sont observées entre la classe intermédiaire et la classe la plus dense. Ces confusions n'interviennent cependant que rarement.

La précision globale obtenue pour la détection des taux de recouvrement à partir de l'image SPOT de l'année 2018 est de 96%, cela dans les deux modes d'évaluation. Là encore, les résultats sont très bons et mettent en valeur le fort potentiel de la méthodologie déployée pour discriminer ces trois classes.

2.3.1.2 Détection de la présence d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 2020

Les matrices de confusion présentées Figure 25 concernent l'évaluation du modèle complet entraîné sur l'ensemble des données d'apprentissage disponibles sur l'emprise de l'image drone acquise en 2020.

L'objectif de cette production est double :

- d'une part bien isoler les surfaces d'herbier des autres surfaces présentes pour en définir le mieux possible les contours.
- d'autre part la prédiction des différents taux de recouvrements d'herbiers de façon directe est recherchée.

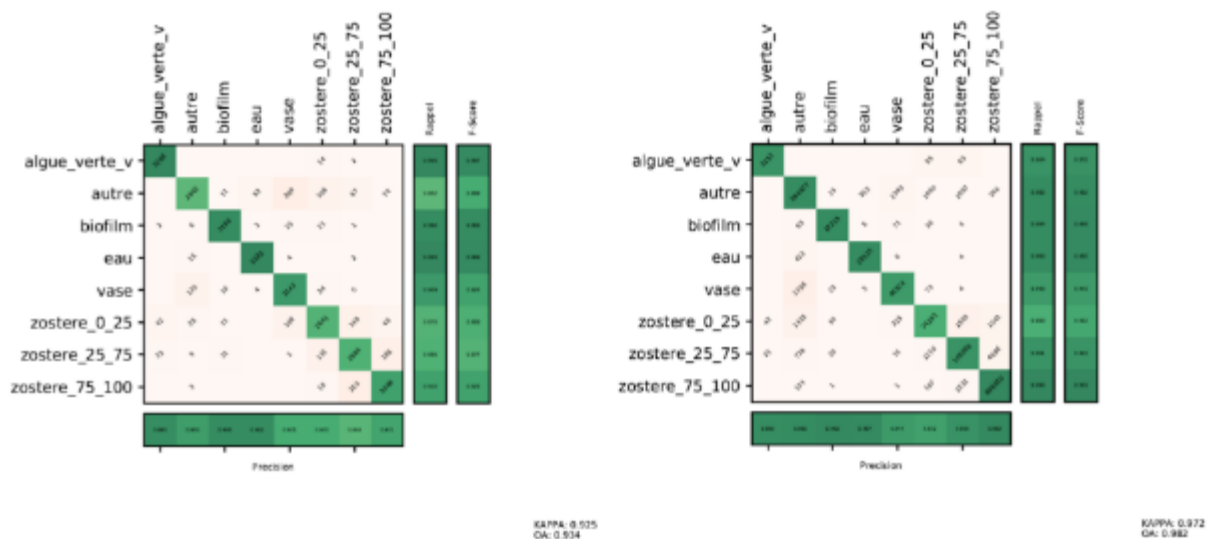


FIGURE 25. MATRICES DE CONFUSION DE LA CLASSIFICATION DE L'IMAGE DRONE 2020 (A GAUCHE MODE BAL, A DROITE MODE NOBAL)

Les précisions globales obtenues sont de 93% en mode équilibré et de 98% en mode déséquilibré. Cela indique une bonne reconnaissance de l'ensemble des classes considérées et confère une bonne confiance quant à l'usage des cartographies produites. On peut noter que les algues vertes sont bien différenciées de l'ensemble des classes d'herbiers avec très peu de confusions obtenues.

Cette observation est aussi valable pour la classe biofilm ce qui tend à indiquer que la discrimination entre herbier des classes les plus problématiques ou proches radiométriquement est correcte. Des confusions importantes sont par contre observées entre les différents taux de recouvrements d'herbiers, cela devra amener à relativiser l'usage de cette information. La Figure 26 présente un extrait de la cartographie obtenue. Les contours produits sont très précis, la bonne pertinence dans cette zone des taux de recouvrements prédits ainsi que la bonne reconnaissance de la présence d'un petit patch d'algues vertes. La finesse de la résolution produite par le drone permet une segmentation très fine du milieu.

Suite à l'analyse de ces résultats, un travail de contrôle qualité et corrections à dire d'expert a été réalisé par i-Sea. Des corrections très ponctuelles ont été apportées (exclusivement suppression de polygones d'herbiers hors vasière) qui permettent d'arriver à une couche cartographique prête à l'usage.

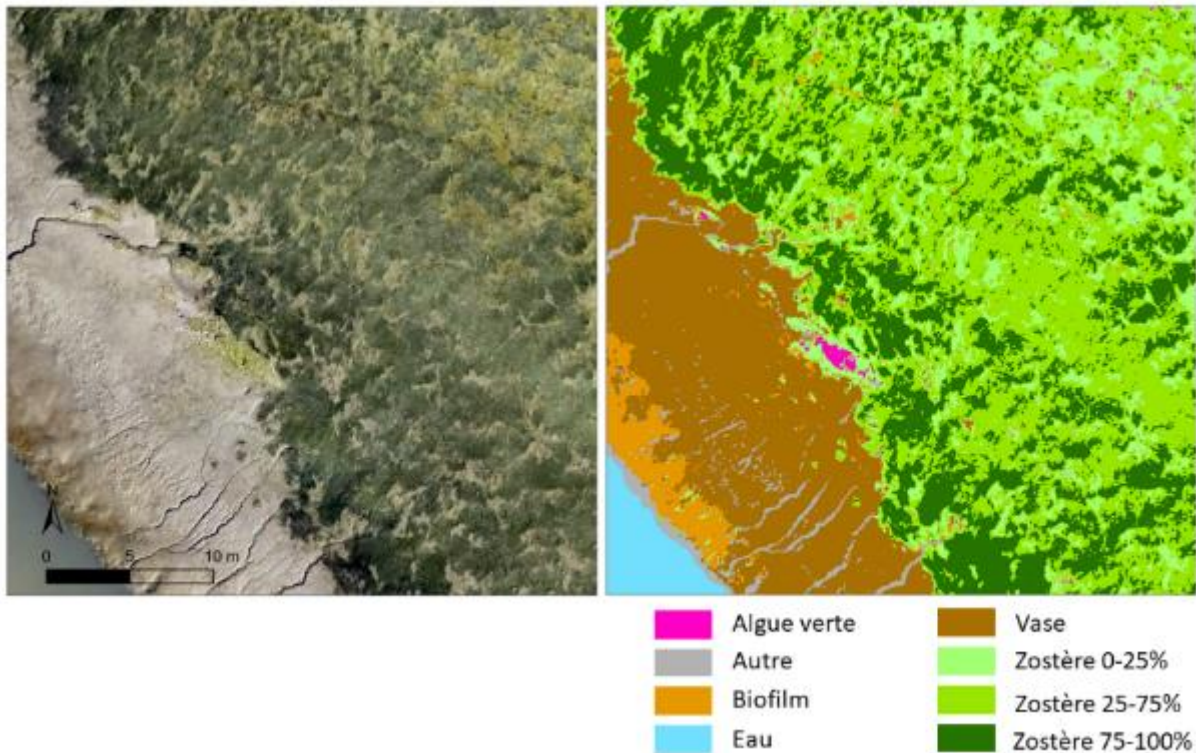


FIGURE 26. PRESENTATION D'UN EXTRAIT DU RESULTAT DE CLASSIFICATION PAR RANDOM FOREST SUR UNE PORTION DE LA FOSSE DE LOIX A PARTIR DE L'IMAGE DRONE 2020. A GAUCHE, UN ZOOM SUR L'IMAGE DRONE A DROITE, LES CLASSES PREDITES

2.3.2 Distribution spatiale des enveloppes d'herbier à zostères naines et taux de recouvrement associés

2.3.2.1 Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 1979

La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 27.

Au total, 482 polygones constituent le shape herbier 1979. Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées Tableau 4. Sur la totalité de la zone étudiée, 153 ha sont occupés par de l'herbier à zostères naines sur les 327 ha analysés.

Le secteur restreint autour de la zone de travaux est couvert par environ 30.4 ha d'herbier à zostères naines, soit 58% de la surface analysée. La majorité de cet herbier présente un taux de recouvrement de 25 à 75%.

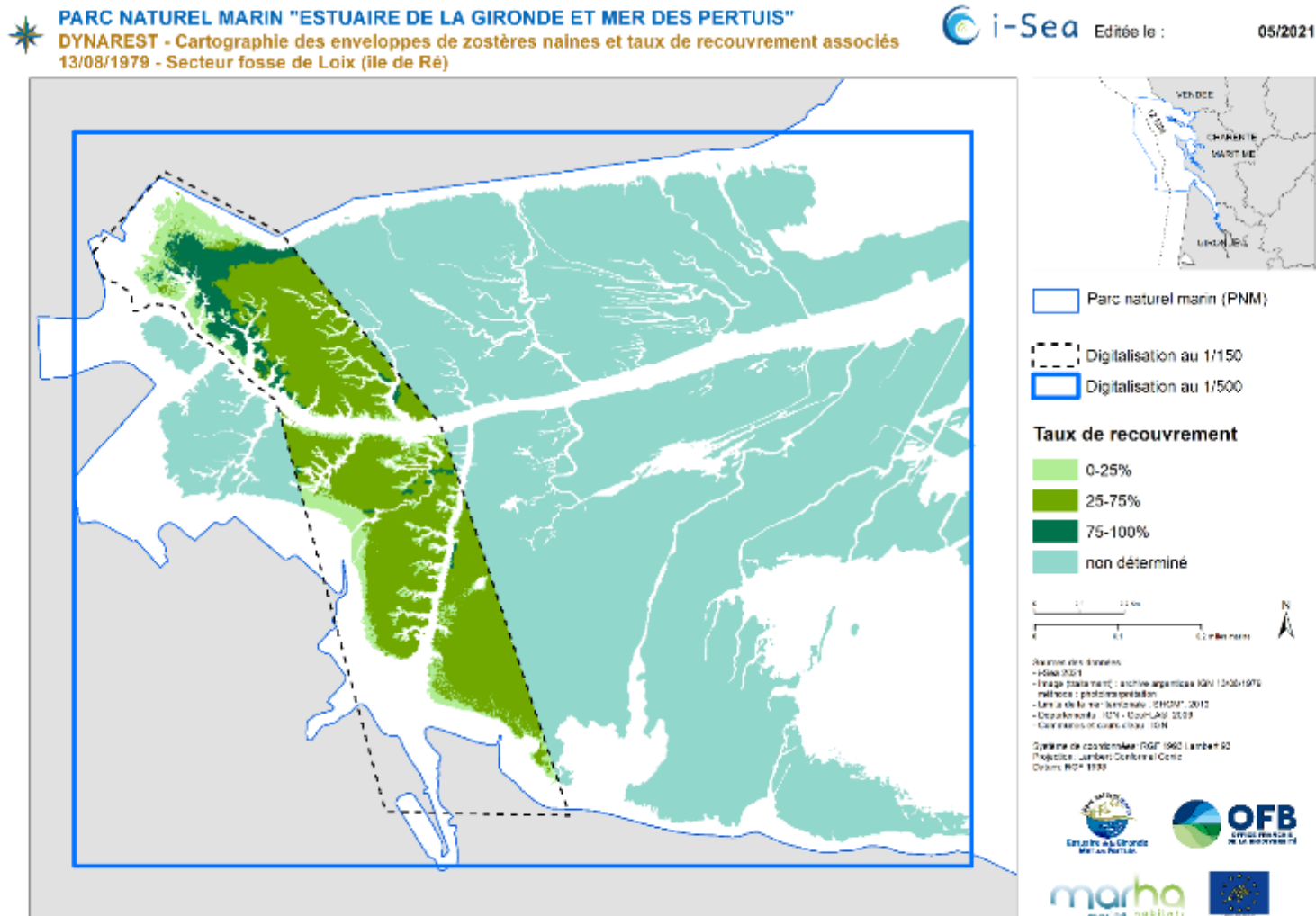


FIGURE 27. CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES OBTENUS DANS LE CADRE DU PROJET DYNAREST PAR PHOTO-INTERPRETATION DE L'IMAGE DU 13/08/1979 SUR LE SECTEUR D'ANALYSE DE LA FOSSE DE LOIX, SUR LE TERRITOIRE DU PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

L'herbier très dense (taux de recouvrement supérieur à 75%) est situé dans la partie nord-ouest de la zone d'étude et s'étend sur 2.9 ha.

Les surfaces couvertes par de l'herbier peu dense (taux de recouvrement de 0 à 25%) se situent en bordure d'herbier et le long des chenaux.

Hors secteur restreint, l'herbier à zostères naines s'étend sur environ 123 ha.

TABLEAU 4. SURFACES COUVERTES EN HECTARE ET NOMBRE DE POLYONES ASSOCIES POUR CHACUN DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX POUR L'ANNEE 1979

Taux de recouvrement	Nombre de polygones	Surface (ha)
0-25%	284	6.1
25-75%	155	21.4
75-100%	42	2.9
Total emprise 1/150	481	30.4
Hors secteur restreint	1	122.7
Total	482	153.1

2.3.2.2 Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 1987

La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 28.

Au total, 530 polygones constituent le shape herbier 1987. Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées Tableau 5. Sur le secteur restreint autour de la zone de travaux qui a été photo interprétée au 1/150, 32 ha sont occupés par de l'herbier à zostères naines.

En dehors de ce secteur, la photo-interprétation n'a pas été réalisée car le niveau d'eau sur l'estran était trop élevé pour détourner l'emprise de l'herbier.

Le secteur restreint autour de la zone de travaux est couvert par environ 32 ha d'herbier à zostères naines, soit à peine plus de 60% du secteur d'analyse. La majorité de cet herbier présente un taux de recouvrement de 25 à 75%. Malgré les travaux, nettement visibles sur l'image, l'impact sur l'enveloppe globale d'herbier n'est pas perceptible. Le dénudement de certaines surfaces liées à la pose de la canalisation semble compensé par la colonisation des bordures de chenaux.

L'herbier très dense (taux de recouvrement supérieur à 75%) est situé dans la partie nord-ouest de la zone d'étude (environ 3.7 ha) mais également dans la zone située au sud du chenal avec deux « taches » couvrant environ 1.9 ha. Au total, il s'étend sur 5.8 ha dans ce secteur restreint autour de la zone de travaux.

Les surfaces couvertes par de l'herbier peu dense (taux de recouvrement de 0 à 25%) se situent en bordure d'herbier et le long des chenaux. Elles représentent environ 5.2 ha. A proximité immédiate des conduites installées en 1984, la vasière est entièrement dépourvue d'herbier.

TABLEAU 5. SURFACES COUVERTES EN HECTARE ET NOMBRE DE POLYGOUES ASSOCIES POUR CHACUN DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX POUR L'ANNEE 1987

Taux de recouvrement	Nombre de polygones	Surface (ha)
0-25%	397	5.2
25-75%	125	21.0
75-100%	8	5.8
Total emprise 1/150	530	32.0

Hors secteur restreint	non cartographié	non cartographié
------------------------	------------------	------------------

2.3.2.3 Enveloppe d'herbier et taux de recouvrement pour l'année 2000

Au total, 445 polygones constituent le shape herbier 2000. Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées Tableau 6. Sur la totalité de la zone étudiée, 183.7 ha sont occupés par de l'herbier à zostères naines.

La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 29.

Le secteur restreint autour de la zone de travaux est couvert par environ 38.1 ha d'herbier à zostères naines, soit environ 73% de la surface d'analyse. La majorité de cet herbier présente un taux de recouvrement de 25 à 75%. Cette analyse semble indiquer une recolonisation significative de l'estran par les herbiers dans la zone des travaux.

Une partie de l'herbier très dense (environ 4.5 ha) est situé dans la partie nord-ouest de la zone d'étude, l'autre partie se trouve au sud du chenal principal, il est divisé en deux tâches principales qui s'étendent sur environ 3.6 ha. Au total, il couvre 8.8 ha dans ce secteur restreint.

Les surfaces couvertes par de l'herbier peu dense se situent en bordure d'herbier et le long des chenaux principaux et secondaires. Elles s'étendent sur environ 5.1 ha.

Hors secteur restreint, l'herbier à zostères naines s'étend sur environ 145.5 ha.

TABLEAU 6. SURFACES COUVERTES EN HECTARE ET NOMBRE DE POLYGOUES ASSOCIES POUR CHACUN DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX POUR L'ANNEE 2000

Taux de recouvrement	Nombre de polygones	Surface (ha)
0-25%	331	5.1
25-75%	94	24.2
75-100%	19	8.8
Total emprise 1/150	444	38.1

Hors secteur restreint	1	145.5
------------------------	---	-------

Total	445	183.7
-------	-----	-------

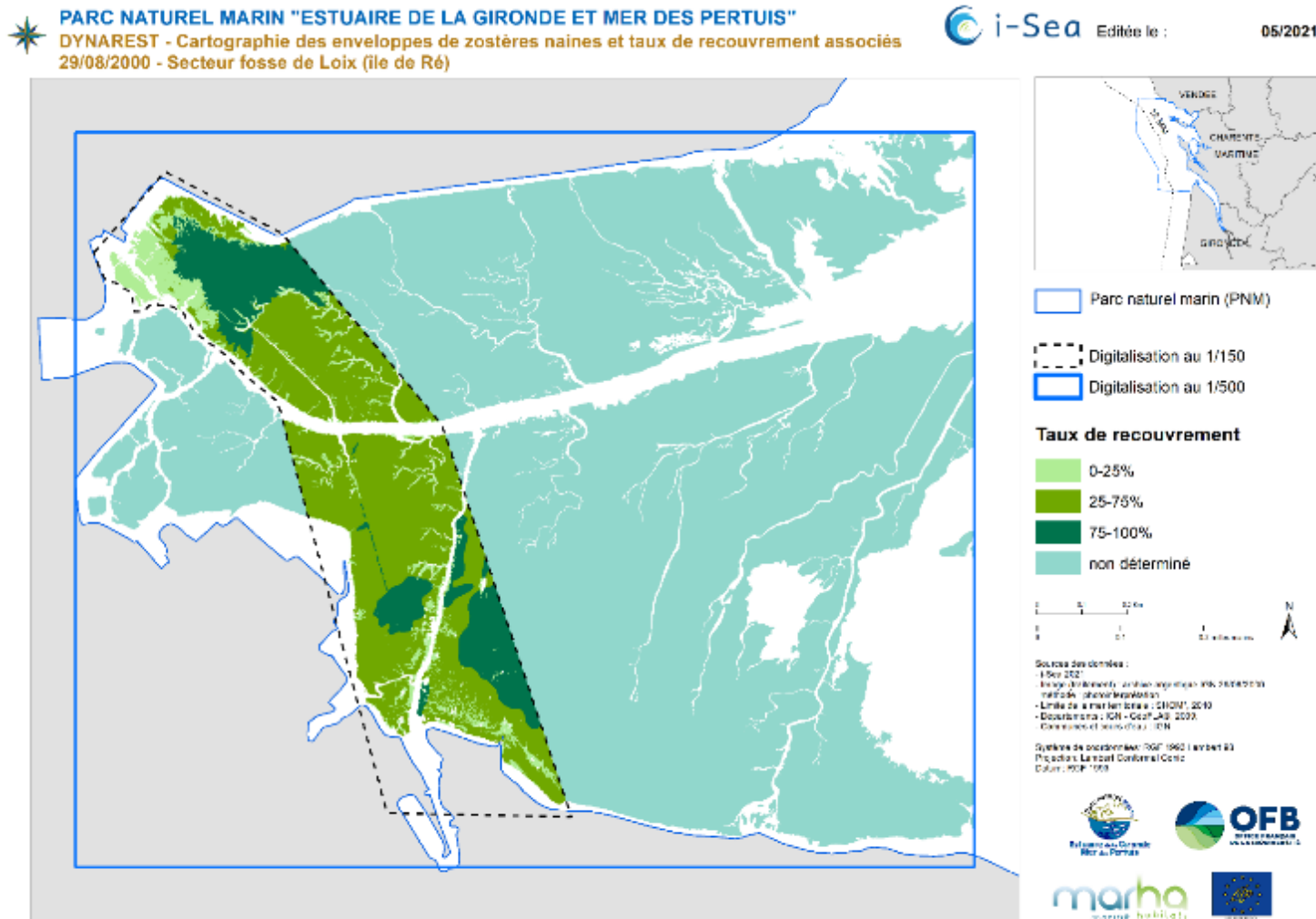


FIGURE 29. CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES OBTENUS DANS LE CADRE DU PROJET DYNAREST PAR PHOTO-INTERPRETATION DE L'IMAGE DU 29/08/2000 SUR LE SECTEUR D'ANALYSE DE LA FOSSE DE LOIX, SUR LE TERRITOIRE DU PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

2.3.2.4 Taux de recouvrement pour l'année 2000 (analyse SPOT)

L'analyse de l'image SPOT de 2000 au sein des enveloppes d'herbier de zostères naines prédites dans le cadre du contrat CartoHECo, a permis d'individualiser 147 polygones. Les surfaces occupées par ces trois classes DCE sur le périmètre élargi de la fosse de Loix sont reportées Figure 30. La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 31.

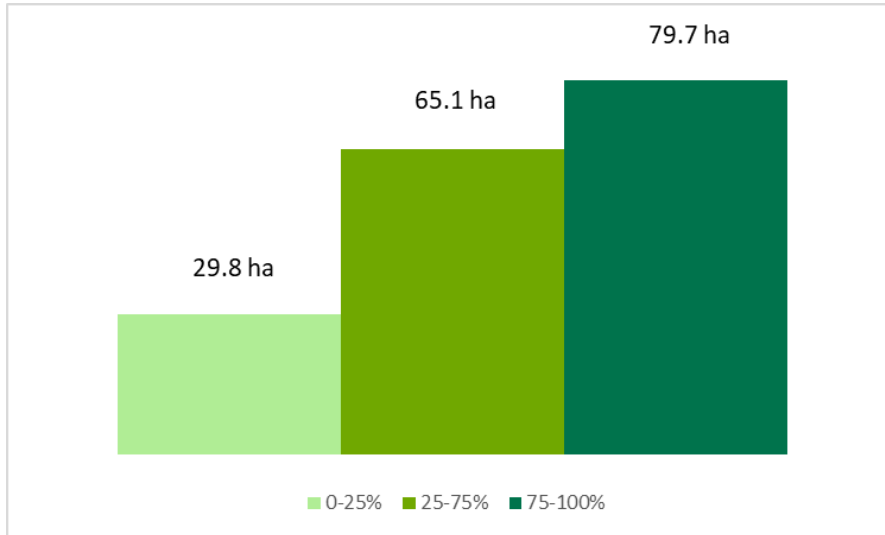


FIGURE 30. REPARTITION DES SURFACES OCCUPEE PAR LES HERBIERS POUR LES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT DCE OBTENUS PAR ANALYSE DE L'IMAGE SPOT DE 2000 DANS LA FOSSE DE LOIX

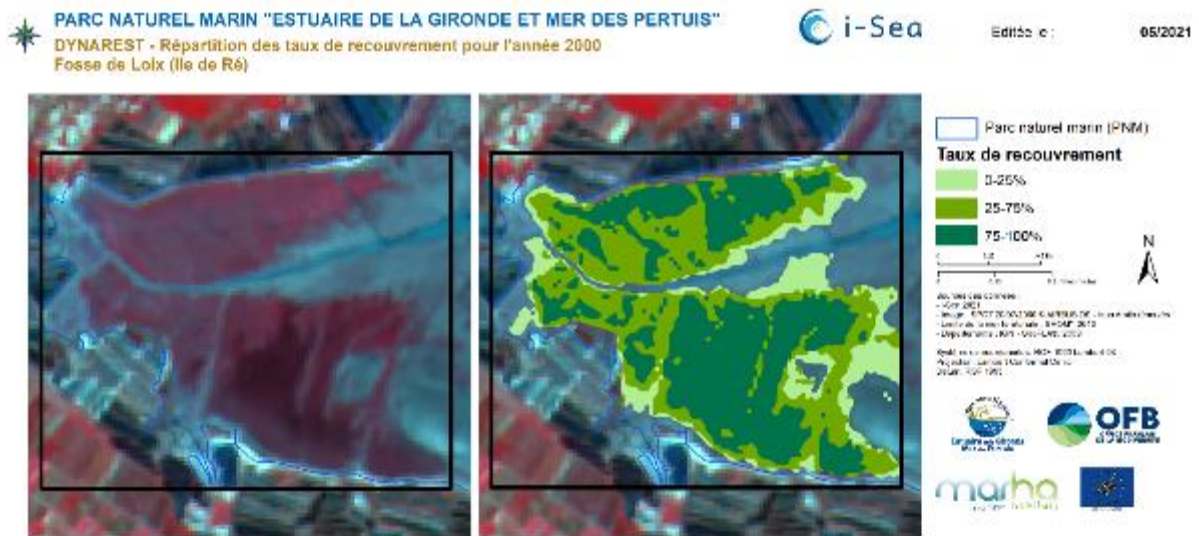


FIGURE 31. CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES D'HERBIER EN FONCTION DU TAUX DE RECOUVREMENT OBTENUE PAR LE TRAITEMENT DE L'IMAGE SPOT DE 2000 SUR LA FOSSE DE LOIX, A GAUCHE : COMPOSITION COLOREE PROCHE INFRA ROUGE, ROUGE, VERT, A DROITE : RESULTAT DE LA CLASSIFICATION

Pour la suite de l'analyse, en dehors du secteur restreint, les limites des polygones ont été fusionnées pour ne conserver que l'enveloppe, sans tenir compte des taux de recouvrement de l'herbier. Ces derniers sont analysés dans l'emprise du secteur restreint.

Ce shape herbier SPOT 2000 est constitué de 33 polygones, totalisant une surface d'environ 174.5 ha.

Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées dans le Tableau 7.

TABLEAU 7. SURFACES COUVERTES EN HECTARE ET NOMBRE DE POLYGOUES ASSOCIES POUR CHACUN DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX POUR L'ANNEE 2000 A PARTIR D'UNE IMAGE SPOT

Taux de recouvrement	Nombre de polygones	Surface (ha)
0-25%	4	4.3
25-75%	10	20.2
75-100%	18	11.4
Total emprise secteur restreint	32	35.9
Hors secteur restreint	1	138.6
Total	33	174.5

La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 32.

Le secteur restreint autour de la zone de travaux est couvert par environ 35,9 ha d'herbier à zostères naines, soit près de 70% de la surface d'analyse. La majorité de cet herbier présente un taux de recouvrement de 25 à 75%.

L'herbier très dense est fragmenté et se divise en plusieurs taches dans tout le secteur restreint autour des travaux. Au total, il couvre 11.4 ha dans cette zone.

Les surfaces couvertes par de l'herbier peu dense se situent en bordure d'herbier et le long des chenaux. Elles s'étendent sur environ 4.3 ha.

La résolution de l'image SPOT 4 acquise le 20/07/2000 ne permet pas de différencier les micro-chenaux, qui ont une largeur inférieure à 20 m, donc inférieure à la taille d'un pixel SPOT 4. L'effacement des chenaux et zones de sédiment nu de faible emprise se traduit directement sur le nombre de polygones d'herbiers observés, plus de dix fois plus important sur la donnée issue du traitement de la photographie aérienne (cf. Tableau 6 et Tableau 7). En termes de surface, l'écart entre les deux résultats est de 5% (soit environ 7 ha pour le seul secteur restreint). Les enveloppes détournées à très haute résolution spatiale étant, à la fois, plus nombreuses et représentant une superficie totale supérieure. Ce chiffre ne peut être considéré comme une bonne mesure du biais sur la méthode de mesure, cet exercice de comparaison doit être multiplié pour estimer l'erreur introduite par l'exploitation de données de nature différente.

Il faudra en tenir compte de biais pour l'analyse date à date et l'interprétation des cartes réalisées à partir de supports de résolution spatiales comprises entre quelques centimètres (pour le drone) et dizaines de mètres pour les données satellitaires les plus anciennes.

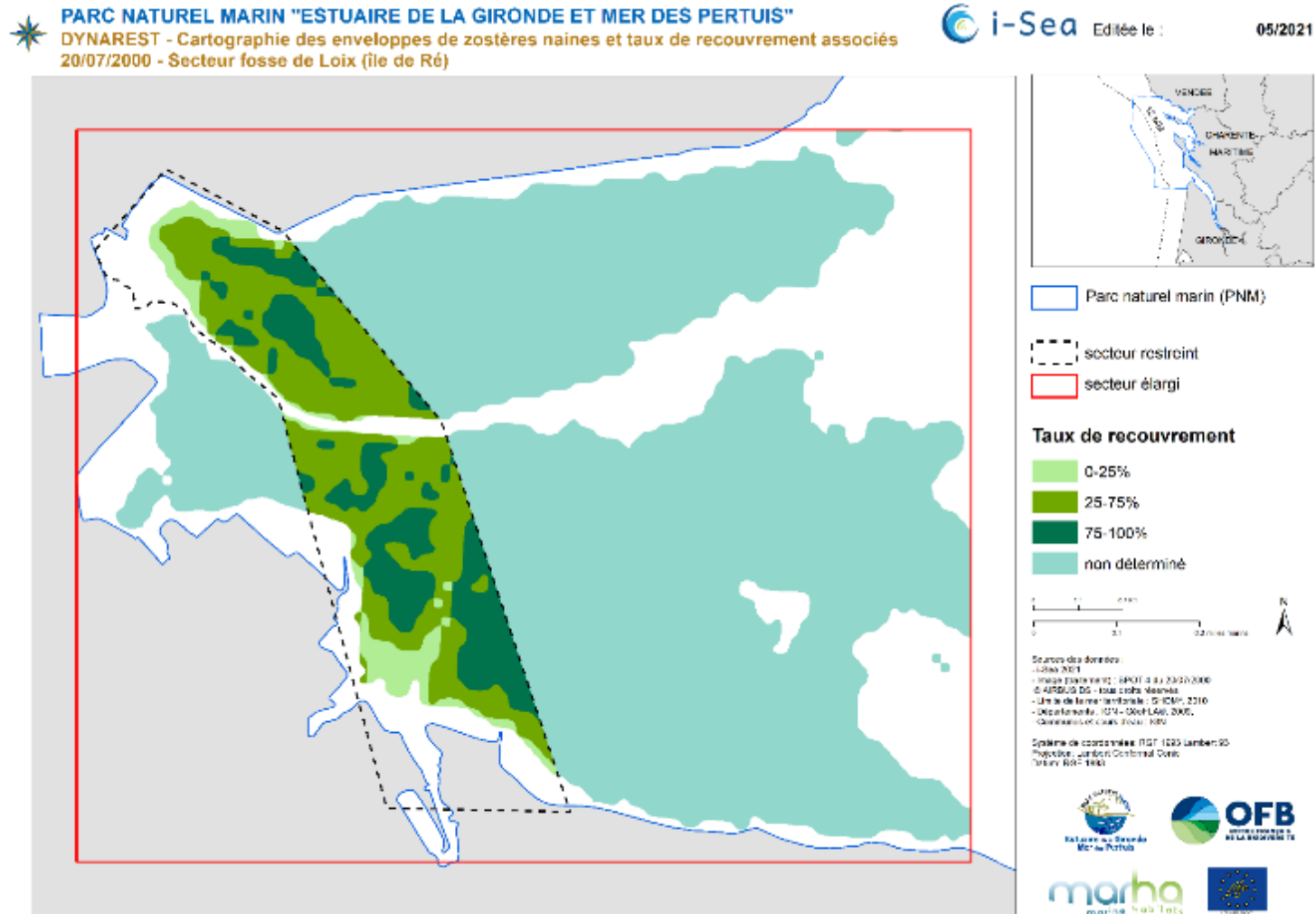


FIGURE 32. CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES OBTENUS PAR ANALYSE DE L'IMAGE SPOT DU 20/07/2000 SUR LE SECTEUR D'ANALYSE DE LA FOSSE DE LOIX

2.3.2.5 Taux de recouvrement pour l'année 2018 (analyse SPOT)

L'analyse de l'image SPOT de 2018 au sein des enveloppes d'herbier de zostères naines prédites (CartoHECo), a permis d'individualiser 645 polygones répartis dans les trois taux de recouvrement prédéfinis sur l'ensemble de la fosse de Loix. Les surfaces occupées par ces trois classes sont reportées Figure 33. Ce shape herbier SPOT 2018 totalise une surface d'environ 130.3 ha, soit près de 40% de la surface analysée (soit sur 325 ha sans herbier).

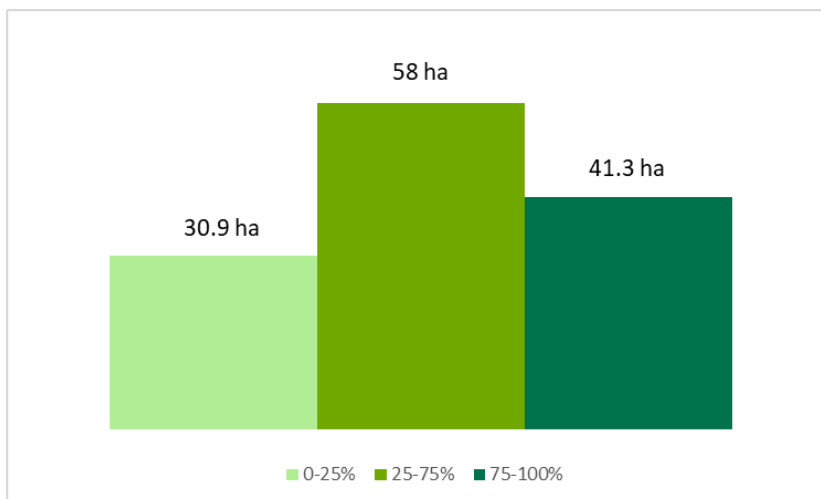


FIGURE 33. REPARTITION DES SURFACES DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT SPOT 2018 DANS L'ENSEMBLE DE LA FOSSE DE LOIX (PARC NATUREL MARINS DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LE LA MER DES PERTUIS)

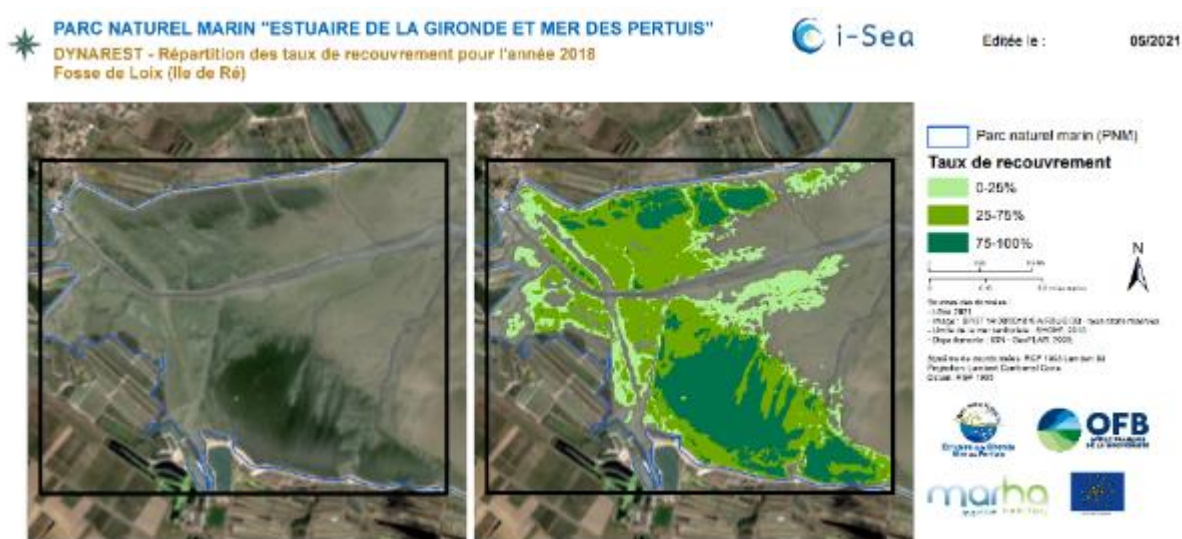


FIGURE 34. REPARTITION DES TAUX DE RECOUVREMENT PREDITS DANS DYNAREST A L'INTERIEUR DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES PREDITES DANS CARTOHECO A PARTIR DE L'IMAGE SPOT DE 2018 SUR TOTALITE DE LA FOSSE DE LOIX

Pour la suite de l'analyse, en dehors du secteur restreint, les limites des polygones ont été fusionnées pour ne conserver que l'enveloppe, sans tenir compte des taux de recouvrement de l'herbier. Ces derniers sont analysés dans l'emprise du secteur restreint.

Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées dans le Tableau 8. La carte des enveloppes et taux de recouvrement associés est présentée Figure 35.

TABLEAU 8. SURFACES COUVERTES EN HECTARE ET NOMBRE DE POLYONES ASSOCIES POUR CHACUN DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX POUR L'ANNEE 2018 A PARTIR D'UNE IMAGE SPOT

Taux de recouvrement	Nombre de polygones	Surface (ha)
0-25%	25	8.5
25-75%	51	18.2
75-100%	50	4.4
Total emprise secteur restreint	126	31.1
Hors secteur restreint	1	99.2
Total	127	130.3

Le secteur restreint autour de la zone de travaux est couvert par environ 31.1 ha d'herbier à zostères naines soit près de 60% de la surface du secteur restreint. La majorité de cet herbier présente un taux de recouvrement de 25 à 75%. L'effet des travaux entrepris est bien marqué par la diminution de l'enveloppe globale de l'herbier, sans mécanisme de compensation, comme celui illustré en 1987.

La majorité de l'herbier très dense se trouve dans la partie sud-est du secteur restreint, quelques taches de plus petites tailles se situent au nord du chenal principal. Au total, il couvre 4.4 ha dans cette zone.

Les surfaces couvertes par de l'herbier peu dense se situent en bordure d'herbier, le long des chenaux ainsi que tout autour de la zone de pose de canalisation. Elles s'étendent sur environ 8.5 ha.

Sur cette cartographie de 2018, la zone de travaux est marquée par la disparition totale de l'herbier à proximité directe des travaux réalisés la même année.

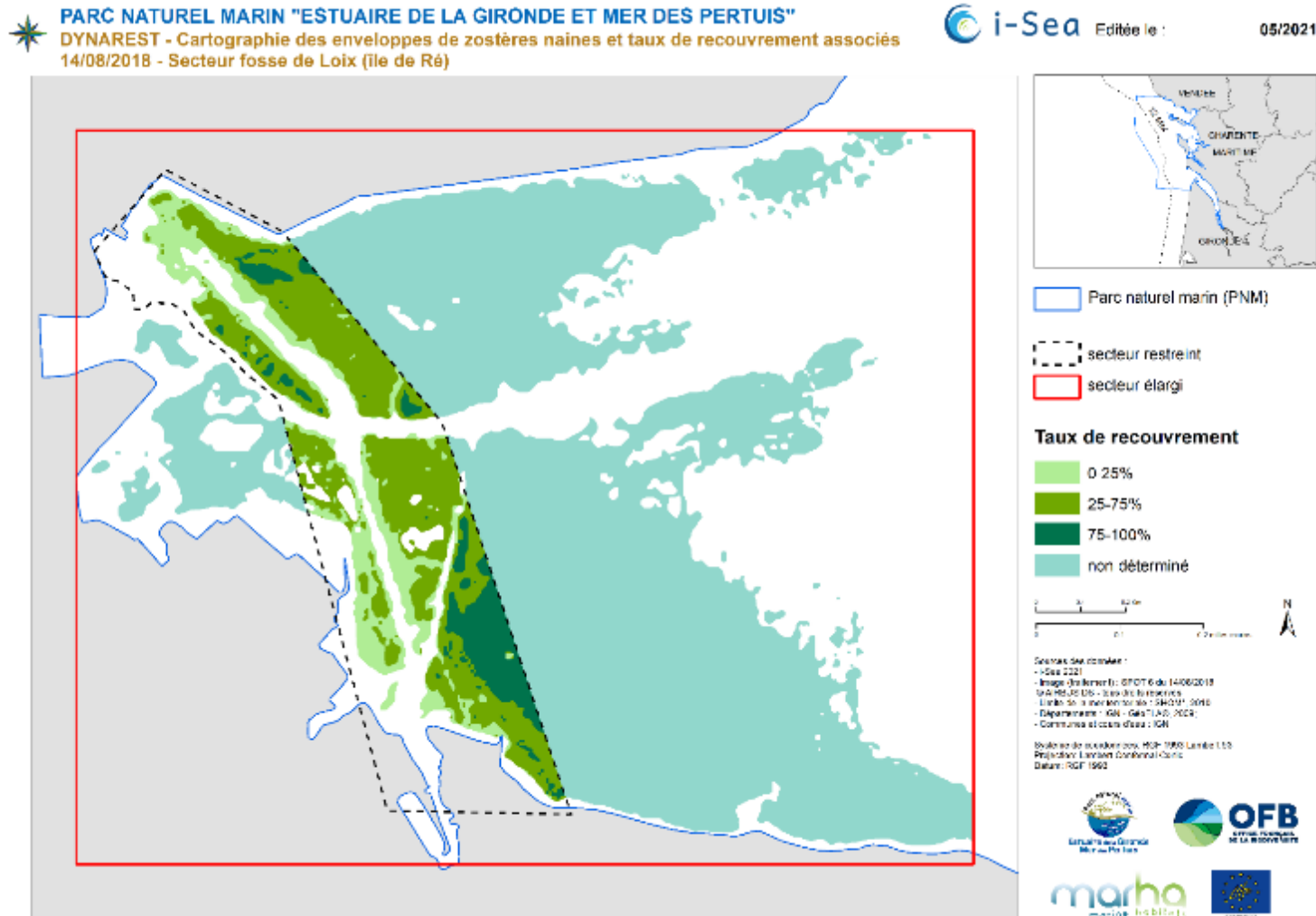


Figure 35. Cartographie des enveloppes de zostères naines et taux de recouvrement associés obtenus par analyse de l'image SPOT du 14/08/2018 sur le secteur d'analyse de la fosse de Loix

2.3.2.6 Enveloppes d'herbier de zostères naines et taux de recouvrement associés à partir de l'image drone pour l'année 2020

Au total, 1 750 048 polygones constituent le shape herbier réalisé dans l'emprise de l'image drone de 2020. Sur les 45.2 ha de la zone étudiée, 31.7 ha sont occupés par de l'herbier à zostères naines. Le nombre très élevé de polygones détectés sur secteur est lié à la résolution très fine de l'image drone. La surface importante occupée par l'herbier (environ 70% de la surface d'analyse) illustre la recolonisation de l'herbier, notamment à proximité de la canalisation.

Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées Figure 36.

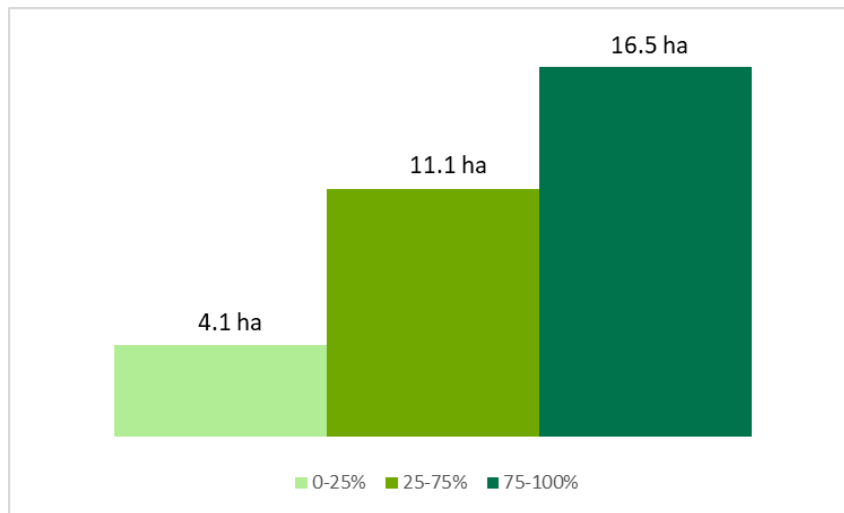


FIGURE 36. REPARTITION DES SURFACES DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT DRONE 2020 DANS LA FOSSE DE LOIX

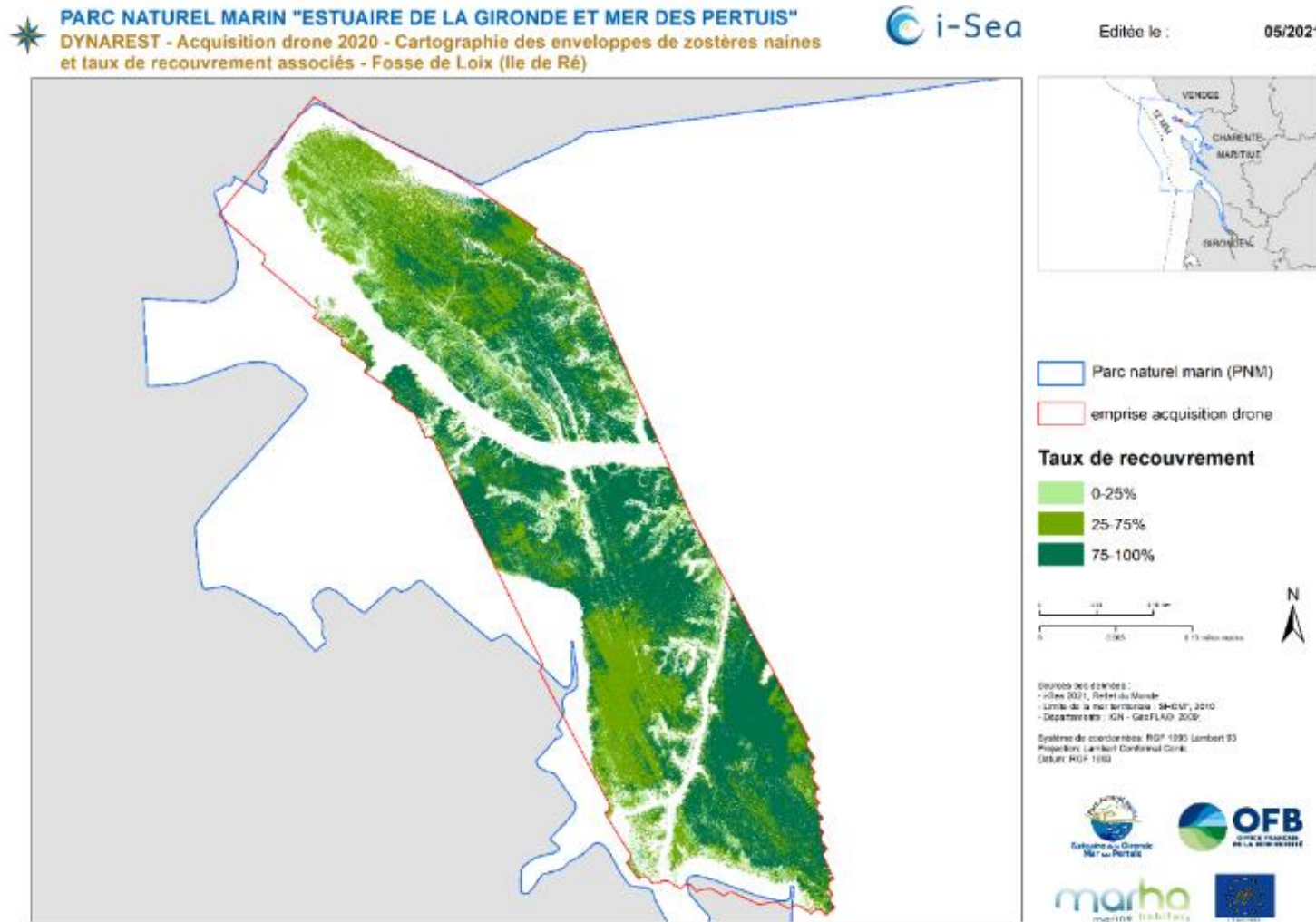


FIGURE 37. CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES OBTENUS PAR ANALYSE DE L'IMAGE DRONE DE 2020 SUR LE SECTEUR DE LA FOSSE DE LOIX

2.3.3 Résultats de l'analyse spatio-temporelle des enveloppes et taux de recouvrement d'herbier

Cette section est organisée comme suit.

Tout d'abord, l'ensemble des résultats quantitatifs de l'analyse de l'évolution surfacique des herbiers est présenté dans une succession de tableaux, introduits ci-après. Puis, les cartes de comparaison date à date sont présentées pour spatialiser finement les secteurs en évolution. L'analyse de ces cartes est étayée par les données reportées dans les tableaux.

Dans les tableaux, pour faciliter la comparaison des résultats, l'analyse des évolutions surfaciques a été rapportée au périmètre restreint en tenant compte des taux de recouvrement et sans en tenir compte dans le secteur élargi. Comme l'emprise de l'acquisition de l'image drone de 2020 ne couvre pas la totalité du périmètre restreint défini autour de la zone de travaux (Figure 38), des calculs d'évolution des enveloppes d'herbier dans le périmètre de l'acquisition de l'image drone ont également été effectués.

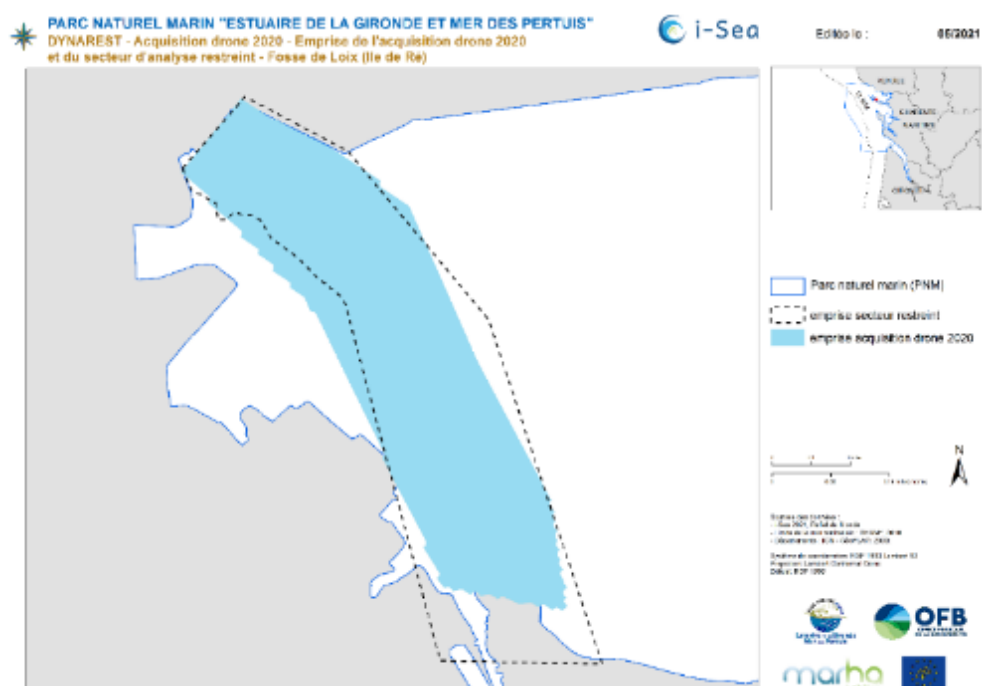


FIGURE 38. EMPRISE DE L'ACQUISITION DRONE DE 2020 ET DU SECTEUR D'ANALYSE RESTREINT AUTOUR DE LA ZONE DE TRAVAUX - SECTEUR DE LA FOSSE DE LOIX

Les surfaces des enveloppes au sein du périmètre restreint exprimées en fonction du taux de recouvrement sont répertoriées, pour chacune des dates, dans le Tableau 9. Le Tableau 10 présente un bilan chiffré des évolutions des enveloppes de zostères naines dans le périmètre d'acquisition de l'image drone de 2020. Pour plus de lisibilité, le contenu de ces deux tableaux est également reporté sur les Figure 39 et Figure 40.

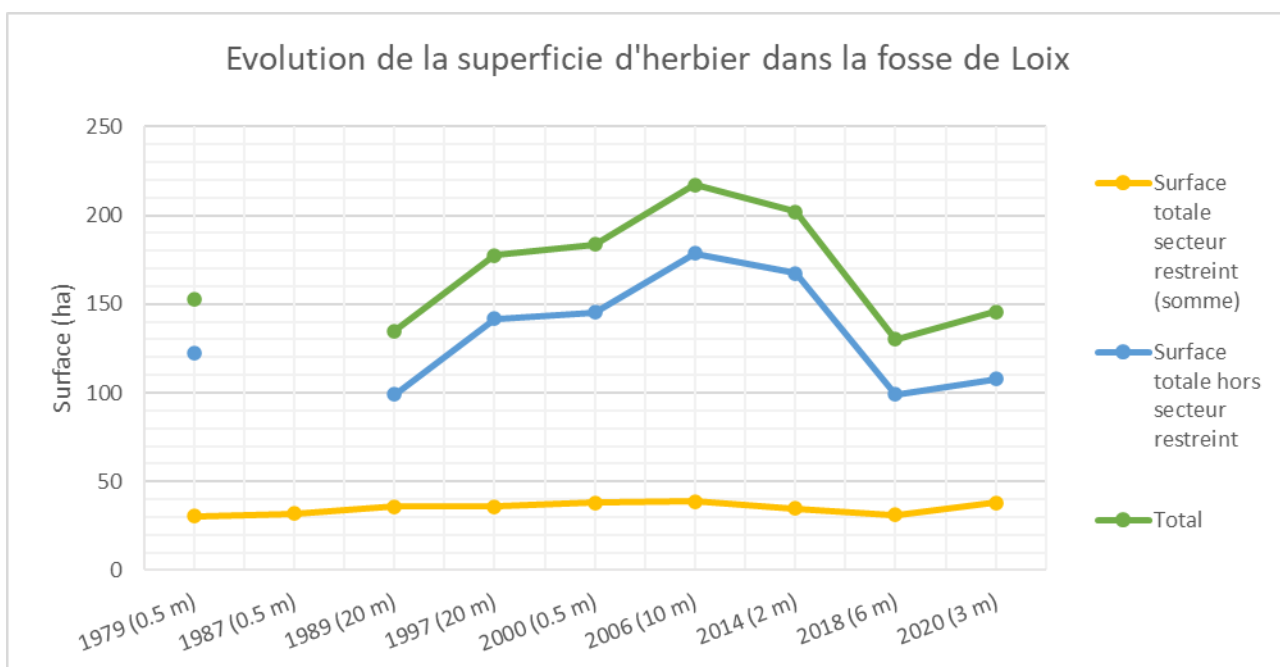


FIGURE 39. EVOLUTION DE LA SURFACE TOTALE D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX, SECTEUR RESTREINT ET HORS SECTEUR RESTREINT DISCRIMINES (LA RESOLUTION DES IMAGES SOURCE EST EXPRIMEE ENTRE PARENTHESES ASSOCIEE A L'ANNEE D'ACQUISITION). POUR 2000 ET 2020, NOUS AVONS RETENU LES SOURCES DE DONNEES LES PLUS FIABLES ET/OU PLUS PRECISES SUR LE PLAN DE LA RESOLUTION SPATIALE.

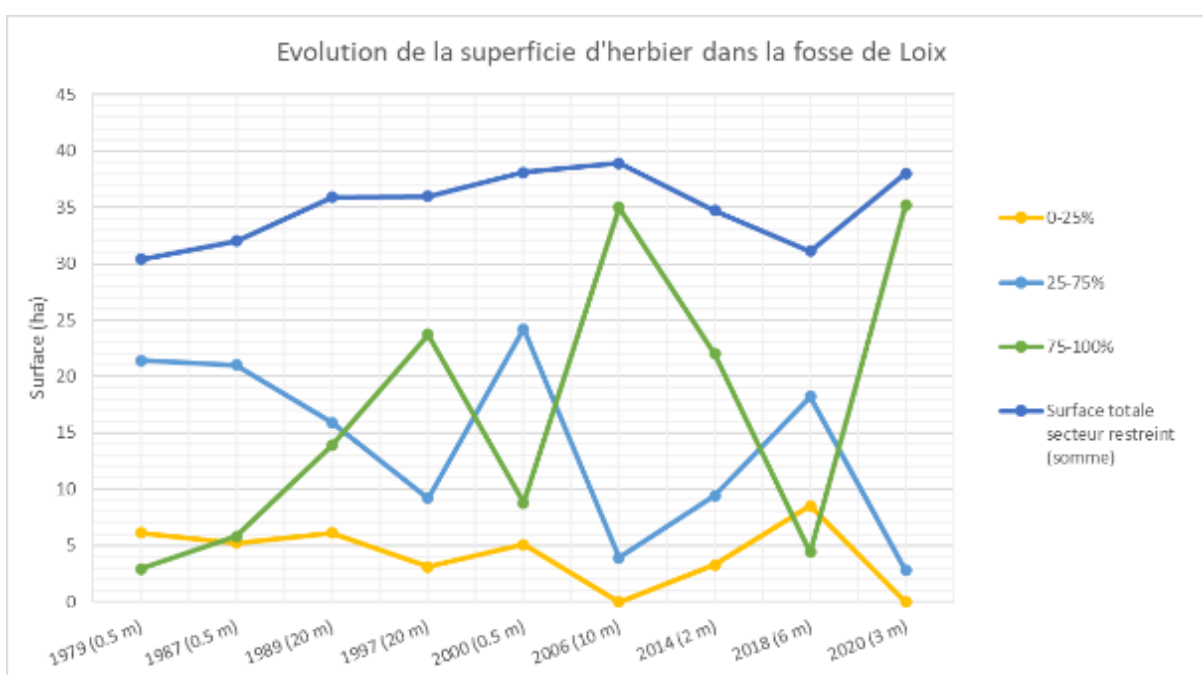


FIGURE 40. EVOLUTION DE LA SURFACE D'HERBIER DANS LA FOSSE DE LOIX, A L'INTERIEUR DU SECTEUR RESTREINT, AU TOTAL ET EN TENANT COMPTE DU TAUX DE RECOUVREMENT (LA RESOLUTION DES IMAGES SOURCE EST EXPRIMEE ENTRE PARENTHESES ASSOCIEE A L'ANNEE D'ACQUISITION). POUR 2000 ET 2020, NOUS AVONS RETENU LES SOURCES DE DONNEES LES PLUS FIABLES ET/OU PLUS PRECISES SUR LE PLAN DE LA RESOLUTION SPATIALE.

TABLEAU 9. SURFACE DES ENVELOPPES PAR TAUX DE RECOUVREMENT DE L'HERBIER DE ZOSTERES NAINES DE L'ENSEMBLE DES DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE SUR LA FOSSE DE LOIX, DANS LE PERIMETRE RESTREINT AUTOUR DE LA ZONE DE TRAVAUX. LES SURFACES SONT EXPRIMEES EN HECTARES.

Taux de recouvrement	1979 (0.5m)	1987 (0.5m)	1989 (20m)	1997 (20m)	2000 (0.5m)	2000 (20m)	2006 (10m)	2014 (2m)	2018 (6m)	2020 (3m)
0-25%	6.1	5.2	6.1	3.1	5.1	4.3	0.0	3.3	8.5	0.0
25-75%	21.4	21.0	15.9	9.2	24.2	20.2	3.9	9.4	18.2	2.8
75-100%	2.9	5.8	13.9	23.7	8.8	11.4	35.0	22.0	4.4	35.2
Hors secteur restreint	122.7	non digitalisé	99.0	141.6	145.5	138.6	178.5	167.4	99.2	107.8
Total	153.1		135.0	177.6	183.7	174.5	217.3	202.1	130.3	145.8

TABLEAU 10. SURFACE DES ENVELOPPES DE L'HERBIER DE ZOSTERES NAINES DE L'ENSEMBLE DES DONNEES UTILISEES POUR L'ANALYSE SUR LA FOSSE DE LOIX, DANS LE PERIMETRE DE L'ACQUISITION DE L'IMAGE DRONE 2020 (45,2 HA). LES SURFACES SONT EXPRIMEES EN HECTARES.

Date et résolution	Surface (ha)	Taux d'occupation %	Date et résolution	Surface (ha)	Taux d'occupation %
1979 (0.5m)	30.4	67 %	2006 (10m)	38.7	86 %
1987 (0.5m)	31.4	69 %	2014 (2m)	35.0	77 %
1989 (20m)	35.1	78 %	2018 (6m)	29.5	65 %
1997 (20m)	35.0	77 %	2020 (3m)	37.4	83 %
2000 (0.5m)	37.5	83 %	2020 (0.025m)	31.7	70 %
2000 (20m)	36.1	80 %			

Le Tableau 11 présente un bilan chiffré surfacique des évolutions des taux de recouvrement de zostères naines dans le secteur restreint autour de la zone de travaux et un bilan surfacique des évolutions des enveloppes de zostères naines sans distinction de taux de recouvrement pour les polygones situés en dehors du périmètre restreint. Les surfaces pour chacune des dates sont représentées en hectares.

Le Tableau 12 présente un bilan chiffré des évolutions surfaciques des enveloppes d'herbier de zostères naines entre 1979 et 2020 sur l'emprise d'acquisition de l'image drone 2020 dans la fosse de Loix pour les images de haute résolution à très haute résolution.

Les cartes de comparaison des enveloppes et taux de recouvrement des zostères naines sur le site de la fosse de Loix pour la période 1979-2020 sont présentées de la Figure 41 à la Figure 52.

TABLEAU 11. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES DE L'HERBIER ENTRE 1978 ET 2020 SUR LA FOSSE DE LOIX POUR LES IMAGES DE HAUTE RESOLUTION A TRES HAUTE RESOLUTION (SURFACES INDIQUEES EN HECTARES)

		1978-1987	1987-1989	1989-1997	1987-2000	1997-2000
Résolution (m)		0.5m/0.5m	0.5m/20m	20m/20m	0.5m/0.5m	20m/0.5m
Secteur 1/150	Taux de recouvrement constant 0-25%	1.2	1.1	1.0	1.0	0.7
	Taux de recouvrement constant 25-75%	13.4	8.1	4.8	14.2	6.5
	Taux de recouvrement constant 75-100%	0.6	2.8	11.5	2.3	8.4
	Apparition herbier avec un taux 0-25%	1.7	3.2	1.0	2.4	1.5
	Apparition herbier avec un taux 25-75%	3.2	2.7	1.0	3.5	2.3
	Apparition herbier avec un taux 75-100%	0.3	0.4	0.6	0.9	0.0
	Disparition herbier avec un taux 0-25%	1.4	0.8	1.9	0.3	0.7
	Disparition herbier avec un taux 25-75%	1.6	1.5	0.7	0.3	0.6
	Disparition herbier avec un taux 75-100%	0.6	0.1	0.0	0.1	0.3
	Passage d'un taux de 25-75% à un taux de 0-25%	1.9	1.7	1.0	1.5	1.7
	Passage d'un taux de 75-100% à un taux de 25-75%	1.3	2.8	2.2	3.2	13.9
	Passage d'un taux de 75-100% à un taux de 0-25%	0.5	0.1	0.2	0.2	1.2
	Passage d'un taux de 0-25% à un taux de 25-75%	3.0	2.4	1.2	3.3	1.6
	Passage d'un taux de 25-75% à un taux de 75-100%	4.5	9.7	9.5	5.0	0.4
Passage d'un taux de 0-25% à un taux de 75-100%	0.4	1.0	2.0	0.7	0.1	
Secteur 1/500	Stabilité	pas d'info 1987	pas d'info 1987	95.8	pas d'info 1987	124.7
	Apparition herbier	pas d'info 1987	pas d'info 1987	45.8	pas d'info 1987	20.8
	Disparition herbier	pas d'info 1987	pas d'info 1987	3.2	pas d'info 1987	16.8

		2000-2006	2000-2006	2006-2014	2014-2018	2018-2020
Résolution (m)		0.5m/10m	20m/10m	10m/8m	8m/6m	6m/3m
Secteur 1/150	Taux de recouvrement constant 0-25%	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0
	Taux de recouvrement constant 25-75%	0.8	0.4	0.8	3.3	0.3
	Taux de recouvrement constant 75-100%	8.8	11.4	21.8	4.0	4.4
	Apparition herbier avec un taux 0-25%	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
	Apparition herbier avec un taux 25-75%	1.2	2.3	0.3	1.9	1.8
	Apparition herbier avec un taux 75-100%	1.2	1.7	0.0	0.2	5.5
	Disparition herbier avec un taux 0-25%	0.6	0.5	0.0	1.2	0.2
	Disparition herbier avec un taux 25-75%	0.9	0.4	1.4	2.4	0.1
	Disparition herbier avec un taux 75-100%	0.0	0.0	3.2	2.8	0.0
	Passage d'un taux de 25-75% à un taux de 0-25%	0.0	0.0	1.6	3.4	0.0
	Passage d'un taux de 75-100% à un taux de 25-75%	0.0	0.0	8.3	12.2	0.0
	Passage d'un taux de 75-100% à un taux de 0-25%	0.0	0.0	1.7	2.9	0.0
	Passage d'un taux de 0-25% à un taux de 25-75%	1.9	1.2	0.0	0.8	0.7
	Passage d'un taux de 25-75% à un taux de 75-100%	22.5	19.4	0.1	0.2	17.7
Passage d'un taux de 0-25% à un taux de 75-100%	2.6	2.6	0.0	0.0	7.6	
Secteur 1/500	Stabilité	144.1	137.0	165.7	95.2	87.8
	Apparition herbier	34.4	41.5	1.7	4.0	20.0
	Disparition herbier	1.5	1.6	12.8	72.2	11.4

TABLEAU 12. EVOLUTION DES SURFACES DES ENVELOPPES D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1979 ET 2020 SUR L'EMPRISE D'ACQUISITION DE L'IMAGE DRONE 2020 DANS LA FOSSE DE LOIX POUR LES IMAGES DE HAUTE RESOLUTION A TRES HAUTE RESOLUTION (SURFACES INDIQUEES EN HECTARES)

	Disparition d'herbier	Stabilité	Apparition d'herbier	Bilan	Bilan (en pourcentage de la surface analysée)
1979/1987 0.5m/0.5m	3.6	26.8	4.5	0.9	< 2%
1987/1989 0.5m/20m	2.6	28.8	6.2	3.7	7.5 %
1989/1997 20m/20m	2.7	32.3	2.7	0.0	-
1987/2000 0.5m/0.5m	0.7	30.7	6.8	6.1	13.4 %
1997/2000 20m/0.5m	1.4	33.6	3.8	2.5	5.5 %
1997/2000 20m/20m	1.4	33.6	2.5	1.1	2.5 %
2000/2006 0.5m/10m	1.0	36.5	2.1	1.2	2.6 %
2000/2006 20m/10m	1.0	35.1	3.6	2.6	5.7 %
2006/2014 10m/2m	4.1	34.5	0.4	-3.7	-8.1 %
2014/2018 2m/6m	7.4	27.6	2.0	-5.4	-11.9 %
2018/2020 6m/0.025m	3.5	26.0	5.7	2.2	4.8 %
2018/2020 6m/3m	0.2	29.3	8.0	7.8	17.2 %

2.3.3.1 1979 - 1987

Le secteur analysé concerne uniquement la zone restreinte située à proximité immédiate du secteur de travaux, en raison du niveau d'eau élevé observé sur l'image de 1987.

L'empreinte laissée par la pose de la canalisation en 1984 est toujours visible en 1987 (Figure 41), l'herbier a totalement disparu sur une bande d'environ 20 m de large et d'un peu plus d'1 km de long (environ 2 ha).

Sur l'ensemble du secteur restreint, 3.6 ha d'herbier ont disparu et environ 5.2 ha sont apparus, principalement en bordure d'herbier, au sud.

L'herbier très dense, situé au nord de la zone restreinte en 1979, migre vers le sud d'une cinquantaine de mètres. Quelques zones à forte densité d'herbier se développent également au sud du chenal principal, sur une surface d'environ 1.9 ha.

La couverture totale de l'herbier passe de 30.4 ha en 1979 à 32 ha en 1987.

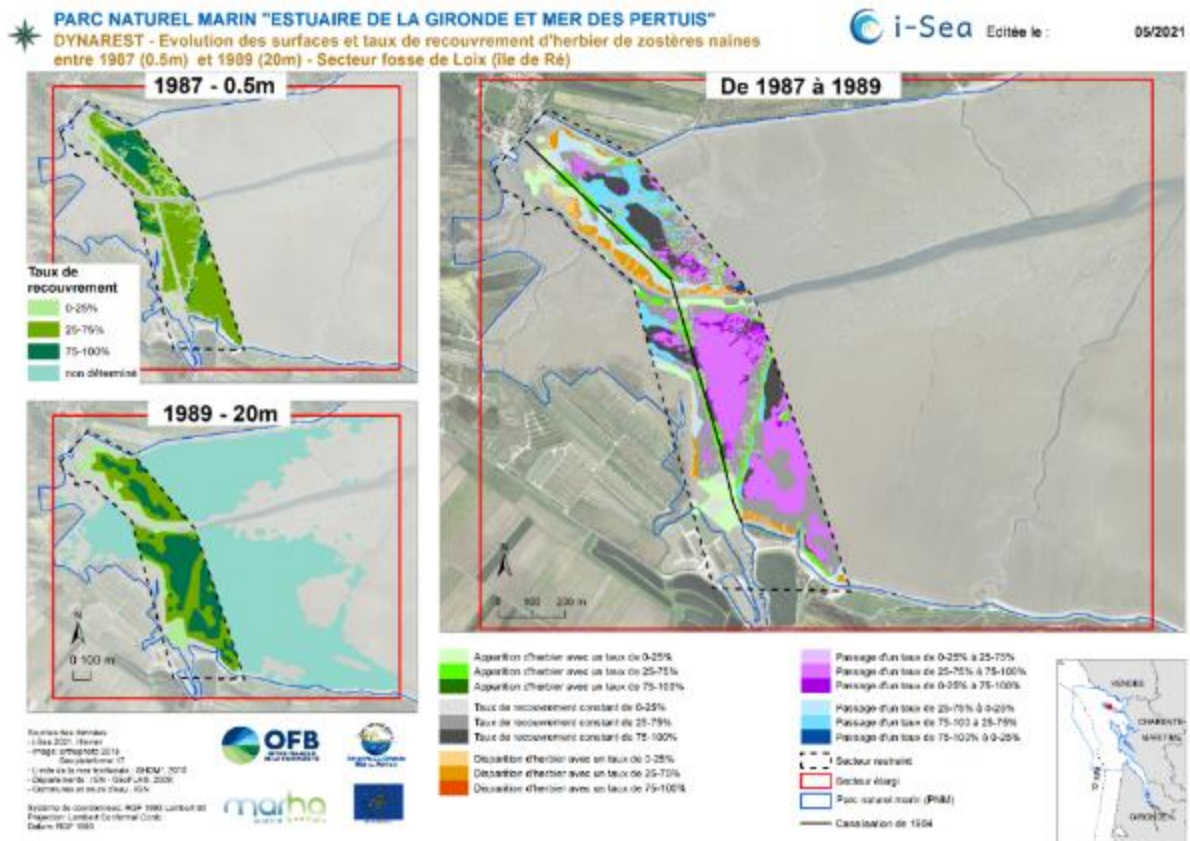


FIGURE 42. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1987 (0.5 M) ET 1989 (20 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.3.3 1989 et 1997

La comparaison porte sur deux images satellite à 20 m de résolution et couvre le secteur restreint mais également le périmètre élargi autour de la zone de travaux (Figure 43).

A cette résolution, l’empreinte de la canalisation de 1984 n’est pas visible.

L’herbier de forte densité s’étend, au nord comme au sud du chenal principal, il occupe la majorité des étendues d’herbier du secteur restreint avec une surface cumulée d’environ 23.7 ha.

Sur le secteur restreint, 2.6 ha d’herbier sont réapparus en bordure d’herbier, au nord du chenal principal, la disparition d’herbier concerne une surface d’environ 2.6 ha également. La couverture totale de l’herbier se maintient à 36 ha.

Sur le secteur élargi, l’herbier a colonisé la vasière sur environ 45.8 ha et 3.2 ha ont disparu.

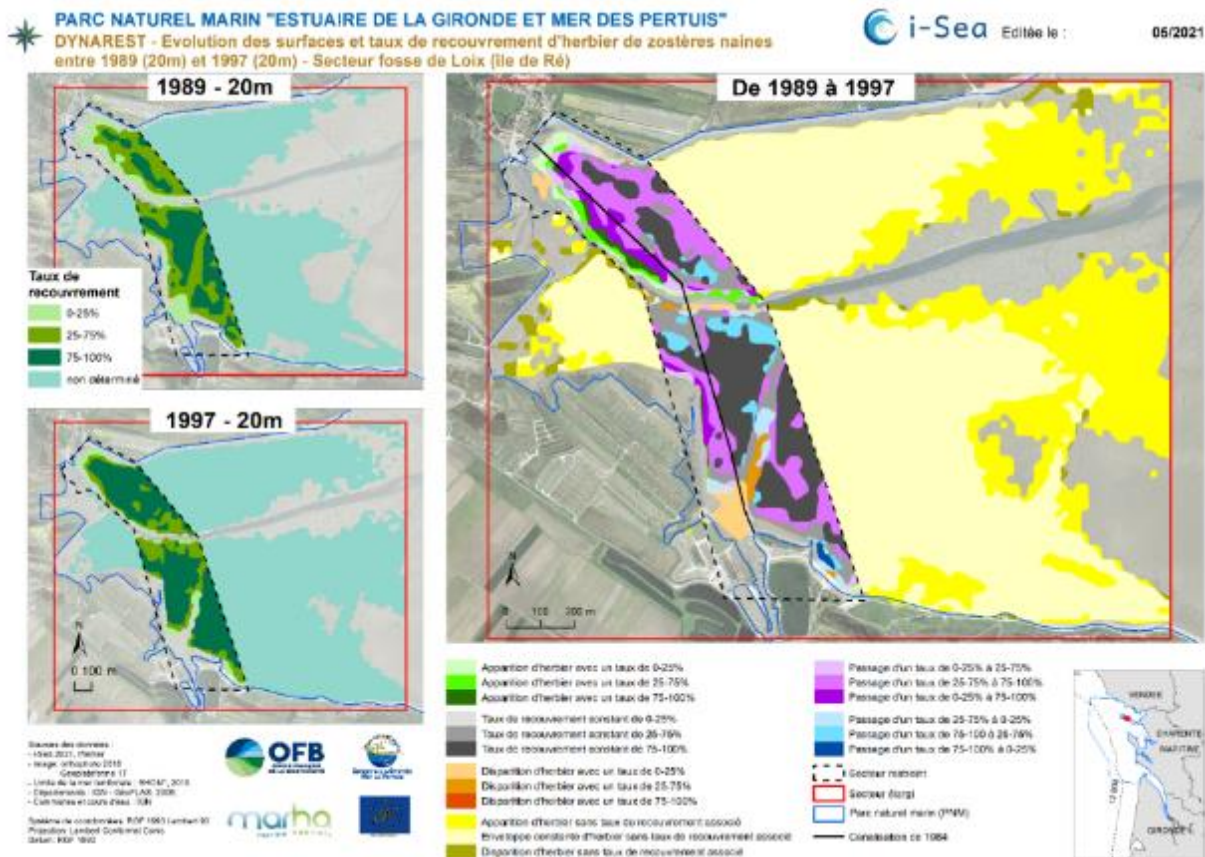


FIGURE 43. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1989 (20 M) ET 1997 (20 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.3.4 1987 et 2000

L'analyse porte sur deux images à 50 cm, afin de mettre en évidence les changements fins situés à proximité directe de la zone de travaux.

La Figure 44 montre la recolonisation d'une grande partie de la bande dépourvue d'herbier en 1987. En 13 ans, cette bande est passée de 20 m à 3 à 5 m de largeur dans la partie au nord du chenal principal. Dans la partie sud du chenal, cette bande est presque entièrement comblée par de l'herbier moyennement dense (25-75%) en majorité, et par de l'herbier très dense par endroit.

L'herbier très dense au nord du chenal, a totalement effacé dans sa partie la plus au nord, l'empreinte de la canalisation.

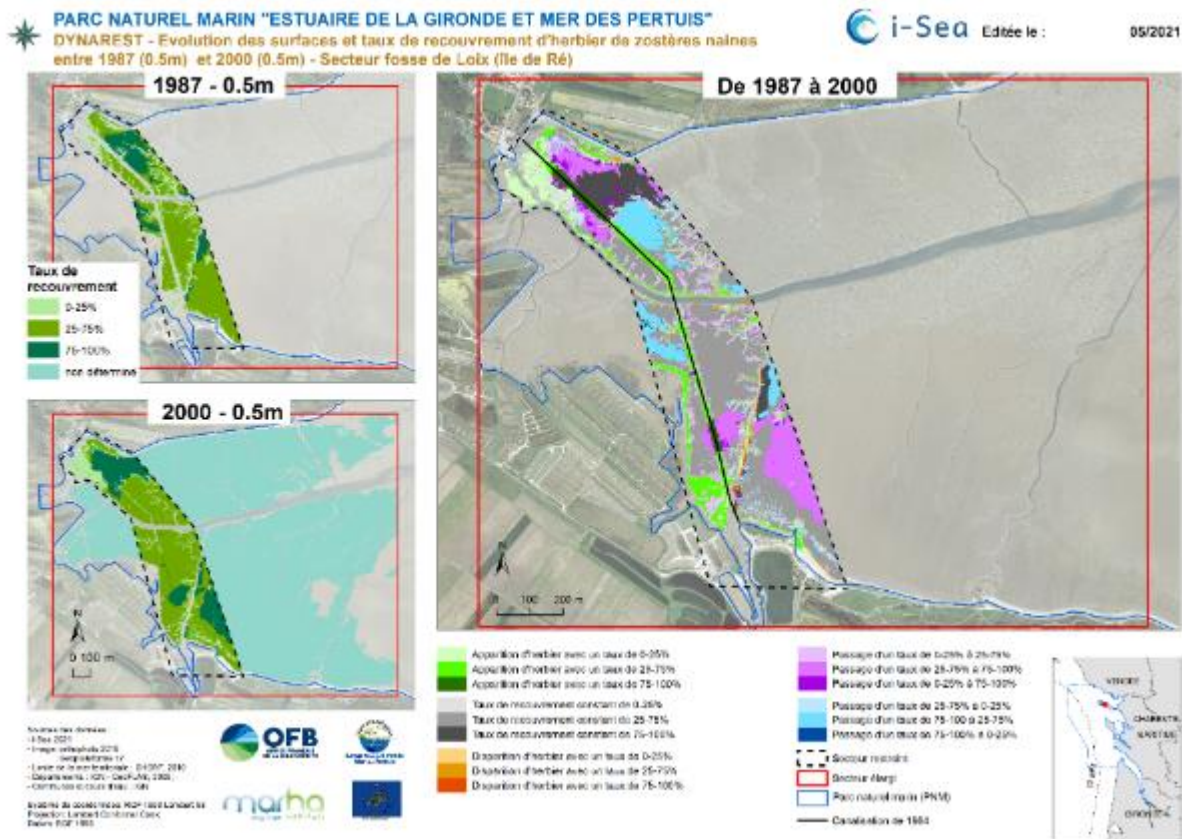


FIGURE 44. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1987 (0.5 M) ET 2000 (0.5 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.3.5 1997 et 2000

Deux comparaisons ont été réalisées, la première entre deux images satellite à 20 m et la seconde entre l'image satellite à 20 m de 1997 et l'orthophotographie à 50 cm de l'année 2000.

La comparaison des deux images satellites à 20m ne permet pas de détailler les évolutions qui pourraient être perçues dans la bande de 20 m impactée par les travaux de 1984 (Figure 45).

La tendance qui ressort de cette comparaison est la diminution du taux de recouvrement de l'herbier sur une partie du secteur restreint. En effet, environ 14.6 ha d'herbier très dense sont concernés par cette baisse de densité, au nord comme au sud du chenal principal, laissant ainsi un herbier fragmenté. Sur ce secteur, 2.2 ha d'herbier ont disparu et 2.1 ha sont apparus entre 1997 et 2000.

Sur le secteur élargi, l'apparition d'herbier concerne 11.3 ha et la disparition 14.3 ha, impactant l'une comme l'autre la bordure d'herbier.

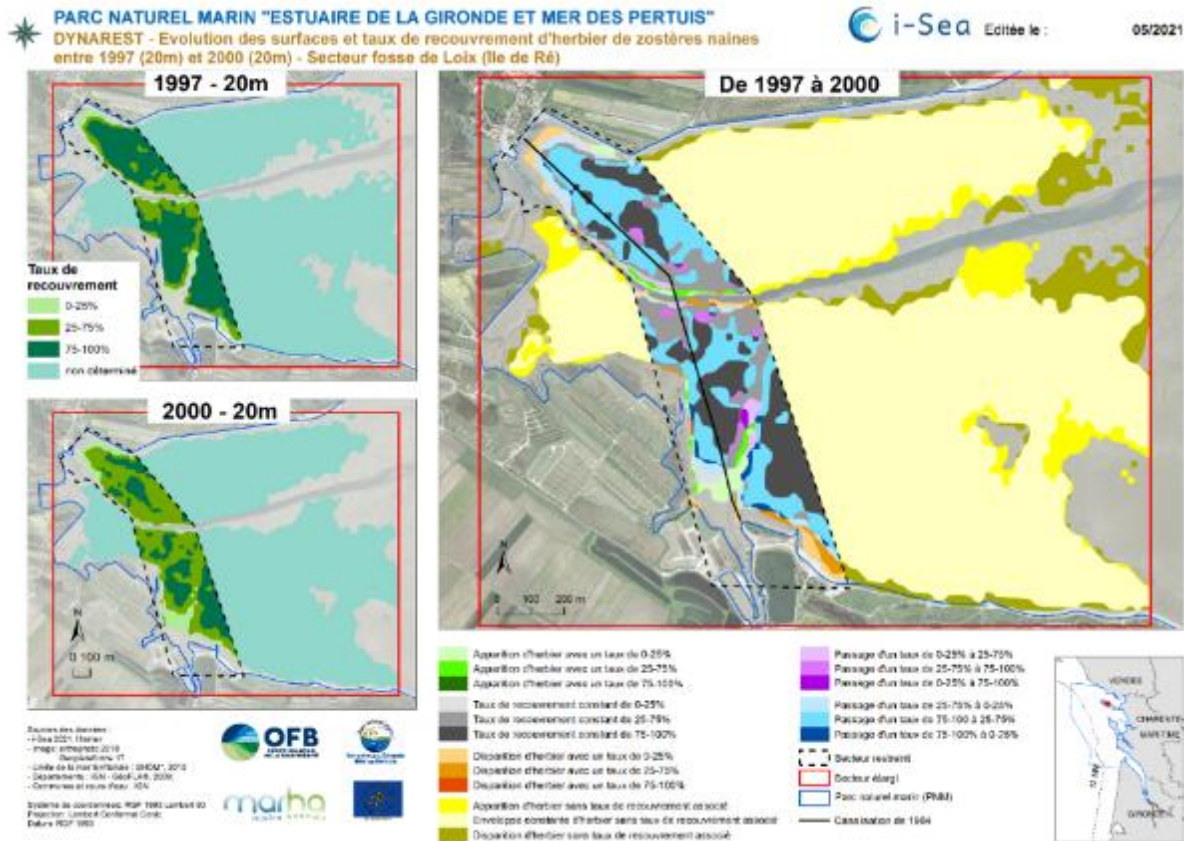


FIGURE 45. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1997 (20 M) ET 2000 (20 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

La comparaison de l'image de 1997 à 20 m et de l'orthophotographie de 2000 à 50 cm révèle la même tendance de diminution du taux de recouvrement de l'herbier au niveau du secteur restreint (Figure 46). Cette baisse concerne 16.8 ha d'herbier très dense (14.6 ha pour la comparaison 1997/2000 à 20 m). Au nord du chenal principal, l'herbier avec une forte densité est ainsi réduit, l'enveloppe qui persiste se situe le plus au nord. Au sud du chenal principal, les herbiers avec un taux de recouvrement de 75-100% sont également réduits, ils totalisent une surface de 4.3 ha répartie en 3 taches principales.

L'image de 2000 à 50 cm met en évidence le tracé de la canalisation de 1984. Dans la partie nord, la bande dépourvue d'herbier sur une largeur d'environ 3 à 5 m est visible. Cette bande apparait en orange sur la Figure 46, signalant une disparition d'herbier, qui est directement liée à la résolution de l'image de 1997 (20 m), supérieure à la largeur de la bande de 5 m. Au sud du chenal principal, au niveau de la canalisation, l'herbier maintient un taux de recouvrement élevé entre 1997 et 2000. La recolonisation de l'herbier sur cette bande est confirmée par l'image de 2000 à 50 cm.

Sur le secteur élargi, la surface couverte d'herbier en 1997 et 2000 correspond à environ 125 ha (contre 127 ha pour la comparaison à 20 m), l'apparition d'herbier concerne 20.8 ha et sa disparition environ 16.8 ha.

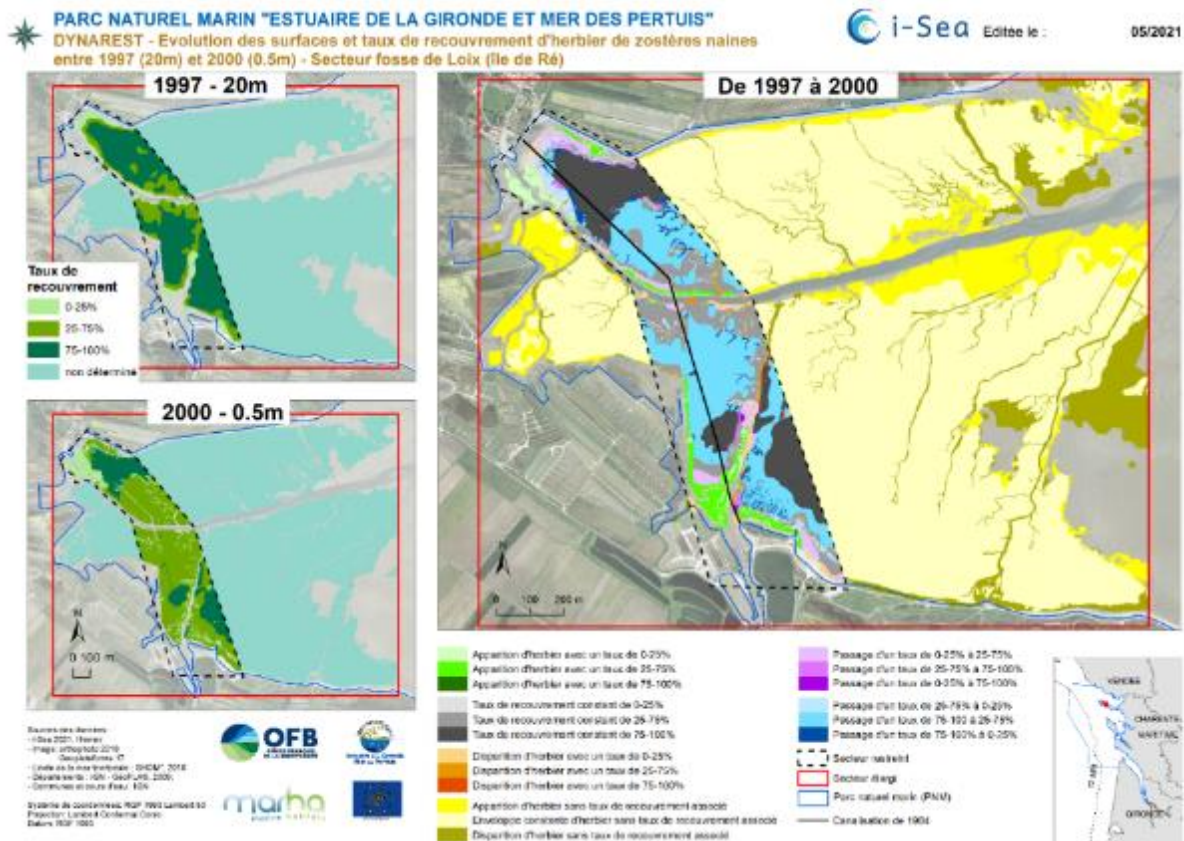


FIGURE 46. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 1997 (20 M) ET 2000 (0.5 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

La comparaison des bilans de 1997 et 2000 à 20 m et 50 cm de résolution met en évidence des résultats relativement proches en termes de surfaces perdues ou gagnées dans le secteur restreint comme dans le secteur élargi.

Les tendances d'évolution sont respectées ainsi que les ordres de grandeur.

En revanche, l'empreinte laissée par les travaux au niveau de la canalisation n'est visible que sur l'image à 50 cm. Cette comparaison montre qu'au niveau de la dynamique globale de l'herbier l'exploitation d'images de résolution variable n'a qu'un impact réduit sur l'analyse des évolutions de surface, en tout cas en termes de tendance. En revanche, sur la structure de l'herbier, il faut rester prudent quant aux interprétations et toujours privilégier de comparer des images de résolution proche. C'est l'exercice qui est proposé en ne comparant que les données les plus fines pour mieux comprendre les impacts des aménagements sur l'herbier dans la section 3.4.

2.3.3.6 2000 et 2006

Deux comparaisons ont été réalisées, la première entre deux images satellite, celle de 2000 à 20 m et celle de 2006 à 10 m (Figure 47), et la seconde entre l'orthophotographie à 50 cm de l'année 2000 et l'image satellite à 10 m de 2006 (Figure 48).

La comparaison des deux images satellite ne permet pas de mettre en évidence la bande de 5 m impactée par les travaux de 1984, visible sur l'orthophotographie de 2000.

La tendance qui ressort de cette comparaison est l'augmentation du taux de recouvrement qui concerne un peu plus de 30 ha d'herbier de zostères naines. En effet, les enveloppes de 2006 ne révèlent la

présence d'aucun herbier peu dense. La majorité du secteur est occupée par de l'herbier avec un taux de recouvrement fort (75-100%).

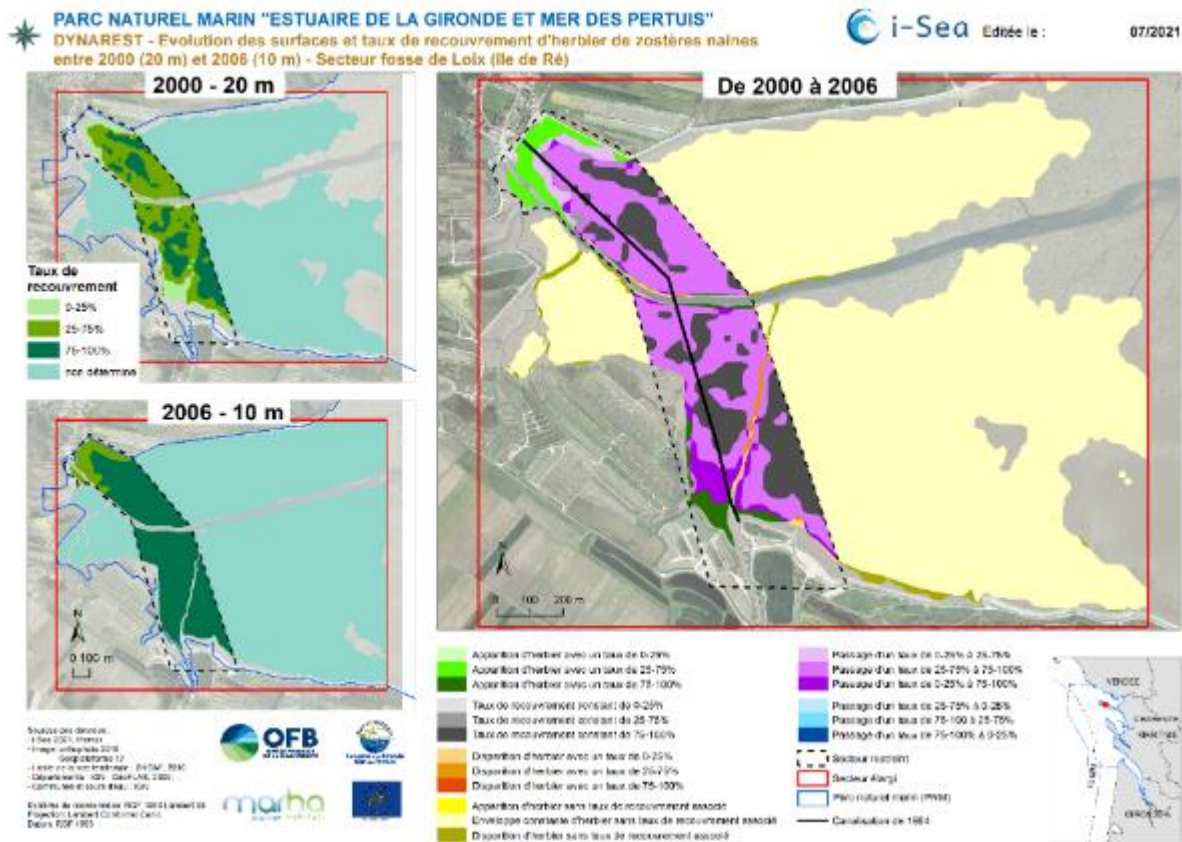


FIGURE 47. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 2000 (20 M) ET 2006 (10 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

La tendance est identique sur la comparaison orthophotographie 50 cm / image satellite 10m, le secteur restreint autour de la zone de travaux montre une importante augmentation du taux de recouvrement.

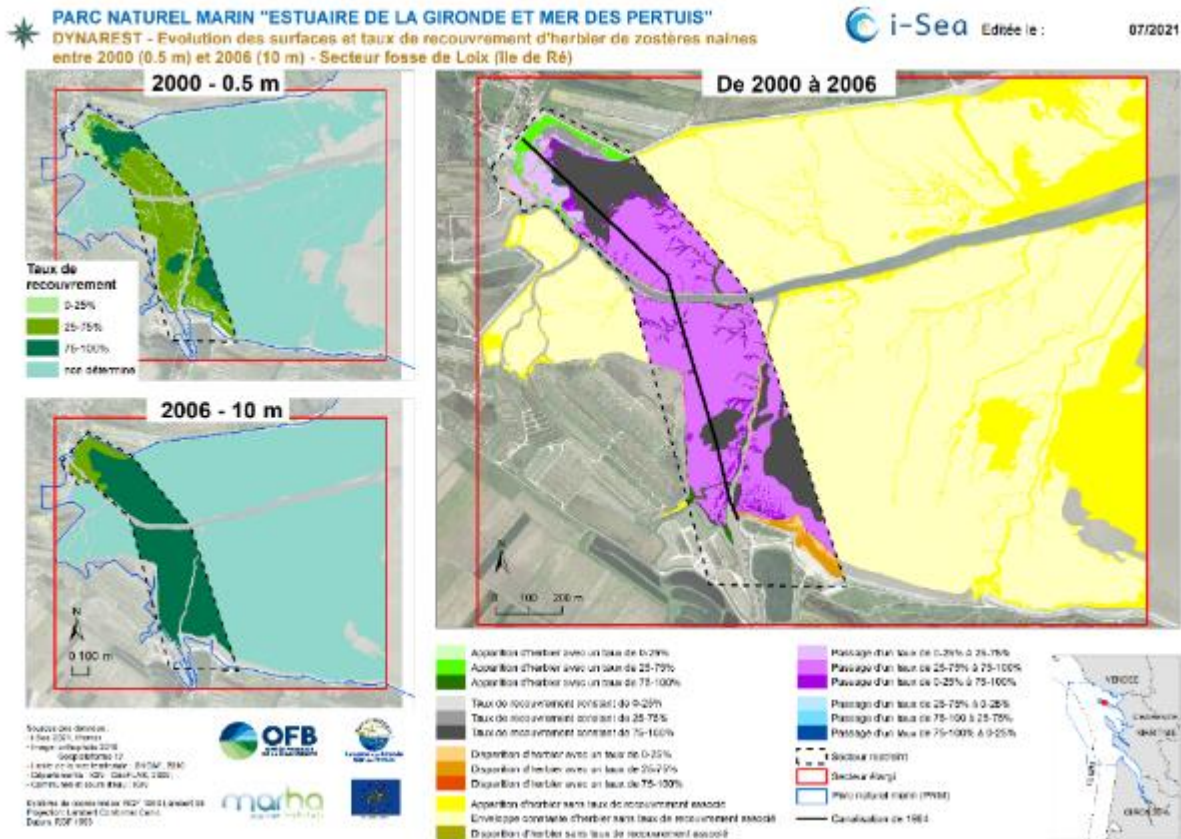


FIGURE 48. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 2000 (0.5 M) ET 2006 (10 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.3.7 2006 et 2014

L'analyse de l'herbier concerne deux images satellite d'une résolution de 10 et 2 m (Figure 49).

En 2014, l'herbier très dense occupe une surface importante sur l'ensemble du secteur restreint, soit environ 22 ha. Ce constat est proche de celui de 2006, en effet, 21.8 ha de vasière recouverte par un herbier très dense sont maintenus entre 2006 et 2014.

L'emplacement des travaux de 1984 est visible au nord du chenal principal, la localisation de la canalisation est marquée par la présence d'un herbier avec un taux de recouvrement moyen (25-75%) sur la cartographie de 2014.

En 2018, une seconde phase de travaux a eu lieu, avec la pose d'une canalisation parallèlement et à proximité de celle installée en 1984.

L'emplacement de cette canalisation est visible sur les Figure 50 à Figure 53.

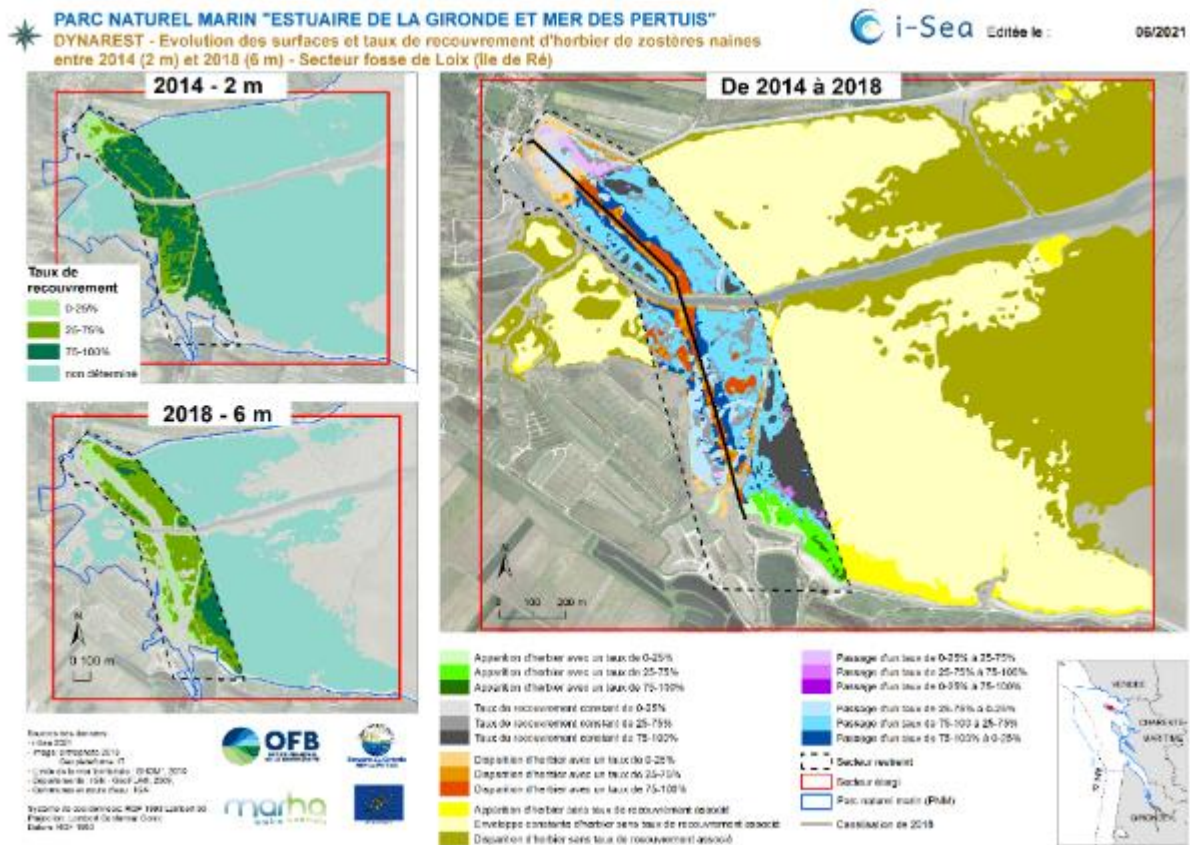


FIGURE 50. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 2014 (2 M) ET 2018 (6 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.3.9 2018 et 2020

Deux comparaisons ont été réalisées, la première concerne l'analyse de deux couvertures satellite, l'une à 6 m acquise en 2018, l'autre à 3 m (donnée CartoHECo). La seconde comparaison est réalisée entre cette même image satellite à 6 m de 2018, et une acquisition drone réalisée en 2020 avec une résolution de 2.5 cm.

Concernant la comparaison entre images satellite (Figure 51), l'empreinte laissée par les travaux de 2018 se retrouve colonisée par de l'herbier très dense. La majeure partie de l'herbier avoisinant ce secteur voit sa densité augmenter. Sur l'image de 2020, 35.2 ha d'herbier ont un taux de recouvrement de 75-100% sur les 38 ha d'herbier de la zone étudiée.

Dans le secteur élargi, 20 ha d'herbier sont apparus entre 2018 et 2020 et la disparition d'herbier concerne une surface d'environ 11 ha. Sur ces 11 ha, 9.8 ha correspondent à des enveloppes qualifiées de douteuses dans le processus de production de la cartographie de 2018.

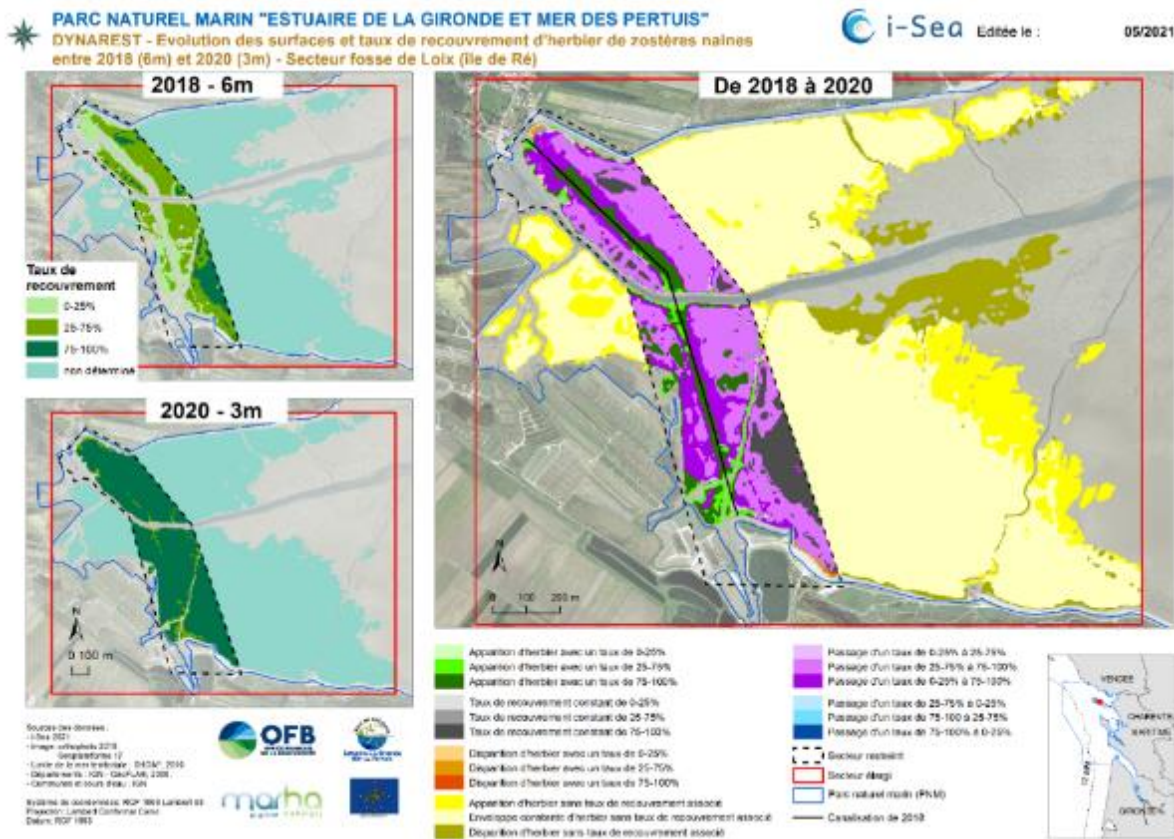


FIGURE 51. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 2018 (6 M) ET 2020 (3 M) SUR LA FOSSE DE LOIX

La comparaison entre l'image satellite de 2018 et l'acquisition drone de 2020 est réalisée sur l'emprise de l'acquisition drone, légèrement différente du périmètre « secteur restreint ». Les calculs pour l'ensemble de la série d'images ont également été réalisés et sont présentés dans le Tableau 12. Comme expliqué plus haut, les taux de recouvrement de l'image drone ne sont pas pris en compte dans cette analyse ; seules les enveloppes sont comparées.

Sur la Figure 52, la recolonisation de l'herbier au niveau de la canalisation posée en 2018 est visible sur l'image de 2020.

De nombreux secteurs, en bordure du réseau secondaire de drainage, semblent avoir disparu. Cela est lié à la comparaison de deux images avec des résolutions différentes, sur l'image de 2018, ces micro-chenaux, d'une largeur inférieure à 6 m, ne sont pas détectés, contrairement à l'image drone d'une résolution de 2.5 cm. Il ne faut donc pas tenir compte de ces surfaces disparues dans l'analyse de la dynamique temporelle de l'herbier dans ce secteur.

Deux ans après les travaux, l'herbier réapparaît en grande partie à l'emplacement de la canalisation de 2018. La plus large bande dépourvue d'herbier de part et d'autre du chenal principal correspond à l'empreinte laissée par la canalisation de 1984, toujours visible en 2020 (Figure 53).

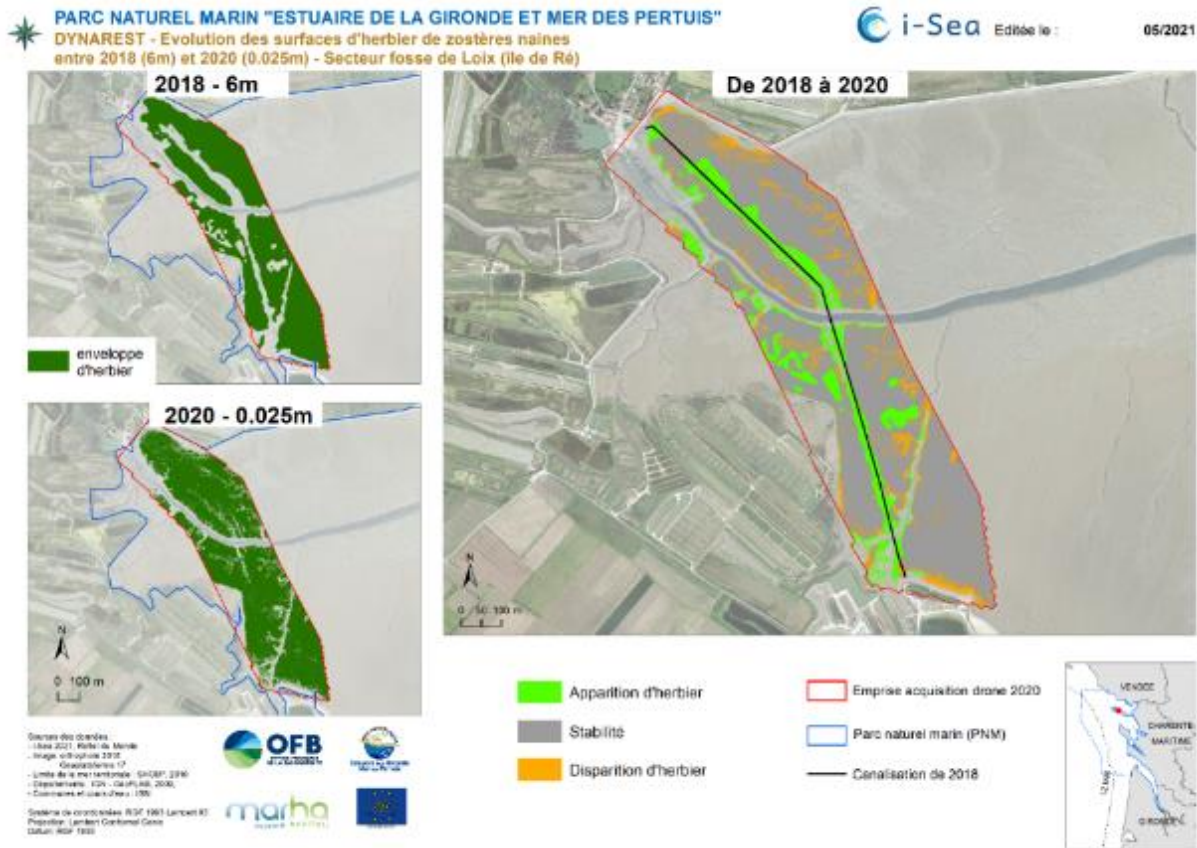


FIGURE 52. EVOLUTION DES SURFACES ET TAUX DE RECOUVREMENT D'HERBIER DE ZOSTERES NAINES ENTRE 2018 (6 M) ET 2020 (0.025 M) SUR LA FOSSE DE LOIX



FIGURE 53. EMPLACEMENT DES CANALISATIONS DE 1984 ET 2018 SUR L'IMAGE DE 2018, LA PLEIADES DE 2020 ET L'ACQUISITION DRONE DE 2020.

2.3.4 Indicateurs d'impact

Les orthophotographies de 1979, 1987, 2000 et 2012, ainsi que la couverture drone de 2020, ont été analysées afin d'étudier plus précisément les impacts des travaux de 1984 et 2018 sur l'herbier de la fosse de Loix (Figure 55).

Trois indicateurs d'impacts sont décrits :

- la modification de la surface de l'herbier,
- la modification des taux de recouvrement de l'herbier,
- la modification du réseau de drainage de l'herbier.

Pour faciliter l'interprétation, le secteur restreint autour de la zone de travaux est divisé en cinq sous-zones, représentées sur la Figure 54.



FIGURE 54. DECOUPAGE DE LA ZONE D'ETUDE EN SOUS-ZONES AFIN DE FACILITER L'INTERPRETATION



FIGURE 55. SERIE TEMPORELLE D'IMAGES TRES HAUTE RESOLUTION UTILISEE DANS L'ANALYSE DES IMPACTS DES TRAVAUX DE 1984 ET 2018 SUR LA FOSSE DE LOIX

2.3.4.1 Modification de la surface de l'herbier

- Au niveau du passage de la canalisation

En 1987, l'herbier a disparu de ce secteur, représentant une perte d'une surface d'environ 2 ha. La bande sans herbier mesure environ 20 m de largeur sur une longueur d'environ 1 100 m.

Dès l'année 2000, l'herbier semble recoloniser l'empreinte laissée par la pose de la canalisation de 1984, totalement dans la zone 1, partiellement dans la zone 2, laissant encore visible une bande d'une largeur proche de 5 m sans herbier. Dans la zone 3, au sud du chenal principal, une bande de 5m de largeur s'étendant sur environ 60 m de long est encore dépourvue d'herbier. La zone 4 semble avoir été entièrement recolonisée par l'herbier.

En 2012 et en 2020, cette bande dépourvue d'herbier est toujours visible dans les zones 2 et 3, sa largeur est passée à 3 m.

- Dans le secteur restreint

Au niveau de la zone 1, au sud de la canalisation, l'herbier semble être impacté en 1987, avec une disparition d'environ 0.6 ha. Dès l'année 2000, l'herbier réapparaît dans ce secteur.

Au sud de la zone 5, au plus proche de la plage, l'herbier semble gagner du terrain à partir de 1987 et se maintient jusqu'en 2020.

En dessous de la bordure sud de la zone 4, un herbier apparaît en 1987 et se maintient jusqu'en 2020.

La très haute résolution de l'image drone de 2020 permet de mettre en évidence des empreintes plus sombres qui ressemblent à des traces de véhicule. La Figure 56 montre deux extraits de l'image drone 2020, sur l'extrait du bas, quelques stations terrain relevées par Seaboost en 2020 dans ces sillons montrent la présence d'un herbier avec un taux de recouvrement supérieur à 75%.

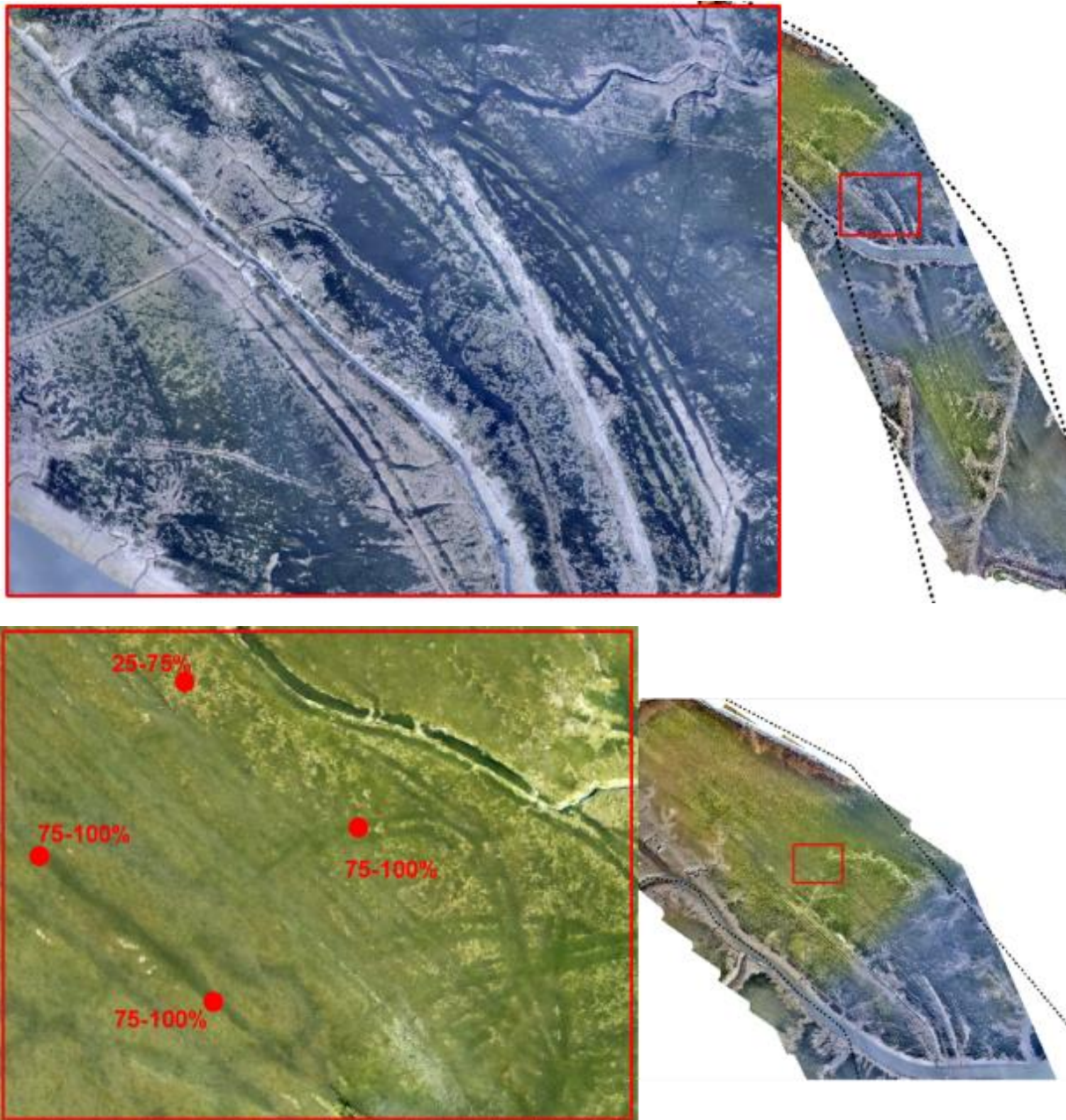


FIGURE 56. EN HAUT : COLONISATION DES TRACES DE VEHICULE PAR DE L'HERBIER VISIBLE SUR L'IMAGE DRONE DE 2020, EN BAS : SUPERPOSITION DE 4 STATIONS TERRAIN REALISEES PAR SEABOOST EN 2020 SUR L'IMAGE DRONE

- Dans le secteur élargi

En dehors de ce secteur restreint, la fosse de Loix est marquée par l'apparition d'un herbier visible en 2000 à l'ouest de la zone de travaux (Figure 57).

A l'est du secteur restreint, l'image de 1987, en grande partie sous l'eau, montre l'extension d'une partie de l'enveloppe sud de l'herbier de la fosse de Loix, sur une surface d'environ 3 ha.

En 2000, l'est de la zone de travaux est marquée par la progression de l'herbier sur deux secteurs. Il n'est pas possible de visualiser la présence d'herbier dans ces deux secteurs en 1987 en raison du niveau d'eau. Il en est de même pour les deux secteurs où l'herbier semble avoir régressé en bordure de chenal principal. L'un de ces deux secteurs est recolonisé sur l'image datant de 2012.

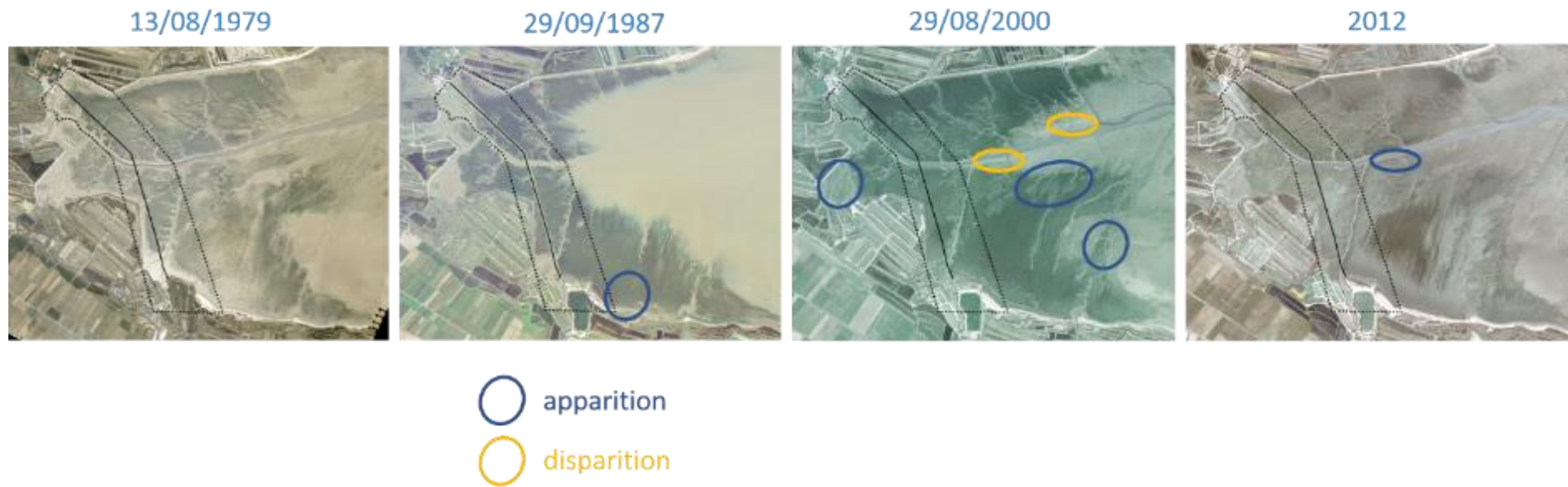


FIGURE 57. SECTEURS D'APPARITION ET DISPARITION D'HERBIER EN DEHORS DU SECTEUR RETREINT

2.3.4.2 Modification des taux de recouvrement de l'herbier

Pour cet indicateur, les comparaisons s'arrêtent en 2012 car la donnée drone de 2020 n'est pas exploitable en termes de taux de recouvrement.

- Au niveau du passage de la canalisation

La recolonisation de l'herbier au niveau de la canalisation visible en 2000 est marquée par le développement d'un herbier avec un fort taux de recouvrement dans les zones 1 et 4 (Figure 58). Ce taux supérieur à 75% est également visible sur l'image de 2012, au niveau de la zone 1.



FIGURE 58. RECOLONISATION DE L'HERBIER DANS L'EMPLACEMENT DE LA CANALISATION DE 1984

- Dans le secteur restreint

En 1979, l'herbier très dense se situe dans la partie nord de la zone 1, les pointillés sur la Figure 59 délimitent sa limite sud. Un déplacement vers le sud est observé en 1987, puis un retour à son emplacement d'origine en 2000 qui est toujours visible en 2012.

Plusieurs herbiers avec un taux de recouvrement élevé font leur apparition en 1987 et 2000. En 1987, dans la zone 3, à l'ouest de la canalisation, un herbier dense est visible, son taux de recouvrement diminue en 2000. Deux autres taches d'herbier présentant un taux de recouvrement supérieur à 75% apparaissent le long du micro chenal situé à l'est de la canalisation. Ces herbiers se maintiennent jusqu'en 2012. En 2000, deux taches d'herbier très denses apparaissent également dans ce secteur situé au sud du chenal principal, l'un d'entre eux est toujours visible en 2012, l'autre voit son taux de recouvrement diminuer.

L'herbier qui apparaît sur l'image de 1987 voit son taux de recouvrement augmenter en 2000 et continue à se densifier en 2012.

- Dans le secteur élargi

Deux grandes étendues d'herbier avec un taux de recouvrement élevé sont visibles en dehors du périmètre restreint de part et d'autre du chenal principal (Figure 60). Au nord du chenal, l'herbier qui longe la plage à un taux de recouvrement qui s'intensifie entre 1979 et 2000. Sur l'image de 1987, cette augmentation de densité est visible sur la portion non immergée de ce secteur. En 2012, il se fragmente en trois principales tâches entourées par de l'herbier moyennement dense.

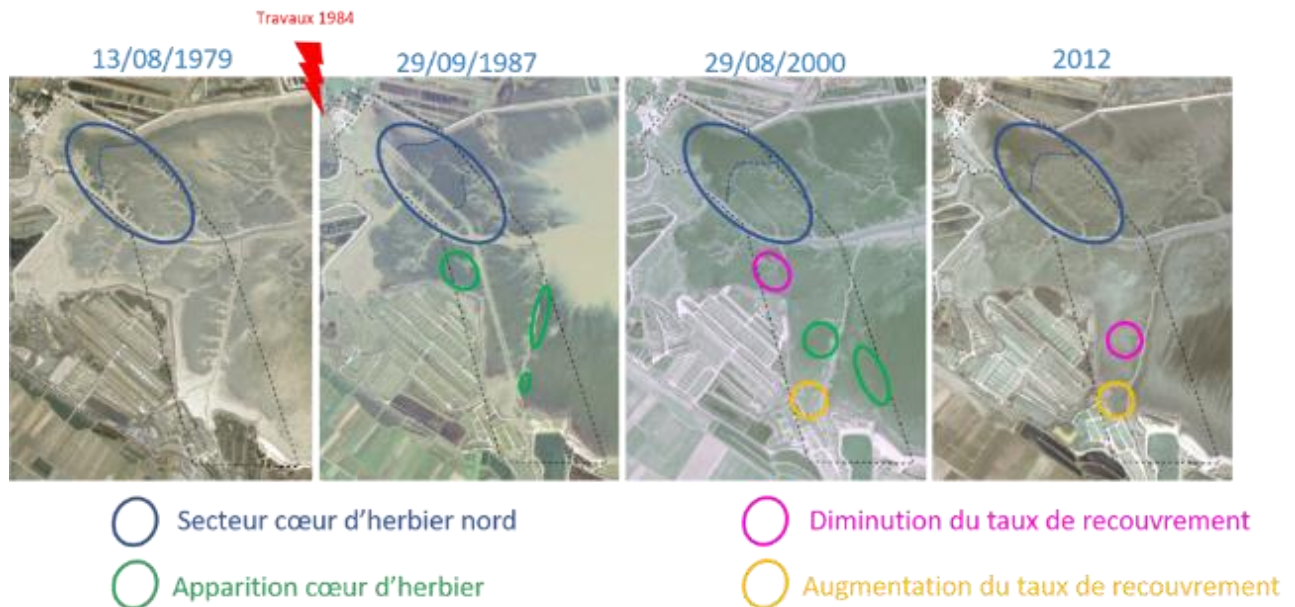


FIGURE 59. SECTEURS PRESENTANT UNE MODIFICATION DES TAUX DE RECouvreMENT DE L'HERBIER

Au sud du chenal principal, l'herbier très dense est clairement visible sur l'image de 2000. Sa surface diminue en 2012. La délimitation de cet herbier avec un taux de recouvrement élevé n'est pas possible sur l'image de 1987 et il n'est pas présent sur celle de 1979.

A l'ouest de la zone de travaux, deux secteurs sont marqués par une diminution du taux de recouvrement en 2000 et 2012.

2.3.4.3 Modification du réseau de drainage de l'herbier

- Au niveau du passage de la canalisation

Dès 1989, ce secteur est marqué par l'apparition d'un micro-chenal au niveau de la canalisation, sur les zones 2 et 3. Cette nouvelle ramification du réseau secondaire de drainage est visible en 2000 et se maintient jusqu'en 2020 (Figure 61).

- Dans le secteur restreint

Le réseau de drainage existant en 1979 est présenté en bleu sur la Figure 62. Sur les différents zooms, il est superposé aux images de 1987 et 2012 afin de visualiser les éventuels changements.

Au niveau de la zone 1, le chenal principal s'est déplacé vers l'est, cette nouvelle position est maintenue en 2012 et 2020.

Au niveau de la zone 3, la ramification du réseau de drainage située à droite de la canalisation de 1984 se comble en partie en 1987 pour disparaître totalement en 2012.

- Dans le secteur élargi

Il n'apparaît pas de changements importants sur le réseau de drainage en dehors du secteur restreint autour de la canalisation.

La quantification d'une modification du réseau de drainage peut être mesurée dans le cadre de suivi de travaux (linéaire de chenaux, surface des chenaux, etc.).

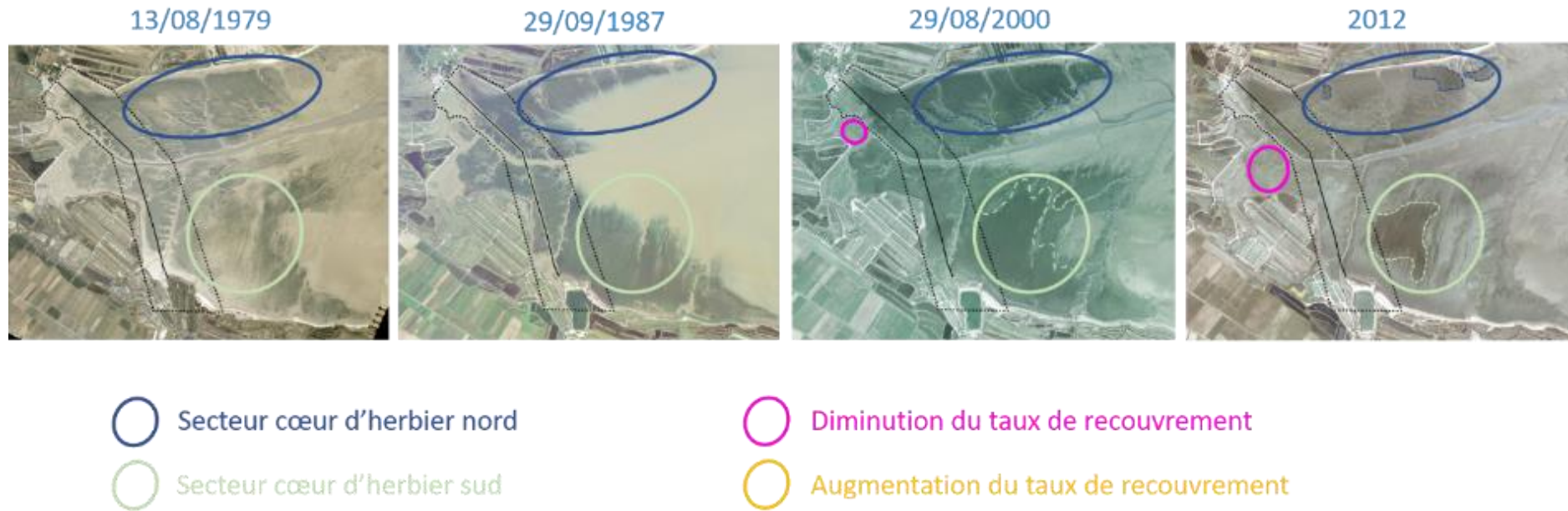


FIGURE 60. SECTEURS AVEC UNE MODIFICATION DES TAUX DE RECOUVREMENT EN DEHORS DU PERIMETRE RESTREINT

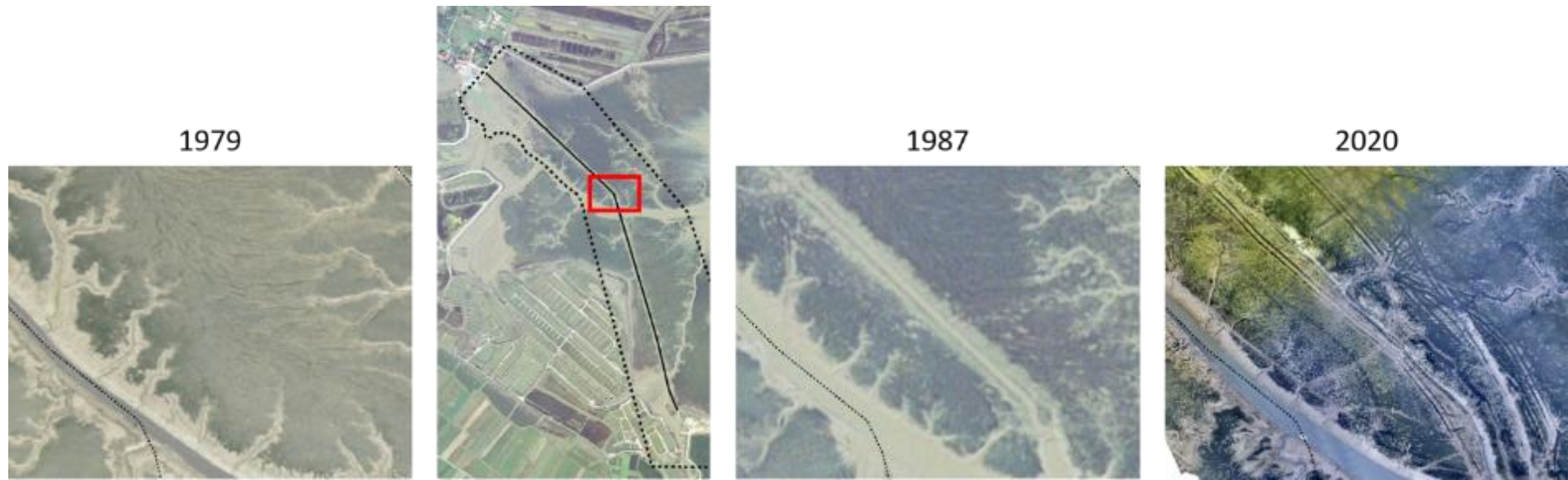


FIGURE 61. APPARITION D'UN MICRO-CHENAL AU NIVEAU DE LA CANALISATION DE 1984

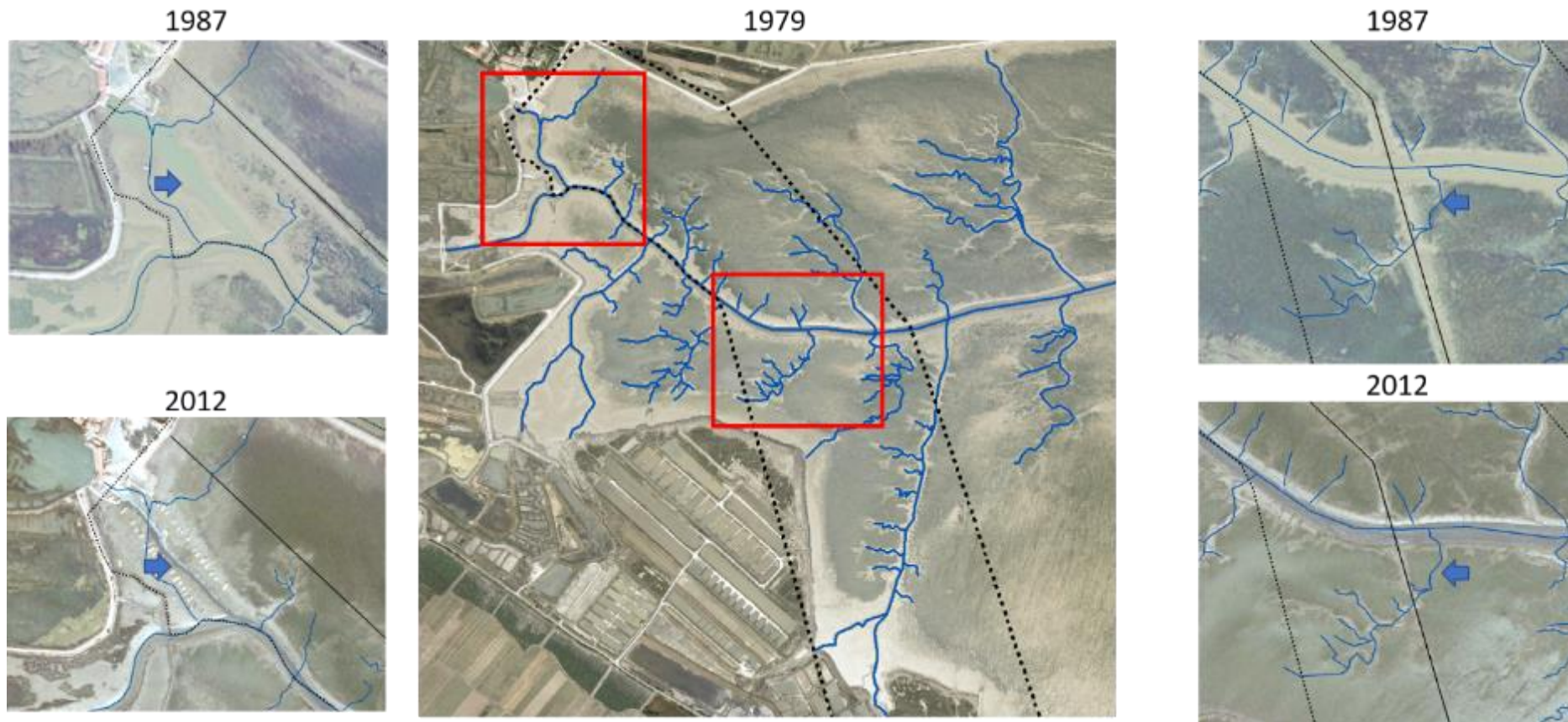


FIGURE 62. MODIFICATION DU RESEAU DE DRAINAGE A PROXIMITE DE LA CANALISATION DE 1984

2.4 Synthèse de l'analyse de l'évolution historique des herbiers dans la fosse de Loix, quels nouveaux apports pour évaluer la restauration

Pour cette synthèse, le secteur restreint est considéré à l'exclusion de tout autre, dans le but d'alimenter la connaissance de la dynamique des herbiers en lien avec les travaux de pose de canalisation. Il est essentiel de souligner le fait que l'herbier est également soumis à des fluctuations naturelles, des épisodes d'apparition ou de disparition sont observés naturellement, sans lien avec des interventions d'origine anthropique étudiées.

En 1979, le secteur restreint est recouvert en majeure partie d'un herbier avec un taux de recouvrement de 25-75%. L'herbier très dense se situe au nord-ouest de la zone.

L'empreinte laissée par les travaux de 1984 est toujours visible en 1987. Au niveau de la canalisation, la vasière est dépourvue d'herbier sur une bande d'environ 20 m de large sur un peu plus d'1 km de long. Entre 1979 et 1987, toutefois, l'effet des travaux sur l'enveloppe globale de l'herbier n'est pas perceptible. Des zones dénudées en 1979 ont dû être colonisées pendant cette période pour compenser l'effet des travaux. Il faudrait une analyse à plus grande échelle pour expliquer. Le niveau d'eau en 1987 est trop élevé pour réaliser une cartographie à l'échelle de la fosse de Loix et vérifier si l'herbier s'est développé assez largement au cours de cette période. On note toutefois une densification de l'herbier sur les zones émergées. Cette période, sur le plan des tempêtes est plutôt ; seul l'hiver 1988 est marqué par des tempêtes, relativement peu intenses, à l'image des climats de houles que sont communs ces 20 dernières années. A cette période, aucun phénomène de submersion n'est observé.

Par ailleurs, un néo-chenal s'est formé dans le sillon de la zone d'enfouissement de la canalisation. L'herbier très dense visible en 1979 s'est déplacé vers le sud, des taches de forte densité sont apparues au sud du chenal principal.

Sur l'image de 1989, l'empreinte laissée par les travaux apparaît entièrement recolonisée, la résolution de 20 m de cette image ne permet pas de distinguer la bande sans herbier. Au nord du chenal principal, l'herbier très dense est fragmenté, les taches visibles au sud se sont étendues.

Sur l'image de 1997, la bande de 20 m visible en 1987 n'est pas visible en raison de la résolution de l'image (20 m). Au nord comme au sud du chenal principal, l'herbier avec un taux de recouvrement de 75-100% occupe une place majoritaire, les enveloppes gagnent en surface.

La comparaison des images de 1987 et 2000, de résolution équivalente (0.5 m), montre la recolonisation d'une grande partie de la bande dépourvue d'herbier. Au nord, comme au sud du secteur restreint, la recolonisation semble totale, avec par endroit l'apparition d'herbier très dense. Au centre du secteur restreint, de part et d'autre du chenal principal, la bande de 20 m initialement dépourvue d'herbier se réduit à 3 à 5 m de largeur. La recolonisation de la zone de travaux est donc toujours en cours en 2000, 16 ans après les travaux. A l'emplacement de la canalisation dans ce secteur, une ramification du réseau secondaire de drainage a pris place durablement. La modification du réseau de drainage doit être considérée comme un impact direct de ces travaux.

La comparaison entre 1997 et 2000 met en évidence la diminution du taux de recouvrement sur une partie du secteur restreint, visible aussi bien sur l'image satellite à 20 m que sur l'orthophotographie à 50 cm.

Cette tendance s'inverse en 2006, la quasi-totalité du secteur est recouverte par de l'herbier avec un fort taux de recouvrement.

Ce constat est semblable en 2014, l'herbier très dense occupe une surface importante, l'empreinte laissée par les travaux de 1984 est toujours visible, le micro chenal apparaît à cette résolution (2 m) comme de l'herbier moyennement dense et peu dense.

En 2018, une seconde phase de travaux impacte le secteur restreint, l'herbier disparaît sur une bande variée entre 8 à 55 m au niveau de la nouvelle canalisation, et des zones concernées par le passage des engins. Le secteur d'herbier très dense se réduit à une petite tache au nord du chenal principal, sa surface diminue également au sud.

Entre 2018 et 2020, la quasi-totalité du secteur restreint est recouverte par un herbier avec un taux de recouvrement supérieur à 75%, la petite bande dépourvue d'herbier visible en 2020 correspond au micro-chenal qui s'est implanté suite à la pose de la canalisation de 1984. En 2020, la recolonisation est toujours en cours 2 ans après les travaux : la zone d'enfouissement ainsi que les traces des engins de chantier sont toujours bien visibles.

En 1987 (4 ans après la premier chantier), l'impact des travaux sur l'herbier était matérialisé par une zone dénudée de 20 m large. En 2020, 2 ans après la seconde intervention, le secteur dénudé ne représente que de 3 m de large.

La plus rapide recolonisation par l'herbier du secteur de chantier s'explique vraisemblablement par la nature moins intrusive de l'opération : la canalisation a été lestée pour pénétrer le sédiment. Lors de la précédente intervention, un sillon avait certainement été creusé.

Par ailleurs, il n'est pas noté une nouvelle modification du réseau de drainage.

3. PRESTATION 2 : SYNTHÈSE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE, INGENIERIE DE RESTAURATION DES HERBIERS DE ZOSTERES NAINES

3.1 Enjeux et contexte de réalisation de l'étude

3.1.1 Objectifs

- cette partie de l'étude de synthèse et d'analyse bibliographique doit permettre de construire un retour d'expérience opérationnel sur les protocoles de restauration d'herbiers à zostères naines. Sur la base d'un inventaire des protocoles de restauration et afin d'évaluer les possibilités de déploiement de ces protocoles dans le contexte du PNMEGMP, les objectifs sont de :
- permettre de comparer ces méthodes,
- mettre en évidence les conditions de réussite des différentes méthodes et, comparer les conditions de restauration des herbiers

3.1.2 Méthode et moyens de réalisation de l'étude

3.1.2.1 Méthode

La synthèse de la bibliographie a été réalisée de la manière suivante : une première phase a permis de rassembler de manière exhaustive la littérature relative à la restauration des herbiers de zostères. Les recherches ont été effectuées par le moteur de recherche Google Scholar en utilisant plus d'une trentaine de termes de recherche dont la liste est présentée en annexe 1. Les recherches ont été effectuées entre septembre 2020 et juillet 2021.

Le choix a été fait de conserver pour cette étude à la fois les méthodes de restauration appliquées à l'espèce *Zostera noltei* et à l'espèce *Zostera marina*. L'espèce ciblée dans cette étude est *Zostera noltei* ; Cependant au regard du faible nombre d'études publiées sur cette espèce et des points communs existants entre l'une et l'autre, il a semblé pertinent d'inventorier les méthodes de restauration appliquées à ces deux espèces. La non prise en compte des méthodes de restauration appliquées à *Zostera marina* diminuerait grandement l'intérêt de cette étude et son exhaustivité. Pour permettre une interprétation juste des résultats, un rappel de la biologie de ces deux espèces, de leurs similarités et différences est réalisé dans le rapport. De même, les points d'attention relatifs au transfert d'une méthode de restauration de l'une à l'autre espèce sont explicitement décrits dans la suite du rapport.

Cette première phase de recherche a permis de rassembler 53 publications scientifiques de différentes typologies : des articles scientifiques, des études expérimentales, des revues de la littérature et méta-analyses.

Un premier tri de la littérature a permis de distinguer deux grandes techniques de restauration des herbiers : les méthodes de restauration par transplantation et les méthodes de restauration par ensemencement. Deux méthodes innovantes en cours de développement ont également été recensées.

Seize publications scientifiques ont fait l'objet d'une lecture approfondie car relatives à des protocoles de restauration précis. Ces publications sont à l'origine de la construction de « fiches Projet » chacune relative à une méthode de restauration, dont les rubriques décrites sont les suivantes : le contexte, les conditions environnementales, le protocole de mise en œuvre de la méthode, le suivi mis en œuvre, les performances et les effets induits, les informations relatives au coût. La liste des publications et la description des projets de restauration sont précisées dans le tableau en annexe 2.

A la suite de la « fiche Projet », une synthèse des performances de la méthode de restauration et de ses conditions de réussite et d'échec est réalisée. Enfin, une analyse de la méthode de restauration est effectuée sur la base des critères suivants : performances, accessibilité technique, capacité à être appliquée et efficace

dans différents contextes hydro-sédimentaires, et niveau d'impact sur le milieu (milieu de prélèvement de plants/de graines et milieu à restaurer). Cette analyse repose sur la littérature scientifique, aussi bien les publications scientifiques spécifiques à la méthode que les synthèses bibliographiques sur les différentes contributions des experts impliqués dans le projet à savoir la société i-Sea, Isabelle Auby de l'IFREMER, et la société Seaboost.

Une synthèse comparative de toutes les méthodes de restauration est enfin réalisée sur la base de ces travaux. Quelques points d'attention particuliers rencontrés au cours des recherches sont finalement discutés.

Suite à cet inventaire comparatif, les contextes des secteurs d'herbiers de zostères naines au sein du Parc sont identifiés et caractérisés à partir des données cartographiques accessibles (SHOM, atlas cartographique du plan de gestion 2018-2023). Le caractère très expérimental des protocoles de restauration ne permet pas à ce stade de tirer des conclusions significatives quant aux conditions indispensables requises pour la réussite de ces actions. De ce fait, il est réalisé une caractérisation des pressions et de leurs impacts potentiels sur les herbiers du Parc afin de proposer en premier lieu des mesures d'évitement et de réduction des impacts.

Enfin, après la présentation du contexte réglementaire relatif à la séquence « Eviter, Réduire, Compenser (ERC) », un recensement des actions de compensation et des mesures d'accompagnement déployées sur quelques espaces (site d'intérêt, parc naturel...) a été fait.

Une synthèse de la démarche de réflexion à adopter dans le cadre de travaux est finalement proposée et des préconisations d'actions à l'échelle du Parc sont faites.

3.1.2.2 Limites de réalisation de l'étude

A la lecture du rapport, les points précisés ci-dessous sont à considérer :

- De manière générale, les méthodes de restauration des herbiers de zostère sont à des stades expérimentaux et les retours d'expérience sont disponibles en quantité limitée. Les méthodes ne sont pas éprouvées et les protocoles peu voire pas répliqués dans des contextes différents : les projets sont menés à titre expérimental avec des protocoles flexibles et adaptés aux conditions de réalisation rencontrées sur site. De ce fait, il est parfois compliqué de tirer des conclusions significatives quant au protocole à suivre, aux conditions environnementales requises, aux conditions de succès et d'échec ainsi qu'aux performances de la méthode.
- Les projets de restauration des herbiers de zostère n'ayant pas eu de succès font rarement l'objet d'une publication ou d'un retour d'expérience : il existe de ce fait un biais sur l'appréciation de la réussite des différentes méthodes. Les projets réussis seront prévalents dans la littérature par rapport aux projets à faible taux de réussite, ce qui induit une perte d'information quant aux conditions de succès et d'échec de ce type de projet.
- Les paramètres environnementaux (conditions de luminosité, de température, de salinité, nature sédimentaire, granulométrie...) sont rarement renseignés en totalité dans les publications (cf. tableau projet en Annexe n°2). En conséquence, l'analyse des conditions indispensables au déploiement des protocoles de restauration reste limitée et l'on peut difficilement tirer des conclusions significatives sur ces points.
- Il n'existe pas de mesures de compensation remplissant strictement les critères énoncés dans le corpus réglementaire pour les herbiers de zostères. Les mesures ne remplissant qu'une partie de ces critères sont définies comme des mesures d'accompagnement.

Par rapport à la mise en perspective de ces conclusions dans le contexte du PNMEGMP, au regard de la granulométrie des données disponibles à l'échelle du Parc et du caractère expérimental des protocoles de restauration, il n'est pas pertinent de préconiser un protocole de restauration particulier dans une zone donnée. En revanche, au regard des secteurs d'herbiers du Parc, des activités dans ces secteurs et de leurs

impacts potentiels, il est proposé des mesures d'évitement et de réduction des impacts à considérer en priorité. Des mesures d'accompagnement sont ensuite préconisées, pour dans le cas où les impacts ne pourraient intégralement évités. Une synthèse de la démarche de réflexion à suivre par un maître d'ouvrage et/ou un gestionnaire de site est finalement proposée pour éviter, réduire les impacts dans le cadre de travaux.

- Les coûts des projets de restauration sont rarement mentionnés dans les publications. De plus, s'agissant de projets expérimentaux, les coûts varient grandement en fonction des moyens déjà à disposition sur place, de la main d'œuvre réellement mobilisée, de l'échelle de l'action... Les unités de caractérisation des coûts des projets de restauration sont également différentes. Des comparaisons sont données relativement aux temps nécessaires à la transplantation d'une unité transplantée, l'unité elle-même pouvant varier selon la méthode utilisée (un plant, 2 plants associés, une motte...). Au final, ces données ne permettent pas de comparer de manière pertinente les coûts des différents protocoles de restauration, d'où l'absence de ce critère de comparaison dans l'analyse comparative.

Les projets de restauration ne sont pas toujours assortis d'un suivi scientifique permettant une mesure de la performance de la méthode. De manière générale, si un suivi est mis en place, il s'étend sur une période courte (inférieure à 1 an), ce qui ne permet pas de mesurer la réussite sur le long terme des opérations de restauration. Ceci limite l'évaluation des performances d'une méthode de restauration.

3.2 Les herbiers de zostère : biologie et réglementation applicable

Afin de mieux appréhender les conditions nécessaires à la restauration d'un herbier de *Z. noltei*, un rappel des grands traits caractéristiques de la biologie des herbiers est proposé ci-dessous relativement à leurs modes d'expansion et aux paramètres d'influence existants.

3.2.1 Description biologique des espèces

3.2.1.1 *Zostera noltei* : zostère naine

La zostère naine (Figure 62) est présente depuis les côtes Sud de la Norvège jusqu'aux côtes Mauritaniennes ; elle est également présente en Mer Méditerranée et en Mer Noire (Green *et al.*, 2003²²).

Le plus souvent, *Z. noltei* forme des herbiers denses sur les surfaces intertidales sablo-vaseuses où *Z. marina* est rare étant donné sa faible tolérance à la dessiccation (Green *et al.*, 2003⁸ ; Lipkin *et al.*, 2003²³). Les feuilles étroites et flexibles des *Z. noltei* sont donc souvent exposées à l'air, mais un film d'eau sur le sédiment vaseux les maintient humides (Ouisse, 2010²⁴). Cette espèce est parfois présente dans les lagunes saumâtres, comme par exemple dans les étangs de Berre, de Thau et du Vaccarès.

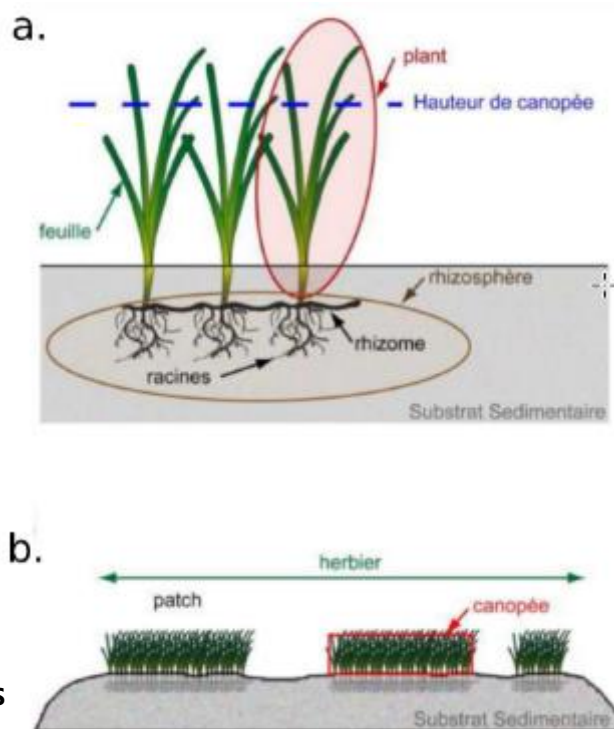


FIGURE 63 : NOMENCLATURE COURANTE POUR DECRIRE LES CARACTERISTIQUES DES PHANEROGAMES MARINES

Source : (Ganthy, 2011)

²² Green, E. P., Short, F. T., Frederick, T. (2003). *World atlas of seagrasses*. Univ of California Press.

²³ Lipkin, Y., Beer, S., Zakai, D. (2003). The eastern mediterranean and the red sea. *World atlas of seagrasses*, 65.

²⁴ Ouisse, V. (2010). Production primaire et respiration des communautés d'herbiers à zostères : rôle dans le cycle carbone en milieu côtier. PhD dissertation, Paris 6, France

Il est constaté que les zones d'herbiers sont localisées essentiellement dans les zones abritées des courants forts et peu exposées à la houle du large.

3.2.1.2 *Zostera marina* : zostère marine

Les zostères marines sont présentes dans les eaux froides ou tempérées de l'hémisphère nord, dans les zones côtières bordant l'Atlantique et le Pacifique. En Europe, elles sont signalées depuis les côtes norvégiennes jusqu'au sud de l'Espagne. Elles colonisent également certains marais atlantiques et lagunes méditerranéennes. Les zostères marines occupent les niveaux bas de l'étage intertidal et l'étage subtidal jusqu'à une profondeur variable, dépendante de la transparence de l'eau (Short *et al.*, 1993²⁹).

Les pieds de zostères marines ont de 3 à 7 feuilles, d'une largeur comprise entre 2 et 10 mm. Leur longueur est généralement comprise entre 30 et 60 cm mais peut atteindre plus de 1,5 m dans les environnements de faible énergie hydrodynamique. Les racines de cette espèce sont plutôt fines (de 0,2 mm à 1 mm de diamètre) et peuvent dépasser 20 cm de long. Les rhizomes, d'un diamètre de 2 à 6 mm, relient les pieds par des segments mesurant de 5 à 40 mm. Les graines mesurent entre 2 et 4 mm de long.

Au sein du PNMEGMP, il existe trois zones d'herbiers de zostères marines situées sur la façade Sud de l'Île de Ré (OFB, 2018)³⁰. Ils sont représentés par les points bleus sur la carte ci-dessous :

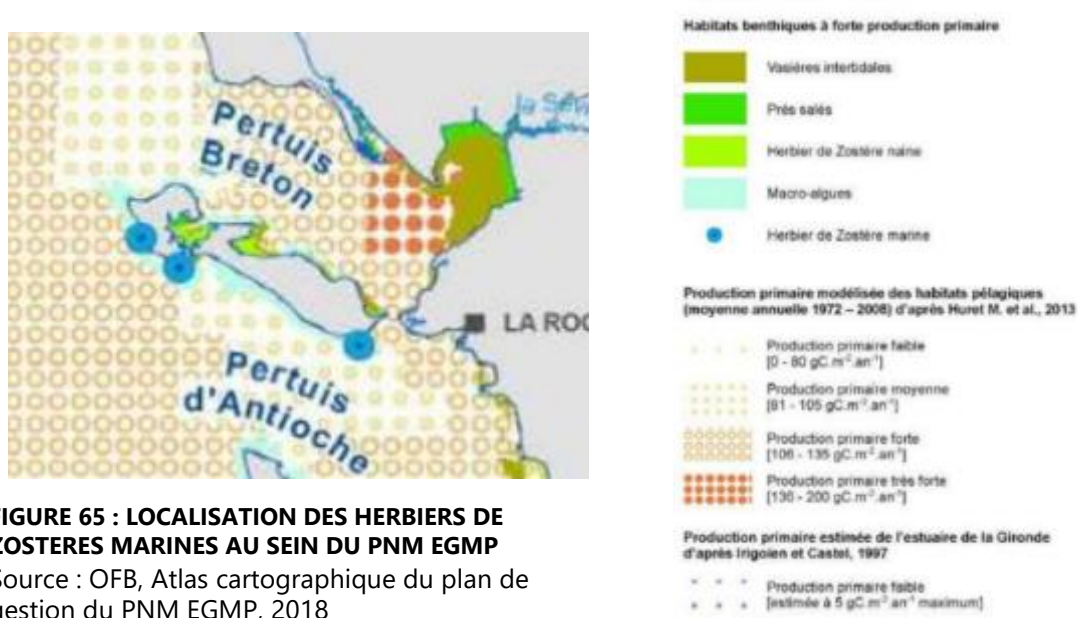


FIGURE 65 : LOCALISATION DES HERBIERS DE ZOSTERES MARINES AU SEIN DU PNM EGMP

Source : OFB, Atlas cartographique du plan de gestion du PNM EGMP, 2018

3.2.1.3 Modes d'expansion et de reproduction

L'expansion par clonage est une composante fondamentale de la production de biomasse et de l'occupation spatiale des zostères, particulièrement lorsqu'il s'agit de coloniser de nouveaux habitats ou de recoloniser une zone ayant subi une régression. Outre le clonage à partir d'un rhizome, un plant peut s'établir sur le substrat sédimentaire de deux manières : par le développement d'un fragment de plante provenant d'un patch existant ou par la germination d'une graine. Les fleurs peuvent être observées du début du printemps jusqu'à l'automne. Une fois totalement développés, les pieds reproducteurs se détachent du fond et se dispersent dans l'environnement en flottant à la surface. Certaines graines se détachent rapidement et tombent sur le sédiment tandis que d'autres sont transportées sur de plus longues distances. Il est même probable que des graines se

²⁹ Short, F. T., Burdick, D. M., Wolf, J. S., Jones, G. E. (1993). Eelgrass in estuarine research reserves along the East Coast, USA.

³⁰ Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.

répandent sur de grandes distances grâce aux poissons, aux canards et aux oies qui s'en nourrissent (Baldwin et Lovvorn, 1994³¹; Figuerola et Green, 2002³²).

3.2.1.4 Paramètres d'influence : lumière, vague, courant, charge en nutriments, prédation

La croissance et la distribution des herbiers sont contrôlées par les propriétés physiques, chimiques et biologiques de leur environnement.

La **lumière** disponible pour la photosynthèse est communément considérée comme le facteur de contrôle principal (Duarte, 1991³³; Villazán *et al.*, 2016³⁴). Les herbiers sont cependant capables de s'adapter à des conditions de lumière variées à travers des réponses biochimiques (variation de teneur en pigments) ou structurelles (variation de la longueur des feuilles) (de los Santos *et al.*, 2010³⁵; Li *et al.*, 2013³⁶).

La **température** affecte la plupart des processus biologiques en modifiant vitesse des réactions biochimiques. La photosynthèse et la respiration sont ralenties à faible température, et s'accroissent lorsque la température augmente. A haute température, la respiration peut surpasser la photosynthèse, ce qui induit un bilan énergétique négatif pour la plante, pouvant causer la limitation de sa croissance, voire sa mort (Marsh *et al.*, 1986³⁷). La gamme de températures supportées par *Z. marina* s'étend de -1°C en hiver à 25°C en été, tandis que *Z. noltei* supporte de plus hautes températures estivales. La température définit ainsi les limites géographiques de la répartition des différentes espèces de phanérogames (Short *et al.*, 2001³⁸).

Les **courants et les vagues** contrôlent aussi la distribution spatiale des zostères (Balke *et al.*, 2014³⁹). Il est estimé que les herbiers de zostère marines ne peuvent exister dans des zones où les vitesses sont supérieures à 1,5 m.s⁻¹ ou sur des côtes très exposées (Fonseca *et al.*, 1983⁴⁰). Pour les zostères naines, de los Santos (2010)⁴¹

³¹ Baldwin, J. R., Lovvorn, J. R. (1994). Expansion of seagrass habitat by the exotic *Zostera japonica*, and its use by dabbling ducks and brant in Boundary Bay, British Columbia. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 103(1), 119-127.

³² Figuerola, J., Green, A. J. (2002). Dispersal of aquatic organisms by waterbirds: a review of past research and priorities for future studies. *Freshwater biology*, 47(3), 483-494.

³³ Duarte, C. M. (1991). Seagrass depth limits. *Aquatic Botany* 40:363-377.

³⁴ Villazán, B., Brun, F. G., González-Ortiz, V., Moreno-Marín, F., Bouma, T. J., Vergara, J. J. (2016). Flow velocity and light level drive non-linear response of seagrass *Zostera noltei* to ammonium enrichment. *Marine Ecology Progress Series*, 545, 109-121.

³⁵ de los Santos, C. B., Brun, F. G., Bouma, T. J., Vergara, J. J., Pérez-Lloréns, J. L. (2010). Acclimation of seagrass *Zostera noltii* to co-occurring hydrodynamic and light stresses. *Marine Ecology Progress Series*, 398, 127-135.

³⁶ Li, W. T., Kim, S. H., Kim, J. W., Kim, J. H., Lee, K. S. (2013). An examination of photoacclimatory responses of *Zostera marina* transplants along a depth gradient for transplant-site selection in a disturbed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 118, 72-79.

³⁷ Marsh Jr, J. A., Dennison, W. C., Alberte, R. S. (1986). Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 101(3), 257-267.

³⁸ Short, F. T., Coles, R. G. Pergent-Martini, C. (2001). Global seagrass distribution. *Global seagrass research methods*, 5-30

³⁹ Balke, T., Herman, P. M. J., Bouma, T. J. (2014). Critical transitions in disturbance-driven ecosystems: identifying windows of opportunity for recovery. *Journal of Ecology* 102:700-708

⁴⁰ Fonseca, M. S., Zieman, J. C., Thayer, G. W., Fisher, J. S. (1983). The role of current velocity in structuring eelgrass (*Zostera marina* L.) meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 17(4), 367-380.

⁴¹ de los Santos, C. B., Brun, F. G., Bouma, T. J., Vergara, J. J., Pérez-Lloréns, J. L. (2010). Acclimation of seagrass *Zostera noltii* to co-occurring hydrodynamic and light stresses. *Marine Ecology Progress Series*, 398, 127-135.

estime la vitesse critique à $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'action des vagues et des courants empêche le développement des herbiers, en limitant l'établissement de graines ou en arrachant les pieds existants.

Les phanérogames marines ont besoin de **nutriments** pour se développer, principalement d'azote et de phosphore. Comparés aux cellules phytoplanctoniques, les zostères ont besoin de quatre fois moins d'azote et de phosphore par unité de poids, ce qui leur donne un avantage dans les environnements pauvres en nutriments (Duarte, 1995⁴²).

Les phanérogames marines sont relativement bien adaptées à des conditions variées de salinité, ainsi qu'à des variations soudaines de ce paramètre. En effet elles colonisent des environnements aquatiques dont la salinité varie entre 5 et 45 PSU, et seules de très importantes teneurs en sel (supérieures à 60 PSU) peuvent causer leur dépérissement (Lirman and Cropper, 2003⁴³; Touchette, 2007⁴⁴).

Les épiphytes qui se développent sur les feuilles des zostères créent de l'ombrage, et peuvent également réduire l'accès aux nutriments par les feuilles.

Les macroalgues (notamment ulves, entéromorphes) forment parfois des amas denses qui se déposent sur les herbiers, limitant drastiquement la pénétration de la lumière et produisant des sulfures au cours de leur dégradation.

La croissance et la distribution des phanérogames peuvent aussi dépendre d'autres organismes, essentiellement à travers la compétition inter espèces et le broutage (Edgar, 1990⁴⁵).

3.2.1.5 Les boucles de rétroaction existantes

Les changements de l'environnement et les pressions anthropiques modifient le fonctionnement des écosystèmes côtiers (Waycott *et al.*, 2009⁴⁶), parfois à travers des processus de rétrocontrôle (Goberville *et al.*, 2011⁴⁷).

Par exemple, la disparition des herbiers mène à l'augmentation des vitesses de courants sur le fond qui peut conduire à l'arrachement mécanique des plantes avoisinantes. De plus, cette augmentation des courants induit de l'érosion et donc une augmentation des concentrations en sédiments en suspension, réduisant ainsi la lumière disponible, ce qui à son tour affecte la croissance des plantes subsistantes.

Ces processus d'auto-amplification peuvent aussi présenter des avantages pour un herbier en voie de colonisation, puisque le développement de l'herbier est favorisé par lui-même.

⁴² Duarte, C. M. (1995). Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41(1), 87-112.

⁴³ Lirman, D., Cropper, W. P. (2003). The influence of salinity on seagrass growth, survivorship, and distribution within Biscayne Bay, Florida : field, experimental, and modeling studies. *Estuaries*, 26(1), 131-141 Lopez *et al.*, 1995

⁴⁴ Touchette, B. W. (2007). Seagrass-salinity interactions: physiological mechanisms used by submersed marine angiosperms for a life at sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1-2), 194-215.

⁴⁵ Edgar, G. J. (1990). Population regulation, population dynamics and competition amongst mobile epifauna associated with seagrass. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 144(2-3), 205-234.

⁴⁶ Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kenworthy, W. J., Short, F. T., Williams, S. L., Kendrick, G. A. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377-12381.

⁴⁷ Goberville, E., Beaugrand, G., Sautour, B., Tréguer, P. (2011). Evaluation of coastal perturbations: A new mathematical procedure to detect changes in the reference state of coastal systems. *Ecological Indicators*, 11(5), 1290-1300.

3.2.1.6 Prérequis à la restauration

L'objectif de la restauration écologique est d'améliorer le fonctionnement écologique d'un secteur et ainsi de retrouver la richesse de l'écosystème et les bénéfices associés. Une action de restauration écologique nécessite au préalable une bonne qualité de l'eau ainsi que la gestion ou la suppression des pressions à l'origine de la dégradation du secteur.

La restauration écologique d'un habitat implique la maîtrise des pressions et le rétablissement des conditions environnementales favorables au retour de la biodiversité locale. Cependant, les conditions environnementales de certains habitats dépendent d'espèces pionnières, en particulier dans les environnements stressants. Lorsque la dynamique de ces espèces pionnières est fortement fragilisée, la restauration par des processus naturels est compromise sur le court et moyen terme (Greve et Binzer, 2004⁴⁸).

3.2.1.7 Transfert des protocoles de restauration

Au regard du nombre limité de références relatives à la restauration des herbiers de *Zostera noltei* et compte tenu de l'existence de nombreuses similitudes entre ces deux espèces, le choix a été fait d'intégrer dans cette étude bibliographique les publications et retours d'expérience relatifs aux protocoles de restauration concernant les zostères naines mais aussi ceux relatifs aux zostères marines. En effet, de nombreuses caractéristiques sont communes aux deux espèces : les modes d'expansion et de reproduction, les facteurs de contrôles, les processus de rétrocontrôle impliquant ces espèces.

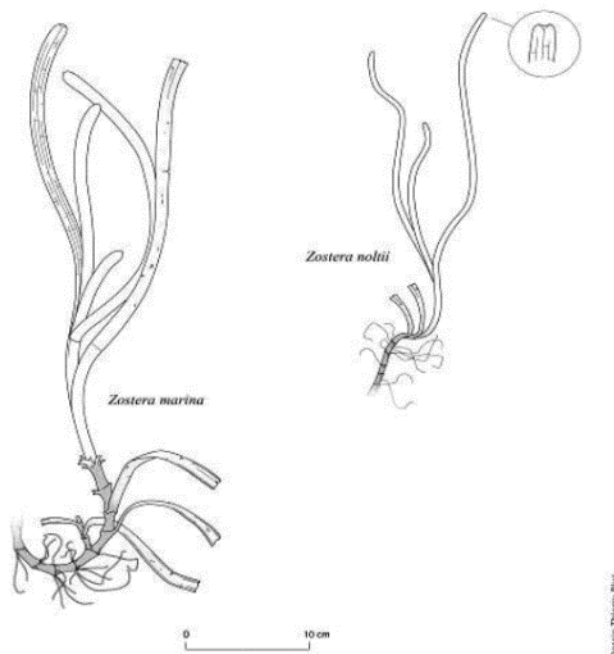


FIGURE 66 : SCHEMA A L'ECHELLE DE ZOSTERA NOLTEI ET ZOSTERA MARINA

Source : (Ganthy, 2011)⁴⁹

Cependant, bien que de nombreux traits communs aux deux espèces rendent pertinent l'enrichissement de la bibliographie par les ressources liées aux zostères marines, certaines caractéristiques diffèrent et impliquent une attention particulière dans le transfert des protocoles de restauration d'une espèce sur une autre, notamment :

⁴⁸ Greve, T. M., Binzer, T. (2004). Which factors regulate seagrass growth and distribution. European seagrasses: an introduction to monitoring and management, 19.

⁴⁹ Ganthy, F. (2011). Rôle des herbiers de Zostères (*Zostera noltei*) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon. PhD Thesis, Université de Bordeaux 1.

- La gamme de température supportée - La comparaison de la répartition géographique de chacune des deux espèces de zostères suggère que les zostères marines sont adaptées à une gamme de température plus faible que les zostères naines.
- La gamme de profondeur - Les zostères marines colonisent les surfaces plus profondes (l'étage subtidal et le bas de l'étage intertidal) que les zostères naines (ensemble de l'étage intertidal). Grâce à leurs feuilles plus longues, les zostères marines sont adaptées à aller chercher de la lumière plus haut dans la colonne d'eau.
- Dans les années 1930, 90% de la population de zostère marine a dé péri le long de la côte atlantique à cause de la maladie du dépérissement (wasting disease).

3.2.2 Cadre réglementaire applicable aux herbiers de zostère naine

D'après (Baraud, 2020)⁵⁰ et la description de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel pour l'espèce *Zostera noltei*⁵¹ :

- L'espèce *Zostera noltei* est présente sur la liste Rouge de l'IUCN sous le statut de préoccupation mineure.
- En France, une réglementation stricte s'applique sur le territoire de 4 régions au travers d'arrêtés régionaux : en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Basse-Normandie et Pays de la Loire. *Zostera noltei* apparait en effet sur la liste des espèces végétales protégées. Les interdictions de « destruction, coupe, mutilation, arrachage, cueillette ou enlèvement, colportage, utilisation, mise en vente, vente ou achat de tout ou partie des spécimens sauvages » s'appliquent dans les régions citées ci-dessus. Des dérogations sont possibles sur l'autorisation exceptionnelle de l'autorité administrative compétente (préfet).
- Au niveau national et international, l'espèce est citée dans plusieurs textes et documents mais dont la portée n'implique pas une réglementation stricte :
 - Au niveau national : dans le Code de l'Environnement, dans l'article L. 411-1 relatif à la protection des espèces.
 - Au niveau international : la Convention de Barcelone (appliquée en Mer Méditerranée) fait apparaitre l'espèce *Zostera noltei* dans la liste des espèces en danger ou menacées, de même que dans la Convention OSPAR, l'espèce apparait sur la liste des espèces et des habitats menacés et/ou en déclin.

Par ailleurs les herbiers constituent un indicateur de qualité du milieu utilisé dans le cadre de l'application de la directive européenne Cadre sur l'Eau.

3.3 Caractérisation générale des protocoles de restauration appliqués aux herbiers de zostères naines

⁵⁰ Baraud L, (2020), AFB. Zostère naine, *zostera noltei*.

⁵¹ *Zostera noltei* Hornem., 1832. Inventaire National du Patrimoine Naturel. < https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/674883/tab/statut >. Dernière consultation : 03/2021.

Cette caractérisation générale des protocoles de restauration des herbiers repose sur l'étude de 16 projets de restauration d'herbier de *Zostera noltei* ou *Zostera marina*. Deux technologies en cours de développement visant à la restauration des herbiers de zostère sont également présentées. Ces projets et les technologies sur lesquels ils reposent sont localisés sur la figure 66 ci-dessous. Les références et données brutes sont regroupées dans un tableau disponible en Annexe. Ces projets constituent le support des fiches Projet présentées plus loin dans le rapport.

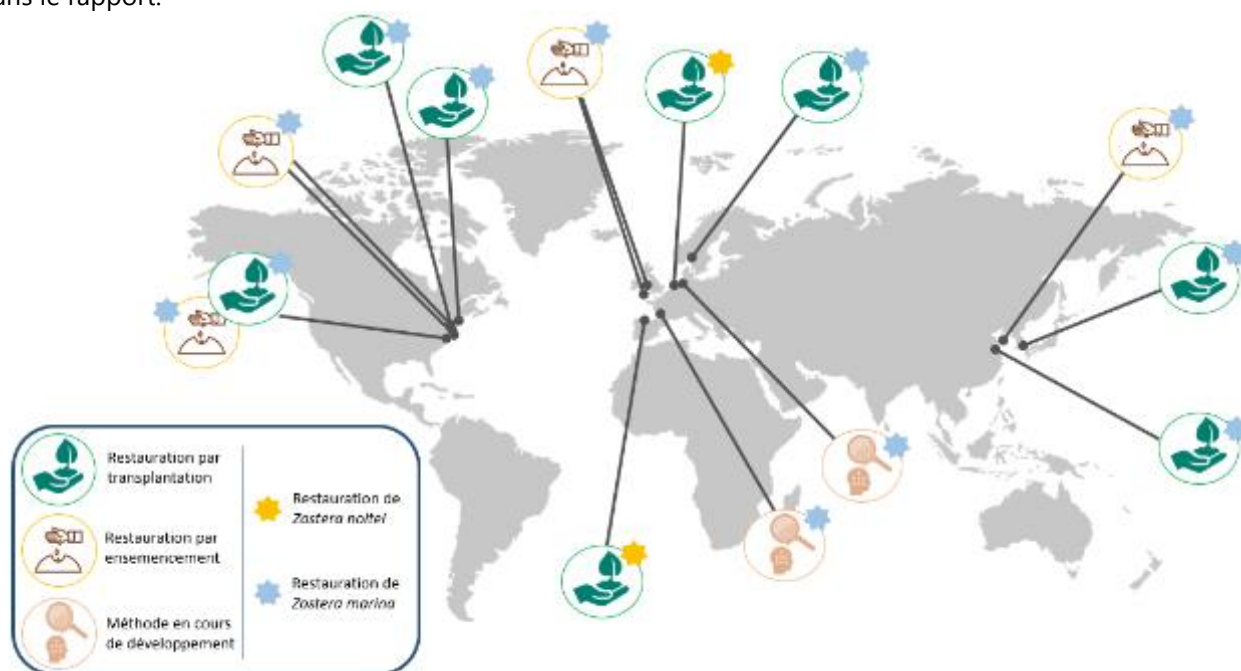


FIGURE 67 : LOCALISATION DES PROJETS DE RESTAURATION DES HERBIERS DE ZOSTERE

Source : Seaboost, A. Gavaille, projet DYNAREST, 08/2021

3.3.1 Géographie des projets

Les projets de restauration étudiés ont été menés dans diverses zones géographiques dont les historiques d'évolution des herbiers et les causes de dégradation varient. On décrit ici globalement les contextes d'exécution des protocoles de restauration ; ces contextes seront explicités avec plus de détails dans chaque fiche Projet.

Parmi les 16 projets étudiés, 5 d'entre eux ont été exécutés au sein de la baie de Chesapeake, baie qui constitue le plus grand estuaire des Etats-Unis et qui s'étend entre les Etats de la Virginie et du Maryland. Cet estuaire ainsi que les lagunes côtières peu profondes de la baie présentent depuis longtemps des herbiers de zostères marines. Ces herbiers s'étendent sur des fonds sableux à vaseux à des profondeurs allant de juste en dessous du niveau moyen bas des eaux jusqu'à environ 2 mètres de profondeur (Orth et al., 2010)⁵². Cette zone a fait l'objet d'un suivi intensif des herbiers de zostère compte-tenu des larges variations de leurs étendues et constitue un lieu important d'expérimentation de protocoles de restauration.

La baie de Chesapeake a été le lieu de la réalisation de nombreux protocoles de restauration. De ce fait, le contexte de réalisation des actions et l'historique des herbiers dans cette zone a fait l'objet d'un suivi sur une longue période. On précise ci-dessous quelques éléments relatifs à cette zone :

L'abondance des herbiers de zostères a peu varié jusqu'au début des années 1900 mais en 1930, un déclin important des herbiers a été observé à l'échelle de la baie, entraînant quasiment la disparition des herbiers dans ce secteur. Ce déclin a été attribué à une maladie due à un parasite ainsi qu'à un cyclone destructeur en 1933. Le retour spontané des herbiers a été variable selon les zones de la baie. Des épisodes de déclin plus récents ont été

⁵² Orth, R. J., Marion, S. R., Moore, K. A., & Wilcox, D. J. (2010). Eelgrass (*Zostera marina* L.) in the Chesapeake Bay region of mid-Atlantic coast of the USA: challenges in conservation and restoration. *Estuaries and Coasts*, 33(1), 139-150

documentés depuis la fin des années 1960. Ces régressions sont causées par une détérioration de la qualité des eaux entraînant une diminution de la clarté des eaux et un accroissement de la charge en nutriments favorisant une sur-croissance de macroalgues. A la fin des années 1970, on estime que les herbiers ont été éliminés d'environ 50% de leur espace d'installation. Depuis 1980, l'intérêt pour la restauration des herbiers grandit en parallèle d'une prise de conscience globale de l'importance des herbiers marins. En 2001, un programme de restauration à grande échelle a démarré et les conclusions suggèrent que la restauration spontanée des herbiers a probablement été limitée par une trop faible quantité de semences au sein de la baie (Orth et al., 2010)⁵³.

Une large prise de conscience de l'importance des herbiers de zostères couplée à la constatation de leur déclin massif a conduit à la prise de mesures de conservation des herbiers depuis les années 1990. Diverses mesures de protection ont été prises à l'échelle des Etats de Virginie et du Maryland, de même qu'une stratégie pour accélérer la restauration des herbiers (Orth et al., 2010). Les protocoles de restauration menés dans cette zone s'inscrivent dans cette stratégie globale de restauration.

3.3.2 Contextes d'exécution des protocoles de restauration

Deux des 16 protocoles s'appliquent pour la restauration d'herbiers de *Zostera noltei*, les 14 autres concernent la restauration d'herbiers de *Zostera marina*.

Tous les projets étudiés ont un fort caractère expérimental et ont fait l'objet d'une publication dans un journal scientifique ou d'une mention dans un article publié. Les projets s'inscrivent globalement dans les 3 catégories suivantes :

- une action s'inscrivant au sein d'une stratégie de restauration globale (en particulier pour les projets menés dans la baie de Chesapeake) (5/16)
- une action expérimentale, un projet pilote (8/16)
- une action de compensation suite à des travaux d'aménagement (3/16)

Lorsque le contexte est décrit plus précisément, les détails sont donnés dans les « fiches Projet ».

3.3.3 Origine de la dégradation des herbiers

De manière générale, les épisodes les plus récents (post année 2000) de déclin des herbiers sont attribués à des températures des eaux trop élevées en été couplées à une turbidité croissante à cette saison. Les activités anthropiques sont également responsables de la dégradation locale des herbiers (aquaculture, dragage, pêche...) (Orth et al., 2010).

Tous les projets de restauration ont lieu en zone estuarienne, sur un site où des herbiers de zostères ont soit historiquement été présents ou le sont encore à un niveau de dégradation plus ou moins avancé.

Parmi les causes de dégradation des herbiers qui font l'objet d'une restauration dans ces projets, la dégradation de la qualité des eaux et ses conséquences (turbidité et baisse de la luminosité dans la colonne d'eau, charge en nutriments élevée favorisant le développement d'algues) sont le facteur majeur rencontré dans les zones estuariennes. Les projets de restauration sont menés à la suite d'efforts conduits en amont pour améliorer la qualité des eaux et ainsi réduire la pression sur les herbiers.

Les pressions anthropiques telles que les aménagements côtiers entraînant une destruction directe des herbiers ou une modification de l'hydrodynamisme, la pêche et le dragage sont les autres principales causes de dégradation des herbiers.

⁵³ Orth, R. J., Marion, S. R., Moore, K. A., & Wilcox, D. J. (2010). Eelgrass (*Zostera marina* L.) in the Chesapeake Bay region of mid-Atlantic coast of the USA: challenges in conservation and restoration. *Estuaries and Coasts*, 33(1), 139-150

3.4 Inventaire comparatif des protocoles de restauration déployés et analyse des conditions de succès et d'échec de chaque protocole et caractérisations conclusives pour l'herbier

3.4.1 Description générale des techniques de restauration des herbiers

Un screening des différents protocoles de restauration des herbiers de zostère a permis de dégager 2 grandes techniques de restauration des herbiers :

- **Les méthodes de transplantation** : ces méthodes reposent sur la reproduction asexuée des zostères. Elles s'appuient sur le prélèvement dans un champ donneur de plants végétatifs ou de mottes porteuses d'herbier, leur transfert puis leur implantation sur le site à restaurer. Ces méthodes impliquent ou non l'ancrage des plants dans le sédiment. Les unités transplantées peuvent être des plants simples, des plants associés via leur rhizome, des plants entiers assemblés ou dissociés.... L'ancrage des plants, quand il a lieu, est réalisé de diverses manières (cadre support, pierre ou coquille d'huitre support...). La transplantation peut être accompagnée de mesures limitant la vulnérabilité des plants des plants à l'érosion, au déracinement ou à la prédation.
- **Les méthodes d'ensemencement** : ces méthodes reposent sur la reproduction sexuée des zostères. Elles consistent en la récolte de tiges d'herbiers matures afin d'en récupérer les graines qui seront ensuite disséminées dans la zone à restaurer. Les méthodes d'ensemencement se différencient relativement au mode de dispersion des graines sur le site à restaurer : à la volée par la main de l'Homme, mécaniquement, ou via des systèmes de sacs en toile et/ou bouées.

3.4.2 Inventaire des méthodes de transplantation des herbiers

Neuf méthodes de transplantation ont été identifiées dans la littérature scientifique, 2/9 sont réalisées sur *Zostera noltei*. Ces méthodes reposent sur la reproduction asexuée des herbiers de zostères, c'est-à-dire sur l'expansion horizontale des plants via la multiplication végétative (expansion du rhizome et croissance de nouvelles feuilles). Parmi ces méthodes on peut encore distinguer 2 variantes :

- Les méthodes pour lesquelles l'unité transplantée est constituée d'un plant simple ou de plusieurs plants de zostères associées sur un support ou liés entre eux par leur rhizome.
- Les méthodes pour lesquelles l'unité transplantée est une motte constituée d'un ou plusieurs plants entiers de zostères et de son assise sédimentaire comportant les systèmes racinaires.

Dans les 2 cas, ces méthodes nécessitent le prélèvement de plants ou de mottes dans un champ donneur situé à proximité du site de transplantation, leur transfert sur le site à restaurer et leur implantation. Selon les méthodes employées et le contexte de réalisation, une phase de stockage peut s'ajouter : en cuve pour les plants ou dans des conditions limitant la dessiccation pour les mottes. Enfin, avant implantation, le liaisonnement des plants via leur rhizome ou leur association à un support de transplantation tel une pierre, une coquille d'huitre ou un cadre est effectué.

Ces neuf méthodes sont les suivantes :

- **La transplantation de plants d'herbier avec rhizome** (Orth et al., 1999)⁵⁴: les plants de zostères prélevés avec rhizome sont implantés sur le site à restaurer par un plongeur insérant un à un, avec son doigt, les plants dans le sédiment à une profondeur de 2,5 à 5 cm. Il n'y a pas de système d'ancrage des plants ou rhizomes.

⁵⁴ Orth, R. J., Harwell, M. C., & Fishman, J. R. (1999). A rapid and simple method for transplanting eelgrass using single, unanchored shoots. *Aquatic Botany*, 64(1), 77-85.

- **La transplantation de plants d'herbier fixés sur un cadre support** (Transplanting Eelgrass Remotely with Frame Systems – TERFS) (Short et al., 2002)⁵⁵: les plants de zostères avec rhizome sont attachés par paire, à intervalle régulier de 5 cm, sur des cadres lestés qui permettent d'assurer l'ancrage des plants en enfouissant les rhizomes et de maintenir les transplants en place le temps de l'installation des racines dans le sédiment. Les cadres sont déposés sur site depuis un bateau, ils sont retirés 3 à 5 semaines après leur mise en place et peuvent être réutilisés.
- **La transplantation par la méthode du rhizome horizontal** (Davis et al., 1997)⁵⁶: l'unité de transplantation consiste en 2 plants associés par leurs rhizomes, chacun pointant dans une direction opposée, et maintenus ensembles par un pic biodégradable. Sur site, les unités sont enfouies par des plongeurs dans 2 cm de sédiment.
- **La transplantation de plants fixés sur une coquille d'huître** (Lee et al., 2008)⁵⁷: les plants avec rhizome sont insérés par paire dans une coquille d'huître percée à cet effet et présentant une masse minimale. Les unités de transplantation sont ensuite larguées depuis un bateau sur le site à restaurer.
- **La transplantation de plants fixés sur une pierre allongée** (Zhou et al., 2014)⁵⁸: les plants sont attachés par 3 à une pierre allongée, de masse minimale, à l'aide d'un cordon biodégradable. Les pierres sont enfouies dans des petits trous creusés au préalable entre 2 et 4 cm de profondeur.
- **La transplantation de mottes prélevées manuellement** (Orth, 2006⁵⁹ ; Valle et al.⁶⁰, Fonseca, 1998⁶¹) : les mottes sont prélevées à l'aide d'un carottier rectangulaire de dimensions de 40x30 cm sur 15 cm d'épaisseur de sédiments. Les mottes sont transférées dans des boîtes en bois protégées de la dessiccation. Elles sont implantées sur site dans des trous préalablement creusés.
- **La transplantation de mottes excavées** (Suykerbuyk et al., 2016)⁶²: les mottes sont prélevées à l'aide d'un excavateur et sont de dimensions importantes (1,5x0,75 m sur une épaisseur de 10 cm). Elles sont transportées dans des boîtes spécialement construites et leur implantation est effectuée par excavateur dans des trous préalablement creusés.
- **La transplantation de plants préalablement cultivés** (Tanner et Parham, 2010)⁶³: les plants sont élevés en nurserie à partir de graines récoltées sur des tiges matures. La culture dure 70 à 100 jours

⁵⁵ Short, F. T., Kopp, B. S., Gaeckle, J., & TAMAKI, H. (2002). *Seagrass ecology and estuarine mitigation: a low-cost method for eelgrass restoration*. *Fisheries science*, 68(sup2), 1759-1762

⁵⁶ Davis, R. C., & Short, F. T. (1997). Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: the horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59(1-2), 1-15

⁵⁷ Lee, K. S., & Park, J. I. (2008). *An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats*. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 1015-1021

⁵⁸ Zhou, Y., Liu, P., Liu, B., Liu, X., Zhang, X., Wang, F., & Yang, H. (2014). *Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique*. *PloS one*, 9(4), e92982.

⁵⁹ Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). *A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays*. In *Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both*. March 11, 2003. Sarasota, Florida (pp. 1-17).

⁶⁰ Valle, M., Garmendia, J. M., Chust, G., Franco, J., & Borja, Á. (2015). *Increasing the chance of a successful restoration of *Zostera noltii* meadows*. *Aquatic Botany*, 127, 12-19.

⁶¹ Fonseca, M. S. (1998). *Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters* (Vol. 55). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Ocean Office.

⁶² Suykerbuyk, W., Govers, L. L., Bouma, T. J., Giesen, W. B., de Jong, D. J., van de Voort, R., ... & van Katwijk, M. M. (2016). *Unpredictability in seagrass restoration: analysing the role of positive feedback and environmental stress on *Z. ostera noltii* transplants*. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 774-784.

⁶³ Tanner, C. E., & Parham, T. (2010). *Growing *Zostera marina* (eelgrass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects*. *Restoration Ecology*, 18(4), 527-537

afin d'obtenir des plants de plus de 12 cm avec des rhizomes de 2 cm environ. Les plants sont ensuite transplantés selon la méthode du rhizome horizontal.

3.4.3 Inventaire des méthodes de restauration des herbiers par ensemencement

Les méthodes de restauration par ensemencement reposent sur les processus de reproduction sexuée des zostères, c'est-à-dire par la dispersion de graines. Ces méthodes impliquent donc au préalable la collecte de graines à partir de tiges reproductives matures. Les tiges sont récoltées sur le site donneur, manuellement, avant que les graines ne soient relâchées dans le milieu. Après récolte, les méthodes diffèrent relativement au mode de dispersion des graines plus ou moins élaborés (ensemencement à la volée, ensemencement mécanique, système de bouées, de sacs...), l'objectif étant de disperser les graines, de limiter leur transport hors du site à restaurer, de favoriser leur implantation, leur germination puis la survie des plants.

Sept méthodes d'ensemencement ont pu être distinguées dans la littérature :

- **L'ensemencement à la volée** (Orth et al., 1994⁶⁴; Orth et al., 2003⁶⁵) : après récolte des tiges reproductives matures, les tiges sont stockées dans des cuves agitées avec une circulation d'eau jusqu'à ce que les graines soient libérées. Les graines sont alors récupérées et dispersées à la main sous forme mélangée avec du matériel détritique à 1 mètre au-dessus de la surface.
- **L'ensemencement mécanique** (Orth et al., 2009)⁶⁶ : les graines sont récoltées de la même manière. Elles sont ensuite diluées dans une matrice gélatineuse afin d'être dispersées par un planteur mécanique qui consiste en une sorte de traineau créant des sillons dans lesquels la mixture gélatineuse contenant les graines est injectée. Un ensemencement des graines à l'aide d'un pistolet extrudeur a aussi été réalisé sur un projet de restauration mené dans le Bassin d'Arcachon. Le semis consiste dans ce cas de l'injection d'un mélange de vase et de graines directement dans le sédiment à l'aide du pistolet (OFB, 2021)⁶⁷.
- **L'ensemencement par un système de bouées** (Pickerell et al., 2005)⁶⁸ : les tiges reproductrices matures sont stockées dans des sacs en mailles perlées. Ces sacs sont placés sur le site à restaurer en étant suspendus dans la colonne d'eau via une bouée de surface d'un côté et maintenus en place de l'autre par un lest posé au fond. L'ensemble est lié par une ligne flottante et cette unité est larguée depuis un bateau à l'emplacement voulu. La libération et la dispersion des graines se fera naturellement depuis le sac.
- **L'ensemencement par des sacs en toile de jute** (Harwell et Orth, 1999)⁶⁹ : les tiges reproductives matures sont directement placées dans des sacs en toile de jute maillés. Les sacs sont ensuite disposés sur le sédiment du site à restaurer et les graines germent ensuite naturellement depuis le sac.

⁶⁴ Orth, R. J., Luckenbach, M., & Moore, K. A. (1994). Seed dispersal in a marine macrophyte: implications for colonization and restoration. *Ecology*, 75(7), 1927-1939

⁶⁵ Orth, R. J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., & Marion, S. R. (2003). Seed-density effects on germination and initial seedling establishment in eelgrass *Zostera marina* in the Chesapeake Bay region. *Marine Ecology Progress Series*, 250, 71-79.

⁶⁶ Orth, R. J., Marion, S. R., Granger, S., & Traber, M. (2009). Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds. *Aquatic Botany*, 90(2), 204-208.

⁶⁷ Office Français de la Biodiversité. (2021). *Projet de restauration participative des herbiers de Zostère naine sur le Bassin d'Arcachon*.

⁶⁸ Pickerell, Christopher H., Stephen Schott, and Sandy Wyllie-Echeverria. "Buoy-deployed seeding: demonstration of a new eelgrass (*Zostera marina* L.) planting method." *Ecological Engineering* 25.2 (2005): 127-136.

⁶⁹ Harwell, M. C., & Orth, R. J. (1999). Eelgrass (*Zostera marina* L.) seed protection for field experiments and implications for large-scale restoration. *Aquatic Botany*, 64(1), 51-61.

- **L'ensemencement à l'aide de sacs en toile de jute remplis de sédiments** (Zhang et al., 2015)⁷⁰ : les graines sont préalablement récoltées à partir des tiges reproductives puis mises en sac mélangées à du sédiment avant déploiement sur site. Les sacs sont ancrés dans le sédiment à l'aide d'accroches métalliques en U, côte à côte sur un espace rectangulaire.
- **L'ensemencement avec des sacs en toile de jute attachés à une ligne** (méthode BossLine ; Unsworth et al., 2019)⁷¹ : les graines sont préalablement récoltées à partir des tiges reproductives puis mises en sac mélangées à du sédiment. Les sacs sont ensuite fixés sur des cordes à 1 m d'intervalle chacun. Les lignes de sacs sont déployées sur site et fixées à leurs extrémités par des piquets métalliques.
- **L'ensemencement en pots** (Orth et al., 2006) : après récolte des graines de la même manière que présentée ci-dessus, les graines sont mises à germer dans des petits pots conservés en cuves pendant la période hivernale et placées dans le milieu au printemps, au début de la phase de croissance des zostères.

3.4.4 Méthodes de restauration et protocoles en cours de développement

En parallèle des actions inventoriées ci-dessus, deux projets innovants en cours de développement ont été identifiés pour la restauration des herbiers de zostères. Ces projets ne reposent ni sur de la transplantation ou de l'ensemencement mais sur la modification du milieu environnement et notamment sur le rétablissement d'un contexte hydro-sédimentaire et de conditions environnementales favorables au développement des plants ayant colonisés spontanément la zone ou transplantés.

3.4.4.1 Le projet SEA ART porté par l'Université technique de Braunschweig

Pour restaurer les herbiers de *Z. marina* en Wadden Sea, le projet de recherche SEA ART (2016 – 2020) vise à développer des herbiers artificiels biodégradables pour la mise en place de conditions de luminosité, hydrodynamiques, et sédimentaires favorables à la germination de graines et au développement des plants (<http://www.sea-art.org/>)⁷².

Ce projet s'articule autour de plusieurs grands thèmes d'étude sur lesquels interviennent plusieurs équipes de recherche (Villanueva & Taphorn, 2019)⁷³ :

- L'étude des conditions environnementales et biologiques requises pour la restauration et la croissance des herbiers naturels (Mesures in-situ et expériences en mésocosme).
- L'étude du dimensionnement de l'herbier artificiel (observation des conditions environnementales, dimensionnement de l'impact hydrodynamique et de rétention sédimentaire par la couche de fond, tests en canal à houle et à courant).
- L'étude des matériaux biodégradables, naturels et des méthodes de production.
- L'étude des possibilités d'utilisation de la biomasse d'herbier (matériaux d'isolation, fertiliseur, ...)
- L'évaluation des performances des herbiers artificiels développés. L'objectif est de réaliser des tests du prototype à l'échelle 1:1 dans un bassin à houle pour mieux comprendre (1) la stabilité du système d'ancrage et (2) l'impact hydrodynamique des herbiers artificiels dans des conditions proches des conditions naturelles.

⁷⁰ Zhang, P. D., Fang, C., Liu, J., Xu, Q., Li, W. T., & Liu, Y. S. (2015). An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: implications for their large-scale restoration. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 89-99.

⁷¹ Unsworth, R. K., Bertelli, C., Cullen-Unsworth, L., Esteban, N., Lilley, R., Jones, B. L., ... & Rees, S. (2019). Sowing the seeds of seagrass recovery using hessian bags. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 311.

⁷² <http://www.sea-art.org/en/home.html>

⁷³ Villanueva R., Paul M., Taphorn M., (2019). Natural geo-textiles as base layer for artificial seagrass.

Compte-tenu des sujets d'étude couverts par ce projet, les herbiers artificiels biodégradables semblent être applicables dans des environnements peu exposés ou ceux soumis à un fort hydrodynamisme lié à des courants ou à de la houle

Le prototype à l'étude correspond à un maillage foisonnant de brins artificiels d'herbiers dont le déploiement consisterait à son déroulement sur l'estran et à son ancrage au sol par des lests.

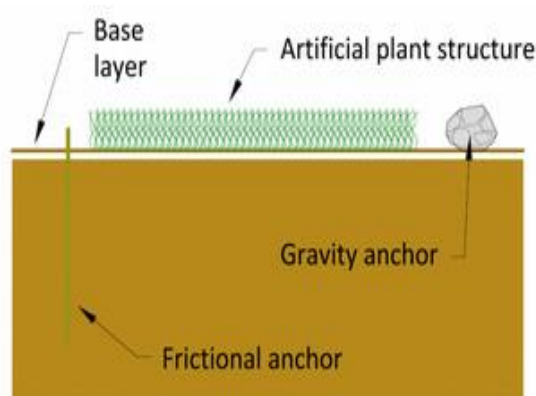


Figure 68 : SCHEMA DU SYSTEME D'HERBIER ARTIFICIEL SEA-ART. Source : (Villanueva & Taphorn, 2019)

3.4.4.2 Les Roselières, Seaboost

Le dispositif Roselière© de l'entreprise Seaboost vise à atténuer les courants dans le but de favoriser la reprise d'un herbier de zostères dont la croissance est limitée par les facteurs hydrodynamiques.

Ce dispositif est constitué de lignes d'herbiers artificiels biomimétiques. Ces dispositifs sont très modulables, manportables et durables et peuvent être utilisés dans différentes configurations et situations pour initier et accompagner d'années en années la reprise spontanée d'herbiers subissant actuellement une régression. Le caractère temporaire et déplaçable du dispositif lui permet d'être enlevé après le retour de l'herbier naturel puis d'être redéployé sur un secteur adjacent pour faciliter l'expansion.

Un projet expérimental, actuellement en cours dans le Parc Naturel Marin du Bassin d'Arcachon, doit permettre l'identification d'éventuelles contraintes et l'amélioration du dispositif en vue d'une expérimentation à plus large échelle.

L'entreprise Seaboost porte actuellement ses recherches sur les sujets suivants :

- la caractérisation fine des interactions entre le dispositif et la dynamique hydrosédimentaire.
- l'optimisation du dispositif pour son utilisation en tant que protection hydrodynamique ; c'est-à-dire l'optimisation du rapport entre nombre de dispositifs installés et la surface restaurée.
- l'identification des meilleures configurations pour chaque type de situation ; c'est-à-dire de maximiser, par son positionnement, les bénéfices d'un module en fonction de son environnement local.
- le développement de matériaux bio-sourcés.
- la restauration des surfaces significatives d'herbiers.

Le déploiement du dispositif est réalisé en 3 étapes :

1. Dimensionnement du dispositif en fonction du contexte environnemental du secteur de déploiement.
2. Pose des ancrages à vis assurant l'ancrage du dispositif.
3. Mise en tension des lignes d'herbier artificiel par serrage sur bout puis à l'aide d'un ridoir.

Cette solution est particulièrement adaptée pour un déploiement en environnement (estran, rebords de chenaux, ...) soumis à un fort hydrodynamisme lié à des courants ou à de la houle, dans des secteurs subissant des dépôts sédimentaires ou dans le cadre du renforcement de chenaux en érosion (canalisation des flux hydrodynamiques en vue de protéger l'érosion des estrans).

Cette méthode de restauration présente le bénéfice de l'absence de la manipulation de zostères et de favoriser un retour de la biodiversité en constituant directement un habitat pour les espèces locales.



FIGURE 70: PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF SEABOOST EN COURS D'EXPERIMENTATION AU SEIN DU PARC NATUREL MARIN DU BASSIN D'ARCACHON, (SEABOOST, ALEXANDRE MUSNIER, LE 19/10/2020)

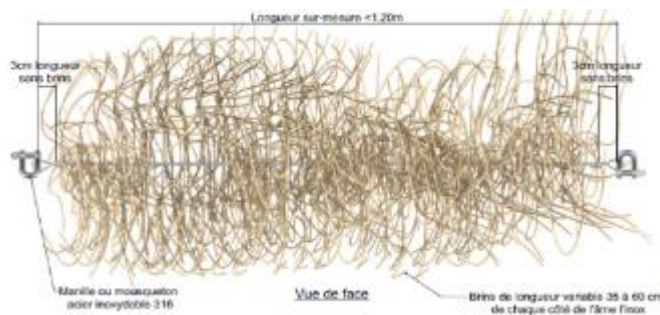


FIGURE 69: VUE DE FACE D'UNE LIGNE DE ROSELIERE (SEABOOST, JOFFREY CAPET)

3.4.5 Inventaire comparatif des méthodes de restauration des herbiers : fiches Projet et analyse des conditions de succès et d'échec

La lecture détaillée des publications relatives aux protocoles de restauration des herbiers a permis la production de fiches Projet. Ces fiches proposent une synthèse standard des projets de restauration et des méthodes déployées sur la base des critères suivants :

- le contexte de réalisation du projet : géographie, espèce concernée, historique de la zone, statut de l'action de restauration (projet expérimental, action de compensation...)
- les conditions environnementales sur le site à restaurer : conditions hydrodynamiques et sédimentaires, marnage, profondeur d'eau...
- le protocole déployé et les facteurs de variation étudiés s'il y en a.
- le suivi scientifique mis en place : durée et méthodes de suivi.
- les performances observées et les effets induits.

Les informations données sont rassemblées dans le tableau des projets donné en Annexe. Ces informations sont données à un niveau de détails le plus précis possible par rapport à l'information brute disponible dans les publications.

A la suite des fiches Projet, un tableau analytique est élaboré. Ce tableau permet d'une part de synthétiser les performances de la méthode ainsi que ses conditions de succès et d'échec relativement aux données disponibles dans la littérature.

D'autre part, dans ce même tableau, une partie analytique permet de caractériser la méthode sur la base de 4 critères jugés d'importance pour un gestionnaire dans la perspective de la mise en œuvre d'une action de restauration. Cette analyse met en regard des informations tirées de la littérature ainsi que l'expertise de Seaboost en tant qu'opérateur d'action de restauration écologique.

Ceci permet de conduire une analyse multicritère de ces méthodes sur le plan opérationnel et de mettre en lumière les avantages et inconvénients de chacune d'elles, leurs conditions d'application et de leur succès.

Les critères choisis sont les suivants :

- **la performance globale de la méthode** : estimation qualitative de la performance de la méthode à partir des données d'évaluation suivies dans les différents projets (taux de survie des transplants à court et/ou long terme, taux de recrutement, taux de germination, évolution du pourcentage de recouvrement...). Une approche qualitative a été choisie compte-tenu de l'hétérogénéité des paramètres de suivi et de la caractérisation de la performance de la méthode dans les différents projets.
- **accessibilité** : estimation du caractère simple et répliquable d'un protocole du point de vue des moyens techniques et installations nécessaires, de la complexité de mise en œuvre, de la nécessité de main d'œuvre et du niveau de compétences de cette main d'œuvre.
- **adaptabilité au contexte** : évaluation de la capacité de la méthode à pouvoir être appliquée et performante dans des contextes hydrosédimentaires différents (site peu exposé et fortement exposé, sédiment sableux à vaseux, site soumis à des mouvements hydro-sédimentaires...)
- **impact sur le milieu** : estimation du niveau d'impact de la mise en œuvre de la méthode de restauration sur les milieux dits « donneurs » (concernés par la collecte de plants/graines), et les sites dits « receveurs », c'est-à-dire les sites à restaurer sur lesquels a lieu la transplantation ou l'ensemencement. Ces impacts sont par exemple les traces laissées sur les sites donneurs et receveurs par les opérations.

Dans ces tableaux analytiques, les données issues de la littérature sont différenciées des analyses produites par Seaboost selon un code couleur : la partie bleutée correspond aux données issues de la littérature, la partie orangée correspond à l'analyse de Seaboost (associée à des données de la littérature dans certains cas pour lesquels les références sont indiquées).

3.4.5.1 Transplantation de plants d'herbier avec rhizome

TRANSPLANTATION DE PLANTS D'HERBIER AVEC RHIZOME



Contexte

- USA, Chesapeak Bay (York River, James River)
- *Zostera marina*
- Large déclin des herbiers dans la baie. Programme expérimental de restauration des herbiers.



Conditions environnementales

- Site présentant des herbiers dans le passé.
- Degré d'exposition aux vagues variables selon les sites : Hauteur de vagues de 0,5 à 1 m aux basses eaux.
- Site nu au York River ; avec quelques patches d'herbier dispersés au James River
- Marnage de 0,8 à 1 m.
- Courants maximum de 25 cm/s.
- Sédiments sableux, avec débris coquilliers ponctuellement.

Coûts :
Pas de données



Protocole

- **Période** : fin septembre à début octobre, période identifiée comme optimale dans la baie.
- **Collecte** de plants adultes avec racines et rhizomes récupérés à la pelle d'un champ donneur situé à proximité.
- **Traitement** :
 - Sédiment retiré des racines
 - Transfert au laboratoire dans des cuves agitées d'un courant d'eau issue du York river pendant 24 à 48 h.
 - Les plants avec 1 à 2 cm de rhizome sont regroupés par bouquets de 50 à 100 plants.
- **Transplantation** :
 - Effectuée par un plongeur, plant par plant, par insertion dans le sédiment à une profondeur de 25 à 50 mm, sous une couche de sédiment plus solide protégeant les plants du déracinement.
 - 70 plants/plot de 2x2 m. Répartition des plants en rangs espacés de 0,5 m et espacement des plants de 15 cm au sein d'un rang.
 - Accolement de plots de 2x2 m pour former des patches de 10x10 et 20x20 m.
 - Total : 192 plots de 2x2 m par site de transplantation.



Suivi

- Suivi du champ donneur par observation.
- **Suivi des transplants après 8, 12 et 20 mois.**
 - Evaluation de la couverture d'herbier dans des quadrats de 2x2m.
 - Comptage des plants : échantillonnage de 3 anneaux de 20 cm de diamètre par plot.



Performances et effets induits

Niveau élevé de survie des transplants :

- 73% après 1 mois
- % de recouvrement passant de 12,3% à 18% dans les 8 mois, puis de 24,2 à 38,9% après 20 mois.
- Après 8 mois, plusieurs rangs se sont rejoints.
- Croissance végétative importante.

→ Pas d'impact de l'exposition aux vagues sur la survie à long terme mais des conditions extrêmes peu après la transplantation sont susceptibles de tout arracher.

→ Système d'ancrage à privilégier en cas de site exposé aux courants.

Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays. In Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both. March 11, 2003. Sarasota, Florida (pp. 1-17).

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de plants d'herbier avec rhizome	<p>Survie : 73% après 1 mois.</p> <p>% de recouvrement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - De 12,3% à 18% dans les 8 mois - De 24,2 à 38,9% après 20 mois. <p>Après 8 mois : plusieurs rangs se sont rejoints.</p> <p>Croissance végétative importante.</p>	Pas de données.	Des conditions extrêmes peu après la transplantation sont susceptibles d'arracher tous les transplants.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Les performances de la méthode sont bonnes dans ce cas présent. ○ Méthode simple, facilement accessible sur le plan technique et répliquable : la méthode peut être réalisée même en l'absence d'installation de stockage si la transplantation s'effectue immédiatement après la collecte des plants. Cette méthode nécessite uniquement l'intervention de plongeurs. ○ Les plants n'étant pas ancrés dans le sédiment, cette méthode est à préférer dans les endroits peu exposés et on veillera à effectuer la transplantation lorsque la météo est favorable. ○ Faible atteinte au milieu donneur. 		

3.4.5.2 Transplantation de plants fixés sur un cadre métallique

TRANSPLANTATION DE PLANTS FIXES SUR DES CADRES METALLIQUES (TERFS)



Contexte

- USA, Great Bay Estuary, New Hampshire, Broad Cove; Massachusetts, Buzzards Bay, New Bedford Harbor
- *Zostera marina*
- Régression de l'herbier induite par les activités anthropiques.



Conditions environnementales

- Pollution aux PCBs et métaux lourds provenant de rejets industriels dans l'estuaire du New Bedford Harbor.

Coûts :
2,64\$/ PU.



Protocole

- **Période** : à l'été.
- **Collecte** de plants avec rhizomes sur un site donneur à proximité.
- **Traitement et transplantation** :
 - Fixation des plants avec des liens biodégradables à des cadres métalliques de 25 x 25 cm lestés avec des briques.
 - Au total, 25 paires de plants sont liés au cadre, à des intervalles de 5 cm, créant des patches à des densités de 200 plants/m².
 - Largage des cadres depuis un bateau de façon à ce que les rhizomes pénètrent dans la couche supérieure des sédiments.
 - Retrait des cadres environ 1 mois après installation.



Suivi

1 mois après installation :

- Evaluation du taux de survie.
- Comparaison avec un site de référence transplanté par la méthode du rhizome horizontal



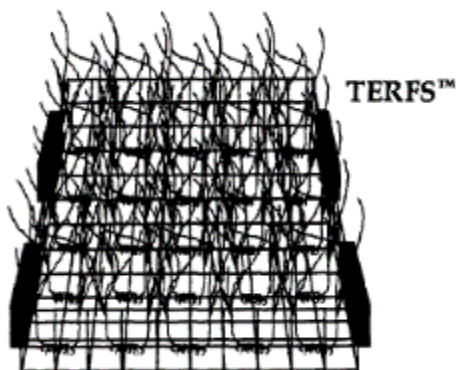
Performances et effets induits

1 mois après transplantation

- 50 à 95% de survie des transplants.
- Survie sur 100% des sites (12/12) transplantés par cette méthode *versus* survie sur 4/12 sites transplantés par la méthode du rhizome horizontal.

→ Le cadre permet le maintien des transplants pendant que ceux-ci s'ancrent au sol.

→ Les cadres fournissent une protection mécanique contre le déracinement et la bioturbation



Cadre métallique support des transplants

Lee, K. S., & Park, J. I. (2008). An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 1015-1021

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de plants fixés sur un cadre métallique	<p>1 mois après transplantation</p> <ul style="list-style-type: none"> - 50 à 95% de survie des transplants. - Survie sur 100% des sites (12/12) transplantés par cette méthode vs survie sur 4/12 sites transplantés par la méthode du rhizome horizontal. 	Pas de données.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Bonnes performances de la méthode à court terme dans le cas présent. Le cadre permet de réduire la contrainte hydrosédimentaire sur les transplants et de réduire les mouvements sédimentaires de surface, deux actions potentiellement à l'origine de la mortalité des transplants dans d'autres méthodes (Short et al., 2002)⁷⁴. o Méthode simple, accessible sur le plan technique. Economie en temps et en moyens par la méthode de largage des cadres (Short et al., 2002), mais action par plongée nécessaire pour le retrait des cadres. o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée et nulle sur le site à restaurer par la méthode du largage des cadres. Les cadres et les briques ne semblent pas impacter la zone. o Cette méthode confère aux transplants une meilleure résistance à la contrainte hydrodynamique et permet de les maintenir fixes le temps de leur ancrage dans le sédiment par croissance des racines (Short et al., 2002). Cette méthode peut être envisagée sur des sites exposés aux vagues et aux courants compte tenu du maintien des plants par le cadre. De même le largage des cadres permet d'envisager une action à plus grande échelle. 		

3.4.5.3 Méthode du rhizome horizontal

⁷⁴ Short, F. T., Kopp, B. S., Gaeckle, J., & TAMAKI, H. (2002). Seagrass ecology and estuarine mitigation: a low-cost method for eelgrass restoration. *Fisheries science*, 68(sup2), 1759-1762

METHODE DU RHIZOME HORIZONTAL



Contexte

- USA, Great Bay Estuary, New Hampshire, Piscataqua River
- *Zostera marina*
- Programme expérimental mené au titre d'une action de compensation suite à l'extension d'installations portuaires ayant eu des impacts directs et indirects sur l'herbier.



Conditions environnementales

- Site présentant des herbiers naturels à proximité.
- Marnage de 3 m.

Coûts :
5,28 \$/PU



Protocole

- **Période** : de juin à septembre et de mai à juillet selon les années.
- **Collecte** de plants adultes sur un herbier sain situé dans l'embouchure du fleuve. Prélèvement en creusant autour du rhizome sur 3 à 5 cm puis section du rhizome pour récupérer le plant. Prélèvement de 50 plants/m² pour une densité initiale de 445 plants/m².
- **Traitement**:
 - Conservation des plants dans des bassines d'eau de mer.
 - Unité formée par l'assemblage de 2 plants via les rhizomes alignés parallèlement et pointant chacun dans une direction opposée et maintenus par une agrafe biodégradable.
- **Transplantation** :
 - Effectuée par un plongeur en zone subtidale et intertidale.
 - Enfouissement de l'unité dans les 2 cm de sédiments supérieurs maintenue en place par une tige de bambou sectionnée.
 - Modèle de répartition uniforme des unités indiqué par des cadres en PVC et nylon de 10x10 m
 - Patches de transplantation de 10x10 m avec des transplants à 0,5 m d'intervalle. Total : 252 patches.



Suivi

Suivi annuel sur 15 ans.

- Échantillonnage par sélection aléatoire de points le long d'un transect avec quadrat de 1,25 m.
- Prélèvement de la biomasse aérienne, calcul de la densité de plants et de l'indice de surface foliaire.



Performances et effets induits

Taux de survie des transplants après 1 an :

- En zone subtidale :
 - 75 à 95% de survie sur 3/5 des sites transplantés une année et de 98 à 99% sur 4/5 des sites transplantés l'année suivante.
 - Densité de plants en zone transplantée parfois supérieure à celle de l'herbier témoin.
 - La bioturbation est le facteur principal de la mortalité des transplants.
- En zone intertidale : survie très faible en raison de gelées et de l'impact des vagues

Davis, R. C., & Short, F. T. (1997). Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: the horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59(1-2), 1-15

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation par la méthode du rhizome horizontal	<p>En zone subtidale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 75 à 95% de survie sur 3/5 des sites transplantés une année et de 98 à 99% sur 4/5 des sites transplantés l'année suivante. - Densité de plants en zone transplantée parfois supérieure à celle de l'herbier témoin. 	Pas de données.	<p>Action bioturbatrice trop importante.</p> <p>Conditions hydrodynamiques trop fortes en zone intertidale (action des vagues notamment).</p> <p>Gelées sur les zones intertidales.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Bonnes performances de la méthode 1 an après transplantation. o Méthode simple, accessible sur le plan technique et nécessitant peu de moyens. o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée et quasiment nulle sur le site à restaurer du fait de l'intervention en plongée. Cette méthode réduit de 80% le nombre de plants à prélever par rapport à la méthode de transplantation de plants d'herbier avec rhizome (Davis&Short, 1997)⁷⁵. De même, le prélèvement à la main limite les impacts par rapport à un prélèvement à la pelle (Davis&Short, 1997). o Méthode à privilégier dans des zones peu exposées à l'action des vagues, les unités transplantées étant vulnérables au déracinement dans les zones plus exposées (zones de déferlement par exemple). 		

3.4.5.4 Transplantation par ancrage du plant sur une coquille d'huître

⁷⁵ Davis, R. C., & Short, F. T. (1997). Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: the horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59(1-2), 1-15

TRANSPLANTATION PAR ANCRAGE DU PLANT SUR UNE COQUILLE D'HUITRE



Contexte

- Baies de la côte Sud de la péninsule coréenne
- *Zostera marina*
- Herbier détruit par la construction d'une route côtière.



Conditions environnementales

- Baies de la côte Sud de la péninsule coréenne



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Période** : sur 4 périodes différentes ; novembre, décembre, janvier et février.
- **Collecte** de plants adultes végétatifs sur un site situé à proximité des sites à restaurer. Collecte à la main de plants présentant 5 à 7 rhizomes.
- **Traitement**:
 - Stockage des plants dans des cuves avant transplantation dans les 24h.
 - Insertion des tiges du plant dans une coquille d'huitre de masse supérieure à 10 g et préalablement percée de 2 trous de 5-7 mm (adapté selon la tige à insérer).
 - Transfert de la cuve de stockage sur un bateau pour largage.
- **Transplantation** :
 - Largage des unités depuis le bateau pour atteindre une densité d'environ 80 plants/m².
 - Transplantation de 4 plots de 1 m² à chacune des 4 périodes.



Suivi

- Suivi après 4, 7 et 13 mois** des transplants de décembre :
- Mesure de la longueur et largeur des feuilles.
 - Densité des plants et taux de survie par comptage des plants dans les plots de 1 m².



Performances et effets induits

- **A court terme** :
 - Baisse de la densité des tiges durant les 2 -3 premiers mois du au choc de la transplantation, aux tempêtes, à l'exposition aux vagues, la bioturbation, la prédation et aux activités anthropiques.
 - Installation et croissance horizontale des tiges survivantes (survie > 75%) au bout de 2,5 à 3,5 mois.
 - Taille et productivité des plants 7 mois après transplantation similaires au témoin.
- **2 ans après transplantation**:
 - La densité de plants a augmenté de +150% par propagation végétative, atteignant des niveaux similaires à ceux de l'herbier autrefois existant.



Unité transplantée : 2 plants d'herbier fixés sur une coquille d'huitre



Unité de transplantation larguée et déposée sur le sédiment

Lee, K. S., & Park, J. I. (2008). An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 1015-1021

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation par ancrage du plant sur une coquille d'huitre	<p>A court terme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Baisse de la densité des tiges durant les 2 -3 premiers mois du au choc de la transplantation, aux tempêtes, à l'exposition aux vagues, la bioturbation, la prédation et aux activités anthropiques. - Installation et croissance horizontale des tiges survivantes (survie > 75%) au bout de 2,5 à 3,5 mois. - Taille et productivité des plants 7 mois après transplantation similaires au témoin. <p>2 ans après transplantation:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La densité de plants a augmenté de +150% par propagation végétative, atteignant des niveaux similaires à ceux de l'herbier autrefois existant. 	Réduction maximale des pressions de tout ordre sur l'herbier afin de limiter le choc de transplantation.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Bonnes performances de la méthode sur le long terme, une fois le choc de la transplantation passé et l'herbier installé. La survie au choc de transplantation conditionne cependant la survie à long terme d'où l'importance de réduire les pressions qui s'exercent sur l'herbier (qualité et clarté des eaux, remaniement des sédiments, hydrodynamisme...). o Méthode simple, accessible sur le plan technique et nécessitant peu de moyens. Forte économie en temps et en moyens par la méthode de largage ne nécessitant pas de plongeurs. Réduction des coûts de transplantation de 50 à 70% (Lee, 2008). o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée car prélèvement des plants à la main et nulle sur le site à restaurer. o Méthode à privilégier dans des zones peu exposées aux courants et vagues afin de ne pas emporter les unités {transplants+huitre}. 		

3.4.5.5 Transplantation de plants fixés sur une pierre allongée

TRANSPLANTATION DE PLANTS FIXES SUR UNE PIERRE ALLONGEE



Contexte

- Chine, Huiquan Bay, Qingdao
- *Zostera marina*
- Régression de l'herbier induite par les activités anthropiques et une détérioration de la qualité des eaux. Amélioration de la qualité des eaux par des mesures de gestion.



Conditions environnementales

- Site présentant autrefois un herbier en zone subtidale et intertidale, actuellement réduit à la zone subtidale.
- Baie ouverte sur un golfe sous l'influence d'une marée semidiurne.
- Sol sableux



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Période :** sur 2 périodes différentes ; début novembre et fin mai.
- **Collecte** de plants avec rhizomes aux racines de 1 à 2 cm. Plants prélevés dans l'eau car arrachés la veille lors d'une tempête (transplants de novembre) ; ou prélevés à la main avec déracinement de 3 à 5 cm de rhizome avant sectionnement (transplants de mai).
- **Traitement:**
 - Constitution de l'unité de transplantation par fixation de 3 plants sur une pierre allongée de 50 à 150 g avec un cordon biodégradable.
- **Transplantation :**
 - Enfouissement des unités dans des trous préalablement creusés à la pelle entre 2 et 4 cm de profondeur.
 - Ou dépôt des unités à la surface des sédiments à marée basse.



Suivi

- **Suivi mensuel les 3 premiers mois :**
 - Calcul du taux de survie par comptage
- **Suivi trimestriel** par observation par comparaison entre l'herbier donneur et la zone transplantée :
 - Traits morphologiques
 - Densité de plant dans un quadrat de 30x30 cm sur 5 – 6 répliques choisis aléatoirement.
 - Biomasse foliaire
 - Taille des particules de sédiments.



Performances et effets induits

- **3 mois après transplantation**
 - Survie de plus de 95% des plants sur les sites transplantés en novembre et en mai.
- **2 à 3 ans après transplantation :**
 - Plus de différences entre l'herbier donneur et l'herbier restauré en termes de densité de plants, de longueur des feuilles et de biomasse aérienne.

Zhou, Y., Liu, P., Liu, B., Liu, X., Zhang, X., Wang, F., & Yang, H. (2014). Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique. *PloS one*, 9(4), e92982.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de plants fixés sur une pierre allongée	<p>3 mois après transplantation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Survie de plus de 95% des plants sur les sites transplantés en novembre et en mai. <p>2 à 3 ans après transplantation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plus de différences entre l'herbier donneur et l'herbier restauré en termes de densité de plants, de longueur des feuilles et de biomasse aérienne. 	Pas de données.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Bonnes performances de la méthode à court et long terme dans le cas présent. Ces bonnes performances peuvent être liées à des conditions environnementales propices à la restauration de l'herbier (hydrodynamisme, peu de perturbations anthropiques, bonne qualité des eaux...) et pourraient être réduites en cas de contexte moins favorable. o Méthode simple, accessible sur le plan technique et nécessitant peu de moyens. Forte économie en temps (Zhou, 2014) et en moyens par la méthode de largage ne nécessitant pas de plongeurs. o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée car prélèvement des plants à la main. L'impact est nul sur le site à restaurer par la méthode du largage, limité si enfouissement des unités. o Cette méthode confère aux transplants une meilleure résistance à la contrainte hydrodynamique (Zhou, 2014) et permet ainsi une installation plus rapide du transplant qui est mieux maintenu à la surface des sédiments ou enfoui. 		

3.4.5.6 Transplantation de plants cultivés en nurserie

TRANSPLANTATION DE PLANTS CULTIVÉS EN NURSERIE



Contexte

- USA, Chesapeake Bay, Potomac River
- *Zostera marina*
- Projet de compensation suite à la destruction d'une zone d'herbier par les travaux de construction d'un pont sur un subestuaire du fleuve de Potomac.



Conditions environnementales

- Taux de croissance les plus élevés à l'automne et au printemps, mortalité accrue en été par l'augmentation de la température des eaux.
- Reproduction sexuée au printemps, maturité des graines fin mai/début juin et germination à partir de fin septembre, mais principalement entre décembre et mars.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte** de plants fin mai sur divers herbiers de la baie.
- **Traitement :**
 - Stockage des plants dans des cuves agitées jusqu'à libération des graines (fin juin/début juillet).
 - Vernalisation des graines pendant 1 à 4 semaines à 3-4°C
 - Graines semées dans 457 bacs remplis de sédiments prélevés sur le site à restaurer (fin juillet). Environ 1000 graines par bacs de dimension 34x24x8 cm, enfouies sous 1 cm de sédiment.
 - Bacs placés dans des cuves, à une température de 13-14°C jusqu'à la germination (mi-août), augmentation ensuite de la température de l'eau de 2°C/semaine.
 - Niveau d'eau ajusté à hauteur des feuilles.
 - Croissance des plants en 16 à 56 jours selon le moment de la germination.
- **Transplantation :**
 - Collecte des plants fin octobre et replantation par la méthode du rhizome horizontal.



Suivi

Pas de données



Performances et effets induits

- Taux de germination dans les bacs d'environ 10%.
- Après 25 jours : environ 91 plantules / bacs.
- Après 90 jours : total de 26 000 plants dont plus de 15 000 plants de taille supérieure à 12,25 cm avec des rhizomes de plus de 2,5 cm.
- NA sur la survie des transplants.

→ L'ajout de matière organique au substrat n'a pas favorisé l'émergence des plants.

→ La fertilisation augmente le taux de croissance latérale.



Installations de culture

Tanner, C. E., & Parham, T. (2010). Growing *Zostera marina* (eelgrass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects. *Restoration Ecology*, 18(4), 527-537

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de plants cultivés en nurserie	Pas de données.	Pas de données.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Performances après transplantation susceptibles d'être proches de celles obtenues par la méthode du rhizome horizontal dans le cas où les conditions du milieu artificiel et du milieu naturel sont suffisamment semblables pour ne pas entraîner un choc de transplantation trop important qui pourrait entraîner la mort des transplants. ○ Méthode couteuse en temps, moyens et main d'œuvre (nettoyage des cuves, électricité pour l'éclairage et le pompage sur une longue durée...) et nécessitant les infrastructures adéquates pour la culture des herbiers (Tanner, 2010). ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est nulle et limitée sur le site à restaurer. ○ Méthode de transplantation qui permet la plus grande diversité génétique des transplants compte-tenu d'une culture à partir de graines et non de la restauration d'un champ par croissance végétative à partir de quelques plants comme c'est le cas dans les autres méthodes de transplantation. Compte-tenu des moyens et des couts qu'impliquent cette méthode et de performances de réussite restant non garanties et dépendantes des conditions du site à restaurer, celle-ci n'apparaît pas comme prioritaire pour un programme de restauration. 		

3.4.5.7 Transplantation de plants avec rhizome dans des structures 3D

TRANSPLANTATION DE PLANTS AVEC RHIZOME DANS DES STRUCTURES 3D



Contexte

- Suède
- *Zostera marina*
- Etude expérimentale



Conditions environnementales

- Site présentant autrefois de l'herbier.
- Site relativement exposé et sédiments mobiles.

Coûts :
Pas de données



Protocole

- **Collecte** de plants avec rhizomes à la main, sur un site donneur à proximité.
- **Transplantation :**
 - Installation des structures 3D constituées en un matériau biodégradable dérivé de l'amidon de pomme de terre. Structures de 6 cm de hauteur et de 91 cm de côté constituant un réseau 3D.
 - Structures positionnées en surface ou enfouies sous la surface du sédiment.
 - Plantation de 3 plants avec rhizome au centre de la structure dans un trou de 10 cm de diamètre.



Suivi

Sur 22 mois :

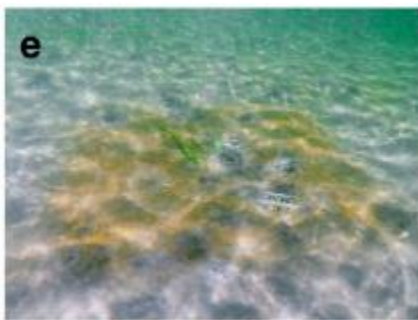
- Taux de survie des transplants
- Expansion latérale
- Nombre de plants
- Mouvement sédimentaire (sur 1 mois seulement).



Performances et effets induits

Après 22 mois :

- Croissance aérienne et souterraine accrue.
- Survie basse à nulle dans les zones contrôles non protégées.
- Survie maximale des herbiers transplantés dans les structures enfouies par rapport aux structures en surface (100% VS 75%), survie supérieure aux herbiers non protégés (20%).
- Densité de brins : 30,1 feuilles sur les structures enfouies VS 6,5 sur structures en surface.
- Densité de plants fois 2 sur structure enfouie.
- Expansion sous-terrain : 30 cm pour structure enfouie VS 5 cm sur structure en surface.
- Mouvement sédimentaire : réduit de 37% par rapport au témoin avec structure en surface, et de 77% avec structure enfouie.



(e) Structure 3D enfouie sous la surface du sédiment

(f) Structure 3D disposée à la surface du sédiment

Temmink, R. J., Christianen, M. J., Fivash, G. S., Angelini, C., Boström, C., Didden, K., ... & Govers, L. L. (2020). Mimicry of emergent traits amplifies coastal restoration success. *Nature communications*, 11(1), 1-9.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de plants avec rhizome dans des structures 3D	<p>Après 22 mois :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Croissance aérienne et souterraine accrue. - Survie basse à nulle dans les zones contrôles non protégées. - Survie maximale des herbiers transplantés dans les structures enfouies par rapport aux structures en surface (100% vs 75%) et supérieure aux herbiers non protégés (20%). - Densité de brins : 30,1 feuilles sur les structures enfouies vs 6,5 sur structures en surface. - Densité de plants 2 fois supérieure sur structure enfouie par rapport aux structures en surface. - Expansion sous-terrain : 30 cm pour structure enfouie vs 5 cm sur structure en surface. - Mouvement sédimentaire : réduit de 37% par rapport au témoin avec structure en surface, et de 77% avec structure enfouie. 	Pas de données.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Bonnes performances à long terme de la méthode dans le cas présent. Survie et croissance favorisées par différents mécanismes : la structure 3D protège les transplants des contraintes hydrodynamiques trop fortes et stabilise les sédiments rendant l'eau plus claire et limitant les phénomènes érosifs qui pourraient déchausser les plants. La structure mime les traits essentiels d'un herbier dense (hydrodynamisme et réseau racinaire en particulier) permettant le retour spontané de l'herbier (Temmink, 2020). o Méthode simple, accessible sur le plan technique, impliquant cependant l'acquisition et l'installation des structures 3D mais pas leur retrait puisque les structures sont biodégradables dans le milieu. o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée et faible sur le site à restaurer de par l'installation des structures. o Cette méthode confère aux transplants une meilleure résistance à la contrainte hydrodynamique et limite les phénomènes érosifs. Cette méthode peut être envisagée sur des sites plus exposés aux vagues et aux courants compte tenu du maintien et de la protection des plants par les structures 3D. 		

3.4.5.8 Transplantation de mottes d'herbier prélevées manuellement



Contexte

- Espagne, Estuaire du Butroe
- *Zostera noltei*
- Programme de recherche visant à l'identification des facteurs influençant la restauration de *Zostera noltei*.
- Régression historique des herbiers due aux pressions anthropiques et reprise limitée par un apport insuffisant en graines.
- Nette amélioration de la qualité des eaux permettant une action efficace.



Conditions environnementales

- Sites classés comme estuaires avec grands marais intertidaux.
- Sélection de la zone à restaurer par évaluation de l'adéquation de l'habitat selon la topographie, la sédimentologie et l'hydrodynamisme par modélisation (Generalized Additive Model).
- Site receveur choisi sur des critères de qualité des eaux et de similarité des conditions physiques et environnementales avec le site donneur.



Protocole

- **Période** : Transplantation effectuée au début du printemps (mars).
- **Collecte** manuelle de 8 mottes de 40x30 cm et de 15 cm d'épaisseur. Mottes prélevées à marée basse avec tiges, rhizomes, racines et sédiments associés.
- **Traitement** :
 - Transfert des mottes dans des boîtes en bois (environ 1000 cm²) recouvertes d'un linge humide.
 - Stockage dans une zone protégée du marais jusqu'à transplantation le jour suivant.
 - Transplantation à marée basse dans des trous préalablement creusés de 10-15 cm de profondeur.

Etude de l'influence du type de sédiment :

- 4 unités plantées en zone sableuse, 4 en zone vaseuse.

Coûts :
Pas de données



Suivi

- **Suivi sur 15 mois** du site receveur.
- **Suivi mensuel** de la densité de plants :
 - Comptage des plants survivants dans la zone de l'herbier la plus dense dans un quadrat de 10x10 cm
 - Photographie pour analyse image)
 - Mesure de la croissance horizontale par comparaison de photos.
- Suivi du site donneur sur 3 ans avec photographie aérienne mensuelle.



Performances et effets induits

Dynamique naturelle des herbiers retrouvée.

En milieu sableux :

- Croissance souterraine et rétablissement de l'herbier plus rapide.
- Après 9 mois : densité de tiges plus importantes en milieu sableux que vaseux et expansion 2 fois plus importante.
- Problématique d'enfouissement des mottes.
- Après 15 mois : perte des 4 mottes lors d'une crue importante du fleuve.

En milieu vaseux :

- Croissance souterraine plus lente.
- Après 5,5 ans : une motte transplantée en milieu vaseux présente un accroissement de sa surface de 200%.

En un an, plus de traces sur les herbiers donneurs où les trous ont été rebouchés.

→ Impact minimal sur racines et rhizomes permettant une reprise rapide de l'herbier après transplantation.

Valle, M., Garmendia, J. M., Chust, G., Franco, J., & Borja, Á. (2015). Increasing the chance of a successful restoration of *Zostera noltii* meadows. *Aquatic Botany*, 127, 12-19.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de mottes prélevées manuellement	<p>En milieu sableux :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Meilleure croissance initiale ○ 0% de survie après 15 mois suite à une crue importante du fleuve <p>En milieu vaseux :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Croissance plus faible ○ Après 5,5 ans, ¼ motte survivante dont la surface s'est étendue de 200%. 	<p>Le faible remaniement des sédiments.</p> <p>Les sédiments vaseux sont plus stables sur le long terme.</p>	<p>Conditions hydrodynamiques trop exposées.</p> <p>Les sédiments sableux, vulnérables à l'érosion, remis en suspension, et venant enfouir les mottes.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Faible performance globale de la méthode. ○ Méthode accessible sur le plan technique, nécessitant peu de moyens. ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est limitée et rapidement effacée (Orth, 2006⁷⁶ ; Valle, 2015). L'impact sur le site à restaurer existe mais reste limité du fait d'une intervention à pied sur le site. ○ Les mottes sont susceptibles d'être enfouies ou érodées dans des conditions d'hydrodynamisme trop élevées et/ou dans des sédiments sableux plus vulnérables à l'érosion (Valle, 2015) : cette méthode est à privilégier dans des environnements peu exposés. En zone plus exposée, des mottes plus larges peuvent limiter le risque d'érosion mais cela implique l'emploi de moyens plus conséquents pour le déplacement des mottes. 		

3.4.5.9 Transplantation de mottes d'herbier excavées

⁷⁶ Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays. In Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both. March 11, 2003. Sarasota, Florida (pp. 1-17).

TRANSPLANTATION DE MOTTES D'HERBIER EXCAVEES



Contexte

- Pays-Bas, Estuaire de l'Escaut
- *Zostera noltei*
- Mesure de compensation après travaux de renforcement d'une digue

Coûts :
85 €/m² d'herbier
transplanté



Conditions environnementales

- Sélection de zones présentant des herbiers dans le passé et aux conditions environnementales les plus propices.
- Temps d'émergence: 47% à 69% du temps.
- % de vase (<63 µm) : 0,01 à 14,3%
- Contrainte de cisaillement au fond (Pa): 0,37 à 1,69.
- Sites protégés à exposés selon les emplacements.
- Sites peu exposés au tourisme, aux activités de dragage et de construction.



Protocole

- **Période** : début juin, au début de la période de croissance.
- Rq: une opération de transplantation en mars pour laquelle l'ensemble des transplants n'ont pas survécu.
- **Collecte** : 236 mottes de 1,5x0,75x 0,1 m (Lxlxe) prélevées à l'excavateur.
 - **Transfert** dans des boîtes en bois sur mesure.
 - **Transplantation** :
 - Par excavateur dans les 24h.
 - Selon 3 modes de répartition des mottes, et avec/sans ajout d'une couche de débris coquilliers.
 - Petit patch: 5 mottes
 - Grand patch: 9 mottes
 - Patch compact: 8 mottes
 - Espacement de 5 m minimum entre les patches
 - Ajout d'une couche de 10 cm de débris coquilliers entre les mottes et le sédiment sur la moitié des patches afin d'exclure les bioturbateurs.



Suivi

- **Suivi sur 2 à 5 ans** selon les années de transplantation des patches.
- **Suivi bisannuel** en début et au pic de la période de croissance (début juin et fin août) :
 - Des caractéristiques des plants: nombre de tiges et % de recouvrement
 - Du nombre de plants par plot
 - De la composition des sédiments, la salinité, la teneur nutriments, la concentration en sulfure, couverture en macroalgues, broutage.
 - De l'abondance en vers (comptage des rejets fécaux).



Performances et effets induits

- **Survie initiale** des transplants : 100% et +256% en nombre de plants la première saison.
- **Sur le long terme**: 43% de survie sur l'ensemble des mottes, déclin progressif du nombre de plants.

→ Survie des transplants non corrélée aux facteurs environnementaux (hydrodynamisme, luminosité, sédiments): caractère imprévisible de la restauration de l'herbier.

→ Impact positif des débris coquilliers sur la survie long terme des transplants.

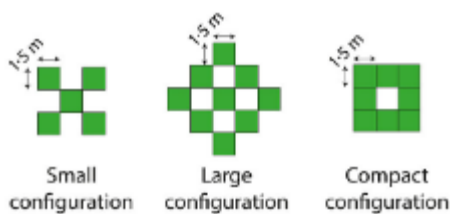
→ Pas d'influence du type de sol, de la configuration d'implantation des mottes et de la densité initiale de tiges.



(c) Prélèvement mécanique des mottes à l'excavateur dans des boxes spécialement conçues



(d) Dépôt des mottes sur le site



Configuration des mottes au sein des patches de transplantation

Suykerbuyk, W., Govers, L. L., Bouma, T. J., Giesen, W. B., de Jong, D. J., van de Voort, R., ... & van Katwijk, M. M. (2016). Unpredictability in seagrass restoration: analysing the role of positive feedback and environmental stress on *Zostera noltii* transplants. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 774-784.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Transplantation de mottes d'herbier prélevées par excavateur	<p>Survie initiale : 100% et +256% en nombre de tiges la première saison.</p> <p>Sur le long terme: 43% de survie sur l'ensemble des mottes, déclin progressif du nombre de tiges.</p>	<p>Impact positif des débris coquillers sur la survie long terme des transplants.</p> <p>Pas d'influence du type de sol, de la configuration d'implantation des mottes et de la densité initiale de tiges.</p> <p>La largeur de la motte permet la réalisation des processus intrinsèques bénéfiques à la croissance de l'herbier (hydrodynamisme, clarté des eaux...)</p>	<p>Survie des transplants non corrélée aux facteurs environnementaux (hydrodynamisme, luminosité, sédiments).</p> <p>Caractère imprévisible de la restauration de l'herbier.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Performance globale moyenne sur le long terme. ○ Méthode nécessitant d'importants moyens techniques (engins de chantier) et impliquant le déplacement d'un gros volume de matière (sédiment des mottes) (Suykerbuyk. 2012). ○ Les mottes larges limitent l'atteinte et la perturbation des racines en faveur d'une reprise rapide de l'herbier. Elles sont également peu vulnérables au déracinement dans des conditions plus exposées et constituent un socle d'ancrage solide pour les herbiers. (Suykerbuyk, 2012). ○ Atteinte sur les milieux donneur et receveur importante du fait de l'utilisation d'engins de chantier. 		

3.4.5.10 Ensemencement à la volée

ENSEMENCEMENT A LA VOLEE



Contexte

- USA, Chesapeake Bay, York River
- *Zostera marina*
- Fort déclin des herbiers dans la baie. Action expérimentale menée dans le cadre d'une stratégie globale de restauration des herbiers après une amélioration de la qualité des eaux dans la baie.



Conditions environnementales

- Sites présentant des herbiers par le passé.
- Sites ayant supporté des essais de transplantation par le passé mais dont les taux de réussite sur le long terme sont faibles.
- Obtention des vitesses de courant par modélisation : courant de marée de 20 cm/s maximum.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines :**
 - Fin mai/début juin, récolte de tiges matures juste avant la libération des graines dans un herbier situé à l'embouchure du fleuve.
 - Transport dans des sacs en maille en nylon et stockage dans des cuves remplies d'eau du fleuve et agitées d'un courant d'eau.
 - Après libération des graines, séparation de celles-ci des tiges et feuilles.
- **Dispersion des graines :**
 - En septembre (opération réalisée sur 3 sites sur 3 années différentes).
 - Dispersion à la main d'une mixture avec graines et matériau détritique à marée basse.
 - Dans des zones circulaires de 5 m de diamètre sur sédiment sableux avec une profondeur d'eau de 0,5 à 1 m à basse mer.
 - Etude de l'influence de la densité de graines par zones de 5 m de diamètre (20 000, 30 000 et 40 000 graines).



Suivi

- **Suivi au printemps (suivant ?) :**
 - Abondance en jeunes plants par comptage avec quadrat de 0,25 m².



Performances et effets induits

- **Sur les 3 sites :**
 - 80% des graines restent dans la zone circulaire malgré le vent >40 km/h.
 - Taux de germination de 3,8 à 39,8% selon les sites et les années d'essai.
 - Faible distance de dispersion des graines, elles sont rapidement piégées dans la microtopographie du fond et s'y intègre rapidement.
 - Seuil critique d'érosion des graines : 0,7 cm/s.
 - Compte-tenu du faible nombre de plants observés relativement à la densité de graines, le transport des graines à l'échelle de la baie est aussi une hypothèse.

Orth, R. J., Luckenbach, M., & Moore, K. A. (1994). Seed dispersal in a marine macrophyte: implications for colonization and restoration. *Ecology*, 75(7), 1927-1939

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement à la volée	<p>Au printemps suivant l'ensemencement réalisé en septembre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 80% des graines restent dans la zone circulaire malgré le vent >40 km/h. - Taux de germination de 3,8 à 39,8% selon les sites et les années d'essai. - Faible distance de dispersion des graines, elles sont rapidement piégées dans la microtopographie du fond et s'y intègre rapidement (ou inversement les graines sont transportées loin d'où le faible nombre de plants observés). - Seuil critique d'érosion des graines : 0,7 cm/s. 	<p>Contrainte de cisaillement au fond < 0,7 cm/sec pour limiter la remise en suspension des graines bien que dans le cas présent, les graines n'aient pas été érodées malgré une contrainte de 1, cm/sec (en zone colonisée, les graines seraient bien moins susceptibles d'être érodées)</p> <p>Pris en compte des modèles hydrographiques régionaux.</p>	<p>Une forte turbidité des eaux en été.</p> <p>Prédation par des crustacés, mollusques et poissons.</p> <p>Conditions environnementales globales non favorables au rétablissement de l'herbier (turbidité, nutriments).</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Performances globales de la méthode difficiles à évaluer : les taux de germination sont moyens à très faibles localement et la survie à long terme n'est pas suivie ici. Cependant, par l'hypothèse de l'export de graines, cette méthode peut conduire à la réimplantation et au développement de l'herbier par le transport et l'apport de graines dans des zones favorables à plus grande échelle. o Méthode simple, accessible sur le plan technique, nécessitant cependant les installations pour le stockage des tiges et la libération des graines (cuves et agitation). o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur et à restaurer est faible. o L'adaptabilité de la méthode à des conditions d'exposition plus ou moins fortes est discutable sur la base des résultats disponibles. Les deux hypothèses suivantes sont posées : (1) Les graines semblent s'ancrer et s'intégrer rapidement dans le sédiment et être peut sensibles aux courants de fond du fait de la microtopographie de surface (2) Il existe un transport des graines à grande échelle (jusqu'à plusieurs dizaines de km) et les graines sont susceptibles de s'implanter dans des environnements aux conditions environnementales favorables. Des expérimentations supplémentaires sont nécessaires pour quantifier la proportion de graines transportées localement et à grande échelle. 		

3.4.5.11 Ensemencement mécanique

ENSEMENCEMENT MECANIQUE



Contexte

- USA, Chesapeake Bay, York River, Piankatank River, Spider Crab River
- *Zostera marina*
- Fort déclin des herbiers dans la baie. Action menée dans le cadre d'une stratégie globale de restauration des herbiers après une amélioration de la qualité des eaux dans la baie.



Conditions environnementales

- Sites présentant des herbiers par le passé.
- Sédiments sableux à faible teneur en matière organique.
- Profondeur de 0,5 à 1 m à marée basse.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines :**
 - Fin mai/début juin, récolte de tiges matures juste avant la libération des graines dans un herbier situé à l'embouchure du fleuve.
 - Transport dans des sacs en maille en nylon et stockage dans des cuves remplies d'eau du fleuve et agitées d'un courant d'eau.
 - Après libération des graines, séparation de celles-ci des tiges et feuilles.
- **Dispersion des graines :**
 - En septembre avant la phase de germination des graines.
 - Préparation d'une matrice gélatineuse dans laquelle les graines sont incorporées.
 - Planteur mécanique chargé sur un bateau, il consiste en un type de traineau qui crée deux sillons en arrière du bateau et d'un système de pompe permettant d'injecter la solution gélatineuse dans les sillons.
 - Enfouissement des graines dans 1 à 2 cm de sédiments à une densité de 300 graines/m².
 - Sur chaque site, plantation de 18 transects à 10 m d'intervalle, de 1 m de largeur et de 10 m de long.



Suivi

- **Suivi au printemps (suivant ?):**
 - Comptage des jeunes plants en plongée avec des quadrats de 4 m² divisés en 16 cellules de 0,25 m².
 - Comptage sur le transect de 10 m, sur 2 m de largeur et sur 2 m supplémentaires à chaque extrémité.
 - Si fusion des plants, déracinement pour réaliser un comptage exact.



Performances et effets induits

- Taux maximum d'établissement de jeunes plants entre 5 et 10 %, variable selon les sites.
- Hypothèses pouvant expliquer la variabilité: les caractéristiques des sédiments et les régimes hydrodynamiques (moins de réussite dans les sites les plus sableux, avec peu de structures biogéniques et plus exposés à des conditions hydrodynamiques fortes.)

→ Globalement faible taux d'établissement des graines.

Orth, R. J., Marion, S. R., Granger, S., & Traber, M. (2009). Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds. *Aquatic Botany*, 90(2), 204-208.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Taux maximum d'établissement de jeunes plants entre 5 et 10 %, variable selon les sites. - Hypothèses pouvant expliquer la variabilité: les caractéristiques des sédiments et les régimes hydrodynamiques. <p>→ Globalement faible taux d'établissement des graines.</p>	Sédiment cohésif, conditions de houle faibles, structure biogénique riche (terriers, palourdes, galeries...)	Fort hydrodynamisme. Moins de réussite dans les sites les plus sableux, avec peu de structures biogéniques et plus exposés à des conditions hydrodynamiques fortes
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Faibles performances de la méthode. ○ Méthode nécessitant des moyens techniques et un investissement plus important par rapport à l'ensemencement à la volée (bateau, injecteur mécanique, préparation de la solution gélatineuse...). De même, la préparation de la solution gélatineuse et la quantité de solvant nécessaire représenteraient un cout élevé dans le cas d'une application de la méthode à grande échelle. La solution nécessite également d'être conservée au frais jusqu'à l'injection, ceci rendant les opérations plus contraignantes (Orth, 2009). ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur et à restaurer est faible voire nul compte tenu d'une intervention par bateau. ○ La méthode est à éviter dans des environnements exposés et dont les sédiments sont peu cohésifs, la remise en suspension des graines ayant été observée dans cette étude. 		

3.4.5.12 Ensemencement par un système de bouées

ENSEMENCEMENT PAR UN SYSTEME DE BOUEES



Contexte

- USA, New York, Sag Harbor Cove
- *Zostera marina*
- Perte de 83% des herbiers depuis 1930, puis bloom algal dans les années 1993-4, soit 10 ans avant l'opération. Action expérimentale.



Conditions environnementales

- Sites présentant des herbiers par le passé.
- Salinité de 38.
- Marnage de 0,75 m.
- Sol sableux (95%) avec présence de matière organique et d'argile.
- Profondeur de 1,3 m à marée basse.



Protocole

- **Positionnement des bouées :** les systèmes {lest+bouées} sont placés sur site par bateau, au préalable, en 3 rangs de 5 bouées espacées de 4,5 m. Le système est constitué d'un parpaing en béton (34,9x19x8,9 cm) servant de lest relié à une bouée à homard avec une ligne flottante en polypropylène de 3,3 m. La longueur de la ligne est adaptable à la hauteur d'eau du site.
- **Collecte de graines :**
 - Début juin, collecte de tiges matures sur la deuxième semaine de libération des graines (repéré par plongée) dans l'estuaire en amont du site à restaurer.
 - Stockage dans des filets en mailles perlées (9 mm – taille identifiée comme maximisant la libération des graines tout en évitant la chute de la tige entière).
- **Dispersion des graines :**
 - Fixation des secs sur les systèmes {lest + bouées} déployés sur le site à restaurer.

Coûts :
Pas de données



Suivi

- **Suivi hebdomadaire des bouées.**
- **Recrutement des graines après 1 an :**
 - Comptage en plongée des plants dans un périmètre de 3 m².
 - Observation des jeunes plants à proximité du périmètre



Performances et effets induits

- Libération des graines dans les 3 semaines après la mise en sacs des tiges.
 - Recrutement calculé : 6,9% relativement à l'abondance des graines estimées dans les filets.
 - Chute des graines quasiment à la verticale.
- Pas de déplacement des systèmes {lest+bouée+sac}
→ Pas de contacts de la ligne avec le sol



Photographie et schéma du système de bouées

Pickerell, Christopher H., Stephen Schott, and Sandy Wyllie-Echeverria. "Buoy-deployed seeding: demonstration of a new eelgrass (Zostera marina L.) planting method." Ecological Engineering 25.2 (2005): 127-136.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement par un système de bouées	<ul style="list-style-type: none"> - Libération des graines dans les 3 semaines après la mise en sacs des tiges. - Recrutement calculé : 6,9% relativement à l'abondance des graines estimées dans les filets. - Chute des graines quasiment à la verticale. <p>→ Pas de déplacement des systèmes {lest+bouée+sac}</p> <p>→ Pas de contacts de la ligne avec le sol</p>	Pas de données.	Pas de données.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Faible taux de recrutement. ○ Méthode nécessitant peu de moyens techniques et simple à réaliser. La nature des dispositifs et leur mise en œuvre permettent d'envisager des actions à plus large échelle ainsi que dans une diversité de sites (répartition des systèmes adaptable au site, ajustement de la longueur de la ligne selon la hauteur d'eau...). Cette méthode ne nécessite pas d'installation de stockage des tiges ce qui permet d'en réduire les coûts en moyens et en main d'œuvre (Pickerell, 2005). ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur et à restaurer est faible compte tenu d'une intervention par bateau pour déposer les systèmes. Par ailleurs, cette méthode permet une libération des graines selon une dynamique naturelle (Pickerell, 2005). ○ L'étude ne discute pas de l'adaptabilité de la méthode selon les conditions hydrodynamiques. Le point clé de la méthode repose sur le bon ancrage des systèmes : le déplacement des lests pourrait détruire et/ou déraciner des jeunes plants. L'hydrodynamisme de la zone ne doit donc pas risquer de déplacer les lests, la masse est donc à sélectionner en fonction de l'hydrodynamisme local. 		

3.4.5.13 Ensemencement avec des sacs en toile de jute

ENSEMENCEMENT AVEC DES SACS EN TOILE DE JUTE



Contexte

- USA, Chesapeake Bay, York River et Piankatank River
- *Zostera marina*
- Large déclin des herbiers dans la baie. Action menée dans le cadre d'une stratégie globale de restauration des herbiers après une amélioration de la qualité des eaux dans la baie.



Conditions environnementales

- Sites présentant des herbiers par le passé.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines :**
 - Fin mai, collecte de tiges matures dans l'estuaire en aval des sites à restaurer.
 - Stockage de la partie aérienne uniquement dans des cuves en extérieur animées d'un courant d'eau et agitées à la main jusqu'à la libération des graines (jusqu'à 6 semaines après récolte).
 - Transfert de 10 graines identifiées comme viables (1x3 mm) dans chaque sac en toile de jute de maille de 1 mm et fermeture avec des agrafes.
- **Dispersion des graines :**
 - A la mi-octobre, enfouissement des sacs à 2-3 cm dans le sédiment sur site de profondeur de 0,5 à 1 m sous le niveau moyen des eaux. Ancrage des sacs avec un fil métallique.
 - Constitution de 2 répliques sur chaque site (6), constitués avec 25 sacs dans un carré de 5x5 m.
 - Comparaison avec le taux de germination de graines non contenues dans un sac.



Suivi

- **Suivi 6 mois après placement des sacs :**
 - Echantillonnage de 10 sacs dans chacun des 6 sites en avril/mai de l'année suivante
 - Etude du taux de germination
 - Etude de l'emplacement de la germination (nœud de croissance situé dans le sac ou à l'extérieur).
- **Sur les traitements sans sac :**
 - Echantillonnage de carottes de 15 cm de diamètre et de 15 cm d'épaisseur.



Performances et effets induits

- Survie des graines après 6 mois :
 - 100% de rétention des graines dans le sac.
- Survie de jeunes plants:
 - 41 à 56% dans les sacs contre 5-15% pour le traitement hors sac.
- Après 8 mois : échec de l'action par enfouissement trop important des sacs dans le sable.
 - Accroissement significatif du taux de germination par rapport à un traitement sans protection des graines (10-15% en général).
 - Les sacs protègent les graines de l'enfouissement, de leur transport et de la prédation.
 - Les sacs sont susceptibles d'empêcher l'installation des plants par obstacle physique.

Harwell, M. C., & Orth, R. J. (1999). *Eelgrass (Zostera marina L.) seed protection for field experiments and implications for large-scale restoration. Aquatic Botany, 64(1), 51-61.*

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement avec des sacs en toile de jute	<p>Survie des graines après 6 mois :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 100% de rétention des graines dans le sac. <p>Survie de jeunes plants:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 41 à 56% dans les sacs contre 5-15% pour le traitement hors sac. <p>Après 8 mois : échec de l'action par enfouissement trop important des sacs dans le sable.</p> <p>→ Accroissement significatif du taux de germination par rapport à un traitement sans protection des graines (10-15% en général).</p>	<p>Taille des mailles adaptée : meilleur compromis entre la protection des graines et la constitution d'un obstacle physique à leur germination et développement du plant.</p>	<p>Enfouissement des sacs sous une couche de sédiment trop épaisse.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bon taux de recrutement par rapport aux autres méthodes d'ensemencement mais cette action s'est révélée être un échec suite à l'enfouissement des sacs entraînant la mort des plants développés. La méthode présente un potentiel intéressant dont les conditions de réalisation sont à ajuster afin de prévenir ce type de phénomènes. ○ Méthode nécessitant peu de moyens techniques et simple à réaliser. La méthode nécessite cependant un minimum d'installation pour la récolte des graines et leur stockage avant mise en sac et déploiement sur site. ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur et à restaurer est faible compte tenu d'une intervention à pied et peu étendue sur le site. ○ Cette méthode paraît adaptée dans des environnements à l'hydrodynamisme faible à modéré car les sacs sont enfouis et ancrés dans le sédiment ce qui limite leur vulnérabilité à un déplacement. Le paramètre à surveiller concerne les mouvements sédimentaires : en effet, dans ce cas précis, les déplacements sédimentaires ont conduit à l'enfouissement trop profond des sacs. On privilégiera cette méthode aux sites présentant peu de déplacements sédimentaires. 		

3.4.5.14 Ensemencement avec des sacs en toile de jute remplis de sédiments

ENSEMENCEMENT AVEC DES SACS EN TOILE DE JUTE REMP LIS DE SEDIMENTS



Contexte

- Chine, Péninsule de Shadong, Swan Lake
- *Zostera marina*
- Forte régression des herbiers fin 1982 causée par des échanges d'eau avec le lagon devenus insuffisants suite à la fermeture artificielle de l'entrée du lagon pour des activités d'aquaculture.
- Suppression de la partie haute de la digue en 1986 permettant une restauration progressive des différents écosystèmes. Action expérimentale



Conditions environnementales

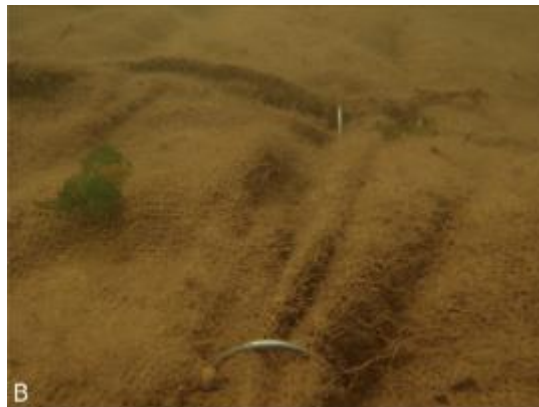
- Lagune intertidale séparée de la mer par un cordon sableux et ouvert par un canal de 130 m de large.
- Profondeur moyenne de 1 m, marnage de 1,15 m.
- Fond de la lagune dominé par du sédiment fin mélangé à de la vase sableuse.
- Température de l'eau suivant la saisonnalité avec un maximum de 25,8 - 26,8 °C en aout et de -1 °C en février.
- Luminosité saisonnière: maximale au printemps et été, minimale à l'automne.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines :**
 - Juillet, collecte de tiges matures à la main dont on retire les racines.
 - Stockage des tiges dans des sacs en nylon (maille < 1mm) conservées submergées sur le site donneur jusqu'à ce que les graines soient libérées (au bout de 5 semaines).
 - Récolte des graines et conservation en laboratoire dans des cuves d'eau oxygénée et à température ambiante.
- **Dispersion des graines :**
 - En octobre : Transfert des graines dans des sacs en toile de jute (de maille de 1 mm) de 120 cm x 90 cm à densité déterminée (200, 300, 400 ou 500 graines par sac).
 - Remplissage des sacs avec 25 à 30 kg d'un mélange de sédiments (25% sable fin / 75% vase et argile) collectés sur la plage à côté du site à restaurer. Fermeture des sacs avec un cordon en coton et mise sur site le lendemain.
 - 4 plots (1 par densité) positionnés sur un transect parallèle au trait de côte (permettant d'avoir une hauteur d'eau constante de 0,5 m en morte-eau) espacés de 10 m, avec 20 sacs répartis sur une grille de 2,4 x 9 m.
 - Sacs de 2 à 3 cm d'épaisseur, ancrés avec des accroches métalliques en U.
 - Décomposition progressive des sacs 1 an après mise dans le milieu, totale après 20 mois.



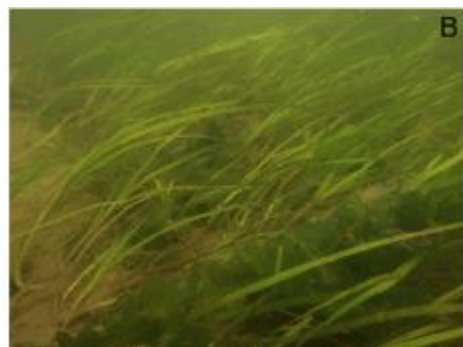
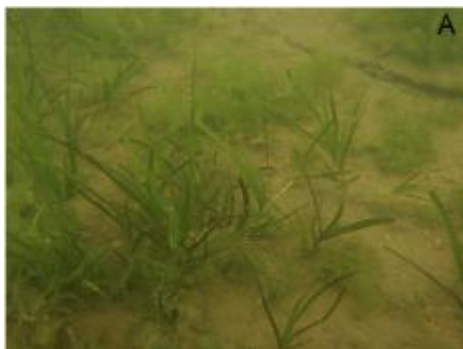
Sacs de jute protecteurs (A) avant déploiement, (B) déployés sur site



Suivi

Suivi sur 3 ans :

- Suivi des paramètres environnementaux (température et luminosité)
- **Suivi au printemps de l'année 1** de la germination et de l'installation des plants : comptage des graines germées et des jeunes plants sur un sac par plot.
- **Suivi de la croissance des plants** entre mai et septembre de l'année 1 sur un sac par plot : calcul de la densité de plants, mesure de la hauteur des plants, de la longueur des tiges, longueur internodule, longueur des racines, diamètre.
- **Suivi de l'établissement de nouveaux patchs d'herbier** aux étés des années 2 et 3 : 5 quadrats de 0,25 m au hasard sur les plots pour comptage et mesures morphologiques.



Croissance des plants à densité de graines de 400 en (A) juin, (B) juillet, (C) août et (D) septembre.



Performances et effets induits

- Taux de germination après 6 mois :
 - de 22% (d=300) à 49% (d=200), taux moyen de 38%.
- Taux d'installation des plants :
 - de 16% (d=300) à 26% (d=400), taux moyen de 21%.

Seule la longueur des racines varie significativement selon les densités : maximale pour d=200.

Après 10 mois: installation complète et développement des plants durablement sur les 3 ans de suivi.

Densité des plants:

- 156-540 plants/m² après 1 an
- 228 -556 après 2 ans
- 204 - 657 après 3 ans.

→ Pas de conclusions significatives sur l'influence de la densité de graines mais d = 400 semble être la densité optimale.

→ Protection effective par les sacs pendant 1,5 à 2 ans (protection contre l'enfouissement des graines, le transport latéral et la prédation : quasiment 100% de rétention des graines).

→ Bénéfice du sédiment sablo-vaseux cohésif et peu vulnérable à l'érosion permettant l'implantation des plants, et mélange favorable à la croissance des herbiers.

→ Effet protecteur du sac > à la gêne du sac sur l'installation des plants.

Taux de réussite > à celui de Harwell et Orth (1999).

Zhang, P. D., Fang, C., Liu, J., Xu, Q., Li, W. T., & Liu, Y. S. (2015). An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: implications for their large-scale restoration. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 89-99.

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement avec des sacs en toile de jute remplis de sédiments	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taux de germination après 6 mois : <ul style="list-style-type: none"> - de 22% (d=300) à 49% (d=200), taux moyen de 38%. ▪ Taux d'installation des plants: <ul style="list-style-type: none"> - de 16% (d=300) à 26% (d=400), taux moyen de 21%. <p>Après 10 mois: installation complète et développement des plants durablement sur les 3 ans de suivi.</p> <p>Densité des plants: 156-540 plants/m² après 1 an ; 228 - 556 après 2 ans ; 204 - 657 après 3 ans.</p>	<p>Bénéfice du sédiment sablo-vaseux cohésif et peu vulnérable à l'érosion permettant l'implantation des plants, et mélange favorable à la croissance des herbiers.</p> <p>→ Pas de conclusions significatives sur l'influence de la densité de graines mais d = 400 semble être la densité optimale.</p> <p>→ Protection effective par les sacs pendant 1,5 à 2 ans (protection contre l'enfouissement des graines, le transport latéral et la prédation : quasiment 100% de rétention des graines).</p>	<p>→ Une gêne du sac supérieure aux bénéfices de protection qu'il apporte sur l'installation des plants.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bonnes performances de la méthode à court et plus long terme (suivi sur 3 ans, relativement rare sur les actions expérimentales de restauration par ensemencement). Performances à long terme supérieures à la méthode précédente sans remplissage des sacs avec du sédiment (Zhang et. al, 2015). ○ Méthode nécessitant peu de moyens techniques. La méthode nécessite tout de même un minimum d'installations pour la récolte des graines et leur stockage avant la mise en sac et déploiement sur site. A plus grande échelle, la méthode est facilement répliquable mais le transport des sacs pourrait nécessiter des moyens de transport plus importants en raison de la charge qu'ils représentent. ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est faible (méthode de prélèvement des tiges matures classique) et modéré sur le site à restaurer : les sacs recouvrent en effet entièrement le sédiment de la zone où les sacs sont déposés. ○ Cette méthode paraît adaptée dans des environnements aux conditions hydrodynamiques peu exposées à plus exposées : les sacs sont en effet lestés, enfouis et ancrés dans le sédiment ce qui limite leur vulnérabilité à un déplacement. La vulnérabilité à l'enfouissement existe toujours comme dans la méthode où les sacs ne sont pas remplis de sédiments (Harwell & Orth, 1999). Ce paramètre des mouvements sédimentaires reste à surveiller avant déploiement afin d'éviter un enfouissement trop profond des sacs. Comme la méthode de Harwell, on privilégiera cette méthode dans les sites présentant peu de déplacements sédimentaires. 		

3.4.5.15 Ensemencement avec des sacs en toile de jute attachés à une ligne (méthode BOSSline)

ENSEMENCEMENT AVEC DES SACS EN TOILE DE JUTE ATTACHES A UNE LIGNE (METHODE BOSSLINE)



Contexte

- UK, Porthdinllaen, North Wales; Helfort River
- *Zostera marina*
- Déclin global des herbiers au UK, perte de 85% des herbiers depuis 1920, présence sur 20/155 estuaires en raison d'une faible qualité des eaux. Projet pilote mené suite aux efforts pour l'amélioration de la qualité des eaux côtières.



Conditions environnementales

- Sélection de 3 sites par utilisation d'un modèle d'évaluation du potentiel de la zone pour la croissance des herbiers.
- Sites supportant des herbiers par le passé, avec quelques patchs restants.
- Marnage important de 7,6 m.
- Courant de marée fort avec mouvements sédimentaires
- Profondeur de 1 à 3 m.
- Sédiments : sables fins à très fins.
- Température en surface de 8 à 17°C.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines :**
 - En aout, collecte de tiges matures par des plongeurs sur des herbiers situés à proximité.
 - Stockage de la partie aérienne dans des cuves aérées, en laboratoire, à une température de 8-12°C jusqu'à libération des graines. Récolte des graines en fond de cuves et stockage dans des cuves avec circulation d'eau.
- **Dispersion des graines :**
 - Transfert de 100 graines dans des sacs en toile de jute de 13 x 7,5 cm (maille de 1 mm) avec 100 cm³ de sédiments prélevés en surface sur un herbier existant et 50 cm³ de détritits d'herbier (issu des tiges reproductives) pour apporter de la micro faune et flore et favoriser le développement du microbiome.
 - Fermeture des sacs et fixation sur une corde à 1 m d'intervalle, chaque corde maintenant 6 sacs. Fixation des lignes à l'aide de piquets métalliques situés aux extrémités.
 - Déploiement sur site en novembre.



FIGURE 3 | Stages of seed bag creation (1) reproductive shoot collection by SCUBA divers, (2) natural rotting of seagrass to allow for seed dropping, (3) separation of seeds from detritus, and (4) filling of bags with seeds, sediment, and detritus.



Suivi

Suivi par plongée en mai et août de l'année suivant l'installation :

- Suivi de la densité
- Suivi de la hauteur des plants



Performances et effets induits

Après 6 mois:

- 16/24 sacs présentent au moins un jeune plant développé ; 100% vs 80% vs 0% selon les sites.
- Pour le site à 0%, des mouvements sédimentaires ont enfoui les sacs trop profondément donnant des conditions anoxiques.
- En excluant le site à 0%, taux de germination de 3,6% ; densité de 3 plants/sacs.

La ligne se casse rapidement et n'est présente que par fragments 6 mois après le déploiement. Mais résistance des installations aux tempêtes hivernales.

Après 9 mois : fragmentation des sacs en toile et présence des rhizomes en croissance dans le sédiment.

*Unsworth, R. K., Bertelli, C., Cullen-Unsworth, L., Esteban, N., Lilley, R., Jones, B. L., ... & Rees, S. (2019). Sowing the seeds of seagrass recovery using hessian bags. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 311.*

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement avec des sacs en toile de jute attachés à une ligne (méthode BOSSline)	<p>Après 6 mois:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 16/24 sacs présentent au moins un jeune plant développé ; 100% vs 80% vs 0% selon les sites. - Pour le site à 0%, des mouvements sédimentaires ont enfoui les sacs trop profondément donnant des conditions anoxiques. - En excluant le site à 0%, taux de germination de 3,6% ; densité de 3 plants/sacs. 	<p>Des conditions environnementales propices au développement d'herbier.</p> <p>Réduction de la prédation par les sacs.</p> <p>Réduction des mouvements des graines permettant leur installation plus rapide dans le substrat.</p>	<p>Les mouvements hydrosédimentaires trop importants susceptibles d'enfouir les sacs trop profondément et de priver les graines d'oxygène.</p> <p>Un positionnement du site trop proche de la zone intertidale sujette à un substrat sableux très mobile.</p>
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> o Les performances de la méthode sont mitigées dans le cas présent. Les taux de germination sont faibles voire nulle sur un site où les sédiments ont enseveli les sacs. Les performances sont plus encourageantes sur les 2 autres sites. Des paramètres de réalisation de la méthode restent à affiner comme par exemple les matériaux de remplissage (Unsworth, 2019). o Méthode simple à réaliser si les installations techniques sont disponibles (laboratoire et cuves) (Unsworth, 2019). A plus grande échelle, la méthode est facilement répliquable, le déploiement est rapide car il ne nécessite que le fonçage des piquets aux extrémités des lignes. o Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est faible (méthode de prélèvement des tiges matures classique) et faible sur le site à restaurer : les sacs sont de petite taille et leur ancrage ne nécessite que quelques piquets. L'intervention peut être réalisée par bateau. o Cette méthode paraît adaptée dans des environnements aux conditions hydrodynamiques peu exposées à plus exposées mais sur des zones où les mouvements sédimentaires sont limités : les sacs sont en effet lestés et fixés à la ligne, donc peu vulnérables au déplacement. La vulnérabilité à l'enfouissement existe toujours comme les méthodes d'ensemencement par sac présentées (Harwell & Orth, 1999 ; Zhang 2015). On privilégiera donc cette méthode aux sites présentant peu de déplacements sédimentaires. 		

3.4.5.16 Ensemencement dans des pots

ENSEMENCEMENT DANS DES POTS



Contexte

- USA, Chesapeake Bay
- *Zostera marina*
- Fort déclin des herbiers dans la baie. Action menée dans le cadre d'une stratégie globale de restauration des herbiers après une amélioration de la qualité des eaux dans la baie.



Conditions environnementales

Pas de données.



Protocole

Coûts :
Pas de données

- **Collecte de graines**
 - Selon méthode classique de récolte et récupération des graines.
- **Dispersion des graines :**
 - Enfouissement de 10 graines dans des pots de 5x5x5 cm à une profondeur de 1,5 à 2,5 cm dans du sédiment naturel.
 - Stockage des pots dans des cuves sous serre jusqu'à germination à l'automne.
 - Replantation des pots sur site au printemps



Suivi

Pas de données.



Performances et effets induits

Faible taux de survie : 14,5%.

Problème majeur identifié : la vulnérabilité des pots au déchaussement dans des contextes hydrodynamiques exposés.

*Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays. In Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both. March 11, 2003. Sarasota, Florida (pp. 1-17).*

Méthode	Performance	Conditions de succès	Conditions d'échec
Ensemencement dans des pots	Taux de survie : 14,5%.	Pas de données.	Site trop exposé déchaussant les pots et arrachant les jeunes plants.
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Faible performance de la méthode dans ce cas présent. Les études existantes sur cette méthode sont insuffisantes pour tirer des conclusions sur l'efficacité de la méthode, d'autres tests, en milieu moins exposé, sont à mener pour être en mesure de qualifier les performances de cette méthode. ○ Méthode simple à réaliser si les installations techniques sont disponibles (laboratoire et cuves). A plus grande échelle, la méthode peut devenir fastidieuse compte-tenu du grand nombre de pots que cela impliquerait de préparer puis de déployer sur site. ○ Méthode dont l'atteinte sur le milieu donneur est faible (méthode de prélèvement des tiges matures classique). L'atteinte sur le site à restaurer est faible si la mise des pots dans le milieu s'effectue à pied ou à partir d'une embarcation. ○ Cette méthode paraît adaptée dans des environnements aux conditions hydrodynamiques peu exposées, en revanche, elle ne l'est pas sur un site exposé aux vagues et aux courants (Orth, 2006). 		

3.4.6 Bilan de l'analyse comparative des protocoles de restauration

Ce bilan s'articule autour d'un tableau de synthèse construit sur la base des tableaux analytiques présentés ci-dessus pour chacune des méthodes.

TABLEAU 13 : DEFINITION DES DESCRIPTEURS ET NIVEAU DE QUALIFICATION

Qualificatif	« NA »	« BON »	« MOYEN »	« BAS »
--------------	--------	---------	-----------	---------

Critère				
Performance	Données insuffisantes pour tirer des conclusions significatives	Performance satisfaisante : impact positif sur le site pour la majorité des réplias (en termes de taux de survie, taux de recrutement, de % de recouvrement, de densité de plants...)	Performance moyenne : pas d'impact positif sur le site pour une partie des réplias.	Performance faible : pas d'impact positif pour la majorité des réplias
Accessibilité	Données insuffisantes pour tirer des conclusions significatives	Méthode simple, nécessitant peu de moyens techniques (pas d'infrastructures requises) et de la main d'œuvre qualifiée (plongeurs notamment) en faible nombre.	Méthode nécessitant des moyens techniques (infrastructures, outils spécifiques) et/ou de la main d'œuvre qualifiée en nombre.	Méthode nécessitant des moyens importants et/ou de la main d'œuvre spécialisée en grand nombre.
Adaptabilité au contexte	Données insuffisantes pour tirer des conclusions significatives	Méthode applicable et efficace dans la majorité des contextes hydrosédimentaires (hors conditions extrêmes)	Méthode adaptée dans quelques contextes hydrosédimentaires particuliers (non applicable/efficace dans des contextes trop exposés notamment)	Méthode adaptée et efficace uniquement dans un type de contexte particulier.
Impact sur le milieu	Données insuffisantes pour tirer des conclusions significatives	Impact sur les milieux donneurs et receveurs nul à faible.	Impact sur les milieux donneurs et/ou receveurs modéré.	Impact important sur les milieux donneurs et/ou receveurs.

TABLEAU 14 : EVALUATION QUALITATIVE ET COMPARATIVE DES METHODES DES PROTOCOLES DE RESTAURATION DES HERBIERS

	Méthode	Performance	Accessibilité	Adaptabilité au contexte	Atteinte au milieu
--	---------	-------------	---------------	--------------------------	--------------------

TRANSPANTATION	Transplantation de plants d'herbier avec rhizome				
	Transplantation de mottes d'herbier par excavateur				
	Transplantation de mottes prélevées manuellement				
	Transplantation par la méthode du rhizome horizontal				
	Transplantation par ancrage du plant sur une coquille d'huitre				
	Transplantation de plants fixés sur une pierre allongée				
	Transplantation de plants fixés sur un cadre métallique				
	Transplantation de plants cultivés en nurserie				
	Transplantation de plants avec rhizome dans des structures 3D				
ENSEMENCEMENT	Ensemencement à la volée				
	Ensemencement mécanique				
	Ensemencement par un système de bouées				
	Ensemencement avec des sacs en toile de jute				
	Ensemencement avec des sacs en toile de jute remplis de sédiments				
	Ensemencement avec des sacs en toile de jute attachés à une ligne				
	Ensemencement dans des pots				
R&D	Sea Art				
	Seaboost				

3.4.7 Synthèse des méthodes de restauration des herbiers

Les principales conclusions tirées relativement aux méthodes de transplantation et d'ensemencement sont résumées ci-dessous. De même, quelques grands points soulevés dans la littérature sont également discutés.

3.4.7.1 Méthodes de transplantation

Les méthodes de transplantation représentent sur tous les essais de restauration des herbiers (toutes espèces confondues) près de 80% des essais dont 55% reposent sur la transplantation de plants et 22% sur la transplantation de mottes (Van Katwijk et al., 2016)⁷⁷.

▪ Performance des méthodes de transplantation

Sur les projets considérés, les performances des méthodes de transplantation sont relativement satisfaisantes hormis pour la transplantation de mottes prélevées manuellement, projet pour lequel les mottes ont été perdues suite à un fort épisode de crue. Aucune méthode ne se démarque par une performance significativement meilleure par rapport aux autres et le nombre limité de réplicas permet difficilement de tirer des conclusions probantes quant à l'efficacité des différentes méthodes.

▪ Accessibilité des méthodes de transplantation

Sur le plan technique, les méthodes de transplantation de plants apparaissent relativement accessibles et peuvent donc être répliquées dans différents contextes :

- La collecte des plants peut impliquer l'intervention de plongeurs ou non selon le mode de prélèvement des plants.
- Il n'y a pas nécessité d'installation de stockage des plants, la transplantation pouvant être effectuée rapidement après le prélèvement.
- Les traitements et manipulations des plants sont des opérations simples : liaisonnement des plants, fixation à des éléments (cadre, pierre, coquille d'huitre).
- Certaines méthodes présentent l'avantage que le déploiement ne nécessite pas de faire appel à des plongeurs et permettent donc une action plus rapide (méthode des cadres, plants fixées sur une pierre ou coquille d'huitre) et permettent une économie de temps et main d'œuvre.
- La méthode de transplantation de plants élevés en nurserie apparait complexe et coûteuse en temps et moyens techniques pour une performance basse, au moins dans ce projet. En revanche, elle reste une voie à explorer compte-tenu du contrôle de la diversité génétique qu'elle peut apporter par la transplantation de plants aux profils génétiques variés et adaptés (Tan et al., 2020)⁷⁸. De même, cette méthode représente une alternative dans le cas de l'absence de champs donneurs à proximité (Tanner, 2010)⁷⁹.

Les méthodes de transplantation de mottes peuvent se révéler plus complexes techniquement compte-tenu de la charge des mottes à déplacer.

▪ Adaptabilité au contexte

La majorité des méthodes de transplantation de plants présente des limites dans leur applicabilité dans des contextes hydrodynamiques plus forts. Les transplants présentent en effet une vulnérabilité relativement forte à l'action des vagues et/ou des courants en particulier sur la période suivant leur transplantation. Cette vulnérabilité est (1) relativement réduite par l'ajout d'un lest au transplant (pierre, coquille d'huitre), (2) réduite plus fortement par l'ancrage des plants, leur protection par un dispositif ou leur fixation à un cadre lui-même ancré (méthode TERFS, protection par une structure 3D). Ces méthodes restent à privilégier dans des environnements peu à modérément exposés. De manière générale sur les projets de restauration d'herbiers

⁷⁷ van Katwijk, M. M., Thorhaug, A., Marbà, N., Orth, R. J., Duarte, C. M., Kendrick, G. A., ... & Verduin, J. J. (2016). Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, 53(2), 567-578.

⁷⁸ Tan, Y. M., Dalby, O., Kendrick, G. A., Statton, J., Sinclair, E. A., Fraser, M. W., ... & Sherman, C. D. (2020). Seagrass restoration is possible: Insights and lessons from Australia and New Zealand. *Frontiers in Marine Science*, 7, 617.

⁷⁹ Tanner, C. E., & Parham, T. (2010). Growing *Zostera marina* (eelgrass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects. *Restoration Ecology*, 18(4), 527-537

tous types d'espèces confondus, l'utilisation de dispositifs d'ancrage et de lestage permet d'accroître la survie des transplants (Van Katwijk, 2016).

Les techniques utilisant la transplantation de mottes présentent l'avantage d'offrir une meilleure résistance à l'hydrodynamisme du fait du maintien d'un réseau racinaire dense et compact dans le sédiment d'origine formant la motte qui constitue un ancrage solide pour les zostères. Ce bénéfice est d'autant plus grand que l'étendue de la motte est importante. La motte permet également la reproduction des processus intrinsèques à l'herbier qui ont une action positive sur sa survie et sa croissance (Suykerbuijk et al., 2012)⁸⁰.

▪ **Impact sur les milieux donneur et receveur**

Les impacts sont faibles à nuls pour les méthodes de transplantation de plants à condition de respecter un seuil de densité minimale sur les champs donneurs ou de diversifier la provenance des transplants (prélèvement de plants déjà déracinés (Zhou et al., 2014)⁸¹, de plants échoués sur la plage... (Tan et al., 2020)), paramètre systématiquement pris en compte dans les projets considérés. De même, dans les projets considérés, les méthodes de transplantation sur le site à restaurer présentent peu d'impact car la transplantation est réalisée en plongée, à pied, ou effectuée depuis un bateau.

Les impacts des méthodes de transplantation de mottes paraissent plus importants en particulier pour les mottes excavées : les mottes sont d'une étendue plus importante et nécessite l'intervention d'engins de chantier à l'impact non négligeable sur les milieux donneur et receveur, notamment en raison des traces que ces engins laissent sur les herbiers (Suykerbuyk, 2012).

▪ **Applicabilité à grande échelle**

Les méthodes de transplantation de plants présentent un niveau variable d'applicabilité à grande échelle. En effet, les méthodes impliquant une action individuelle en plongée pour chaque plant ou unité de plantation resteront difficilement applicables à grande échelle compte-tenu du coût en main d'œuvre et en temps qu'elles impliquent (méthode du rhizome horizontal, méthode de transplantation de plants simples, méthode des plants cultivés...). En revanche les méthodes de transplantation dont le déploiement peut s'effectuer depuis un bateau permettent d'envisager une action à plus grande échelle (méthode des cadres lestés, des plants fixés sur une pierre ou coquille d'huitre...).

Les méthodes de transplantation de mottes sont difficilement envisageables à grande échelle compte-tenu des volumes de sédiments à transporter dans ces cas et des impacts que cela générerait sur les sites donneur et receveur.

▪ **Deux principaux sujets à considérer ressortent également dans la littérature**

La diversité génétique du champ restauré :

Les méthodes de transplantation reposent en effet sur le prélèvement dans un ou quelques champs donneurs de plants d'herbier. En conséquence, le champ transplanté peut potentiellement présenter une faible diversité génétique compte-tenu d'une part importante de reproduction végétative dans les herbiers. Les herbiers restaurés sont ainsi susceptibles de présenter une faible capacité de résilience à une perturbation et une plus faible capacité d'adaptation à un contexte changeant (Tanner et al. 2010). La variation des sources et la provenance de transplants est un point à surveiller afin d'élargir la base génétique des champs restaurés et ainsi d'accroître leur capacité d'adaptation (Tan et al., 2020).

La proximité des champs donneurs :

⁸⁰ Suykerbuyk, W., Govers, L. L., Bouma, T. J., Giesen, W. B., de Jong, D. J., van de Voort, R., ... & van Katwijk, M. M. (2016). Unpredictability in seagrass restoration: analysing the role of positive feedback and environmental stress on *Zostera noltii* transplants. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 774-784.

⁸¹ Zhou, Y., Liu, P., Liu, B., Liu, X., Zhang, X., Wang, F., & Yang, H. (2014). Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique. *PloS one*, 9(4), e92982

Ce paramètre peut influencer sur la survie des transplants : les plants d'un champ situé à proximité sont plus susceptibles de présenter des gènes adaptés au contexte environnemental du site à restaurer (Van Katwijk, 2016).

LES METHODES DE TRANSPLANTATION EN QUELQUES POINTS

- **Performance des méthodes de transplantation**
Relativement satisfaisante hormis pour la transplantation de mottes prélevées manuellement. Aucune méthode ne se démarque par une performance significativement meilleure.
- **Accessibilité des méthodes de transplantation**
Relativement accessible.
Installations de stockage non essentielles si la transplantation s'effectue rapidement après prélèvement. Transplantation en plongée ou par bateau. Préparation des unités transplantée par des manipulations et opérations simples sur les transplants.
Moyens plus importants pour le prélèvement et le transport de mottes d'herbier.
- **Adaptabilité au contexte**
Pour les transplants non ancrés ou lestés : environnements peu exposés.
Pour les transplants ancrés et/lestés (sur cadre, pierre, coquille d'huitre) : environnements peu exposés à modérément exposés.
Pour les mottes : résistance à l'hydrodynamisme proportionnelle à la taille de la motte.
- **Impact sur les milieux donneur et receveur**
Impact nul à faible pour la transplantation de plants si respect d'un seuil de densité minimal sur le champ donneur.
Impact potentiellement fort pour la transplantation de mottes si nécessité d'engins pour le prélèvement, transport et transplantation des mottes.
- **Applicabilité à grande échelle**
Peu adaptée pour la transplantation d'unités nécessitant une action en plongée ou la transplantation de mottes.
Relativement adaptée pour les méthodes avec transplantation par bateau (plants fixés sur cadre, coquille ou pierre notamment).

3.4.7.2 Méthodes d'ensemencement

Ces méthodes représentent environ 20% de l'ensemble des essais de restauration des herbiers, tous types d'espèces confondus (Van Katwijk, 2016).

- **Performance des méthodes d'ensemencement**

Globalement, le niveau de réussite des méthodes d'ensemencement, apprécié en fonction du taux de recrutement à partir des graines, est faible : entre 5 et 15% (Zhang et al., 2015)⁸² et aucune méthode ne se démarque par un taux de réussite significativement plus élevé sur le long terme.

- **Accessibilité technique des méthodes d'ensemencement**

La majorité des méthodes d'ensemencement implique préalablement de récolter des graines à partir des tiges reproductrices matures, donc de les prélever et de les stocker jusqu'à libération des graines. Ces méthodes nécessitent donc des installations de stockage avec des cuves oxygénées et/ou agitées d'un courant d'eau issue du milieu naturel. Ces méthodes impliquent donc un minimum de moyens techniques (laboratoire ou infrastructures équipées) et humains (main d'œuvre spécialisée). Seule la méthode d'ensemencement par un système de bouées ne nécessite pas de telles installations puisque les tiges sont directement mises dans le milieu, dans des sacs maillés, et les graines seront libérées selon une dynamique naturelle depuis ces sacs.

⁸² Zhang, P. D., Fang, C., Liu, J., Xu, Q., Li, W. T., & Liu, Y. S. (2015). An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: implications for their large-scale restoration. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 89-99.

Les techniques de dispersion des graines varient en termes de complexité et en termes de cout économique avec des méthodes de faible niveau de technicité et à bas cout (ensemencement à la volée, dans des sacs...) et des méthodes plus complexes à des coûts plus élevés (ensemencement mécanique). Le choix du mode de dispersion des graines pourra donc être ajusté par rapport aux moyens techniques et humains disponibles.

▪ **Adaptabilité au contexte**

Le niveau d'adaptabilité des méthodes d'ensemencement au contexte hydrodynamique est variable selon les cas. Là où les graines sont dispersées directement dans le milieu (ensemencement à la volée, système de bouées), un contexte exposé n'apparaît pas être un facteur d'échec de la méthode. Au pire, les graines sont dispersées à plus grande échelle (baie, estuaire...) et peuvent s'installer notamment là où les conditions sont propices à leur développement. Il est globalement constaté, malgré une potentielle dispersion à plus grande échelle, la présence de graines dans la zone d'ensemencement, et les hypothèses d'une chute rapide des graines, de leur captage et enfouissement dans le sédiment du fait de la microtopographie de surface sont émises dans le cadre des projets considérés au regard des densités élevées de graines observées au niveau des sources d'émission des graines.

En revanche, pour les méthodes où les graines sont fixées dans le milieu (ensemencement dans des sacs ou pots), les mouvements hydrosédimentaires susceptibles d'enfouir trop profondément les sacs peuvent s'avérer sources d'échec. Les zones présentant d'important déplacements de sédiments sont donc à éviter pour ces méthodes où le dispositif a pour objectif de maintenir la graine fixée à un endroit afin de faciliter son installation et son ancrage local dans le sédiment.

▪ **Impact sur les milieux donneur et receveur**

Les méthodes d'ensemencement n'impactent pas les milieux donneur et receveur. Les méthodes de prélèvement des tiges reproductrices sont réalisées, dans les projets considérés, de manière à respecter un seuil de densité de plants minimal sur les champs donneurs. La dispersion des graines par bateau, à la volée, ou en sacs, engendre très peu de perturbations sur les sites à restaurer.

▪ **Application à grande échelle**

L'application à grande échelle des méthodes d'ensemencement s'envisage plus aisément que les méthodes de transplantation compte-tenu de la facilité de dispersion des graines dans le milieu et sur de larges étendues : une graine ne nécessite pas une action spécifique, en plongée ou en surface, comme la transplantation d'un plant peut l'exiger dans certaines méthodes de transplantation (transplantation simple, méthode du rhizome horizontale, transplantation sur une pierre ou coquille d'huitre...). Toutes les méthodes d'ensemencement impliquent la dispersion d'un grand nombre de graines par une action unique et simple (largage des graines, dépose de sacs sur le sédiment ou via une bouée...)

Une application à grande échelle impliquera cependant une phase de collecte de graines plus importante : des méthodes de prélèvement automatiques des graines existent actuellement (Tan, 2020) et permettent une collecte rapide palliant ainsi ce potentiel frein.

▪ **Trois principaux sujets à considérer ressortent également dans la littérature :**

La période d'ensemencement :

Selon Orth et al., 2006 ⁸³, il semblerait préférable de semer les graines à l'automne plutôt qu'au printemps, ceci permettant à la graine puis au plant de disposer d'une période d'installation et de croissance suffisante pour parvenir sous une forme robuste à la période estivale, saison pendant

⁸³ Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays. In *Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both. March 11, 2003. Sarasota, Florida* (pp. 1-17).

laquelle les conditions thermiques sont les plus exigeantes pour les herbiers. Les périodes d'ensemencement sont ensuite à ajuster selon la périodicité qui varie avec la géographie des projets.

La variation des coûts des opérations (Orth, 2006) :

Les coûts des actions de restauration basées sur les méthodes d'ensemencement sont très variables d'un projet à un autre du fait de différents facteurs de variations et notamment : l'éloignement du site donneur, l'éloignement du site à restaurer, les conditions environnementales, les moyens techniques déjà disponibles...

Le rapport coût/temps/performance des méthodes d'ensemencement :

Les performances des méthodes considérées ci-dessus sont globalement faibles, avec des taux de recrutement des graines excédant rarement les 15%. Cependant, les méthodes d'ensemencement présentent l'avantage de pouvoir être conduites à plus grande échelle pour des coûts en temps et en main d'œuvre restreint, d'où un choix des gestionnaires à privilégier ces méthodes (Orth et al., 2006).

LES METHODES D'ENSEMENCEMENT

- **Performance des méthodes de transplantation**
Faible taux de recrutement des méthodes d'ensemencement. Aucune méthode ne se démarque par une performance significativement meilleure.
- **Accessibilité des méthodes de transplantation**
Accessibilité technique variable : Installations nécessaires pour la collecte des graines à l'exception d'une méthode. Méthode de dispersion des graines plus ou moins simple.
- **Adaptabilité au contexte**
Pour les graines libérées dans le milieu : environnements peu exposés à exposés (les graines sont alors dispersées à plus grande échelle).
Pour les graines fixées localement par une mise en sacs : environnements peu exposés à exposés mais où les mouvements sédimentaires sont limités pour éviter l'enfouissement des sacs.
- **Impact sur les milieux donneur et receveur**
Impact nul à faible pour l'ensemble des méthodes d'ensemencement.
- **Applicabilité à grande échelle**
Adapté : dispersion d'un grand nombre de graines au travers d'une opération d'ensemencement. Action facilement applicable à plus grande échelle dans des coûts et un temps limités.

3.4.7.3 Points d'attention particuliers relatifs aux protocoles de restauration des herbiers

Enfin, d'autres sujets généraux relatifs aux méthodes de restauration des herbiers en général ont pu être relevés dans la littérature, toutes méthodes de restauration confondues :

- **La relation échelle d'action et taux succès de l'action : plus l'échelle de l'action est grande, plus le taux de réussite est élevé.**

Van Katwijk⁸⁴ souligne les bénéfices d'une action menée à grande échelle et l'existence d'un seuil à dépasser afin d'augmenter les taux de réussite de l'action. Une action de transplantation avec un nombre de plants plus grand permet l'apparition d'un effet de dilution du risque, l'existence d'une plus grande diversité génétique et donc d'une plus grande capacité de résilience. De même, l'augmentation du nombre de plants est en faveur de la réalisation de processus rétroactifs positifs au sein de l'herbier (contrôle de

⁸⁴ van Katwijk, M. M., Thorhaug, A., Marbà, N., Orth, R. J., Duarte, C. M., Kendrick, G. A., ... & Verduin, J. J. (2016). Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, 53(2), 567-578.

l'hydrodynamisme, rétention des sédiments, clarté des eaux...). Van Katwijk conclut sur l'idée qu'il peut être bénéfique de cibler une échelle d'action supérieure à celle que l'on pense nécessaire afin d'atteindre des seuils de taille et de densité permettant une meilleure réussite de l'opération.

Il observe dans sa méta-analyse, considérant 1786 essais de restauration d'herbier toutes espèces confondues, un taux de survie directement corrélé au nombre initial de transplants ou graines semées : 22% de survie pour les tests avec un nombre de plants/graines inférieur à 100 contre 42% de survie pour les tests avec un nombre de plants/graines supérieur à 100 000.

Dans ce même ordre d'idées, dans son article rédigé à la suite du congrès européen sur la restauration des herbiers, Cunha (2012)⁸⁵ souligne la faible réussite des projets de restauration menés en Europe ainsi que la petite échelle des actions, rarement supérieure à 10 m² (seulement 30% des actions s'étendaient sur une surface supérieure à 100 m²). Par ailleurs, il relate que sur les 10 dernières années (entre 2000 et 2010), aucun des participants (scientifiques et gestionnaires) ne peut témoigner de la réussite probante d'un des projets de restauration mené.

- **La durée du suivi dans le cadre des projets de restauration : elle est rarement supérieure à 1 an ce qui entraîne une perte d'informations au fil des expérimentations.**

De manière générale, dans les projets considérés, les durées de suivi, lorsqu'ils sont mis en œuvre, sont courtes, sur 12 mois ou moins dans 50% des cas, supérieures à 2 ans dans 28% des cas (Van Katwijk, 2016). Cunha (2012), fait ce même constat lors du Congrès européen : cette durée trop courte des suivis induit un biais sur l'évaluation de la performance des méthodes de même que la majorité des projets aux taux de réussite très faibles qui ne font pas l'objet d'une publication. En conséquence, il existe une perte d'informations relativement aux facteurs de succès et d'échecs des actions, qui ne sont pas répertoriés au fil des expérimentations (Van Katwijk, 2016).

- **L'historique de la zone et le niveau de pression au moment de l'action de restauration sont des paramètres déterminants dans la réussite de l'action.**

Sur les 1789 essais considérés dans sa méta-analyse, toutes espèces de phanérogames confondues, Van Katwijk relève que 50% des projets sont entrepris suite à une régression des herbiers due à la dégradation de la qualité des eaux. Dans ce cas, les projets de restauration ont le moins de succès comparés à ceux menés suite à une dégradation de l'herbier par des travaux. Ce constat rejoint les conclusions de Cunha (2012) et de Paulo (Paulo et al., 2020)⁸⁶ concernant les prérequis à une action de restauration, qui indiquent qu'avant de restaurer il convient de limiter ou d'éliminer les pressions négatives qui s'exercent sur l'herbier. La bonne qualité des eaux est en effet compliquée à rétablir en zone côtière alors qu'il est plus facile d'intervenir sur le mode de gestion des travaux sur le littoral.

Finalement, cette synthèse de la littérature relative aux actions de restauration des herbiers de zostère révèle le caractère encore expérimental de ces actions et une réussite générale faible des essais réalisés jusqu'ici. La littérature existante est encore peu développée et les efforts sont concentrés sur certaines zones géographiques comme en atteste les projets considérés dans l'inventaire réalisé. Le constat des taux de réussite faible est également fait lors du Congrès européen sur la restauration des herbiers. **Ces faits conduisent ainsi (1) à considérer la restauration des herbiers comme dernière alternative et (2) à mener de manière rigoureuse la séquence Eviter-Réduire-Compenser afin de limiter au maximum les impacts sur les herbiers (à éviter en premier lieu).**

⁸⁵ Cunha, A. H., Marbá, N. N., van Katwijk, M. M., Pickerell, C., Henriques, M., Bernard, G., ... & Manent, P. (2012). Changing paradigms in seagrass restoration. *Restoration Ecology*, 20(4), 427-430.

⁸⁶ Paulo, D., Cunha, A. H., Boavida, J., Serrão, E. A., Gonçalves, E. J., & Fonseca, M. (2019). Open coast seagrass restoration. Can we do it? Large scale seagrass transplants. *Frontiers in Marine Science*, 6, 52.

3.5 Catalogue des conditions indispensables aux déploiements de protocoles de restauration au sein du périmètre du Parc

Pour cette partie, les travaux sont menés à partir :

- des conclusions tirées de l'inventaire comparatif des méthodes de restauration des herbiers et sur les conditions de succès et d'échec des méthodes.
- de données cartographiques disponibles (cartographie des herbiers du Parc, données du catalogue SHOM, atlas cartographique du PNM EGMP du plan de gestion 2018-2023)
- des travaux d'expertise de Seaboost, d'Isabelle Auby (IFREMER) et d'I-Sea.

Compte-tenu (1) du caractère expérimental des projets de restauration des herbiers, (2) de l'impossibilité de tirer des conclusions significatives relativement aux conditions de déploiement des protocoles de restauration et (3) du caractère prioritaire des mesures d'évitement et de réduction des impacts sur les herbiers, il est proposé pour cette partie :

- d'analyser le contexte des zones d'herbier présentes au sein du Parc sur les plans bathymétrique et hydrosédimentaire ;
- de recenser et d'évaluer l'impact potentiel des activités susceptibles d'impacter les herbiers de cette zone ;
- de proposer des mesures de gestion prioritaires d'Évitement et de Réduction des impacts sur les herbiers ainsi que de suivis adaptés de ces mesures et travaux.
- de rappeler les conditions indispensables à la mise en œuvre d'actions de restauration de manière générale et spécifiquement dans le cas d'herbiers de zostères naines.

3.5.1 Les herbiers de zostère naine au sein du Parc

3.5.1.1 Localisation des zones d'herbier de zostères naines au sein du Parc

Au sein du Parc, les herbiers de zostères naines sont localisés dans trois secteurs, comme illustré ci-dessous sur les cartes représentant les habitats marins, issues du programme de connaissance CARTHAM.

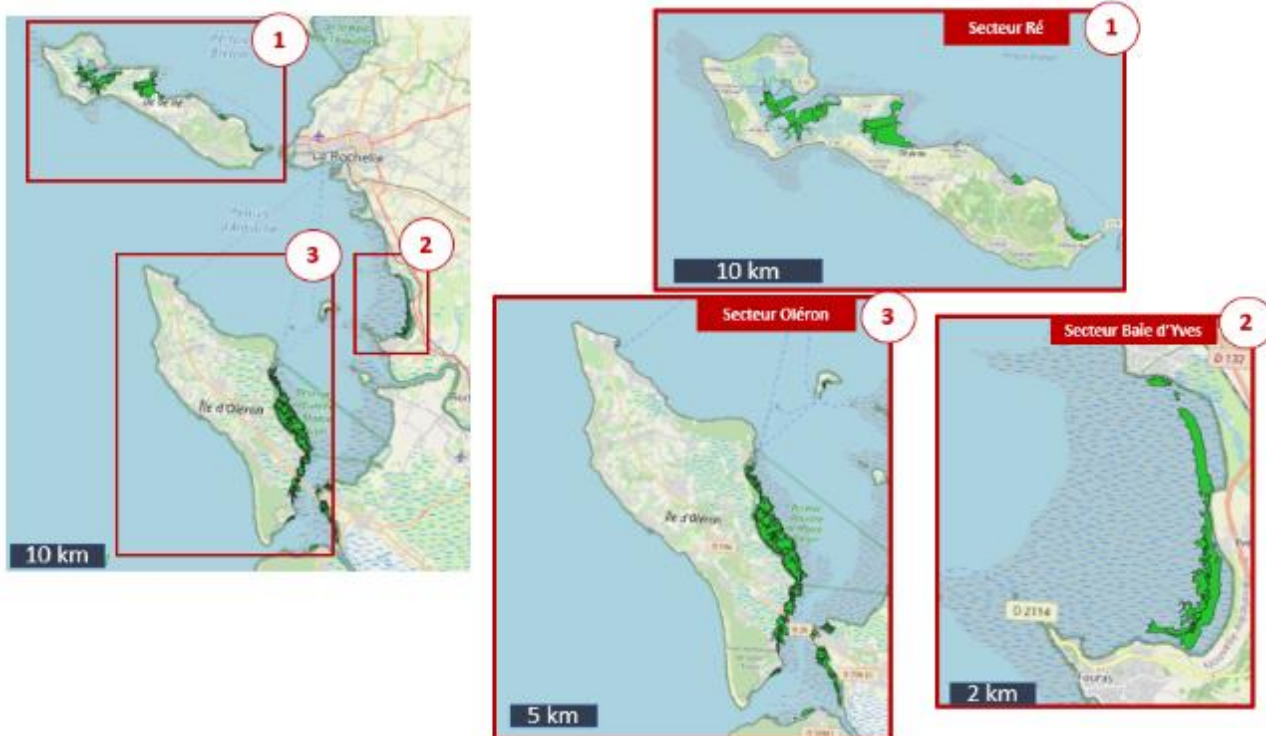


FIGURE 71 : LOCALISATION DES GRANDES ZONES D'HERBIERS DE ZOSTERES NAINES AU SEIN DU PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET MERS DES PERTUIS

Source : Programme de connaissances CARTHAM, 2010-2012.⁸⁷

Par la suite, ces 3 secteurs seront dénommés de la manière suivante :

- le secteur Ré
- le secteur Oléron
- le secteur Baie d'Yves

3.5.1.2 Identification des contextes environnemental et hydrosédimentaire des zones d'herbier de zostères naines du Parc

Selon l'atlas cartographique du PNM EGMP du plan de gestion 2018-2023 (OFB, 2018)⁸⁸, les herbiers sont situés dans des zones de substrats du type « vases et vases sableuses », sur des côtes stables ou en accrétion (Voir en annexe 2 ; Carte : Nature des fonds superficiels et dynamiques sédimentaires).

Les zones sont situées dans des masses d'eau côtières pour lesquelles le niveau d'état est évalué à bon (Voir en annexe 3 ; Carte : Les masses d'eau DCE au sein du Parc et les SAGE littoraux).

Au regard des conditions de courants et bathymétries dont les extraits suivants sont issus du catalogue SHOM⁸⁹ :

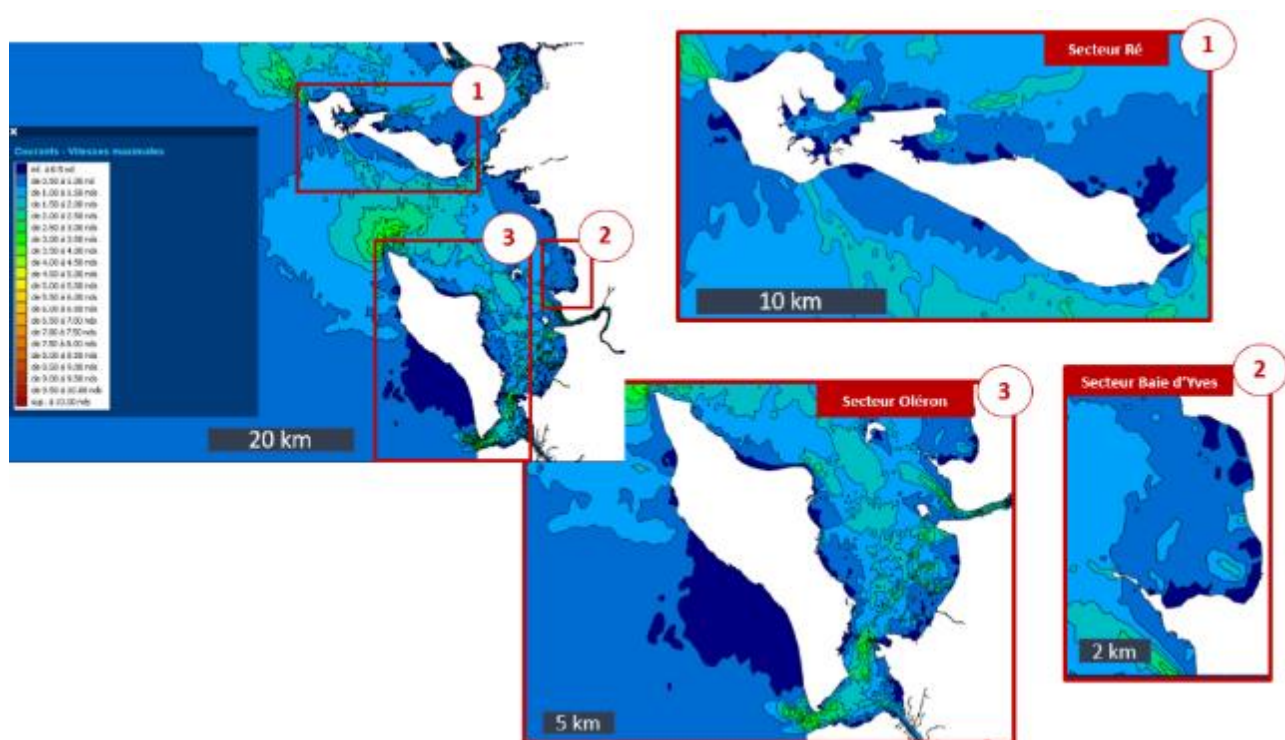


FIGURE 72 : CARTOGRAPHIE DES VITESSES MAXIMALES DES COURANTS DE MAREE SUR LES SECTEURS D'HERBIER DU PARC

Source : DATA.SHOM, Courants de marée 2D – Courants – Vitesses maximales. Dernière mise à jour : 2019.

⁸⁷ Programme de connaissances CARTHAM, 2010-2012.

⁸⁸ Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.

⁸⁹ SHOM, Courants de marée 2D – Courants – Vitesses maximales. Dernière mise à jour : 2018. Accessible via « DATA.SHOM.FR »

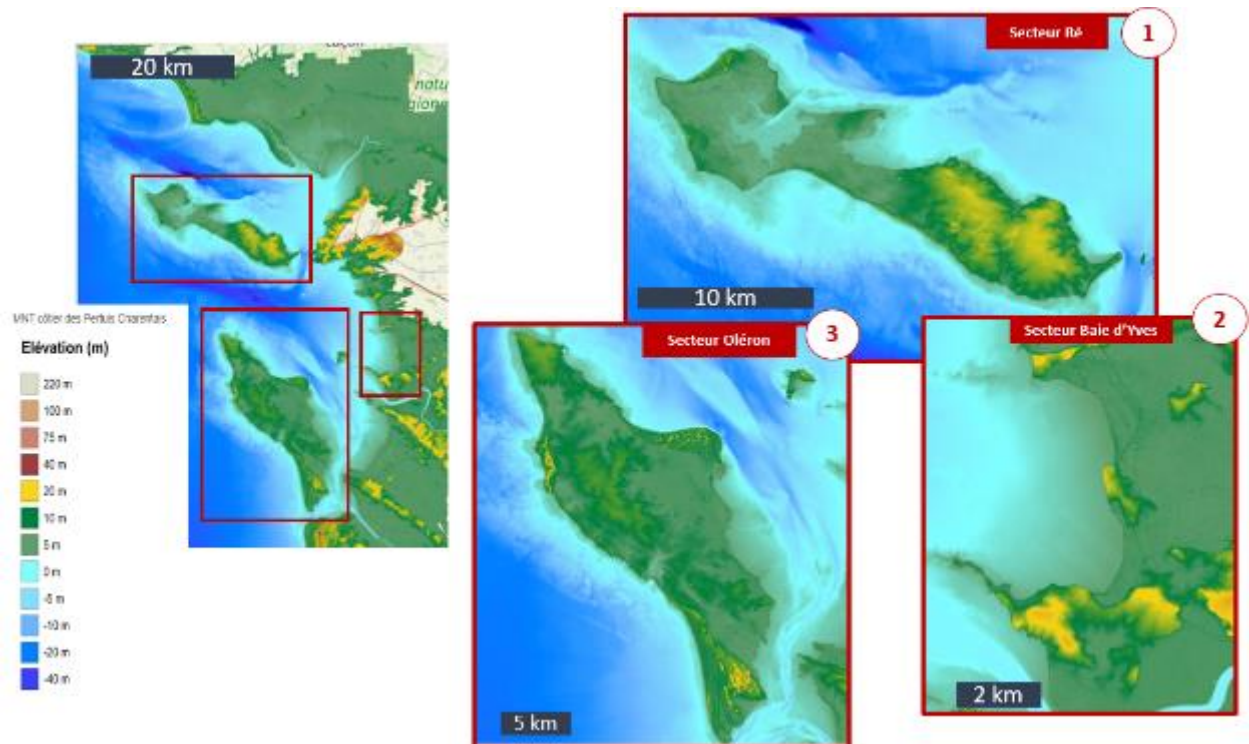


FIGURE 73: REPRESENTATION DES BATHYMETRIES AU SEIN DU PARC CET SUR LES SECTEURS D'HERBIERS

Source : SHOM, 2015.⁹⁰

Globalement :

- Les herbiers sont localisés dans les zones abritées des courants trop forts, de vitesse inférieure à 1,0 nœuds (équivalent à 0,51 m/s). Ces données sont bien inférieures à la vitesse limite de 1,5 m/s indiquée dans la littérature.
- Les herbiers sont situés entre 0 et 5 m de profondeur. Une cartographie bathymétrique plus fine permettrait de mieux caractériser les profondeurs de présence des herbiers.
- Les expositions à la houle et aux vagues n'ont pu être caractérisées.
- Sur les façades ouest où les vitesses de courants maximales sont inférieures au seuil de tolérance des herbiers, les herbiers sont absents. L'hypothèse posée est que l'exposition aux vagues trop importante empêche l'installation et le développement des herbiers dans ces zones.

3.5.2 Activités et pressions exercées sur les herbiers du Parc

Sur la base des données cartographiques et du plan de gestion du Parc, l'évaluation des pressions potentielles exercées sur les herbiers du Parc est réalisée au regard des différentes activités ayant lieu sur ces secteurs du Parc. Une description des pressions découlant de ces activités est fournie afin d'en déduire les impacts sur les herbiers, puis, dans un second temps, de proposer des mesures de gestion de ces pressions et impacts.

Les données cartographiques utilisées issues de l'atlas cartographique du plan de gestion 2018-2023⁹¹. La description et l'analyse des impacts de ces activités sont réalisées sur la base de l'expertise de Seaboot.

Les activités, pressions et secteurs concernés sont synthétisés dans le tableau suivant :

⁹⁰ SHOM, 2015. MNT Topo-Bathymétrie Côtier des Pertuis Charentais (Projet Homonym). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_COTIER_PERTU »IS_HOMONIM_20m_WGS84

⁹¹ Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.

TABEAU 15: ACTIVITES ET PRESSIONS POTENTIELLES EXERCÉES SUR LES HERBIERS DANS LES 3 SECTEURS DU PARC PRESENTANT DES HERBIERS DE ZOSTERE

Activités	Secteur Ré	Secteur Oléron	Secteur Baie d'Yves	Description et pressions potentielles exercées sur les herbiers
Station de traitement des eaux usées domestiques	5 stations, 3 à proximité des zones d'herbier	6 stations, 1 à proximité de la zone d'herbier	Environ 10 stations à proximité de la Baie d'Yves, proximité non directe avec les zones d'herbier	En cas d'anomalies de fonctionnement de la station, une pollution ponctuelle des eaux peut survenir, causant une modification de la chimie des eaux, un apport de nutriments, de polluants et une augmentation de la turbidité des eaux. Ces éléments peuvent être à l'origine, selon l'ampleur, la durée et la gestion de l'anomalie, de ses conséquences, d'une perturbation des herbiers de zostères naines.
Établissement industriel	Pas d'établissement à proximité	4 établissements sur l'île, proximité non directe avec les zones d'herbier.	Plusieurs établissements situés en amont de l'estuaire de la Charente	Selon la nature des établissements et les équipements de gestion des eaux, ils peuvent être à l'origine d'une pollution ponctuelle et/ou chronique des eaux causant une modification de la chimie des eaux, un apport de nutriments, de polluants et une augmentation de la turbidité des eaux. Ces éléments peuvent être à l'origine d'une perturbation des herbiers de zostères naines.
Conchyliculture	Ostréiculture: élevage (à plat ou surélevé), captage, dépôt.	Ostréiculture: élevage (à plat ou surélevé), captage, dépôt.	Mytiliculture: captage et élevage sur bouchot	Les pratiques de conchyliculture peuvent être à l'origine d'une perturbation des herbiers par destruction directe (accès, installation des parcs, piétinement, piétinement en zone d'herbier) des herbiers.
Pêche à pied (loisir et professionnelle)	A proximité directe et en zone d'herbier	A proximité directe et en zone d'herbier	Non concerné.	La pêche à pied peut être à l'origine d'un fort piétinement des herbiers ce qui peut provoquer sa dégradation de même qu'une augmentation de la turbidité des eaux du fait de la fréquentation de la zone.
Activités balnéaires (fréquentation de plage)	1 plage à forte fréquentation à proximité de l'herbier	1 plage à faible fréquentation à proximité de l'herbier	Une plage à faible fréquentation à proximité de l'herbier	La fréquentation de plages à proximité directe des herbiers peut entraîner la dégradation des herbiers par piétinement.
Dragage et gestion de sédiments	Dragage et gestion des sédiments sur de faibles volumes à proximité directe des zones d'herbier	Dragage et gestion des sédiments sur de faibles volumes à proximité directe des zones d'herbier	Pas d'activité.	Le dragage et le remaniement de sédiments entraînent une remise en suspension des sédiments donc ponctuellement une augmentation de la turbidité des eaux qui peut perturber les herbiers de zostères.

Infrastructures portuaires et côtières	3 ports de plaisance à proximité directe de l'herbier, 2 de capacité moyenne, 1 de grande capacité	5 ports de petite capacité à proximité directe de l'herbier	Pas de ports à proximité.	La présence d'infrastructures portuaires représente une source de pollution potentielle des eaux mais également une zone anthropisée sujette à des travaux d'aménagement et générant un trafic maritime. Au regard des herbiers, les infrastructures portuaires peuvent être à l'origine d'une perturbation de la qualité des eaux (apports de polluants), d'une augmentation de la turbidité des eaux, d'une modification des conditions hydrographiques et hydrosédimentaires (modification de la topographie, de la distribution des sédiments et de la direction des courants). Les infrastructures portuaires peuvent ainsi être l'origine d'une perturbation chimique et physique des herbiers.
Mouillage	Zones de mouillage forain et sur corps morts à proximité directe de l'herbier, mouillages portuaires.	Non concerné.	Non concerné.	Le mouillage forain et sur corps morts peut être à l'origine d'une destruction de l'herbier si l'ancrage est réalisé en zone d'herbier.

Ainsi, sur le territoire du Parc, les activités anthropiques peuvent entraîner différentes pressions sur les herbiers pouvant être à l'origine d'une destruction directe ou indirecte des herbiers. Ces pressions sont principalement dans les secteurs concernés au sein du Parc :

- La destruction directe
 - Par piétinement
 - Par le mouillage d'ancres
 - Par la perte de surface dû à l'aménagement des côtes et aux installations ayant une emprise sur les fonds marins (pose de conduites/câbles dans le cas présent et passage d'engins)
- La destruction indirecte
 - Par la perturbation des fonds (dragage)
 - Par la perturbation des conditions hydrographiques et hydro-sédimentaires (modification du trait de côte, travaux d'aménagement...)
 - Par une augmentation de la turbidité des eaux
 - Par une modification de la chimie des eaux
 - Apports de polluants
 - Apports de nutriments

3.5.3 Recommandation de mesures de réduction des pressions au sein du Parc

La revue de la littérature réalisée a mis en évidence le caractère expérimental des mesures de restauration des herbiers de zostère. Ainsi, au regard de la séquence Eviter-Réduire-Compenser, le gestionnaire d'un espace présentant des herbiers de zostère devra privilégier dans ses choix et actions toutes les mesures permettant d'Eviter et de Réduire les impacts sur les herbiers. Cette logique doit permettre de limiter au maximum la perte d'herbier, leur restauration (mesures d'accompagnement) devant être envisagée comme dernière alternative compte-tenu de l'incertitude qui pèse sur la réussite des actions de restauration.

Dans cette logique, sont proposées ci-dessous et de manière prioritaire des mesures d'évitement et de réduction des impacts relatives aux pressions préalablement identifiées dans les secteurs du Parc ainsi que du suivi de la capacité de restauration passive de l'herbier. Par la suite, les conditions requises pour la restauration seront synthétisées dans la proposition d'une démarche globale que peut mener un gestionnaire.

Le tableau ci-dessous propose une synthèse des mesures de gestion pour l'évitement et la réduction des impacts potentiellement induits par les pressions liées aux activités réalisées à proximité des secteurs d'herbier de zostère du Parc. Les mesures de gestion proposées sont issues d'une analyse des impacts des activités par Seaboost et Isabelle Auby.

TABLEAU 16: PROPOSITIONS DE MESURES DE REDUCTION POUR L'EVITEMENT ET LA REDUCTION DES IMPACTS SUR LES HERBIERS DE ZOSTERE

Activités	Description et pressions potentielles exercées sur les herbiers	Mesures de gestion
Station de traitement des eaux usées domestiques	Apport de polluants Apport de nutriments Turbidité des eaux	Mesures d'évitement des impacts par une maîtrise à la source de la pollution rejetées.
Établissement industriel	Apport de polluants Apport de nutriments Turbidité des eaux	Mesures d'évitement des impacts par une maîtrise à la source de la pollution rejetées.
Conchyliculture	Destruction directe par piétinement/accès Destruction directe par les installations	Balisage de chemins d'accès Sensibilisation des conchyliculteurs, atelier d'échanges et de concertation avec les acteurs et usagers du territoire Contrôle des installations
Pêche à pied (loisir)	Destruction directe par piétinement Turbidité des eaux	Balisage des accès Sensibilisation des pratiquants et des visiteurs sur des points stratégiques aux zones de pêche à pied.
Activités balnéaires (fréquentation de plage)	Destruction directe par piétinement	Sensibilisation des pratiquants et des visiteurs sur des points stratégiques fréquentés, d'accès aux zones sensibles...
Dragage et gestion de sédiments	Turbidité des eaux	Évitement des zones situées à proximité des herbiers Minimisation des volumes de sédiments à déplacer Préservation des conditions hydrographiques naturelles Prise en compte des cycles de développement des espèces dans les travaux.
Infrastructures portuaires et côtières	Apport de polluants Modification des conditions hydrographiques et hydrosédimentaires Turbidité des eaux Destruction directe par emprise des infrastructures sur l'herbier	Sensibilisation des plaisanciers aux bonnes pratiques (gestion des eaux grises/noires, bonnes pratiques du mouillage...) Sensibilisation des plaisanciers aux herbiers de zostères Évitement des travaux et aménagement sur des zones à proximité des herbiers. Minimisation des modifications des conditions hydrographiques et hydrosédimentaires (minimisation des remaniements du trait de côte, protection perméables aux flux...)

<p>Mouillage</p>	<p>Destruction directe</p>	<p>Réorganisation des zones de mouillage en dehors des zones d'herbi d'interdiction du mouillage...) Balisage Sensibilisation des plaisanciers</p>
<p>Travaux en zones côtières</p>	<p>Turbidité des eaux Destruction directe (piétinement, passage d'engins...)</p>	<p>Minimisation des voies d'accès et passages d'engins Evitement des travaux et aménagement sur des zones à proxim d'herbier. Suivi de la capacité de restauration passive des herbiers</p>

3.5.4 Conditions requises pour l'application de mesures de restauration des herbiers de zostère au sein du Parc

Dans le cas où les mesures d'évitement et de réduction des impacts ne permettent pas l'évitement total d'effets sur les herbiers, le gestionnaire de site et/ou maître d'ouvrage pourra mettre en place des actions de restauration et des mesures d'accompagnement dans le cadre de la compensation des impacts.

Au regard de l'inventaire des protocoles de restauration réalisés en 1.2., compte-tenu du caractère expérimental des protocoles, d'une maîtrise encore partielle de ces protocoles et d'une répliation faible voire nulle de ces derniers, il n'est pas possible de tirer des conclusions significatives quant aux conditions indispensables au déploiement de ces protocoles spécifiques.

De même, il paraît compliqué de projeter ces protocoles dans le périmètre du Parc au regard données disponibles quant aux dynamiques hydro-sédimentaires (exposition aux vagues et courants, vitesse de courants, force des vagues, nature sédimentaire, granulométrie, dynamiques côtières...), à la bathymétrie et aux activités et usages sur ce périmètre.

L'analyse de l'évolution historique de l'occupation des herbiers de zostère dans le Parc est également une donnée clé qui permet de comprendre les conditions nécessaires à sa survie et les raisons de sa dégradation et/ou progression pour finalement aboutir à la sélection des sites les plus appropriés à sa restauration.

En revanche, il est rappelé ci-dessous les prérequis à toutes actions visant la restauration d'écosystèmes côtiers situés en zones subtidale et intertidale :

- La maîtrise de la pression à l'origine de la perturbation/destruction des herbiers de zostère est un prérequis indispensable à l'action de restauration (ex : fin d'une remise en suspension des sédiments, fin de la perturbation directe des herbiers due à un piétinement, passage d'engins..., maîtrise de la qualité d'un rejet, etc...) Le niveau de maîtrise de la pression doit permettre d'envisager le retour et la survie de l'herbier dans ce contexte.
- La restauration d'un contexte hydro-sédimentaire (vitesse de courants, flux sédimentaires, exposition aux vagues) favorable à l'installation et à la survie des herbiers est indispensable pour le succès d'une action de restauration.

Plus spécialement au regard de l'inventaire des protocoles de restauration actives des herbiers, des conclusions tirées de l'analyse de l'évolution historique des herbiers réalisée en Prestation 1 et des observations sur le terrain (Seaboost, septembre 2019) on prêtera une attention particulière aux points suivants pour la sélection du site à restaurer :

- aux chenaux d'écoulement préférentiels sur la zone à restaurer ;
- à la fluidité des vases ;
- à la turbidité des eaux dans la zone à restaurer ;
- à l'historique de la zone en termes de progression/régression des herbiers et les causes sous-jacentes à ces évolutions
- à la qualité des eaux

3.6 Compilation des mesures dites « compensatoires connues » voire déployées et prospectives/perceptives possibles

Cette partie se concentre sur le volet de la compensation des impacts sur les herbiers de zostères, volet considéré dans le cas où les mesures prises ne permettent pas d'éviter totalement les impacts résiduels sur les herbiers de zostères. Le cadre réglementaire des mesures compensatoires est d'abord présenté puis un inventaire des mesures déployées est réalisé, inventaire dans lequel la position des actions dans ce cadre réglementaire est précisé.

3.6.1.1 Réglementation applicable

La notion de compensation écologique s'inscrit dans la séquence Eviter, Réduire, Compenser (ERC) qui constitue le fil directeur de l'intégration environnementale des projets. En France, cette séquence est inscrite dans le corpus législatif réglementaire depuis la loi du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature et a été confortée par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 8 août 2016 (Commissariat général au développement durable, 2018)⁹².

La séquence « éviter, réduire, compenser » a pour objectif d'établir des mesures visant à éviter les atteintes à l'environnement, à réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, à compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits.

Les principes de la séquence ERC au regard des mesures de compensation définis dans la loi pour la reconquête de la biodiversité sont les suivants :

- **L'équivalence écologique** avec la nécessité de « compenser dans le respect de leur équivalence écologique » : cela implique une équivalence de milieux/d'espèces ou dans une moindre mesure de fonctionnalités (le nouvel habitat doit remplir certaines fonctions de l'habitat détruit) et une équivalence surfacique (la compensation doit s'effectuer sur une surface a minima équivalente).
- L'objectif d'« **absence de perte nette voire de gain de biodiversité** » représenté par la figure suivante :

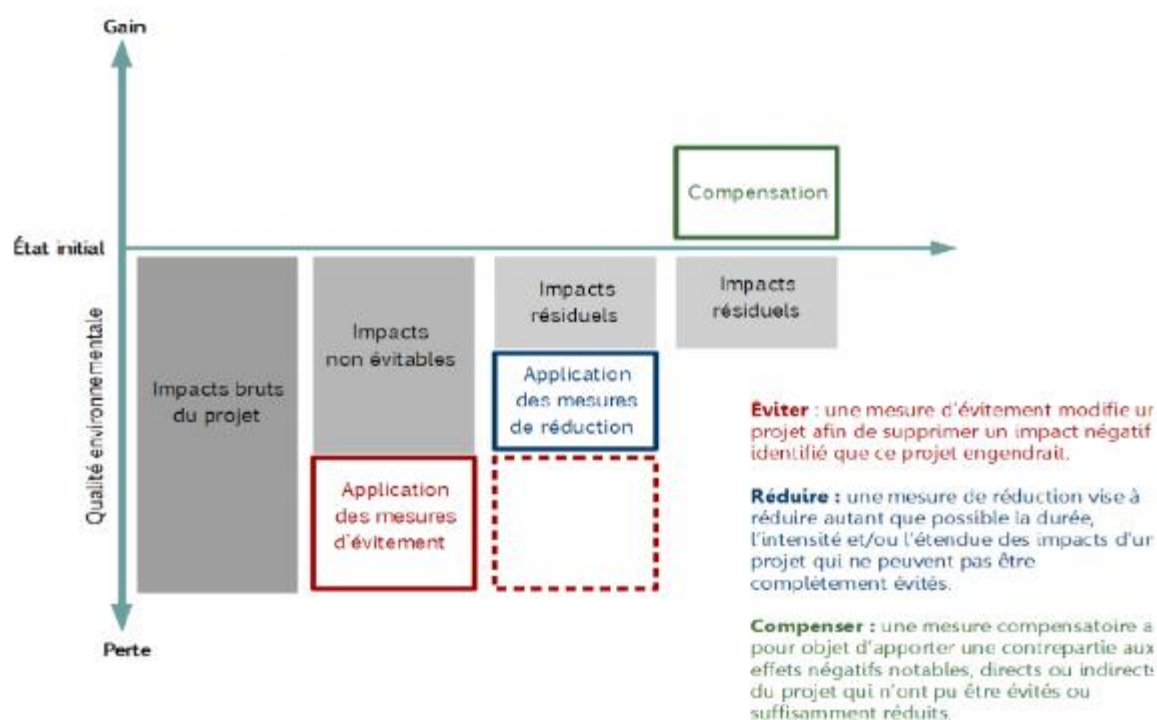


FIGURE 74: SCHEMA DE LA SEQUENCE ERC.

Source : Commissariat général au développement durable, 2018

⁹² Commissariat général au développement durable. (2018). Evaluation environnementale – Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.

- Le corollaire de ce principe est l'absence de perte nette, la compensation **doit être additionnelle**, elle doit porter une plus-value démontrée par rapport à l'état initial. (Dupont & Lucas, 2017)⁹³
- La **proximité géographique** avec la priorité donnée à la compensation « sur le site endommagé ou, en tout état de cause, à proximité de celui-ci afin de garantir ses fonctionnalités de manière pérenne ». Sur ce point, des retours d'expérience ont montré que la compensation sur site aboutissait à la création d'habitats différents, isolés et difficiles à gérer. Une action de compensation hors site avec une perspective fonctionnelle et paysagère semble alors plus adaptée en termes écologiques qu'une compensation sur site (Dupont & Lucas, 2017).
- L'efficacité avec « **l'obligation de résultats** » pour chaque mesure compensatoire
- **La pérennité avec l'effectivité des mesures de compensation « pendant toute la durée des atteintes »**. Sur ce point, la durée des impacts va dépendre du type d'écosystème et de sa résilience. Pour des projets d'artificialisation des sols par exemple, les impacts seront a priori permanents, ainsi les compensations doivent perdurer à perpétuité.

Par ailleurs, l'article L163-1 du Code de l'environnement indique que « *Toute personne soumise à une obligation de mettre en œuvre des mesures de compensation des atteintes à la biodiversité y satisfait soit directement, soit en confiant, par contrat, la réalisation de ces mesures à un opérateur de compensation défini au III du présent article, soit par l'acquisition d'unités de compensation dans le cadre d'un site naturel de compensation défini à l'article L. 163-3.* » De même « *Dans tous les cas, le maître d'ouvrage reste seul responsable à l'égard de l'autorité administrative qui a prescrit ces mesures de compensation* » (Legifrance, 2021)⁹⁴

Selon le guide d'aide à la définition des mesures ERC (Commissariat général au développement durable, 2018), une mesure peut être qualifiée de compensatoire lorsqu'elle remplit ces trois conditions nécessaires :

- **Disposer d'un site par la propriété ou par contrat**
- et Déployer des mesures techniques visant à **l'amélioration de la qualité écologique** des milieux naturels (restauration ou réhabilitation) ou visant à **la création de milieux** ou **modifier les pratiques de gestion antérieures** ;
- et Déployer **des mesures de gestion** pendant une durée adéquate

Une action qui ne comprendrait pas les trois éléments précités ne pourrait être reconnue comme une mesure de compensation. Les actions ne constituant par une mesure de compensation au regard de ces éléments sont indiquées comme des **mesures d'accompagnement**.

Les **mesures d'accompagnement n'apparaissent pas dans les textes législatifs et réglementaires. C'est une mesure qui vient compléter une mesure de la séquence ERC mais elle n'est pas suffisante pour assurer une compensation**. Toutes les mesures qui ne peuvent se rattacher à des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation appartiennent à ce type de mesures. Ces mesures additionnelles peuvent faciliter l'acceptation du projet.

A ce titre, les mesures de compensation correspondent aux mesures faisant appel à une action sur un site maîtrisé sur le long terme (par propriété, contrat ou servitude) par (DREAL PACA et Occitanie, 2018)⁹⁵:

- La **création d'habitat ou d'un milieu**
- OU la **restauration/réhabilitation d'un habitat/milieu**

⁹³ Dupont V., Lucas M., (2017). La loi pour la reconquête de la biodiversité : vers un renforcement du régime juridique de la compensation écologique ?. <https://doi.org/10.4000/cdst.548>

⁹⁴ Article L163-1 Compensation des atteintes à la biodiversité. Legifrance. < https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033025728/#:~:text=I.,II%20de%20l'article%20L.&text=Les%20mesures%20de%20compensation%20des%20atteintes%20C3%A0%20la%20biodiversit%C3%A9%20visent,voire%20de%20gain%20de%20biodiversit%C3%A9.> Dernière consultation : 03/2021.

⁹⁵ DREAL PACA et DREAL Occitanie, (2018). Guide cadre Eval_Impact. Impacts des projets d'activités et d'aménagements en milieu marin méditerranée. Recommandations des services instructeurs. Fascicule 3 – Mise en œuvre de la séquence Eviter, Réduire et Compenser : focus sur l'application de mesures compensatoires en mer. Ed. CO2 Communication.

- **OU l'évolution des pratiques de gestion** : il s'agit d'actions permettant d'assurer une gestion optimale d'un milieu, des espèces et de leurs habitats et permettant un gain substantiel des fonctionnalités du site

Selon d'autres sources, la préservation ou gestion de sites existants où l'objectif visé est de restaurer puis maintenir une protection du site peut également constituer une mesure de compensation (Cerema, 2016⁹⁶; Souquet & Sibora, 2018⁹⁷).

Les mesures d'accompagnement seront du type (Commissariat général au développement durable, 2018) :

- Mise en place d'une préservation par maîtrise foncière sans mise en œuvre d'actions de restauration ou de création d'habitat.
- mise en place d'une protection réglementaire ;
- mesure de rétablissement de certaines fonctionnalités écologiques (avec équivalence écologique non garantie, forte incertitude de résultats...) ;
- mise en place ou participation au financement d'actions ou de structures diverses ;
- mise en place d'actions expérimentales présentant de fortes incertitudes de résultat ;
- action de gouvernance, de sensibilisation, de communication ou de diffusion de connaissances ;
- aménagement paysager contribuant à assurer l'intégration de l'ouvrage dans le territoire.

3.6.1.2 Le cas de la compensation en mer

Selon les DREAL PACA et Occitanie (DREAL PACA et Occitanie, 2018), en mer, la seule mesure qui remplisse l'ensemble des critères est « la création et la gestion dans la durée d'un espace protégé (sur une surface égale ou supérieure à celle impactée par le projet) de même habitat sur des zones à forts enjeux de conservation à proximité fonctionnelle du site du projet. » Aucune mesure telle n'existe à ce jour.

Ainsi, dans ce document des DREAL PACA et Occitanie, il est proposé de distinguer les mesures de niveau 1 et de niveau 2 : les mesures de niveau 1 se rapprochent le plus des critères de compensation et sont donc prioritaires, celles de niveau 2 sont moins ambitieuses et répondent partiellement aux critères d'équivalence et d'additionnalité.

Mesures de niveau 1 :

- **Les mesures de création/préservation** : La création et la gestion sur le long terme d'espaces protégés de surface égale ou supérieure à la surface impactée par le projet, de même habitat, sur des zones à forts enjeux de conservation à proximité fonctionnelle du site du projet.
- **Les mesures permettant une évolution des pratiques et de gestion** : Les actions de gestion à proximité géographique et fonctionnelle de l'espèce/habitat dégradé permettant une meilleure protection des habitats et de leurs fonctionnalités. Exemple : gestion des usages (mouillage, navigation, pêche)

Mesures de niveau 2 :

- **Les mesures de réhabilitation écologique** permettant de rétablir une ou plusieurs fonctionnalités de l'habitat dégradé (récifs artificiels, nurseries artificielles..) à condition que les pressions soient maîtrisées.

⁹⁶ CEREMA, (2016)- Note d'information. Mesures compensatoires des impacts sur les milieux naturels. Collection Connaissances.

⁹⁷ SOUQUET, M., SIBORA, N. (2018) - Guide méthodologique de l'étude d'impact environnemental des projets et de la mise en œuvre de la séquence ERC (Éviter-Réduire-Compenser) en Nouvelle-Calédonie. Communauté du Pacifique et provinces de Nouvelle-Calédonie. 123 p. + annexes.

Dans le cas des mesures 1 et 2, le maître d'ouvrage doit respecter au maximum les principes liés à la compensation. La réussite de ces mesures étant fortement dépendante du contexte local, les études préalables à la mise en œuvre des mesures (état initial, consultation, cadrage) sont essentielles.

3.6.1.3 Le cas complexe des mesures compensatoires pour les herbiers de zostères : la mise en œuvre de mesures d'accompagnement

Selon les définitions et le cadre réglementaire précisés ci-dessus, il apparaît qu'aucune action, existante à ce jour relative aux herbiers de zostères, ne remplit strictement l'ensemble des critères requis pour pouvoir être définie comme une mesure compensatoire telle que décrite dans les textes réglementaires. Par ailleurs, aucun retour d'expérience sur une mesure compensatoire stricte relative à de l'herbier de zostères n'a pu être trouvé.

Les mesures actuelles appliquées aux herbiers de zostères ne remplissent que partiellement les critères que doit satisfaire une action pour être décrite comme une mesure compensatoire. **Les actions déployées à ce jour sont donc des mesures d'accompagnement.**

En conséquence, **les mesures d'évitement et de réduction des impacts sur l'herbier de zostère sont à mettre en place en priorité afin de limiter les impacts que les connaissances actuelles ne permettent pas de compenser.**

Le tableau ci-dessous synthétise le type de mesures à mettre en œuvre par un porteur de projet dans le cadre de la réglementation liée à la compensation en mer :

TABLEAU 17: MESURES A METTRE EN OEUVRE PAR UN PORTEUR DE PROJET DANS LE CADRE DE LA DE LA SEQUENCE ERC

Niveau de la mesure	Type	Remarques
Mesures d'évitement	<ul style="list-style-type: none"> Evitement des périodes les plus sensibles, changement de la zone du projet 	PRIORITÉ 1
Mesures de réduction	<ul style="list-style-type: none"> Mise en œuvre de dispositif anti-turbidité, anti-bruit... Transplantation* 	PRIORITÉ 2
Mesures de niveau 1	<ul style="list-style-type: none"> Protection et gestion d'espaces protégés Evolution des pratiques de gestion 	Mesures qui respectent un maximum de principes de la doctrine ERC
Mesures de niveau 2	<ul style="list-style-type: none"> Réhabilitation écologique 	Mesures qui respectent a minima les principes de : efficacité, faisabilité, proximité fonctionnelle et pérennité
Mesures transversales	<ul style="list-style-type: none"> Acquisition de connaissances Opérations de sensibilisation Opérations de R&D 	Mesures additionnelles aux mesures de niveau 1 et 2

Source : DREAL PACA et Occitanie, 2018

Par ailleurs, les mesures suivantes sont à éviter (DREAL PACA et Occitanie, 2018) :

- des opérations de transplantation dont l'inefficacité a été démontrée ;
- des mesures sans proximité fonctionnelle et géographique avec l'espèce ou l'habitat détruit ;
- des mesures réglementaires qui ne sont pas en cohérence avec la politique de l'Etat en mer ;
- des mesures menées sans la concertation des acteurs locaux, techniquement irréalisables ;

- la mise en place de zones protégées sans y associer une structure de gestion ainsi que les moyens financiers et humains nécessaires.

3.6.1.4 Inventaire des mesures d'accompagnement déployées

Les protocoles de restauration inventoriés ci-avant ne semblent pas pouvoir être considérés comme des mesures compensatoires au regard des critères d'équivalence, d'additionnalité et d'obligation de résultats que doivent remplir ce type de mesures. En effet, les actions de restauration présentent un niveau de maturité et de maîtrise trop bas pour pouvoir satisfaire ces critères. Ces actions peuvent en revanche constituer des mesures d'accompagnement (opérations de R&D).

Ci-dessous sont donc inventoriées diverses mesures qui revêtent le caractère de mesures d'accompagnement et notamment :

- des actions menées en lien avec l'herbier de zostères pouvant revêtir le caractère de mesures d'accompagnement ;
- des mesures d'accompagnement mises en œuvre en Méditerranée pour la gestion et la préservation de l'herbier de Posidonie et dont les objectifs rejoignent ceux de mesures qui seraient mises en œuvre pour les herbiers de zostères ;
- des mesures d'accompagnement globales, applicables pour diverses espèces/écosystèmes.

Les mesures sont inventoriées selon les classes suivantes :

- les mesures de sensibilisation du public ;
- les mesures visant au développement et au partage des connaissances sur les herbiers ;
- les mesures visant une évolution des pratiques de gestion ;
- les actions de R&D et projets expérimentaux.

Ces actions sont issues de la littérature et notamment :

- du projet VALMER (Ballé-Bréganton et al, 2015)⁹⁸ conduit sur un site du Golfe du Morbihan. L'objectif global de ces mesures a été de co-construire avec les acteurs du territoire des propositions de gestion adaptées et partagées afin de conserver les herbiers de zostères tout en maintenant les activités maritimes littorales ;
- de mesures d'accompagnement menées en Méditerranée pour l'herbier de Posidonie et dont l'application pourrait être envisagée dans le cadre de mesures relatives à l'herbier de zostères (DREAL PACA et Occitanie, 2018) ;
- de mesures d'accompagnement applicables de manière générale (DREAL PACA et Occitanie, 2018).

TABLEAU 18: INVENTAIRE DE MESURES D'ACCOMPAGNEMENT

Mesures de sensibilisation du public
<ul style="list-style-type: none"> • Construction de supports de communication à destination des usagers et visiteurs du site : livret, film, atlas géographique, disposition de panneaux informatifs aux abords des sites fréquentés... • Actions de sensibilisation des publics via des associations, des institutions et structures de gestion de la zone côtière (visites de site, intervention dans les écoles, intervention dans les ports, sur les plages...)
Mesures visant au développement et au partage des connaissances sur les herbiers
<ul style="list-style-type: none"> • Constitution d'une boîte à outils avec rapport, fiches de synthèse, plateforme d'intégration des connaissances ZOSTERA...

⁹⁸ Ballé-Béganton, J., J. Herry, M. Philippe, R. Pasco, B. Angst, M. Urien, D. Bailly, M. Cassé, Les services écosystémiques en soutien à la gestion des herbiers de zostères du golfe du Morbihan, Projet Interreg IVA Manche VALMER, mars 2015, 14p.

- Atelier d'acquisition de connaissances par la réunion d'experts et de gestionnaires pour croiser les regards sur les problématiques de conservation des herbiers.
- Atelier regroupant des acteurs du territoire et usagers du domaine maritime : partage des connaissances et des problématiques liées à la conservation des herbiers.
- Développement d'un réseau de suivi environnemental et mise à disposition publique des données collectées.

Mesures visant une évolution des pratiques de gestion

- Ateliers thématiques relatifs à chaque usage du domaine maritime et les interactions potentielles entre les herbiers et les usagers afin d'identifier des mesures de gestion en faveur de préservation des herbiers.
- Atelier d'établissement de scénario et de proposition de stratégies de gestion et de sensibilisation à l'échelle du territoire/de la zone d'enjeu.
- Organisation des mouillages (ZMEL, zones d'interdiction des mouillages...)

Actions de R&D et projets expérimentaux

- Toutes les opérations expérimentales décrites ci-dessus visant à la restauration des herbiers de zostères
 - Transplantation de zostères
 - Restauration par ensemencement
 - Autres innovations
- Actions visant à la restauration de quelques fonctionnalités écologiques des herbiers (déploiement de nurseries artificielles, de Solutions fondées sur la Nature pour la maîtrise de l'érosion côtière et de l'hydrodynamisme côtier...)
- Mise en place de mouillages innovants

3.7 Synthèse : Déroulement de la séquence ERC dans le cadre de travaux et conditions d'applications au sein du périmètre du Parc

Dans ce chapitre est proposée la démarche de réflexion que peut adopter un maître d'ouvrage ou un gestionnaire d'un espace occupé par des **herbiers de zostères et susceptible d'être impacté directement ou indirectement dans le cadre de travaux**. Cette démarche repose sur la séquence Eviter-Réduire-Compenser, séquence inscrite dans le corpus législatif réglementaire sur la protection de la nature. Elle constitue le fil directeur de l'intégration environnementale des projets (Commissariat général au développement durable, 2018)⁹⁹.

Cette démarche de réflexion est construite selon les principes suivants :

- les mesures d'évitement et de réduction des impacts sont à considérer de manière prioritaire dans le projet pour la conservation des herbiers de zostères ;
- les actions de restauration sont à considérer en dernier recours dans le projet compte-tenu des points cités ci-dessus ;
- le caractère expérimental des actions de restauration, leur faible degré de maturité et l'incertitude qui pèse sur le succès de ces actions ne permettent pas de qualifier ces actions comme des mesures compensatoires ;
- les mesures compensatoires telles que définies dans la loi ne sont pas applicables aux herbiers de zostères car les mesures existantes ne remplissent pas tous les critères requis, La compensation est abandonnée au profit de mesures d'accompagnement.

La démarche se décline en deux temps :

⁹⁹ Commissariat général au développement durable. (2018). Evaluation environnementale – Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.

i. Mesures d'Évitement et de Réduction des impacts du projet

Ces mesures sont prioritaires et à définir le plus en amont possible du projet. Ces mesures ciblent en effet les plans du projet/des infrastructures ainsi que les procédés de mise en œuvre et de travaux. Plus ces éléments sont considérés en amont dans le projet, plus ils pourront être pris en compte dans la réalisation du projet. Une anticipation des impacts permettra d'éviter et de réduire au maximum les effets sur les herbiers.

TABLEAU 19: MESURES D'EVITEMENT ET DE REDUCTION DES IMPACTS DES ACTIVITES MENEES AU SEIN DU PARC

PRINCIPAUX IMPACTS POTENTIELS	MESURES D'ÉVITEMENT ET DE RÉDUCTION DES IMPACTS DANS LE CADRE DE TRAVAUX
Destruction directe par emprise des infrastructures et/ou des engins de travaux sur l'herbier	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement du projet hors zone d'herbier ou en zone plus lointaine • Optimisation des passages des engins: minimisation du piétinement des herbier, limitation du nombre d'aller/retour, passage en dehors et au plus loin des zones d'herbier • Optimisation des infrastructures: limitation de l'emprise au sol, optimisation des systèmes de pose. • Balisage des chemins d'accès à la zone de travaux
Augmentation de la turbidité des eaux	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation des volumes de sédiments à remanier • Minimisation de la perturbation des fonds marins (minimiser le passage d'engins de travaux à proximité de l'herbier, les opérations de pose/dépose d'éléments...) • Saisonnalité des travaux, préférer la saison hivernale, période de faible croissance des herbiers pour meilleure reprise à la belle saison. • Si travaux réalisés en pleine eau, adapter la temporalité des travaux par rapport au stade de marée (jusant, flot) en fonction de la situation du chantier par rapport aux herbiers.
Modification des conditions hydrographiques et hydrosédimentaires	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiser les volumes de sédiments à remanier • Minimiser l'emprise au sol des infrastructures • Conserver un maximum de perméabilité aux flux sur les infrastructures (notamment des structures traditionnelles de protection des côtes du type épis, brise-lame...) • Limiter les opérations de nivellement, de remaniement du trait de côte...pour conserver au maximum les profils hydrographiques et hydrosédimentaires naturels du trait de côte. • Eviter les travaux affectant les voies d'écoulement naturelles afin de conserver les flux d'eau, de sédiments et les vitesses de courant naturels.
Apport de polluants	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation des volumes de sédiments à remanier • Limitation de l'usage d'engins • Contrôle des sédiments introduits dans le milieu

Si ces mesures ne permettent pas l'évitement total d'impacts sur les herbiers, les mesures de restauration et de compensation sont à envisager. Compte-tenu du cadre réglementaire relatif à la compensation, on parlera ci-dessous de mesures d'accompagnement.

ii. Mesures d'accompagnement

Les mesures d'accompagnement correspondent à des actions qui ne remplissent pas l'ensemble des critères requis pour pouvoir être définies comme action de compensation (critères d'équivalence écologique, d'additionnalité, de résultat, de pérennité et de proximité géographique..

Les mesures d'accompagnement se déclinent selon les classes d'action suivantes :

- Les actions de restauration : actions expérimentales visant le retour des herbiers dans une zone donnée.

Présentés ci-avant, les protocoles de restauration font appel soit à la technique de transplantation de zostères (sous forme de plants individuels ou en mottes, à l'aide d'ancrage...) soit à l'ensemencement de graines préalablement récoltées. La sélection d'un protocole de restauration est à réaliser au regard :

- du contexte hydrosédimentaire du site à restaurer ;
- des moyens techniques et humains disponibles à proximité (engins, laboratoire...) ;
- de l'accessibilité du site ;
- de la volonté et de l'intérêt du gestionnaire pour l'expérimentation d'un protocole particulier.

Préalablement à l'exécution d'un protocole de restauration, les prérequis à remplir sont (1) la maîtrise et/ou la suppression de la pression à l'origine de la dégradation de l'herbier et (2) le retour de conditions environnementales et hydrosédimentaires favorables à la survie de l'herbier de zostère.

Au regard du caractère expérimental de ces actions, la plus-value d'un suivi écologique et d'un retour d'expérience est importante et à encourager.

Au sein du périmètre du Parc, une telle action est envisageable en mobilisant différents experts ainsi que les installations et laboratoires existants. Le site restauré peut faire l'objet d'une intégration aux stations déjà suivies dans le cadre des protocoles DCE.

La sélection d'un site de restauration est à réaliser en concertation avec les acteurs locaux ayant la meilleure connaissance de leur territoire et sur la base des données existantes (historique des dynamiques de recouvrement des herbiers dans la zone, nature de la perturbation ayant conduit à la dégradation des herbiers, niveau de maîtrise de la pression, conditions de houle, de courants, hydrodynamisme, voies d'écoulement...). Le choix d'un protocole de restauration particulier découle également des conditions sur le site à restaurer, les moyens disponibles et de l'intérêt du porteur de projet pour l'expérimentation d'un protocole.

- Les actions de sensibilisation du public

Ces actions visent à informer les visiteurs et usagers des espaces offerts par le Parc de l'existence des herbiers de zostères naines et des enjeux de leur préservation.

Certaines zones du Parc concentrent une importante activité touristique. Les sites d'intérêt et points de concentration des flux de visiteurs constituent des lieux privilégiés pour la sensibilisation des visiteurs aux enjeux de la préservation des herbiers, aux services écosystémiques qu'ils produisent et aux fonctionnalités écologiques qu'ils supportent.

Cette sensibilisation peut passer par des interventions directes, par la mise à disposition de flyers, panneaux informatifs, l'organisation d'excursions thématiques...

Les plages fréquentées, les points d'accès aux zones de pêche à pied, les ports de plaisance, les infrastructures du Parc type « Maison du Parc » sont autant de points stratégiques à privilégier pour la mise en place de mesures de sensibilisation telles que les panneaux informatifs, la diffusion de films, de fiches informatives, les interventions directes...

- Les actions visant au développement et au partage des connaissances sur les herbiers

Ces actions visent à produire de la connaissance, à combler les lacunes existantes sur les herbiers de zostères et à diffuser cette information.

Le Parc fédère de nombreux acteurs du territoire en interaction plus ou moins directe avec les herbiers de zostères naines. L'intégration des connaissances de chacun, des observations réalisées sur le terrain au sein d'une plateforme collaborative ainsi que l'organisation d'ateliers d'échanges sont autant d'actions qui permettront le développement et le partage de connaissances ainsi qu'un suivi précis des herbiers de zostères naines.

Le renforcement des suivis des secteurs d'herbiers peut également être réalisé en faisant appel aux dernières technologies (imagerie satellite, survol drone...). La structure du Parc peut également permettre la constitution

d'un laboratoire grandeur nature en étant le siège de l'expérimentation de différents protocoles de restauration des herbiers au même titre que l'a été la Baie de Chesapeake aux Etats-Unis.

➤ Les actions visant une évolution des pratiques de gestion

De nombreux acteurs évoluent au sein du Parc et impactent de diverses manières les herbiers de zostères naines. Ce sont notamment : les plaisanciers, les professionnels de la pêche, les touristes, les conchyliculteurs, les gestionnaires de ces espaces, la communauté scientifique, les maîtres d'ouvrage... A chaque niveau des évolutions des pratiques permettraient de limiter les impacts sur les herbiers. A titre d'exemple sont proposées quelques mesures :

- *La réorganisation des zones de mouillage*
- *L'expérimentation de mouillages innovants*
- *Les accès aux zones conchylicoles*
- *Les pratiques de pêche à pied et les accès à ces zones*
- *La sensibilisation aux bonnes pratiques au sein des ports*

Une concertation des acteurs au travers d'ateliers d'échanges peut être envisagée afin d'élaborer un plan d'actions visant une évolution vers des pratiques plus respectueuses des herbiers de zostères naines.

4. PRESTATION 3 : ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE RESTAURATION PASSIVE DE L'HERBIER DE LOIX

Cette troisième prestation a pour objectif d'analyser la dynamique naturelle de reprise des herbiers de zostères naines dans la zone dégradée mécaniquement. Plus spécifiquement, il s'agit d'acquérir des données *in situ* pour permettre de quantifier l'impact résiduel des travaux de 2018. La confrontation des données ici acquises aux données de 2018/2019 permet :

- (1) d'**évaluer l'évolution de l'état de santé des herbiers**, et donc la dynamique de restauration, mais aussi
- (2) de **mieux comprendre l'évolution de l'environnement physique** dans lequel évoluent les herbiers de zostères et donc les paramètres environnementaux susceptibles de limiter la croissance/reprise des herbiers.

Ce cas d'étude vise à proposer des pistes d'amélioration de la méthode de réalisation de ce type de travaux mais aussi, une fois les facteurs limitants la reprise bien identifiés, de conseiller des solutions favorisant une restauration efficace des herbiers de zostère. L'analyse conjointe des paramètres biologiques et environnementaux permet de poser les bases d'une réflexion poussée entre l'ensemble des parties prenantes à l'étude pour proposer :

- des indicateurs caractérisant les effets directs et indirects de destructions mécaniques sur les herbiers et,
- des mesures correctives visant la restauration du milieu (cf R&D, mesures d'accompagnement etc.).

4.1 Suivi de la restauration par acquisition d'images par drone

Cette prestation vise à constituer des cartographies (haute résolution) de l'herbier avant et après travaux à partir des données déjà acquises. Ces cartographies seront ensuite compilées pour identifier des zones de régression (ou de progression) de l'herbier août 2018 et septembre 2020. Les résultats permettront de quantifier les conséquences des travaux sur l'évolution de l'emprise spatiale des herbiers et de leur taux de recouvrement.

4.1.1 Matériel et méthodologie

Entre le 17 et le 22 septembre 2020 (période de développement maximal de l'herbier et grands coefficients (minimum 87, maximum 113) de marée), un survol drone a été effectué, par la société Reflet du Monde, dans le but de constituer une cartographie haute résolution de l'herbier dans le secteur de la fosse de Loix. La surface à couvrir a été divisée en 4 secteurs (Figure 9 - zones 1 à 4) pour des questions pratiques (remplacement des batteries, réalisation des survols sur plusieurs jours). De plus, une zone très localisée (Figure 9 - zone 5), qui correspond à la station C du suivi stationnel, a été survolée à basse altitude (20m) afin d'augmenter localement la précision pour comparer éventuellement les données issues du survol drone avec les données issues du suivi stationnel.

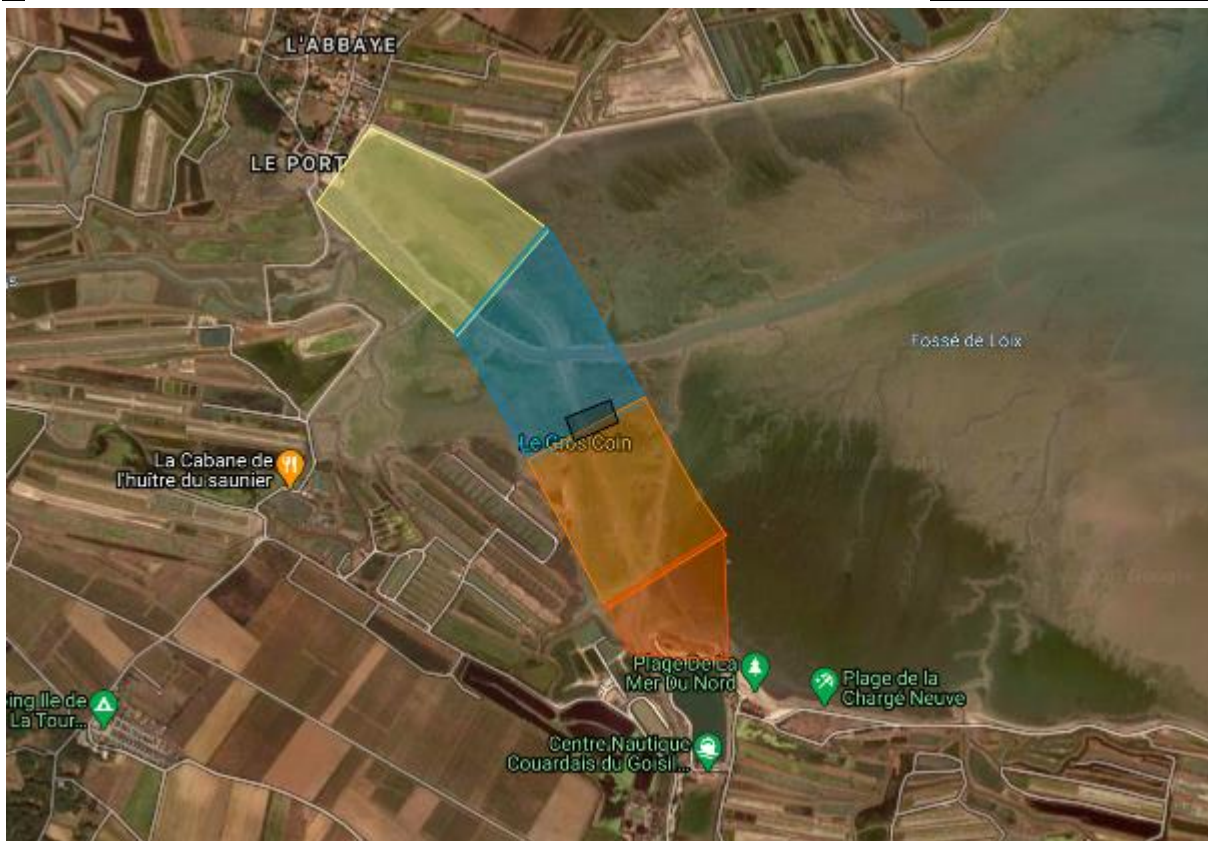


FIGURE 75: ZONE DE SURVOL GLOBALE DIVISEE EN 4 SECTEURS SE CHEVAUCHANT + 1 ZONE LOCALISEE. (SOURCE : MATHIS COGNAT , ADAPTE DE LILIAN MAROLLEAU, DYNAREST)

Le survol de la zone d'étude a été réalisé par un drone (DJI - Phantom 4 Multispectral) muni du capteur multi spectral Six CMOS de 1/2,9 pouce (dont un capteur RGB et cinq capteurs monochromes pour l'imagerie multispectrale) (Figure 76). Chacun de ces capteurs présente des pixels effectifs 2.08 MP (nombre total de pixels : 2,12 MP). Cet ensemble de capteurs est idéal pour convertir par la suite les données acquises en des métriques herbiers (emprise spatiale et taux de recouvrement selon les classes DCE). Il permettra l'acquisition d'une orthomosaique géoréférencée de résolution native de 2,5 cm pour la zone 1 à 4 et de 1,2 cm pour la zone 5.

Capteur embarqué utilisé pour la prestation :

- Filtres : bleu (B) : 450 nm ± 16 nm ; vert (G) : 560 nm ± 16 nm ; rouge (R) : 650 nm ± 16 nm ; red edge (RE) : 730 nm ± 16 nm ; infrarouge proche (NIR) : 840 nm ± 26 nm
- Taille d'image maximale : 1600x1300 (4:3.25)
- Formats de photo : JPEG (imagerie en lumière visible) + TIFF (imagerie multispectrale)
- Moyens de positionnement --> GNSS précision 0,5 mètres



FIGURE 76 : PHOTOGRAPHIE DU DRONE UTILISE POUR LE SURVOL (CREDIT PHOTO : LILIAN MAROLLEAU DE REFLET DU MONDE)

Pour obtenir une résolution native de 2,5 cm, le survol des zones 1 à 4 a été réalisé à 47 mètres de hauteur. Avec pour objectif d'obtenir une très haute résolution du secteur de la station B (cf. paragraphe 4.2), le survol de la zone 5 a été réalisé à 20 mètres de hauteur. Ce survol supplémentaire et non prévu initialement permet la mise en correspondance des résultats issus du survol drone avec ceux obtenus sur le terrain.

L'analyse multispectrale consiste à analyser la réflectance des végétaux, c'est à dire la lumière du soleil renvoyée par les végétaux, en se focalisant sur des bandes spectrales correspondant à des paramètres intéressants au niveau des plantes : taux de chlorophylle, stress hydrique, etc... grâce à des indices de végétation normalisés (de type NDVI, GNDVI, OSAVI). Ces indices comme le NDVI sont obtenus avec des données collectées par un ensemble de capteurs spécifiques (Aerial shop100). Par exemple, l'indice de végétation par différence normalisé, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (NIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge. $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$. La Figure 77 rend compte du principe de fonctionnement des capteurs multispectraux.

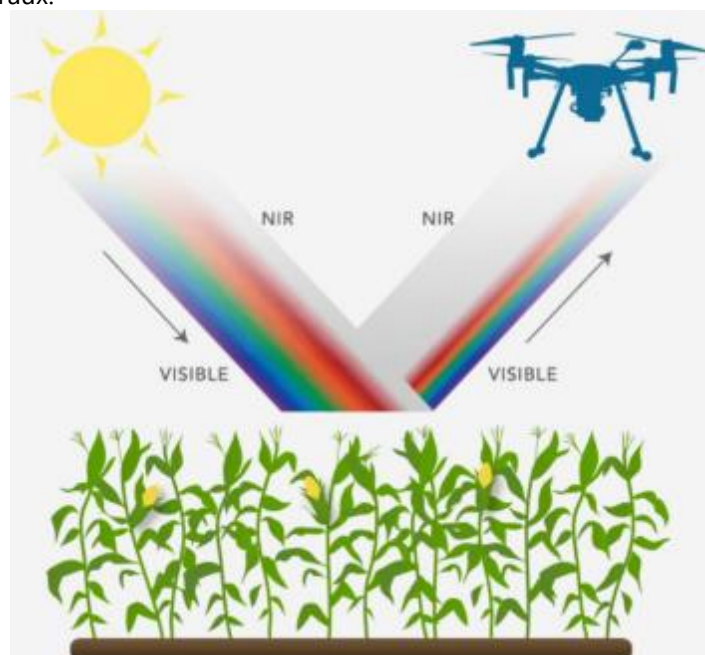


FIGURE 77 : SCHEMA DE PRINCIPE RELATIF A L'INDICE DE VEGETATION PAR DIFFERENCE NORMALISEE (SOURCE : AERIAL-SHOP)

¹⁰⁰ https://www.aerial-shop.com/fr/blog/2_a-quoi-sert-un-capteur-multispectral-.html

Un capteur multispectral capte des informations très spécifiques, dont certaines sont absolument imperceptibles par l'œil humain, notamment dans les domaines infrarouge et proche infrarouge. Ces longueurs d'ondes permettent de mieux caractériser l'état des plantes comme le montre la Figure 78. Le "Red-Edge" fait partie de ces bandes spécifiques.

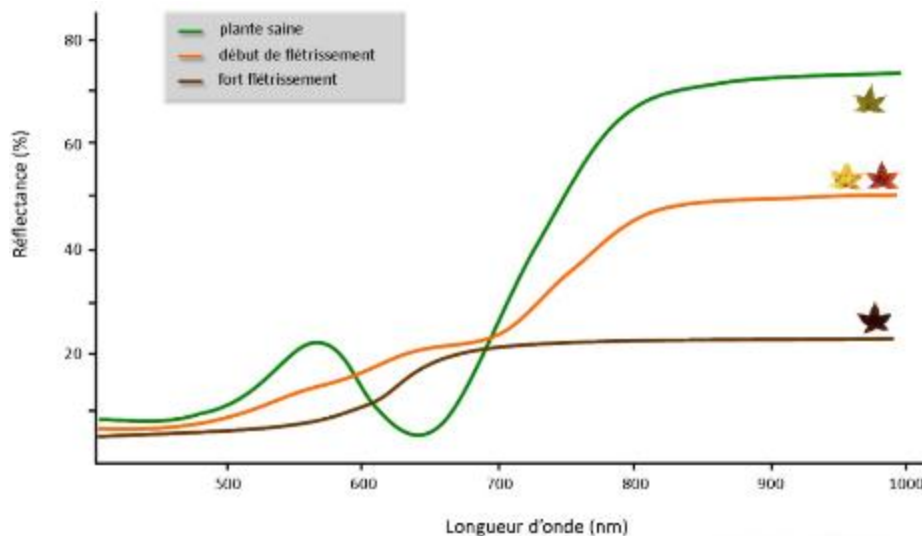


FIGURE 78 : REFLECTANCE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE POUR DIFFRENTS ETATS DE SANTE DE PLANTES

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0.

Préalablement à ces vols, des autorisations de vol ont été demandées et validées auprès de :

- la préfecture.
- la mairie de Loix.
- la gendarmerie de Loix .
- la DREAL Nouvelle-Aquitaine.
- le PNMEGMP.

Un mail de courtoisie, a aussi été envoyé par le PNM à la Communauté de Communes de l'île de Ré afin de prévenir de l'intervention et d'expliquer les objectifs du projet.

L'information a aussi été relayée à la DDTM.

Initialement prévus les 17/09/2020 (zones 1 et 2) et 18/09/2020 (zones 3 et 4), les survols ont finalement eu lieu, à cause de contraintes météorologiques (vitesse du vent supérieure à 40 km/h au niveau du sol) :

- de 9h30 à 13h30 le 17/09/2020 sur la zone 1
- de 12h15 à 16h20 le 21/09/2020 sur les zones 2 et 3
- de 13h15 à 16h15 le 22/09/2020 sur les zones 4 et 5

Au total, 38228 photos ont été réalisées pour couvrir l'ensemble des cinq zones.

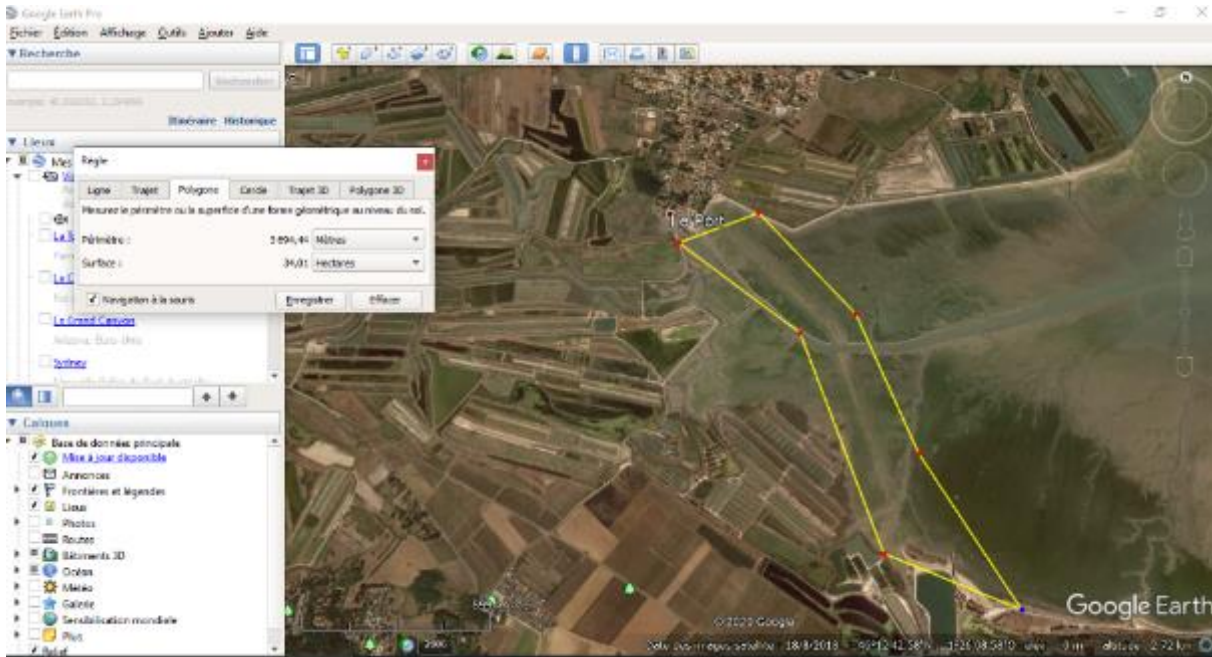


FIGURE 79 : ZONE DE SURVOL PAR DRONE (ENVIRON 40 HA)

4.1.2 Résultats

La Figure 80, à travers des zooms sur la station A, montre différents assemblages (RVB, GNDVI, OSAVI et NDVI) issus des multiples photographies acquises par les différents capteurs embarqués sur le drone. Ce traitement, nécessitant une importante puissance de calcul numérique, a été réalisé par Reffet du Monde.

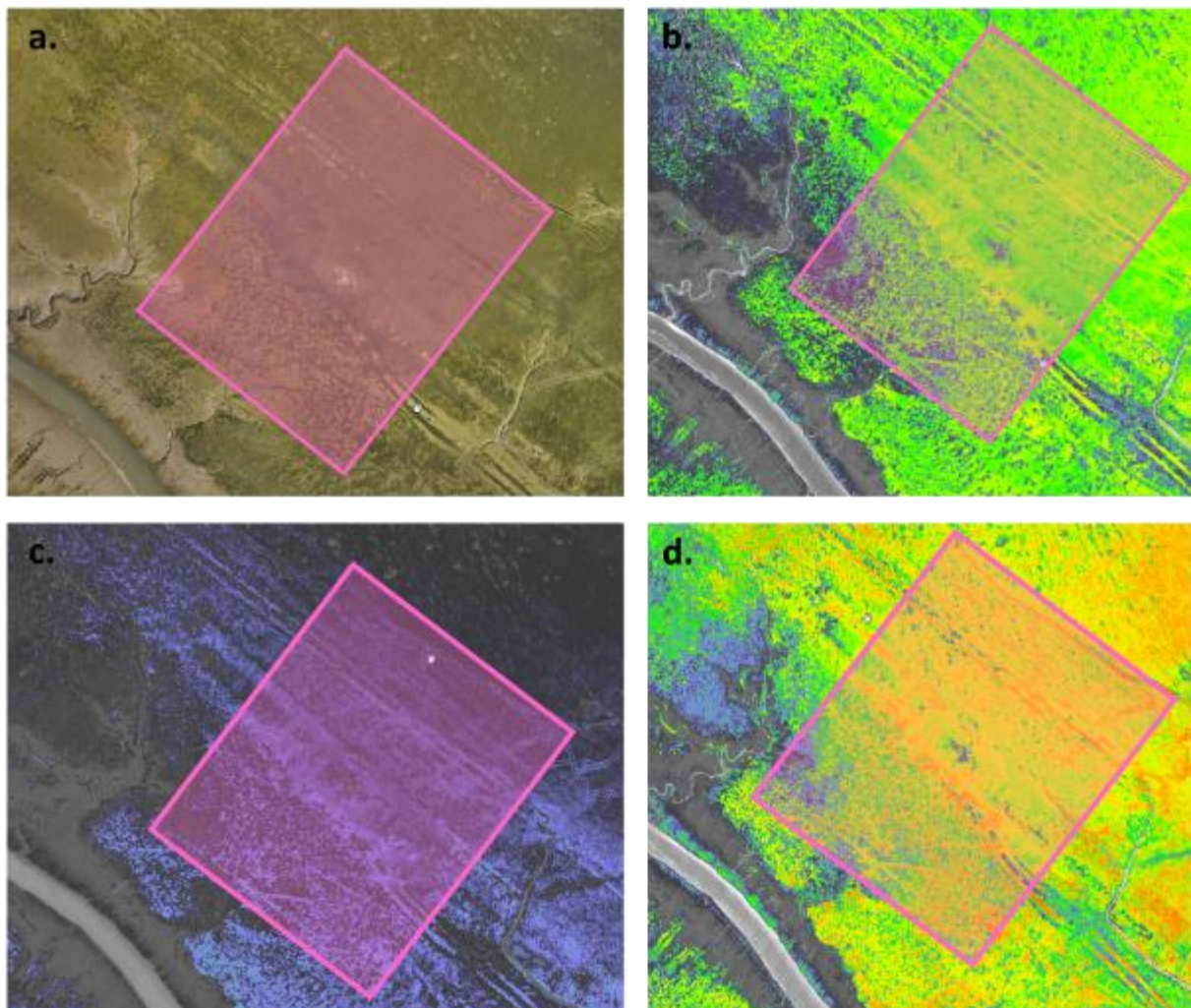


FIGURE 80: ORTHOMOSAÏQUE DU SECTEUR DE LA STATION A (CF. LE PARAGRAPHE CONCERNANT LE SUIVI STATIONNEL) ACQUISE AVEC LE CAPTEUR : (A.) RVB (B.) MULTI SPECTRAL GNDVI (C.) MULTI SPECTRAL OSAVI ET (D.) MULTI SPECTRAL NDVI.

L'orthomosaïque RVB obtenue (Figure 81) présente une rupture brutale dans la colorimétrie (une forte impression de « sombre »). Une zone est ensuite de nouveau bien éclairée. Cette forte hétérogénéité dans la radiométrie de l'image est problématique pour déduire l'enveloppe de l'herbier par une analyse prédictive (classification supervisée).

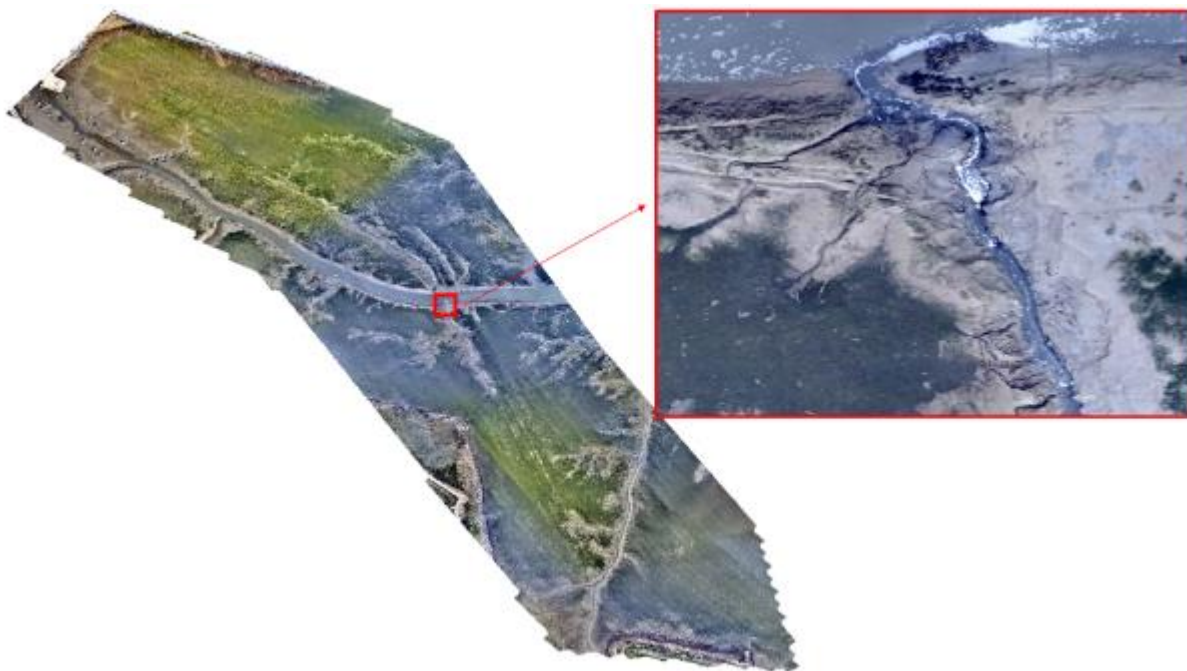


FIGURE 81 : EMPRISE DE L'IMAGE DRONE DE 2020 EXPLOITEE POUR L'ANALYSE DE L'ENVELOPPE D'HERBIER ET DES TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES DANS LA FOSSE DE LOIX AVEC UN ZOOM SUR UNE PORTION DE L'IMAGE

De ce fait, l'orthomosaique drone de 2020 a été traitée par i-Sea de la même manière que les orthophotographies d'archive, à savoir par photo-interprétation, pour caractériser l'enveloppe globale de l'herbier. De plus, le taux de recouvrement a été déterminé par analyse automatisée basée sur les relevés terrain. Les images multispectrales (RVB, GNDVI, OSAVI et NDVI) permettent de spatialiser les taux de recouvrement par prédiction statistique (modèle basé sur la connaissance terrain exclusivement) de manière plus robuste que la photo-interprétation.

La cartographie issue du traitement de l'orthomosaique est présentée en Figure 82. Au total, 1 750 048 polygones constituent le shape herbier réalisé dans l'emprise de l'image drone de 2020. Sur les 45.2 ha de la zone étudiée, 31.7 ha sont occupés par de l'herbier à zostères naines. Le nombre très élevé de polygones détectés sur secteur est lié à la résolution très fine de l'image drone.

Les surfaces occupées par chacune des classes de recouvrement sont reportées Figure 83. Une analyse approfondie de ces données est faite dans l'exposé de la Prestation 1.

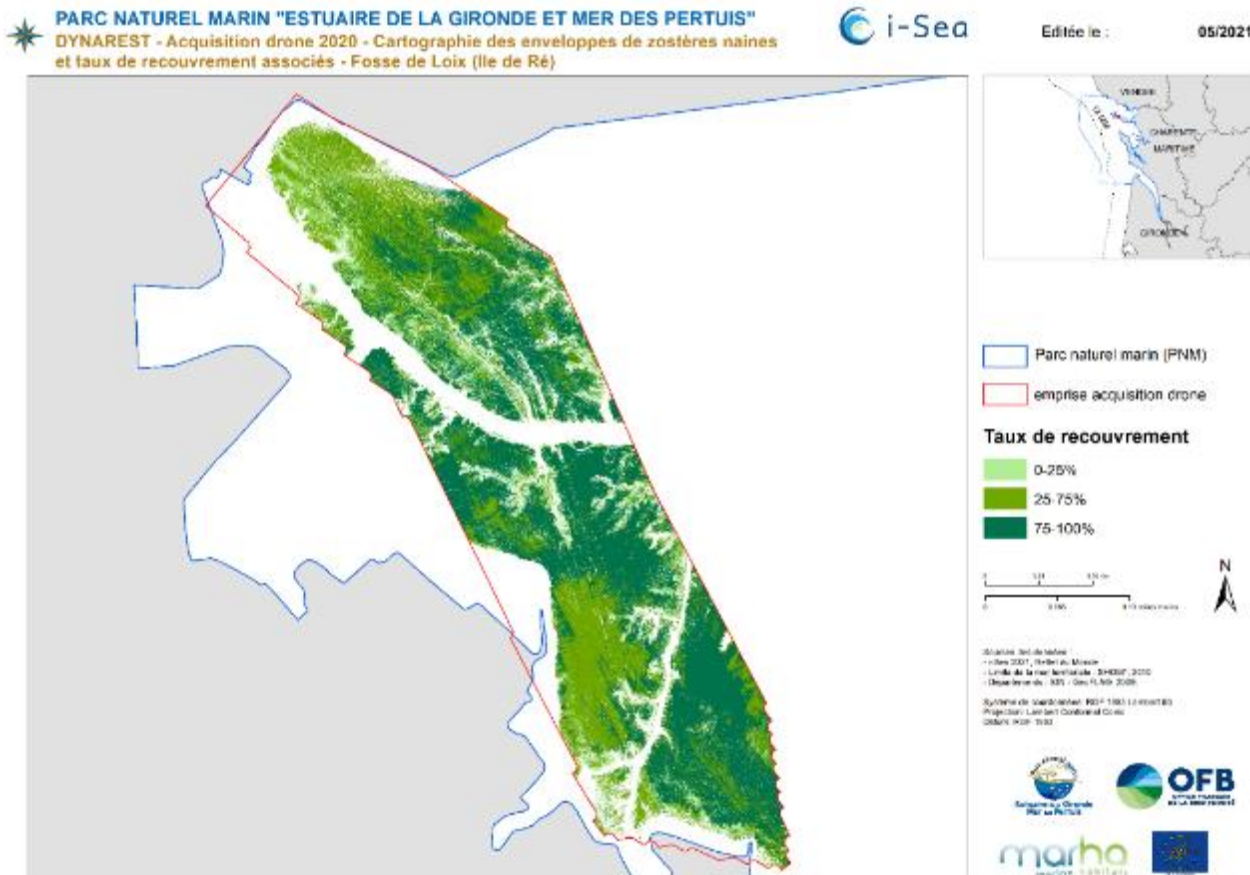


FIGURE 82 : CARTOGRAPHIE DES ENVELOPPES DE ZOSTERES NAINES ET TAUX DE RECOUVREMENT ASSOCIES OBTENUS PAR ANALYSE DE L'IMAGE DRONE DE 2020 SUR LE SECTEUR DE LA FOSSE DE LOIX

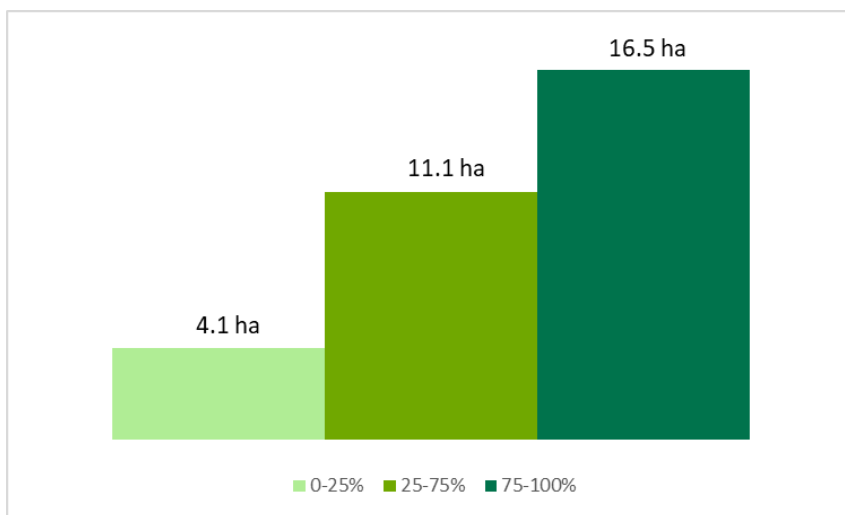


FIGURE 83 : REPARTITION DES SURFACES DES TROIS TAUX DE RECOUVREMENT DRONE 2020 DANS LA FOSSE DE LOIX

o o

4.2 Suivi de la restauration selon le protocole DCE stationnel

L'objectif de cette prestation est de quantifier l'état de santé des herbiers de zostère naine en vue de mieux comprendre la dynamique de restauration spontanée des herbiers dans la zone impactée par les travaux d'installation de la conduite de 2018 mais aussi d'identifier les paramètres de l'environnement qui pouvant influencer cette restauration. Pour ce faire, quatre stations de 100x80m ont été suivies en se basant sur le protocole Directive Cadre sur l'Eau (Auby *et al.*, 2018). Trois des stations sont placées dans la zone impactée par les travaux tandis qu'une sert de station « témoin ».

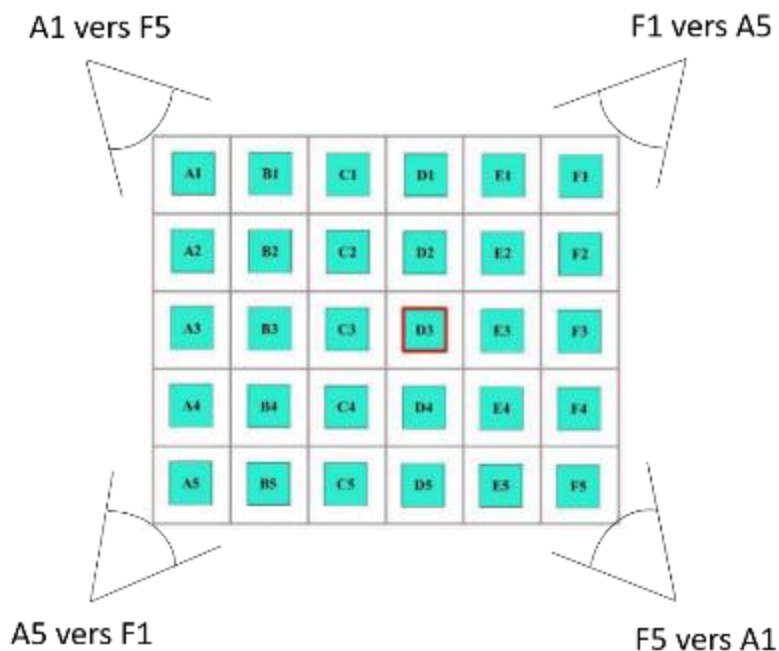
4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Stratégie générale d'échantillonnage

Le géoréférencement des stations a été réalisé avec le logiciel QGIS 3.8.3-Zanzibar (Figure 85) qui est un Système d'Information Géographique (SIG) convivial distribué sous licence publique générale GNU. C'est un projet officiel de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo). Il est compatible avec Linux, Unix, Mac OS X, Windows et Android et intègre de nombreux formats vecteur, raster, base de données et fonctionnalités.

Chacune des stations a été échantillonnée selon le protocole DCE (Auby *et al.*, 2018), à savoir :

- Quatre photographies générales de la station réalisées en chacun des coins avec visée vers le coin opposé diagonalement (ces photographies ont été réalisées au fur et à mesure des points de passage afin de limiter les déplacements et donc le piétinement de la zone).



- Prise de note pour relever les points remarquables : traces, piscines tidales, uniformité de l'herbier, débris coquillé, amas de macroalgues, ...
- En chacun des 30 points de la station :
 - o le quadrat est positionné en centre de maille
 - o présence des trois types de macroalgues est rapportée
 - o un cliché photographique est réalisé photo à l'ombre d'un parapluie en cas de soleil

- les macroalgues sont retirées et une seconde photographie est faite. L'échantillonnage des macro-algues a été réalisé 6 fois par station.
- le taux de recouvrement est estimé visuellement selon les classes du protocole
- Les analyses granulométriques en réalisant un pool de trois carottes sédimentaires prélevées aléatoirement dans la zone de la station DCE suivie. L'échantillon est ensuite placé dans une glacière réfrigérée envoyée au laboratoire d'analyse.
- Prélèvement de 9 carottes de sédiments pour analyses des teneurs en matière organique. Les carottes sont placées dans des pots pour envoi au laboratoire d'analyse par glacière réfrigérée.

4.2.1.2 Calendrier des opérations de suivi

Les stations suivies pour la Directive Cadre sur l'Eau (17 stations - 2 sur l'île de Ré) sont échantillonnées annuellement et ce, toujours en fin de saison estivale lorsque le développement de l'herbier est maximal. Bien qu'il ne soit pas encore question que le suivi soit réalisé annuellement pour les stations du projet DYNAREST, il convient de respecter la saisonnalité du protocole pour obtenir des données en cohérence et intégrables dans la base de données Quadrigé².

Dans le cadre du projet DYNAREST, l'acquisition des données sur le terrain a eu lieu le jeudi 17 et le vendredi 18 septembre 2020. Le Tableau 3 présente les paramètres tidaux et météorologiques de ces deux journées.

TABLEAU 20: PARAMETRES METEOROLOGIQUES ET DE MAREES LORS DES ACQUISITIONS DE DONNEES SUR LE TERRAIN

	Heure de basse mer	Coefficient	Météo	Coefficient	Vitesse du vent
17/09/2020	11h29	104	Nuage/soleil	104	25 km/h
18/09/2020	12h13	112	Nuage/soleil	112	24 km/h

4.2.1.3 Positionnement des stations

Une station est constituée d'une grille de 30 points répartis régulièrement sur l'herbier suivi. Pour un herbier de grande taille, l'étendue de la grille pourra être de 100 m x 80 m, formée de 5 lignes sur 6 colonnes (ou 6 lignes sur 5 colonnes), tous les points étant espacés de 20 m. Un point (X, Y) est codifié de manière unique par un code lettre-chiffre. La figure 12 présente une codification allant du code A1 au code F5 (Auby *et al.*, 2018).

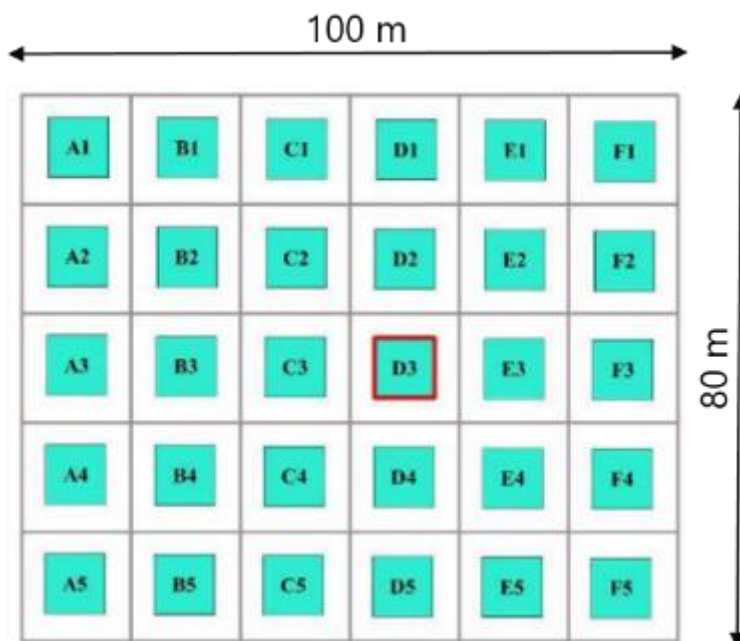


FIGURE 84 : EXEMPLE DE GRILLE D'ÉCHANTILLONNAGE DANS UN HERBIER DE ZOSTERA NOLTEI (AUBY ET AL., 2018)

Afin d'évaluer l'état des herbiers dans le secteur impacté par les travaux d'installation de conduite, quatre grilles DCE ont été positionnées dans le cadre du projet DYNAREST (Figure 13), à l'aide du logiciel QGIS.

Afin de compléter le jeu de données déjà acquis par le Parc sur ce secteur et pour des raisons d'accessibilité et de sécurité, les grilles de suivi ont été positionnées de manière à être d'une facilement approchables à pied à partir d'un point d'accès en véhicule (A1, A2 et A3 sur la Figure 85) et d'autre part, à capter la variabilité des pressions dues aux travaux (impact de la conduite, du passage des engins).



FIGURE 85: LOCALISATION DES STATIONS POSITIONNEES DANS LE CADRE DU PROJET DYNAREST – CREATION DES GRILLES SOUS QGIS. PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

Le géoréférencement d'une station dans QGIS (Auby *et al.*, 2018) abouti à la création d'un fichier .gpx par grille qui contient les 30 points de passage de la grille en WGS84. Ce type de fichier est facilement intégrable dans un GPS.

▪ STATION A

La station A (Tableau 4 et Figure 14) est positionnée sur l'estran proche du chenal qui mène à Loix en Ré. Cette station est traversée à la fois par la conduite d'eaux usées et part des traces d'engins de travaux. En se basant sur l'image satellite réalisée en 2018 (Figure 11), ce sont les lignes B, C et D (secteur Nord-Est) qui semblent les plus impactées par les travaux.

TABLEAU 21: LOCALISATION ET PARAMETRES RELATIFS A L'ECHANTILLONNAGE DE LA STATION A

STATION A	
Latitude du point C3 (WGS84)	46.214886458383688
Longitude du point C3 (WGS84)	-1.435349239844391
Accès station	A pieds à partir de A1
Date et heure du suivi	Le 18/09/2020 de 13h35 à 15h40
Opérateurs	Alice Gavaille et Mathis Cognat



FIGURE 86: EMPRISE DE LA GRILLE ET LOCALISATION DES POINTS DE LA STATION A (PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

▪ STATION B

La station B (Tableau 22 et Figure 87) se situe quant à elle le long de la conduite à mi-distance entre Loix et le centre nautique de La Couarde dans une zone ayant subie à la fois les perturbations de la conduite et des engins de travaux. Ce sont principalement les lignes B, C et D de la grille qui sont impactées par les travaux d'après la vue satellite de 2018 (Figure 87).

TABLEAU 22 : LOCALISATION ET PARAMETRES RELATIFS A L'ECHANTILLONNAGE DE LA STATION B

STATION B	
Latitude du point C3 (WGS84)	46.210745442136854
Longitude du point C3 (WGS84)	-1.430971297933188
Accès station	A pieds a partir de A2
Date et heure du suivi	Le 18/09/2020 de 10h35 à 12h35
Opérateurs	Alice Gavaille et Mathis Cognat



FIGURE 87: EMPRISE DE LA GRILLE ET LOCALISATION DES POINTS DE LA STATION B (PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

▪ STATION C

Ensuite, la station C (Tableau 23 et Figure 88) a été placée au Nord du centre nautique de La Couarde sur l'estran au Nord-ouest de l'épi à l'ouest de la plage de la Mer Du Nord. Cette zone est concernée essentiellement par le passage des engins et ce en ligne C.

TABLEAU 23: LOCALISATION ET PARAMETRES RELATIFS A L'ECHANTILLONNAGE DE LA STATION C

STATION C	
Latitude du point C3 (WGS84)	46.207210056990995
Longitude du point C3 (WGS84)	-1.428424934072249
Accès station	A pieds a partir de A3
Date et heure du suivi	Le 17/09/2020 de 10h37 à 12h55
Opérateurs	Alice Gavaille et Mathis Cognat



FIGURE 88: EMPRISE DE LA GRILLE ET LOCALISATION DES POINTS DE LA STATION C (PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

▪ STATION D

Pour finir, la station D (Tableau 24 et Figure 89) est positionnée dans une zone non impactée par les travaux. Cette station permettra d'obtenir des données relatives à un herbier de zostère naine en bon état dans le contexte environnemental de la Fosse de Loix. Cette station est primordiale puisque les paramètres biologiques (biométrie, biomasse, densité ...) sont naturellement variables en fonction des paramètres environnementaux qui contrôlent la croissance (lumière, temps d'immersion, vitesses de courant, ...)

TABLEAU 24: LOCALISATION ET PARAMETRES RELATIFS A L'ECHANTILLONNAGE DE LA STATION D

STATION D	
Latitude du point C3 (WGS84)	46.208110049850028
Longitude du point C3 (WGS84)	-1.42615941397245
Accès station	A pieds a partir de A3
Date et heure du suivi	Le 17/09/2020 de 13h40 à 15h25
Opérateurs	Alice Gavaille et Mathis Cognat



FIGURE 89 : EMPRISE DE LA GRILLE ET LOCALISATION DES POINTS DE LA STATION D (PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

Sur le terrain, les 30 points de chaque grille ont été parcourus et localisés grâce à un GPS portable QPSMAP 78 d'une précision inférieure à 2 mètres.

4.2.1.4 Estimation du taux de recouvrement

En chacun des trente centres de mailles de chaque grille, un quadrat de 50 cm de côté est placé pour quantifier le taux de recouvrement (Figure 90).



FIGURE 90: PHOTOGRAPHIES DE QUADRAT (A GAUCHE) AVEC ET (A DROITE) SANS MACROALGUE – STATION C POINT E3 (CREDIT PHOTO : MATHIS COGNAT LE 17/09/2020, DYNAREST- PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

D'abord, le taux de recouvrement est estimé visuellement par les opérateurs en fonction des six classes de recouvrement du protocole DCE (Tableau 25). La classe du pourcentage recouvrement est ensuite rapportée sur la fiche terrain.

TABLEAU 25 : VALEURS ATTRIBUEES AUX DIFFERENTES CLASSES DE RECOUVREMENT

Classe de taux de recouvrement (%)	0	1-25	26-50	51-75	76-99	100
Valeur	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1

Ultérieurement à la phase terrain, les clichés photographiques réalisés après retrait des macroalgues sont traités à l'aide du logiciel Image J et de l'annexe 1 du protocole DCE (Auby *et al*, 2018) pour vérification de l'estimation terrain (Figure 91).

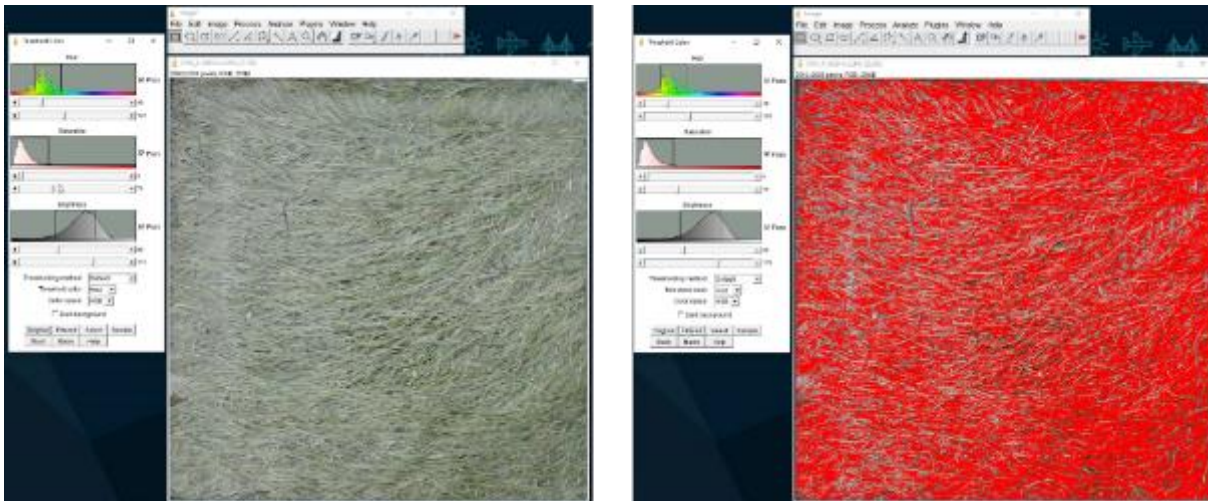


FIGURE 91: AJUSTEMENT DES PARAMETRES DE TEINTE, DE SATURATION ET DE LUMINOSITE SOUS IMAGE J POUR LA POINT A2 DE LA STATION A. PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS

Les résultats de l'analyse sous Image J permettent de corriger ou de préciser les estimations visuelles réalisées sur le terrain.

4.2.1.5 Prélèvement et analyse des sédiments

- **Granulométrie**

En chacune des quatre stations, trois carottes de sédiment (diamètre 8 cm – profondeur 5 cm) ont été prélevées et placées dans un même contenant en vue d'analyses granulométriques.

Cinq échantillons supplémentaires ont été prélevés pour caractériser plus globalement la zone impactée par les travaux.

Dès le retour au véhicule, les échantillons ont été placés en milieu réfrigéré. Aucune coupure de la chaîne du froid n'a été enregistrée jusqu'à réception des échantillons par le laboratoire d'analyse SGS Multilab situé à Rouen où l'ensemble des analyses ont été réalisées.

Analyse granulométrique :

Un échantillon représentatif de chaque station (Gra_A, Gra_B, Gra_C, Gra_D) a été réalisé en mélangeant trois carottes sédimentaires récoltées aléatoirement à proximité des rebords de grille de la station échantillonnées.

TABLEAU 26: CODE ECHANTILLON DES ANALYSES GRANULOMETRIQUE REALISEES

Type d'analyse	Code
Granulométrie	Gra_A
Granulométrie	Gra_B
Granulométrie	Gra_C
Granulométrie	Gra_D

L'analyse des échantillons granulométriques a été réalisée par le laboratoire SGS Mutilab. Elle a consisté en :

- Un séchage en étuve durant 48h à 60°C
- La pesée de 100 g de sédiment sec à 0,01 g de précision
- Le passage humide sur tamis de maille 63 µm
- Un séchage 48 h en étude à 60°C
- Un passage à sec sur série de 17 tamis AFNOR (de 4 mm à 63µm) – Pesée de chaque fraction avec une précision de 0,01 g

- **Matière organique**

En chacune des 4 stations, neuf carottes de sédiment (diamètre 3 cm – profondeur 5 cm) ont été prélevées en neuf points de la grille choisis aléatoirement. Chaque carotte a été placée dans un contenant en vue d'analyses de teneur en matière organique (Figure 20).



FIGURE 92: PRELEVEMENT D'UN ECHANTILLON DE SEDIMENT POUR ANALYSE DE TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE (CREDIT PHOTO : ALICE GAVOILLE LE 17/09/2020, PROJET DYNAREST - PARC NATUREL MARIN DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

TABLEAU 27: CODE ECHANTILLON DES ANALYSES EN MATIERE ORGANIQUE REALISEES

Type d'analyse	Code
Matière organique	MO_A_1
Matière organique	MO_A_2
Matière organique	MO_A_3
Matière organique	MO_A_4
Matière organique	MO_A_5

Matière organique	MO_A_6
Matière organique	MO_A_7
Matière organique	MO_A_8
Matière organique	MO_A_9
Matière organique	MO_B_1
Matière organique	MO_B_2
Matière organique	MO_B_3
Matière organique	MO_B_4
Matière organique	MO_B_5
Matière organique	MO_B_6
Matière organique	MO_B_7
Matière organique	MO_B_8
Matière organique	MO_B_9
Matière organique	MO_C_1
Matière organique	MO_C_2
Matière organique	MO_C_3
Matière organique	MO_C_4
Matière organique	MO_C_5
Matière organique	MO_C_6
Matière organique	MO_C_7
Matière organique	MO_C_8
Matière organique	MO_C_9
Matière organique	MO_D_1
Matière organique	MO_D_2
Matière organique	MO_D_3
Matière organique	MO_D_4
Matière organique	MO_D_5
Matière organique	MO_D_6
Matière organique	MO_D_7
Matière organique	MO_D_8
Matière organique	MO_D_9

Les analyses de teneur en matière organique ont été réalisées par le laboratoire SGS Multilab à Rouen. D'abord d'un étuvage à 60°C de 48h permet d'obtenir le poids sec de l'échantillon par l'intermédiaire d'une pesée. Ensuite l'échantillon est passé au four à 450°C pendant 4h et est pesé à nouveau. C'est la différence entre le poids de sédiment sec et le poids de ce même sédiment calciné qui permet d'estimer la teneur en matière organique totale.

$$MO(\%) = (P_{\text{sec}} - P_{\text{cendres}}) / P_{\text{sec}} \times 100$$

4.2.1.6 Prélèvements des macroalgues

En chacune des stations A, B, C, six échantillons de macroalgues ont été prélevés. Un prélèvement consiste à ramasser à la main l'ensemble des macroalgues présentes sur les 0,25 m² du point échantillonné à l'aide du quadrat et à les mettre dans un sachet plastique hermétique.

Réserves méthodologique sur les résultats présentés :

Le tri entre les différentes espèces n'a pu être réalisé. Les échantillons ne sont pas conformes au protocole DCE puisque des feuilles d'herbier mort étaient emmêlées dans les amas de macroalgues. Un tri en bassine des échantillons aurait été nécessaire pour enlever chaque feuille de zostère avant envoi au laboratoire pour étuvage et pesée. Les données devraient pouvoir être interprétées pour la comparaison entre les stations DYNAREST puisque l'échantillonnage a été réalisé de la même manière pour tous les échantillons. Cependant, il paraît assez difficile de pouvoir comparer dans le futur les données acquises dans le cadre du projet DYNAREST avec les données des stations DCE. En ce qui concerne la station témoin (station D), celle-ci présentait si peu de macroalgues qu'un seul point présentait une quantité significative de macroalgues pour permettre un prélèvement.

Dès le retour au véhicule, les échantillons ont été placés en milieu réfrigéré. Aucune coupure de la chaîne du froid n'a été enregistrée jusqu'à réception des échantillons par le laboratoire d'analyse SGS Multilab situé à Rouen où l'ensemble des analyses sont en cours de réalisation.

Le Tableau 28 rapporte les codes des 6 échantillons de macroalgues par station (à l'exception de la station d'où un seul prélèvement a été effectué).

TABLEAU 28: CODE ECHANTILLON DES PRELEVEMENTS EN MACROALGUES

Type d'analyse	Code
Matière sèche sur les déchets	MA_A_1
Matière sèche sur les déchets	MA_A_2
Matière sèche sur les déchets	MA_A_3
Matière sèche sur les déchets	MA_A_4
Matière sèche sur les déchets	MA_A_5
Matière sèche sur les déchets	MA_A_6
Matière sèche sur les déchets	MA_B_1
Matière sèche sur les déchets	MA_B_2
Matière sèche sur les déchets	MA_B_3
Matière sèche sur les déchets	MA_B_4
Matière sèche sur les déchets	MA_B_5
Matière sèche sur les déchets	MA_B_6
Matière sèche sur les déchets	MA_C_1
Matière sèche sur les déchets	MA_C_2
Matière sèche sur les déchets	MA_C_3
Matière sèche sur les déchets	MA_C_4
Matière sèche sur les déchets	MA_C_5
Matière sèche sur les déchets	MA_C_6

L'analyse de ces échantillons a été réalisée par le laboratoire SGS Multilab à Rouen par une pesée de la biomasse sèche (précision 0,01 g) après un étuvage de 48h à 60°C.

4.2.2 Résultats

4.2.2.1 Suivi global

Dans un premier temps un suivi global de la zone a d'abord permis de dresser un premier état des lieux de la zone impactée par les travaux d'installation de la conduite.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- un herbier très dense et homogène est observé en Station D (station témoin). En cette station, les macroalgues ne sont pas rapportées (Figure 96).
- les herbiers des stations A, B et C sont hétérogènes et principalement la station C (Figure 93, Figure 94, Figure 95). De nombreuses flaques et piscine tidales sont rapportées en station B et C. Sur ces stations, des macroalgues vertes (*Ulva sp.*) sont présentes, parfois en forte abondance (plus d'un centimètre d'épaisseur). Quelques rares ulves en lames sont observées.
- les ornières réalisées par les engins de travaux (stations A, B et C) sont comblées (pas de différentiels topographiques) par du sédiment fluide (grande différence de portance lorsqu'elles sont traversées en patin) dans lequel les rhizomes des herbiers semblent s'être développés aisément. Des échantillons de sédiment ont été prélevés dans ces ornières et à coté afin de réaliser des analyses granulométriques pour comparaison.
- La présence de traces de quille de voiliers ou de dérive de dériveurs est rapportée. Ces traces traduisent, sur certains secteurs, la présence d'usages qui peut très localement contraindre la croissance et altérer provisoirement l'herbier dont le dynamique de restauration est rapide lorsque les conditions environnementales sont favorables. Pour répondre à ces enjeux en cas de forte abondance de traces sur un site, des mesures de gestion pourraient être étudiées comme par exemple interdire ou limiter la circulation des embarcations dans les zones à l'herbier à marée basse. Par ailleurs, l'installation de dispositif permettant de localiser et de faciliter le mouillage pourrait aussi limiter ce type d'impacts.
- Mise à part à l'extrême proximité des petits chenaux secondaires, aucun indice de pression hydrodynamique (pas de rides ni de racines apparentes) n'a été observé. Un hydrodynamisme élevé ne semble pas être facteur limitant la résilience dans ce secteur. Cependant, cette zone très abritée pourrait capter d'importantes quantités de matière présente dans la colonne d'eau qui aurait pu être mise en suspension lors d'événements climatique fort. D'importants dépôts de sédiment sur les estrans peuvent être néfastes pour les herbiers lorsque que ceux-ci sont supérieurs à la capacité de croissance verticale des rhizomes. L'évolution des besoins de dragage dans la zone et un bon indicateur de la capacité du secteur à capter du sédiment.
- Bien que difficiles à observer localement, les traces de la canalisation et d'engins sont visibles à l'œil nu. La couleur des feuilles d'herbiers est plus claire dans les traces qu'à leur voisinage.

La Figure 93, la Figure 94, Figure 95 et la Figure 96 permettent un premier aperçu de l'environnement des stations. Les clichés photographiques ici présentés ne se focalisent pas seulement sur l'emprise de la grille de la station en question, ils peuvent par exemple montrer de petits chenaux à proximité de la station.



FIGURE 93 : VUES D'ENSEMBLE DE LA STATION A (CREDIT PHOTO : MATHIS COGNAT LE 18/09/2020, DYNAREST)



FIGURE 94 : VUES D'ENSEMBLE DE LA STATION B (CREDIT PHOTO : MATHIS COGNAT LE 18/09/2020, DYNAREST)



FIGURE 95 : VUES D'ENSEMBLE DE LA STATION C (CREDIT PHOTO : MATHIS COGNAT LE 17/09/2020, DYNAREST)



FIGURE 96 : VUES D'ENSEMBLE DE LA STATION D, STATION TEMOIN (CREDIT PHOTO : MATHIS COGNAT LE 17/09/2020, DYNAREST)

4.2.2.2 Taux de recouvrement

Le taux de recouvrement est le pourcentage de la surface recouvert par les feuilles. Il est estimé au sein d'un quadrat de 50x50 cm aléatoirement placé au centre de chaque maille des stations protocole DCE adapté.

Les taux de recouvrement de l'herbier issus de l'analyse des clichés avec le logiciel Image J sont présentés dans le Tableau 29. Ils traduisent la densité de l'herbier à l'intérieur du quadrat placé au centre de chacune des mailles suivies.

	STATION A		STATION B		STATION C		STATION D	
	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ
A1	90	0,875	100	1	100	1	100	1
B1	100	1	3	0,125	100	1	80	0,875
C1	100	1	25	0,125	100	1	100	1
D1	100	1	100	1	100	1	100	1
E1	50	0,625	80	0,875	75	0,875	100	1
F1	5	0,125	70	0,625	100	1	100	1
A2	100	1	100	1	100	1	100	1
B2	100	1	15	0,125	100	1	100	1
C2	100	1	60	0,625	100	1	100	1
D2	100	1	100	1	100	1	100	1
E2	80	0,625	100	1	100	1	100	1
F2	100	1	100	1	100	1	100	1
A3	100	1	5	0,125	20	0,125	100	1
B3	65	0,625	5	0,125	20	0,125	70	0,875
C3	100	1	100	1	100	1	100	1
D3	100	1	100	1	100	1	100	1
E3	70	0,625	90	0,875	60	0,625	100	1
F3	0	0	70	0,625	100	1	100	1
A4	55	0,625	100	1	100	1	100	1
B4	100	1	80	0,875	100	1	100	1
C4	100	1	100	1	35	0,125	100	1
D4	100	1	15	0,125	100	1	100	1
E4	0	0	100	1	100	1	100	1
F4	70	0,625	100	1	95	0,875	100	1
A5	95	0,875	100	1	15	0,125	100	1
B5	100	1	25	0,125	80	0,875	100	1
C5	100	1	100	1	0	0	100	1
D5	20	0,125	80	0,875	100	1	100	1
E5	30	0,375	100	1	100	1	100	1
F5	100	1	90	0,875	100	1	100	1

TABLEAU 29 : TAUX DE RECOUVREMENT

	STATION A	STATION B	STATION C	STATION D
A1	0,875	1	1	1
B1	1	0,125	1	0,875
C1	1	0,125	1	1
D1	1	1	1	1
E1	0,625	0,875	0,875	1
F1	0,125	0,625	1	1
A2	1	1	1	1
B2	1	0,125	1	1
C2	1	0,625	1	1
D2	1	1	1	1
E2	0,625	1	1	1
F2	1	1	1	1
A3	1	0,125	0,125	1
B3	0,625	0,125	0,125	0,875
C3	1	1	1	1
D3	1	1	1	1
E3	0,625	0,875	0,625	1
F3	0	0,625	1	1
A4	0,625	1	1	1
B4	1	0,875	1	1
C4	1	1	0,125	1
D4	1	0,125	1	1
E4	0	1	1	1
F4	0,625	1	0,875	1
A5	0,875	1	0,125	1
B5	1	0,125	0,875	1
C5	1	1	0	1
D5	0,125	0,875	1	1
E5	0,375	1	1	1
F5	1	0,875	1	1

Station A

Les quatre clichés photographiques réalisés en chaque coin de la grille A et en direction du coin de grille opposé sont montrés en Figure 97.

Globalement, l'herbier semble relativement homogène et dense bien que la présence de piscines tidales de faible emprise surfacique et la présence de traces d'engins est observée. Les ornières relatives au passage des engins sont comblées par du sédiment fluide superficiel.

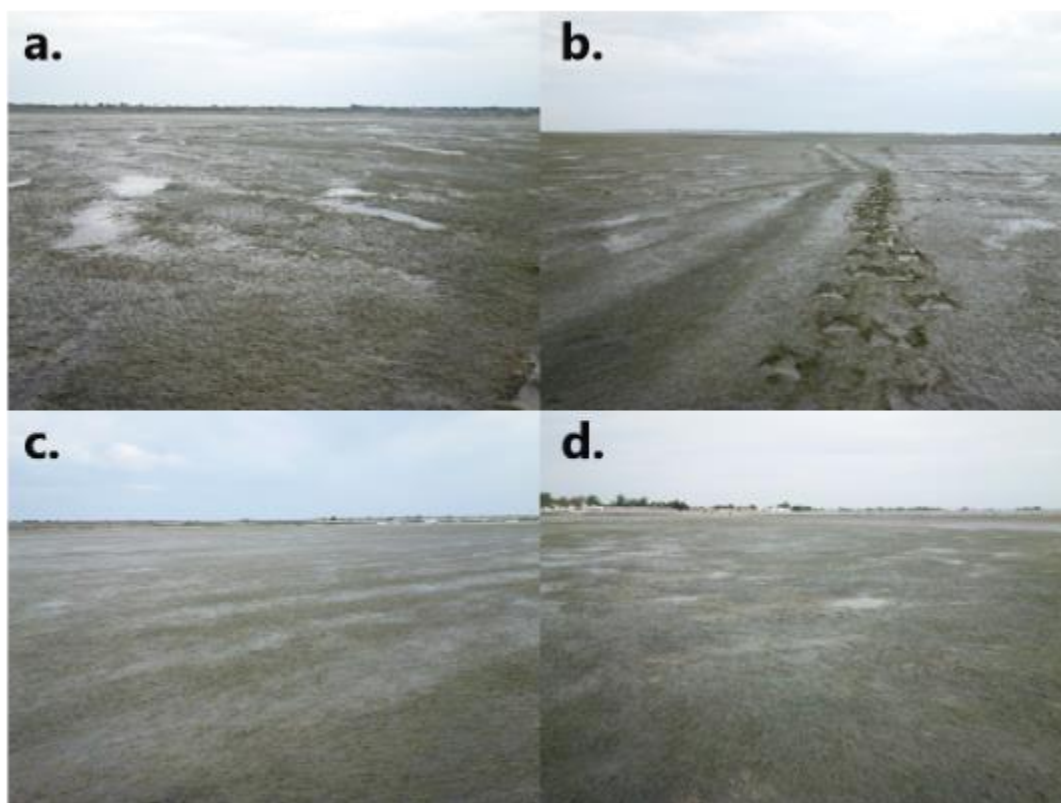


FIGURE 97 : PHOTOGRAPHIES DE LA STATION A REALISEES DANS LE CADRE DU PROTOCOLE DCE. PHOTOGRAPHIE PRISE EN (A) A1 EN DIRECTION DE F5, (B) A5 EN DIRECTION DE F1, (C) F1 EN DIRECTION DE A5 ET (D) F5 EN DIRECTION DE A1.

La Figure 98 rend compte de la spatialisation du taux de recouvrement. Dix-neuf mailles de la grille de la station A présentent un taux de recouvrement compris dans l'intervalle [0,75 ; 100]. Les mailles présentant les taux de recouvrement les plus faibles (lignes E et F) sont principalement situées au Sud de la grille, secteur pourtant faiblement impacté par les travaux. Les lignes A et B proches du chenal principal présentent des taux de recouvrement élevé.

	1	2	3	4	5
A	0,875	1	1	0,625	0,875
B	1	1	0,625	1	1
C	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	0,125
E	0,625	0,625	0,625	0	0,375
F	0,125	1	0	0,625	1

FIGURE 98 : SPATIALISATION DU TAUX DE RECOUVREMENT POUR LA STATION A

Les taux de recouvrement relevés sur le terrain sont comparés aux taux de recouvrement extraits par classification de l'image drone de 2020. Cette comparaison est présentée sur les Figure 99 et Tableau 30.

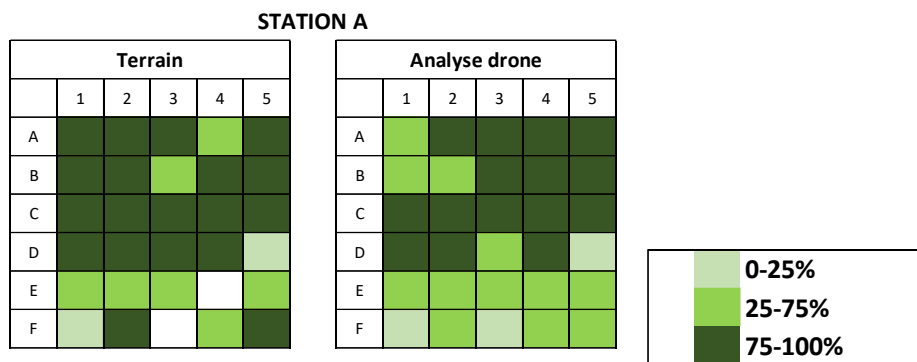


FIGURE 99 : COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT RELEVES SUR LE TERRAIN ET CEUX EXTRAITS DE L'IMAGE DRONE 2020

TABLEAU 30 : MATRICE DE CONFUSION OBTENUE POUR LA COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT PREDITS ET CEUX OBTENUS SUR LE TERRAIN POUR LA STATION A

Grille A

		Prédiction		
		0-25%	25-75%	75-100%
Terrain	0-25%	3	1	0
	25-75%	0	5	2
	75-100%	0	6	13

Précision : 0.7

Ces résultats sont en accord avec ceux issus de l'analyse de l'orthomosaique acquise par drone (Figure 99). En effet, une correspondance de 70% est obtenue pour la station A (Tableau 30).

Ces résultats sont de qualité très variables. Comme nous l'avons expliqué précédemment, la radiométrie de l'image drone est très hétérogène sur l'ensemble du site d'étude.

Pour cette station, il se trouve que les plus faibles taux de recouvrement sont observés dans les mailles les plus éloignées de la conduites et des traces d'engin. Il est suspecté que les travaux aient généré un réseau de drainage qui pourrait causer un dessèchement de l'estran au Nord-Est de la grille. Les herbiers des lignes E et F subiraient alors une forte dessiccation ce qui expliquerait les faibles taux de recouvrement dans ces zones.

Station B

Les quatre clichés photographiques réalisés en chaque coin de la grille B et en direction du coin de grille opposé sont montrés en Figure 100.

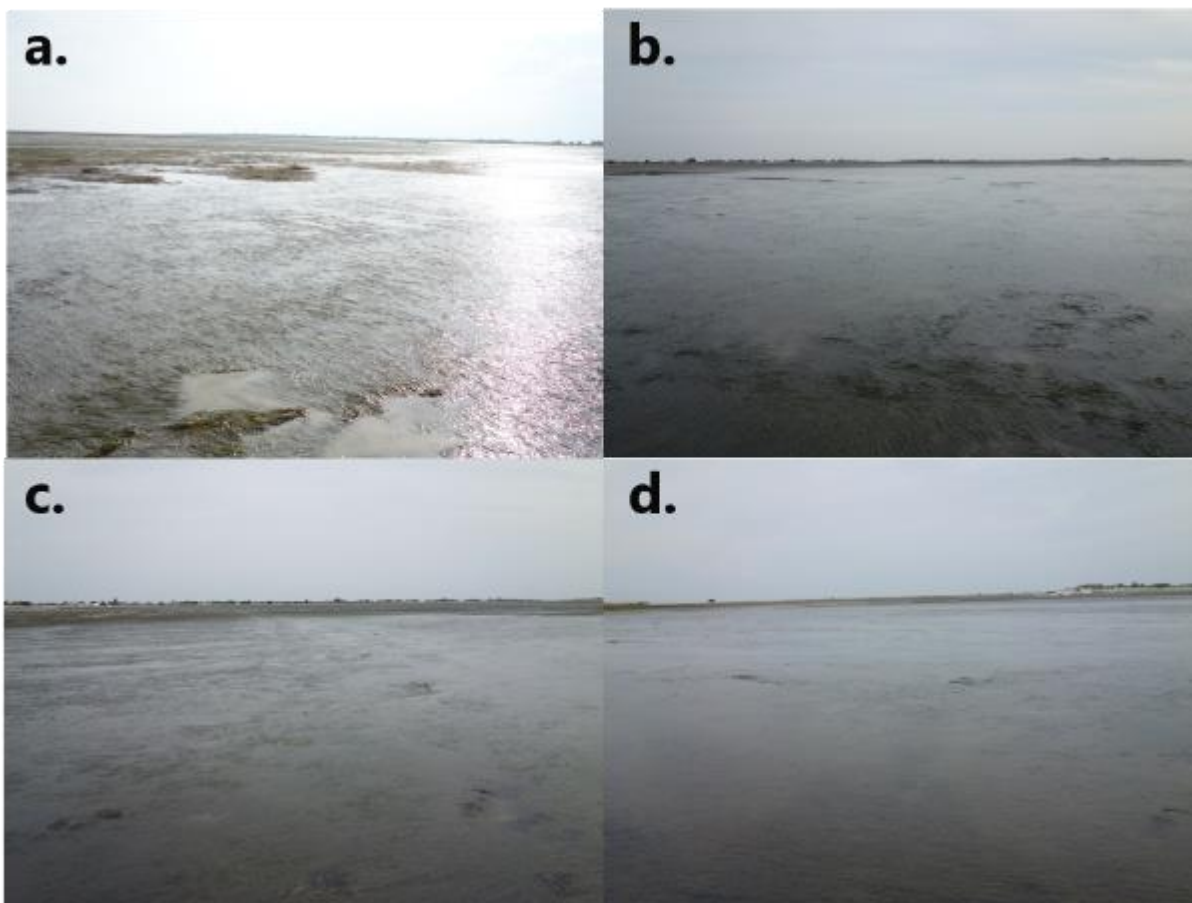


FIGURE 100 : PHOTOGRAPHIES DE LA STATION B REALISEES SELON LE PROTOCOLE DCE. PHOTOGRAPHIE PRISE EN (A) A1 EN DIRECTION DE F5, (B) A5 EN DIRECTION DE F1, (C) F1 EN DIRECTION DE A5 ET (D) F5 EN DIRECTION DE A1.

En ce qui concerne la spatialisation des résultats sur la grille B, la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre que les plus faibles taux de recouvrement sont principalement observés sur les lignes B et C de la grille qui correspondent au passage de la conduite. D'autre part, sept des trente points de la grille présentent un taux de recouvrement inférieur à 0,5.

	1	2	3	4	5
A	1	1	0,125	1	1
B	0,125	0,125	0,125	0,875	0,125
C	0,125	0,625	1	1	1
D	1	1	1	0,125	0,875
E	0,875	1	0,875	1	1
F	0,875	1	0,625	1	0,875

Pour cette station, les travaux semblent avoir eu un impact mécanique localisé.

Les taux de recouvrement relevés sur le terrain sont comparés aux taux de recouvrement extraits par classification de l'image drone de 2020. Cette comparaison est présentée sur les Figure 101 et Tableau 31 : Matrice de confusion obtenue pour la comparaison des taux de recouvrement prédits et ceux obtenus sur le terrain.

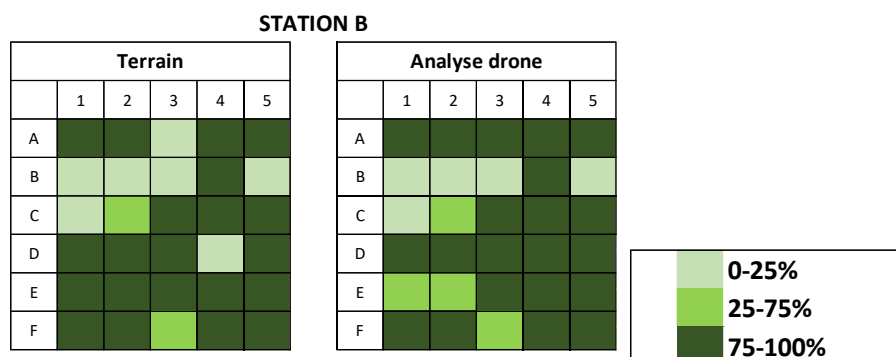


FIGURE 101 : COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT RELEVÉS SUR LE TERRAIN ET CEUX EXTRAITS DE L'IMAGE DRONE 2020

TABLEAU 31 : MATRICE DE CONFUSION OBTENUE POUR LA COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT PRÉDITS ET CEUX OBTENUS SUR LE TERRAIN POUR LA STATION B

Grille B

		Prédiction		
		0-25%	25-75%	75-100%
Terrain	0-25%	5	0	2
	25-75%	0	2	0
	75-100%	0	2	19

Précision : 0.87

Ces résultats se confirment par l'analyse de l'image drone (Figure 101). En effet, une correspondance de 87% (Station B) est obtenue pour la station B (Tableau 31).

Station C

Les quatre clichés photographiques réalisés en chaque coin de la grille B et en direction du coin de grille opposé sont montrés en Figure 29.

L'herbier est dans ce secteur très hétérogène et peu dense. La topographie est variable avec de nombreuses piscines tidales. La présence d'étendues de sédiment nu est aussi observée.

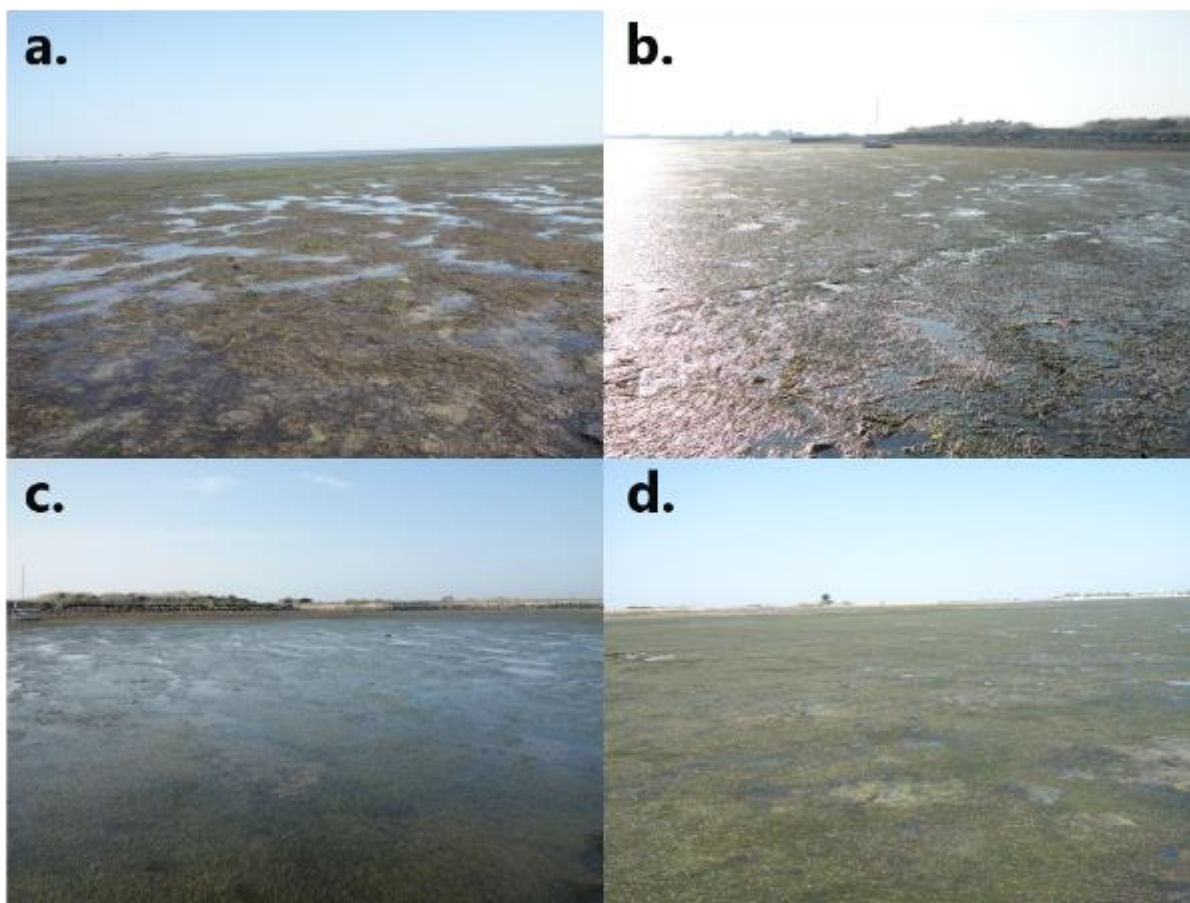


FIGURE 102 : PHOTOGRAPHIES DE LA STATION C REALISEES DANS LE CADRE DU PROTOCOLE DCE. PHOTOGRAPHIE PRISE EN (A) A1 EN DIRECTION DE F5, (B) A5 EN DIRECTION DE F1, (C) F1 EN DIRECTION DE A5 ET (D) F5 EN DIRECTION DE

La Figure 103 montre que le secteur proche du trait de côte (au Sud-Ouest de la grille) présente l'herbier de plus faible densité. La ligne C, très impactée par le passage des engins semble relativement bien colonisée excepté les points C4 et C5, proche du trait de côte. Les opérateurs ont rapporté pour cette ligne la présence de vase très fluide qui semble propice à la reprise rapide et spontanée de l'herbier.

	1	2	3	4	5
A	1	1	0,125	1	0,125
B	1	1	0,125	1	0,875
C	1	1	1	0,125	0
D	1	1	1	1	1
E	0,875	1	0,625	1	1
F	1	1	1	0,875	1

FIGURE 103 : SPATIALISATION DU TAUX DE RECOUVREMENT POUR LA STATION C

Les taux de recouvrement relevés sur le terrain sont comparés aux taux de recouvrement extraits par classification de l'image drone de 2020. Cette comparaison est présentée sur la Figure 104 et le Tableau 32.

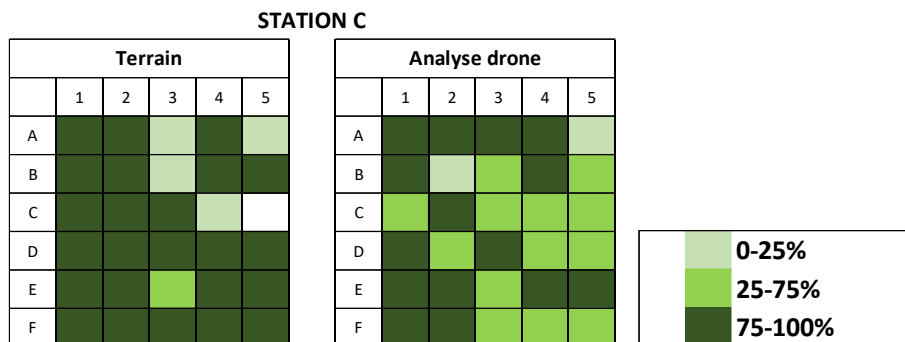


FIGURE 104 : COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT RELEVÉS SUR LE TERRAIN ET CEUX EXTRAITS DE L'IMAGE DRONE 2020

TABLEAU 32 : MATRICE DE CONFUSION OBTENUE POUR LA COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT PRÉDITS ET CEUX OBTENUS SUR LE TERRAIN POUR LA STATION C

Grille C

		Prédiction		
		0-25%	25-75%	75-100%
Terrain	0-25%	1	3	1
	25-75%	0	1	0
	75-100%	1	9	14

Précision : 0.53

Pour cette station, les correspondances avec l'analyse drone sont assez faibles, une correspondance de 53 % est obtenue pour la station C (Tableau 32).

Station D (station témoin)

Les quatre clichés photographiques réalisés en chaque coin de la grille B et en direction du coin de grille opposé sont montrés en Figure 105. En cette station, l'herbier est très dense et homogène. La présence ni d'épiphyte ni de macro algue n'a été rapportée.

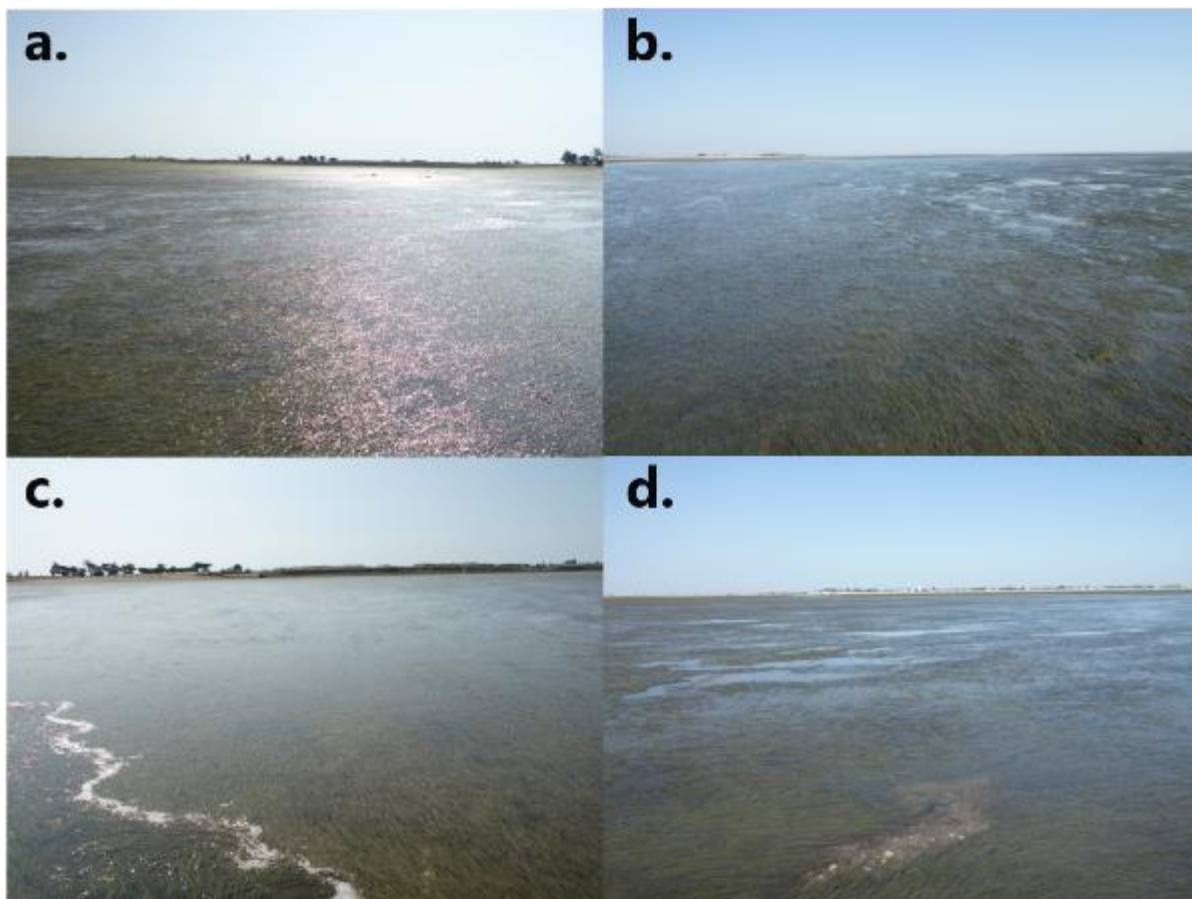


FIGURE 105 : PHOTOGRAPHIES DE LA STATION D REALISEES DANS LE CADRE DU PROTOCOLE DCE. PHOTOGRAPHIE PRISE EN (A) A1 EN DIRECTION DE F5, (B) A5 EN DIRECTION DE F1, (C) F1 EN DIRECTION DE A5 ET (D) F5 EN DIRECTION DE A1.

	1	2	3	4	5
A	1	1	1	1	1
B	0,875	1	0,875	1	1
C	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1
F	1	1	1	1	1

FIGURE 106 : SPATIALISATION DU TAUX DE RECOUVREMENT POUR LA STATION D

A l'exception de deux mailles de la grille qui présentent un taux de recouvrement de 0,875, l'ensemble des points de la grille D sont recouvertes à 100% par l'herbier. Cette station présente un herbier de qualité avec un taux de recouvrement élevé et homogène.

Les taux de recouvrement relevés sur le terrain sont comparés aux taux de recouvrement extraits par classification de l'image drone de 2020. Cette comparaison est présentée sur la Figure 109. Le domaine survolé par le drone permet la comparaison entre les deux méthodes d'acquisition pour deux mailles seulement. Ces deux mailles présentent un taux de recouvrement de 100% quelque soit la méthode d'acquisition.

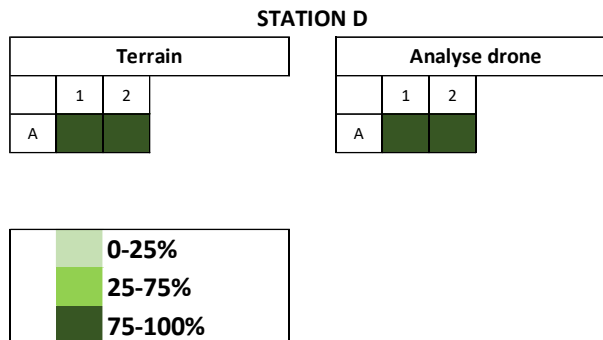


FIGURE 107 : COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT RELEVES SUR LE TERRAIN ET CEUX EXTRAITS DE L'IMAGE DRONE 2020

Le Tableau 33 présente la matrice de corrélation entre les deux méthodes d'acquisition des données de recouvrement pour l'ensemble des 92 mailles qui ont pu être comparées.

TABLEAU 33 : MATRICES DE CONFUSION OBTENUES POUR LA COMPARAISON DES TAUX DE RECOUVREMENT PREDITS ET CEUX OBTENUS SUR LE TERRAIN

Total

		Prédiction		
		0-25%	25-75%	75-100%
Terrain	0-25%	9	4	3
	25-75%	0	8	2
	75-100%	1	17	48

Précision : 0.71

Sur l'ensemble des données disponibles pour la comparaison des deux méthodes, une correspondance de 71 % est obtenue. Les importantes différences entre les résultats acquis par traitement de l'image drone et ceux issus de suivi DCE s'expliquent par :

- la radiométrie de l'image drone qui est très hétérogène sur l'ensemble du site d'étude. Ce problème impacte largement la prédiction des taux de recouvrements ; Il est intéressant de réaliser l'ensemble des survols dans les mêmes conditions d'ensoleillement.
- la méthode d'acquisition. En effet, les taux de recouvrement dans le protocole DCE proviennent de l'analyse Image J de photographies de quadrats de 50x50 cm placés en chacun des centres de mailles de 10x10 m de grille tandis que les taux de recouvrement provenant de l'image drone considèrent les mailles de 10x10 m dans leur totalité.
- la non prise en compte de l'hétérogénéité au sein d'une maille dans le protocole DCE pourrait être à l'origine de ces variations et notamment pour la station C qui présente un herbier très hétérogène.

Les données de recouvrement moyennées par station figurent dans le Tableau 34. La station B présente le plus faible taux de recouvrement moyen (73,8 %). Exceptée la station témoin D, qui présente un taux de recouvrement moyen de 98,8 %, c'est la station C qui a le plus haut taux de recouvrement, il est de 83,3%.

Sur l'ensemble des stations impactées par les travaux (Stations A, B et C), l'écart-type compris entre 31,4 et 35,9 est relativement élevé ce qui traduit l'hétérogénéité de la qualité de l'herbier sur ces zones.

	STATION A		STATION B		STATION C		STATION D	
	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ	Rec. est. terrain	Rec. ImageJ
Moyenne	77,7	0,771	73,8	0,738	83,3	0,825	98,3	0,992
Ecart-type	34,0	0,333	35,9	0,362	31,4	0,339	6,5	0,032

TABEAU 34 : MOYENNES ET ECARTS-TYPES DES TAUX DE RECOUVREMENT POUR CHACUNE DES STATIONS

	STATION A	STATION B	STATION C	STATION D
Moyenne	0,771	0,738	0,825	0,992
Ecart-type	0,333	0,362	0,339	0,032

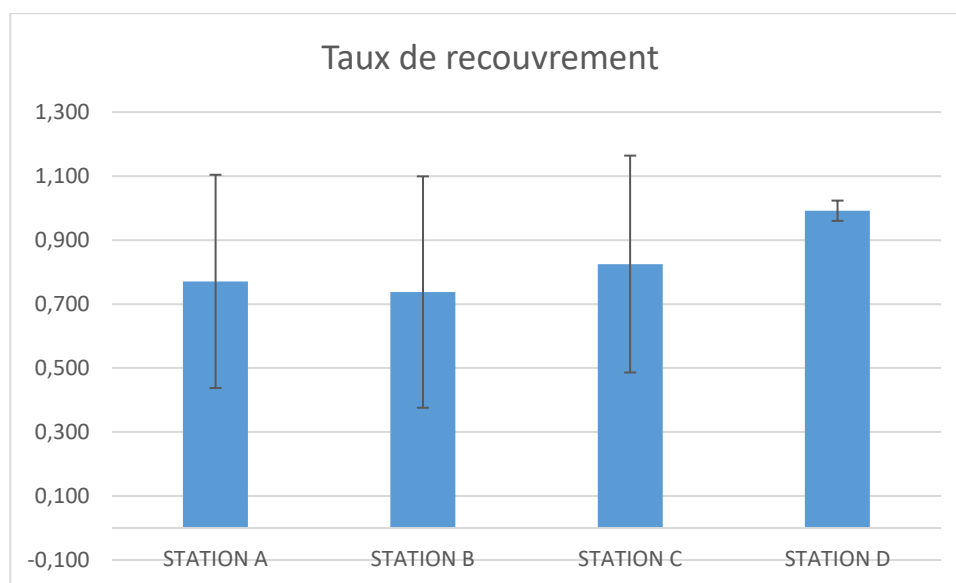


FIGURE 108 : TAUX DE RECOUVREMENT ET DISPERSION DES VALEURS POUR LES 4 STATIONS SUIVIES

L'analyse des résultats des taux de recouvrement montre que les stations proches des travaux présentent des herbiers moins denses et plus fragmentés que la station témoin. Les données complémentaires issues de l'analyse drone sont enrichissantes, elles confirment le ressenti terrain concernant la station C. En effet, les taux de recouvrement issus de l'analyse des photographies de quadrats semble surestimé la réalité. Il est très probable que les centres de maille où étaient placés les quadrats (50x50 cm) présentent des taux de recouvrement supérieurs à ceux des mailles (10x10 m) dans leur globalité.

4.2.2.3 Macroalgues

Sur le terrain, la présence ou l'absence de macroalgues a été reportée pour chaque point de maille sur la fiche terrain et six échantillons par station d'amas de macroalgues (macroalgues, feuilles d'herbier, coquilles, ...) ont été prélevés sur le terrain et envoyés au laboratoire d'analyse.

Les premiers résultats fournis par le laboratoire (RNR20-16819.PDF) étaient en pourcentage et donc non exploitables puisqu'on attendait un poids sec en grammes.

Le laboratoire a ensuite fourni les résultats bruts en format image (RESULTATS_BRUTES_MA.PNG) qui permettent l'obtention du poids sec (Resultats_MA_brutes.xlsx).

$$P_{sec} = \left(\frac{M_{sec1} + M_{sec2}}{2} \right) - M_{creuset}$$

Avec M_{sec1} le résultat de la première pesée du creuset et de son contenu après étuvage

M_{sec2} le résultat de la seconde pesée du creuset et de son contenu après étuvage

$M_{creuset}$ la masse du creuset seul

Le tri des macroalgues et donc le retrait des feuilles d'herbier, des coquillages ou encore des débris coquillés n'a pas été réalisé. Cependant, bien que les résultats ne peuvent pas être comparés à d'autres stations DCE, l'inter-comparaison des stations DYNAREST peut être réalisée puisque les prélèvements ont été réalisés suivant la même méthode.

Station A

La présence de macroalgues vertes a été rapportée sur 16 des 30 points de la grille de la station A. La Figure 109 permet de spatialiser sur la grille la présence de ces algues. Elles sont réparties sur l'ensemble du secteur mais sont plus présentes au sud de la grille (lignes E et F) où l'herbier présentait un faible de taux de recouvrement.

	1	2	3	4	5
A	-	-	-	x	0,380
B	x	-	0,924	-	-
C	x	x	-	-	-
D	0,828	-	-	-	x
E	x	x	0,795	x	0,662
F	-	1	x	x	-

FIGURE 109 : PRESENCE/ABSENCE ET POURCENTAGE DE BIOMASSE (PAR RAPPORT A LA PLUS FORTE VALEURE MESUREE) DE MACROALGUES VERTES SUR LA GRILLE DE POINTS ECHANTILLONNES SUR LA STATION A (- : ABSENCE ; X : PRESENCE NON ECHANTILLONNEE ; VALEURS : PRESENCE ECHANTILLONNEE)

Station B

La présence de macro algues vertes a été rapportée sur 15 des 30 points de la grille de la station B. La figure 34 permet de spatialiser sur la grille la présence des macroalgues. Pour cette station, les macroalgues vertes

sont principalement rapportées en lignes B et C qui ont été les plus impactées par les travaux (passage de la conduite et d'engins).

	1	2	3	4	5
A	-	-	x	-	x
B	x	x	0,264	0,649	x
C	x	0,683	-	x	-
D	-	-	-	0,383	x
E	-	0,479	-	-	-
F	x	-	x	-	0,445

FIGURE 110 : PRESENCE/ABSENCE ET POURCENTAGE DE BIOMASSE (PAR RAPPORT A LA PLUS FORTE VALEURE MESUREE) DE MACROALGUES VERTES SUR LA GRILLE DE POINTS ECHANTILLONNES SUR LA STATION B (- : ABSCENCE ; X : PRESENCE NON ECHANTILLONNEE ; VALEURES : PRESENCE ECHANTILLONNEE)

Station C

La présence de macro algues vertes a été rapportée sur 16 des 30 points de la grille de la station C. La figure 35 permet de spatialiser sur la grille la présence des macroalgues. Pour cette station, bien que ce soit les lignes A, B, C et D qui ont été le plus impactées par le passage des engins, les macroalgues sont présentes sur l'ensemble du secteur et plus fréquentes sur les lignes E et F qui ont été les plus épargnées par les travaux.

	1	2	3	4	5
A	x	-	0,578	-	x
B	-	-	0,619	-	x
C	-	-	-	x	x
D	0,845	-	x	-	-
E	0,659	x	0,276	-	x
F	x	0,315	-	x	-

FIGURE 111 : PRESENCE/ABSENCE ET POURCENTAGE DE BIOMASSE (PAR RAPPORT A LA PLUS FORTE VALEURE MESUREE) DE MACROALGUES VERTES SUR LA GRILLE DE POINTS ECHANTILLONNES SUR LA STATION C (- : ABSCENCE ; X : PRESENCE NON ECHANTILLONNEE ; VALEURES : PRESENCE ECHANTILLONNEE)

Station D

La présence de macro algues vertes a été rapportée en un seul point sur la station D et ce en très faible quantité. La figure 36 montre que le seul point de cette station avec présentant de macroalgues se trouve en bordure de grille (point B5).

	1	2	3	4	5
A	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	0,058
C	-	-	-	-	-
D	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-

FIGURE 112 : PRESENCE/ABSENCE ET POURCENTAGE DE BIOMASSE (PAR RAPPORT A LA PLUS FORTE VALEURE MESUREE) DE MACROALGUES VERTES SUR LA GRILLE DE POINTS ECHANTILLONNES SUR LA STATION D (- : ABSENCE ; X : PRESENCE NON ECHANTILLONNEE ; VALEURS : PRESENCE ECHANTILLONNEE)

Le TABLEAU 35 présente la moyenne des pesées de 6 échantillons de macroalgues pour chacune des stations excepté pour la station D où un seul prélèvement a pu être effectué étant donné la faible présence de macroalgues sur cette station.

TABLEAU 35 : POIDS SEC (G) DE MACROALGUES MOYENNEES PAR STATION

Station A	Station B	Station C	Station D
3,94	2,49	2,83	0,3

Les pesées de échantillons de macroalgues montrent leur forte présence sur les stations A, B et C.

4.2.2.4 Sédiments

4.2.2.4.1 Matière organique

Pour chaque station, neuf échantillons de sédiment ont été prélevés puis envoyés au laboratoire SGS Multilab pour des analyses de teneur en matière organique.

Les premiers résultats de teneurs en matière organique fournis par le laboratoire (RNR20-16820_v2) étaient compris entre 16,9 et 833 % alors que les teneurs en matière organique des estrans accueillants des zostères naines sont habituellement compris entre 3 et 9 %.

Les résultats bruts (Colonne de A à H du fichier MO__RNR20-16820 (002).xlsx), ensuite fournis par SGS Multilab, ont permis de recalculer les teneurs en matière organique (Colonne de K à O du fichier MO__RNR20-16820 (002).xlsx).

Avec m_{tot} la masse totale de l'échantillon, m_{60} la masse sèche après étuvage et m_{450} la masse après passage au four à 450 °C (perte au feu).

Cinq échantillons sur trente-six soit 13 % présentent des valeurs aberrantes. Pour l'échantillon 15, la masse du creuset ajoutée à la masse sur résidu après le four est inférieure à la masse du creuset seule.

Le Tableau 36 présente pour chaque station les moyennes et les écart-types des teneurs en matière organique (neuf échantillons par station). Les cinq valeurs aberrantes ne sont pas prises en compte dans l'analyse : les écart types ne sont donc pas calculés sur la base du même nombre d'échantillons pour chacune des quatre stations. La teneur en matière organique dans les sédiments dépendant des apports de matière vivante au

système, ce paramètre peut être considéré comme un proxy de la biomasse de macroalgues présentes sur l'herbier au cours de la période précédant l'échantillonnage.

TABLEAU 36 : TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE (%) (EN JAUNE LES VALEURS ABERANTES NON PRISES EN COMPTE DANS LE CALCUL DES MOYENNES ET DES ECARTS-TYPES)

		STATION A	STATION B	STATION C	STATION D
Matière organique (%)	N	8	6	8	9
	Moyenne (%)	6,98	7,61	5,69	5,61
	Ecart-type (%)	1,85	1,27	0,99	1,37
	MO_*_1	4,42	56,40	6,37	4,77
	MO_*_2	9,18	5,56	5,73	3,85
	MO_*_3	49,38	8,11	5,84	6,60
	MO_*_4	9,65	17,67	6,16	6,03
	MO_*_5	4,87	7,56	6,91	5,10
	MO_*_6	6,95	501,65	4,14	3,81
	MO_*_7	6,54	7,18	4,23	7,87
	MO_*_8	7,68	7,81	-46,65	5,66
	MO_*_9	6,53	9,46	6,16	6,83

Les taux en matière organique présentent une variabilité inter station importante allant de $5,61 \pm 1,37$ % pour la station D à $7,61 \pm 1,27$ % pour la station B.

En comparant ces résultats aux taux de recouvrements obtenues pour chacune des stations, une anti-corrélation entre le taux de matière organique du sédiment et le taux de recouvrement des zostères est observée.

En effet, le taux de matière organique le plus élevé est obtenu pour la station B ($7,61 \pm 1,27$) qui présente le plus faible taux de recouvrement (73,8 %) tandis que le plus faible est obtenue pour la station D ($5,61 \pm 1,37$) qui présente le taux de recouvrement le plus important (99,2 %).

Il est probable que le développement des herbiers soit en partie contraint par le niveau d'abondance des macroalgues pendant le printemps et l'été. En effet, certains mécanismes comme la limitation des échanges entre les zostères, la masse d'eau et l'atmosphère, ou encore la réduction de la disponibilité en lumière peuvent être néfaste pour les herbiers

La station de Charge Neuve inscrite dans le protocole DCE présente, d'après le rapport 2020, un taux de matière organique de $3,6 \pm 0,7$ ce qui est largement inférieur aux valeurs obtenues dans cette étude.

L'importante variation entre cette étude et les résultats du protocole DCE 2020 est difficile à expliquer avec autant d'incertitude sur la fiabilité des données. Il aurait été intéressant de comparer ces résultats avec les biomasses de macroalgues. En effet la teneur en matière organique est un indicateur de la quantité de macroalgue dégradée les années précédentes.

4.2.2.4.2 Granulométrie

Neuf échantillons de sédiment ont été prélevés puis envoyés au laboratoire SGS Multulab pour des analyses granulométriques. Quatre d'entre eux correspondent aux quatre stations suivies dans le projet selon le protocole DCE tandis que les autres ont pour objectif de caractériser les sédiments dans la zone de travaux.

Les premiers résultats fournis par SGS Multilab (à la fin du pdf RNR20-16820_v2.PDF) ne rendaient pas compte de la fraction de vase, aucune masse n'était donnée pour la fraction inférieure à 63 microns. De plus,

l'échantillon GRA-A relatif à la station A, n'a pas pu être analysé : « Granulométrie impossible sur cet échantillon ».

Les fractions des vases ont ensuite été transmises pour les neuf échantillons :

RNR20-16820	Msec	Msec>63µm	Msec<63µm
38	602,15	83,64	518,51
39	621,85	117,35	504,5
40	909,41	371	538,41
41	834	389,82	444,18
42	738,21	151,2	587,01
43	668,55	103,73	564,82
44	1003,17	118,62	884,55
45	624,6	120,82	503,78
46	529,72	75,53	454,19

Les calculs réalisés sur le fichier GRANULO_V3.xlsx ont permis de corriger les premiers résultats qui étaient en pourcentage de la fraction supérieure à 63 microns en les transformant en pourcentage de la fraction totale.

Les échantillons, excepté GRA_A, ont ensuite été traités, comme le préconise le protocole DCE, à l'aide de GRADISTAT.

Le Tableau 14 regroupe les principaux résultats granulométriques issus de l'analyse Gradistat (Blott & Pye, 2001).

TABLEAU 37 : RESULTATS SEDIMENTAIRES ISSUS DE LA PROCEDURE GRADISTAT (BLOTT & PYE, 2001)

SAMPLE STATISTICS

		GRA_A	GRA_B	GRA_C	GRA_D
ANALYST AND DATE:		,	,	,	,
SIEVING ERROR:					
SAMPLE TYPE:		-	Bimodal, Very Poorly Sorted	Bimodal, Poorly Sorted	Bimodal, Very Poorly Sorted
TEXTURAL GROUP:		-	Gravelly Mud	Slightly Gravelly Sandy Mud	Gravelly Mud
SEDIMENT NAME:		-	Very Fine Gravelly Very Fine Silt	Slightly Very Fine Gravelly Very Fine Sandy Very Fine Silt	Very Fine Gravelly Medium Silt
FOLK AND WARD METHOD (Description)	MEAN:	-	Coarse Silt	Very Coarse Silt	Very Coarse Silt
	SORTING:	-	Very Poorly Sorted	Poorly Sorted	Very Poorly Sorted
	SKEWNESS:	-	Coarse Skewed	Fine Skewed	Symmetrical
	KURTOSIS:	-	Leptokurtic	Platykurtic	Leptokurtic
MODE 1 (µm):		-	71,50	112,5	112,5
MODE 2 (µm):		-	112,5	71,50	71,50
D ₁₀ (µm):		-	5,503	6,248	6,586
D ₅₀ (µm):		-	21,68	40,89	53,21
D ₉₀ (µm):		-	4381,3	119,2	139,6
% GRAVEL:		13,9%	10,9%	3,0%	5,4%
% SAND:			8,1%	37,9%	41,5%
% MUD:			86,1%	81,0%	59,5%

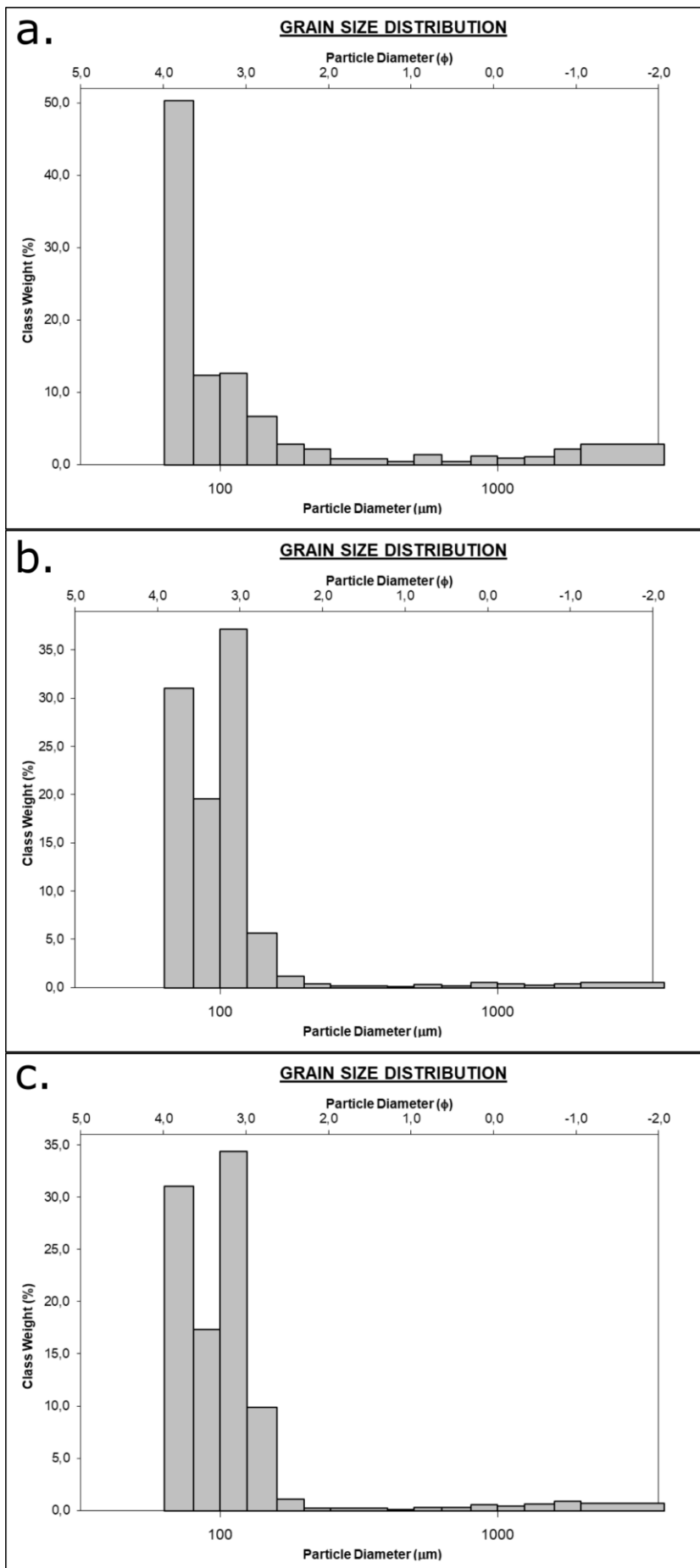


FIGURE 113 : REPARTITION MASSIQUE DES PARTICULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE POUR LES STATIONS B, C ET D (PROJET DYNAREST – PARC NATUREL MARIN DE L’ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET DE LA MER DES PERTUIS)

Le sédiment de la station A présente en masse un taux moyen d'environ 86,1 % de vases, un taux de sables et d'éléments grossiers de l'ordre de 13,9 % (Tableau 37). Un incident lors de la défloculation de cet échantillon n'a pas permis le passage dans l'ensemble des tamis. Seule la fraction de vase a pu être obtenue pour cette station.

Le sédiment de la station B présente en masse un taux moyen d'environ 81,0 % de vases, un taux de sables de 8,1 % et un taux de 10,9 % d'éléments grossiers (Tableau 37). La distribution en taille apparaît comme bimodale (112,5 µm et 71,5 µm) avec un mauvais classement.

Le sédiment de la station C présente en masse un taux moyen d'environ 59,5 % de vases, un taux de sables de 37,9 % et un taux de 3,0 % d'éléments grossiers (Tableau 37). La distribution en taille apparaît comme bimodale (71,5 µm et 112,5 µm) avec un très mauvais classement.

Le sédiment de la station D présente en masse un taux moyen d'environ 53,1 % de vases, un taux de sables de 41,5 % et un taux de 5,4 % d'éléments grossiers (Tableau 37). La distribution en taille apparaît comme bimodale (71,5 µm et 112,5 µm) mais les modes avec un mauvais classement.

Pour comparaison, le suivi DCE 2020 de la Plage de la Charge neuve a révélé un taux de vase de 12,7 %, un taux de sable de 86,3 % et un taux de graviers de 1 %.

Les quatre stations suivies dans le cadre du projet DYNAREST présentent de très fortes teneurs en vase par rapport à la station de Charge Neuve. Ces différences sont susceptibles de s'expliquer par la fluidité du sédiment observée sur la zone mais la qualité des analyses par le laboratoire rend difficile l'interprétation des résultats (cf 4.2.2.4.3).

4.2.2.4.3 Analyse critique des résultats DCE

Le protocole DCE est un moyen intéressant pour qualifier et comparer ponctuellement l'état de santé d'un herbier. Dans le cadre de la DCE, il permet de suivre annuellement les stations DCE tandis que dans le cadre de l'étude DYNAREST, quatre stations ont fait l'office d'un unique suivi.

L'analyse des résultats DCE relatifs aux taux de recouvrement (étude du recouvrement sur un quadrat de 50cmx50cm et traitement imagine J) a été renforcée par l'analyse d'une orthomosaïque drone haute résolution (étude du recouvrement à l'échelle d'une maille de grille DCE) à moins de quatre jours d'intervalle ce qui apporte une réelle plus-value à l'étude. La comparaison de ces deux méthodes montre (1) des résultats similaires pour les stations A, B et D qui sont des stations au recouvrement homogène et (2) d'importantes différences pour la station C qui présente un herbier clairsemé. Ainsi, le protocole DCE peut apporter un biais suivant le positionnement du quadrat lorsque l'herbier est très hétérogène tandis que l'analyse de l'image drone est réalisée sur l'ensemble de la maille et prend en compte l'hétérogénéité de l'herbier. De plus, les actions AQUAREF EIL ¹⁰¹« Zostères » durant lesquelles une série de photographies de quadrats présentant différents taux de recouvrement de zostères sont traitées à l'aide d'Image J par les différents opérateurs ont permis de mettre en évidence un biais induit par les opérateurs. Des survols par drone complétés par une vérification terrain sur certains secteurs (création d'un set d'apprentissage pour l'analyse) semblent être une approche complémentaire intéressante pour caractériser les taux de recouvrement.

Tant en terme de présence/absence que de poids des échantillons prélevés, les macro algues vertes sont largement présentes sur les stations A, B et C (environ quinze mailles sur trente pour ces trois stations) tandis que quasiment absentes de la station D. Le lien entre la présence des macroalgues et les travaux reste difficile

¹⁰¹ <https://www.aquaref.fr/essais-interlaboratoires-hydrobiologie-etat-lieux-propositions>

à réaliser d'autant que la présence de macroalgues est régit par de nombreux processus (courantologie, ressources disponibles, température). Il n'empêche que leur présence peut nuire aux herbiers de zostère par les phénomènes d'anoxie et de limitation de la lumière disponible.

En ce qui concerne les taux de matière organique, les plus élevés sont mesurés sur les stations présentant le plus de macroalgues. Il est possible que les taux de matière organique élevés soient la signature d'une importante dégradation de macroalgues en ces secteur dans le passé. Il est intéressant de noter que les valeurs mesurées dans cette étude sont largement supérieures à celles mesurées sur la station DCE de Plage de Charge Neuve située à proximité en 2020 et par le passé.

Les analyses granulométriques montrent une fraction de vase importante pour l'ensemble des quatre stations DYNAREST (86,1%, 81,0%, 59,5%, 53,1% pour les stations A, B, C et D respectivement) et surtout pour les stations A et B. Pour comparaison, la fraction de vase à Charge Neuve en 2020 est de 12,7 %. La taille de grain médian est plus élevée pour les stations D (53,21 μm) et C (40,89 μm) que pour la station B. (21,68 μm). La taille du grain médian est représentative des vitesses des courants sur un site étant donné les interactions morphodynamiques. Ces résultats révèlent un environnement plus dynamique (en terme de courantologie) sur la station C et surtout sur la station D que sur les stations A et B. (donnée manquante pour la station A, interprétation par le biais de la fraction sableuse). Pour comparaison, le D50 obtenu en 2020 à la station de Charge Neuve est de 128 μm synonyme d'un fort hydrodynamisme.

Les résultats sont cohérent entre eux. De faibles teneurs en vase et en matière organique ainsi que de plus faible quantités de macroalgues sont observées pour les stations à fort dynamisme (D50 élevés) alors qu'elles ont plus élevé pour les stations à faibles hydrodynamisme. Un hydrodynamisme élevé peut avoir un impact positif sur la santé des herbiers lorsqu'il ne dépasse pas un certain seuil qui dépend paradoxalement de l'environnement dans lequel l'herbier évolue. Un hydrodynamisme élevé (taille de grain médian élevé) correspond à bon renouvellement des masses d'eau ce qui limite l'impact par exemple des fortes chaleurs et le développement de macroalgues ou encore l'accumulation de macroalgues et de matière organique.

Pour réaliser les analyses du protocole DCE et plus généralement relatives aux herbiers de zostère, il est préconisé de faire appel à un laboratoire spécialisé dans l'analyse de ce type d'échantillons. De même pour les analyses des taux de recouvrement, l'opérateur peut introduire un biais¹⁰². Le survol drone s'est avéré un bon outils en apportant une autre échelle et en permettant une comparaison. Il est intéressant de répéter et de comparer l'évaluation de plusieurs opérateurs habitués à différents contextes. Le contexte environnemental des herbiers apporte la présence de feuilles, de débris coquillées et de macrofaune benthique dans les échantillons qui implique un trie au sein de l'échantillon. De plus, le substrat principalement constitué de vases s'agrège et devient collant ce qui nécessite des étapes de défloculation. Les laboratoires communs analysent rarement de telles matrices.

4.3 Analyse de la capacité de restauration et proposition d'indicateur

4.3.1 Liste de l'ensemble des pressions naturelles et anthropiques

Cette étude nous a permis de lister une partie des pressions que peuvent subir les herbiers de phanérogames marines ainsi qu'une évaluation de leur gravité dans le Tableau 38 ci-après. Des mesures correctives sont proposées.

¹⁰² <https://www.aquaref.fr/essais-interlaboratoires-hydrobiologie-etat-lieux-propositions>

TABLEAU 38 : GRAVITE ET PROPOSITION D'ACCOMPAGNEMENT POUR LES CAUSES NATURELLES ET ANTHROPIQUES DE DEGRADATION DES HERBIERS DE PHANEROGAMES MARINES (LA NATURE DES PROTOCOLES A POTENTIELLEMENT METTRE EN ŒUVRE N'EST PAS VISEE DANS CE PROJET)

	Gravité	Proposition d'accompagnement	
Causes naturelles	Maladies	Variable - Long-terme et impact mondial pour Wasting disease en 1930	-
	Evènements climatiques (tempêtes, crues)	-	-
	Consommation par les herbivores	Impact faible et diffus	-
	Phénomènes géologiques (séisme, activité volcanique)	Impact localisé	-
Causes anthropiques	Pêche à pied	Impact localisé	Actions de sensibilisation
	Système de mouillages	Impact localisé	Mouillages écologiques
	Chalutage	Impact mécanique localisé Impact sur la remise en suspension des sédiments diffus	Arrêtés et récifs anti-chalutages Favoriser les méthodes de pêche sélectives et plus respectueuses
	Aménagements littoraux	Impact localisé	Mesure de transplantation et de réduction, éviter la création de nouveaux aménagements
	Dragages	Impact localisé et diffus	Dragage dans les zones non colonisées, mise en place de filet anti matières en suspension, réalisation des travaux durant les périodes de moindre impact Meilleure gestion des impacts, aquaculture
	Aquaculture	Impact localisé et diffus	extensive, déplacement des cheminements, changement de pratiques, déplacements
	Nutriments (Eutrophisation)	Impact localisé et diffus	Meilleure gestion des apports issus du bassin versant
Contaminants (pesticides, métaux lourds, détergents, hydrocarbures)	Impact diffus	Réduction des apports en contaminant du bassins versants et du traitement des eaux usées	

Changement global

Impact diffus

-

4.3.2 A l'échelle de la fosse de Loix

4.3.2.1 Synthèse des principaux résultats

Cette étude nous a permis de dégager des grandes tendances liant certaines pressions historiques à l'état actuel de l'herbier. Les résultats des analyses par drone montrent que l'empreinte de la canalisation de 2018 et les traces d'engins se retrouvent colonisées par de l'herbier dense. En effet, l'herbier réapparaît en grande partie à l'emplacement de la canalisation de 2018. La plus large bande dépourvue d'herbier de part et d'autre du chenal principal correspond à l'empreinte laissée par la canalisation de 1984, toujours visible en 2020. En deux ans, les traces des engins de 2018 ont été recolonisées en partie.

Les traces et la canalisation semblent cependant avoir modifié la topographie très locale (entre 10 et 50 m de part et d'autre des traces et de la canalisation) en causant des voies préférentielles pour l'écoulement de l'eau. La modification de la morphologie du terrain a pu altérer l'hydrodynamisme au niveau de l'estran, conduisant à un assèchement du sédiment (phénomène de dessiccation) à proximité des traces qui pourrait expliquer la disparition des herbiers dans ces zones (Ouisse, 2010¹⁰³). En effet, les passages d'engins et de la canalisation ont conduit à la création de lignes affaissées très localisées sur l'estran. Ces zones semblent alors avoir stocké un sédiment fluide, facilement pénétrable par les rhizomes, à forte teneur en eau favorable au développement de l'herbier. Inversement, les surfaces à proximité de ces lignes ont vu les herbiers régresser et ce probablement sous l'impact de la dessiccation induite par l'écoulement de l'eau dans les traces.

Le suivi des quatre stations selon le protocole DCE (adapté) a permis de caractériser l'impact local des travaux sur l'état de santé des herbiers de zostère naine mais aussi de mesurer des paramètres environnementaux. Les résultats d'analyse permettent de tirer certaines conclusions en corrélation avec les résultats du survol drone. Nous avons ainsi pu observer

- L'importante hétérogénéité des états de santé des herbiers dans les zones historiquement impactées par les travaux comme l'on montré à la fois les importants écarts-types obtenus pour les taux de recouvrements pour les stations A, B et C et les importantes variations entre les données drone et les données acquises selon le protocole DCE adapté DCE.
- La présence de macroalgues sur ces mêmes sites, en proportion plus importante que dans la zone témoin, et en particulier dans les piscines intertidales.

4.3.2.2 Conclusion quant à la dynamique de l'herbier

L'analyse de l'évolution spatiale de l'emprise des herbiers a montré :

- que l'empreinte laissée par la pose de la canalisation en 1984 est toujours visible en 1987. La disparition des herbiers le long de la conduite est flagrante.
- qu'en 1997, l'herbier semble avoir recolonisé la zone de travaux mais la résolution de la donnée de 20m étant équivalente à la bande d'impact des travaux (environ 20 m), les résultats ne sont pas très fiables.
- la recolonisation d'une grande partie de la bande dépourvue d'herbier en 1987. En 13 ans, cette bande est passée de 20 m à 3 à 5 m de largeur dans la partie au nord du chenal principal. Dans la partie sud du chenal, cette bande est presque entièrement comblée par de l'herbier moyennement dense (25-75%) en majorité, et par de l'herbier très dense par endroit. L'herbier très dense au nord du chenal, a totalement effacé dans sa partie la plus au nord, l'empreinte de la canalisation.

¹⁰³ Ouisse, V. (2010). Production primaire et respiration des communautés d'herbiers à zostères : rôle dans le cycle carbone en milieu côtier. PhD dissertation, Paris 6, France

- que l'emplacement des travaux de 1984 est visible au nord du chenal principal, la localisation de la canalisation est marquée par la présence d'un herbier avec un taux de recouvrement moyen (25-75%) sur la cartographie de 2014.
- que l'impact des travaux 2018 sur l'herbier est bien visible sur la cartographie 2018. Au nord du chenal principal, une bande variant de 17 à 55 m de large se retrouve dépourvue d'herbier. Au sud du chenal, la largeur de cette bande varie entre 8 et 55 m.
- une bonne recolonisation du secteur impacté par les travaux 2018 en 2020 réalisé avec une méthode de travaux semblant moins intrusive.
Ainsi, on s'aperçoit que si l'herbier commence à se réimplanter après la dégradation, il faut peu de temps pour atteindre des taux de recouvrement supérieurs à 75%, qui permettent de garantir à la fois la santé de l'herbier, mais aussi qu'il supporte les fonctionnalités écologiques qui lui sont dévolues.
- Les zostères naines ont une capacité d'extension spatiale d'environ 50 cm par an (Marbà et Duarte, 1998¹⁰⁴). Une fois l'espace recolonisé, les herbiers de zostères naines densifiés, leur réseau racinaire est augmenté ainsi que la densité de feuilles au m².

Les résultats acquis dans l'étude DYNAREST montrent que l'impact des premiers travaux de 1884 est temporellement supérieur à celui des seconds travaux de 2018. Dans de nombreux secteurs, la recoloration des traces d'engins de 2018 en 2020 confirme l'aspect résilient des herbiers lorsque les conditions environnementales sont favorables.

Cette étude montre que l'impact de tels travaux a un effet systématique sur les herbiers avec la destruction totale et localisée de l'herbier au niveau du passage des engins et de la canalisation (cf. vue satellitaire 2018). Cependant, une fois l'impact réalisé, la capacité de résilience des herbiers de zostères dépend des facteurs locaux comme le confirme la variation de la capacité de recolonisation en fonction des secteurs. En effet, la vitesse de reprise des herbiers n'est pas homogène d'une zone d'étude à l'autre.

Il est alors intéressant de se poser la question des meilleures conditions de résilience de l'herbier. Il a été observé qu'un même impact n'a pas toujours le même effet en fonction du contexte local. Les impacts des traces d'engins ou de l'enfouissement de la canalisation ne sont pas identiques en fonction de la proximité aux chenaux principaux. Il est recommandé d'analyser la cartographie des chenaux avant de réaliser un projet pouvant mener à la modification du contexte local d'écoulement.

En effet, les traces localisées à une bonne distance du chenal semblent avoir été recolonisées plus rapidement que les traces proches des chenaux. Il est probable que les traces loin des chenaux se soient rapidement comblées de vase superficielles favorisant la reprise des herbiers tandis qu'un écoulement préférentiel se serait créé dans les traces proches des chenaux pour rejoindre l'écoulement du chenal principal. Le transport sédimentaire induit par cet écoulement préférentiel aurait alors initié l'élargissement et le creusement de la trace. A marée basse, la tranchée induite pourrait être à l'origine de l'assèchement de l'estran à proximité causant la dessiccation de l'herbier : une partie du volume d'eau est capté par ces points bas et laisse donc potentiellement plus découvertes certaines zones d'herbier jusqu'ici suffisamment immergées.

De plus, il semblerait que l'orientation des traces par rapport à la pente de l'estran puisse avoir un impact non négligeable sur sa dynamique de restauration. Une trace dans le sens de la pente favorise l'écoulement de la couche d'eau superficielle à marée basse tandis qu'une trace transverse participe au maintien de cette pellicule d'eau.

Pour mieux comprendre les effets d'assèchement des estrans dans le secteur, il serait intéressant de réaliser un MNT haute résolution de la zone et d'utiliser les fonctions QGIS de bassin versant pour identifier les zones susceptibles de subir une forte dessiccation.

Les zones d'estran asséchées ne sont pas propices au développement des herbiers alors que les piscines tidales présentent souvent des herbiers denses. Cependant, il a été remarqué en station C que les flaques et piscines tidales ne sont pas colonisées par les herbiers mais présentent d'importants amas de macroalgues. L'absence

¹⁰⁴ Marbà, N., Duarte, C. M. (1998). Rhizome elongation and seagrass clonal growth. Marine Ecology Progress Series, 174, 269-280.

d'herbier semble s'expliquer par la compétition entre les deux espèces. Les macroalgues échouées pourraient consommer l'oxygène ou encore créer une limitation en lumière.

Les différents points évoqués ci-dessus montrent que la résilience de l'herbier n'est pas constante suivant le contexte local. Dès lors, en tant que gestionnaire, se pose la question de la maximisation de la résilience de l'herbier face à une dégradation. Deux leviers d'actions complémentaires peuvent aujourd'hui répondre à cet enjeu :

- agir sur la nature de la dégradation (mesures d'évitement et de réduction), c'est-à-dire penser les travaux et les usages de manière à ce qu'ils soient cohérents avec les principes de résilience des herbiers. C'est la raison pour laquelle nous proposons une réflexion sur les indicateurs contextuels afin de piloter cette gestion
- proposer des méthodes qui permettent de limiter les effets à long terme de la dégradation, c'est-à-dire engager des actions de restauration des herbiers, essentiellement fondées sur la restauration du contexte. Les herbiers sont des écosystèmes extrêmement résilients si tant est que des conditions favorables à leur réhabilitation soient instaurées.

4.3.2.3 Réflexion sur les indicateurs

L'intérêt d'un indicateur environnemental est de fournir une donnée claire, interprétable, de manière à traduire un état, à le rendre lisible, et à orienter, en fonction, des actions de gestion des milieux dans le cas qui nous intéresse.

Les indicateurs de santé des herbiers reposent sur des métriques biologiques à grande échelle (taux de recouvrement, fragmentation, présence de traces et de sillons) et à petite échelle (nombre de faisceaux, densité foliaire, longueur foliaire, ...) relatives aux herbiers ainsi que sur des données environnementales (caractéristiques sédimentaires, présence de trace d'hydrodynamisme).

Les analyses conduites sur la résilience de l'herbier suite à des travaux ont permis de dégager un certain nombre de facteurs contextuels qui contribuent à favoriser ou non la résilience de l'herbier dans ce contexte. Ainsi, dans l'optique d'une gouvernance plus efficace de ces écosystèmes, il paraît intéressant de nous pencher sur ces indicateurs, présentés ci-dessous, qui peuvent permettre de prévoir et d'améliorer les techniques et les travaux permettant de maintenir les conditions propices pour l'espèce.

4.3.2.3.1 Proximité aux chenaux d'écoulement préférentiels

L'herbier est parcouru de chenaux d'écoulement préférentiels, et s'est organisé, au fil du temps en fonction de la répartition spatiale de ces chenaux. Vecteurs majeurs de l'hydrodynamisme sur l'estran, ils canalisent les flux et régissent à l'échelle locale, la hauteur et le temps d'immersion.

L'altération de la morphologie du site à proximité de ces chenaux peut créer des voies d'écoulement secondaires amenées à rejoindre les chenaux initiaux, et donc altérer profondément et durablement le fonctionnement hydrodynamique du site. Cette modification peut ainsi aboutir à la création de formes de dessiccations sur les points hauts voisins, et dégrader l'herbier qui s'y trouve.

Une manipulation assez simple pour vérifier cette hypothèse consisterait, à l'occasion de travaux ou à proximité d'une trace d'ancrage récente, à mesurer la santé de l'herbier à proximité en quelques points en suivant en parallèle l'évolution des conditions hydrodynamiques. L'intérêt serait de mesurer son évolution sur des points peu impactés par le sillon, et sur d'autres dans sa zone d'influence. Il serait intéressant dans ce cadre d'évaluer jusqu'où s'étend la zone d'influence hydrodynamique du sillon.

Du point de vue de la gestion, ce serait intéressant car cette approche permettrait de planifier travaux et usages en fonction du positionnement de chenaux existants, et d'envisager des actions de restauration à très court terme permettant d'obtenir rapidement des conditions favorables à la résilience de l'herbier sur ces sites.

Des études approfondies sur le sujet permettraient de caractériser certains sillons en fonction de leurs dimensions et de leur proximité aux chenaux originels.

4.3.2.3.2 Proximité à un herbier sain

La croissance horizontale d'un herbier est un processus qui fonctionne de proche en proche. L'herbier adjacent protège en effet l'herbier en croissance de l'hydrodynamisme, il dilue la prédation des brouteurs et permet de favoriser la sédimentation, et donc de lutter contre la turbidité qui impacte la photosynthèse.

C'est la raison pour laquelle la proximité d'un herbier sain est aussi un facteur de résilience de l'herbier de zostère et pourrait être un indicateur précieux dans la gestion de cet écosystème. Il serait ainsi intéressant, dans le cadre d'une dégradation ponctuelle et à proximité d'un herbier sain, de mesurer la vitesse de reconquête du site par l'herbier selon un transect orienté obliquement par rapport à la limite de l'herbier sain. Par ailleurs, cela permettrait d'avoir une mesure de l'effet de la proximité de l'herbier sain sur la résilience de l'herbier, sous forme d'un abaque par exemple. Ces éléments sont à analyser au regard d'une caractérisation des pressions générées et de leurs effets.

Du point de vue de la gestion d'un site, il est intéressant de piloter les usages et les travaux en fonction de la cartographie des herbiers. De manière générale, les pressions récurrentes sur un habitat à enjeu majeur de préservation sont à éviter. Dans le cas de travaux ponctuels et lorsque l'évitement n'est techniquement pas possible, les porteurs de projet doivent s'assurer que les zones impactées sont propices à une très forte résilience. Les zones fragiles doivent être exclues de toutes altérations (tableau ci-dessous).

Éviter	Prévoir le déplacement des travaux
Réduire	Préférer des altérations très locales en préservant au maximum la dégradation des herbiers voisins (éviter les altérations de grande ampleur)
Accompagner la restauration	Suivre la restauration naturelle et/ou mettre en œuvre de mesures d'accompagnement (ex : transplantation d'herbiers)

4.3.2.3.3 Influence de la pente

La pente du site est un autre facteur qui pourrait être déterminant de la résilience de l'herbier. Sa quantification nécessite une topographie précise de la zone tant en résolution verticale qu'horizontale. Les platiers intertidaux doivent présenter une faible pente afin héberger les zostères naines. La pente est un facteur déterminant de la vitesse des flux puisque les fortes pentes sont observées en rebords de chenaux où les vitesses de courants sont élevées.

Il semble d'une part que l'orientation d'une dégradation par rapport à la pente puisse mener à la création d'effets Venturi forts, qui canalisent l'élargissement de brèches et sillons et d'autre part que la position de la dégradation sur la pente en conditionne aussi les effets. Ainsi, une dégradation dans un sens orthogonal sera préférée à la plus forte pente et en haut de pente, plutôt qu'une dégradation tangentielle à la pente en bas de pente. Il serait intéressant de valider ces hypothèses par des mesures in situ.

Éviter	Ne pas modifier la topographie
Réduire	Déployer des solutions techniques pour éviter la chenalisation

4.3.2.4 Restauration de l'herbier

Dans un premier temps, il est intéressant de rappeler que les zostères ont une forte productivité et peuvent recoloniser un milieu très rapidement quand les conditions leur sont favorables. A contrario, si on tente de réimplanter les zostères dans des zones non favorables, l'entreprise est vouée à l'échec.

L'installation et le maintien des zostères naines dépendent d'abord de facteurs physiques (sans prise en compte de la qualité physico-chimique ou des usages) : limites bathymétriques et limites courantologiques. Ce fait, la modification de ces paramètres permet généralement d'expliquer la diminution des emprises : rehaussement ou creusement des fonds sur l'estran, non conciliables avec leurs limites bathymétriques d'extension (creusement : en zone turbide manque de lumière ; rehaussement : trop forte dessiccation à basse mer compétition avec les végétaux du schorre, ...) augmentation des courants générant l'érosion des sédiments et l'arrachage des plantes, en zone eutrophisée diminution des courants générant le développement et le dépôt de macroalgues opportunistes (manque de lumière, accumulation de sulfures quand les algues se dégradent).

Pour la même raison, pour faciliter la restauration dans des zones où les zostères étaient autrefois présentes, il faut intervenir sur ces facteurs pour créer un espace favorable à leur survie et à leur croissance. Dans ce cas, toutes les méthodes qui ont fait leur preuve peuvent être testées.

Au vu du fort potentiel productif des zostères, les agressions ponctuelles dans le temps et l'espace (pêche à pied si elle est réalisée correctement – patins et pêche « au trou »-, faible augmentation de la turbidité, ancrages des bateaux et des filets de pêche) ne semblent pas mettre en danger la santé de l'herbier. Par contre, on peut s'interroger sur l'effet d'agressions localisées mais répétées comme les chaînes des corps morts et, quand ils sont mis en place et retirés chaque année, l'impact de ces opérations.

BIBLIOGRAPHIE

- Baldwin, J. R., Lovvorn, J. R. (1994). Expansion of seagrass habitat by the exotic *Zostera japonica*, and its use by dabbling ducks and brant in Boundary Bay, British Columbia. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 103(1), 119-127.
- Balke, T., Herman, P. M. J., Bouma, T. J. (2014). Critical transitions in disturbance-driven ecosystems: identifying windows of opportunity for recovery. *Journal of Ecology* 102:700-708
- Ballé-Béganton, J., J. Herry, M. Philippe, R. Pasco, B. Angst, M. Urien, D. Bailly, M. Cassé, Les services écosystémiques en soutien à la gestion des herbiers de zostères du golfe du Morbihan, Projet Interreg IVA Manche VALMER, mars 2015, 14p.
- Baraud L, (2020), AFB. Zostère naine, *zostera noltei*.
- CEREMA, (2016) - Note d'information. Mesures compensatoires des impacts sur les milieux naturels. Collection Connaissances.
- Commissariat général au développement durable. (2018). Evaluation environnementale – Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Cunha, A. H., Marbá, N. N., van Katwijk, M. M., Pickerell, C., Henriques, M., Bernard, G., ... & Manent, P. (2012). Changing paradigms in seagrass restoration. *Restoration Ecology*, 20(4), 427-430.
- Davis, R. C., & Short, F. T. (1997). Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique: the horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59(1-2), 1-15
- Den Hartog. C. (1970). The sea-grasses of the world. *Verh. kon. ned. Akad. Wet., Afd. Natuurkunde*, 59(1):275
- DREAL PACA et DREAL Occitanie, (2018). Guide cadre Eval_Impact. Impacts des projets d'activités et d'aménagements en milieu marin méditerranée. Recommandations des services instructeurs. Fascicule 3 – Mise en œuvre de la séquence Eviter, Réduire et Compenser : focus sur l'application de mesures compensatoires en mer. Ed. CO2 Communication.
- Duarte, C. M. (1991). Seagrass depth limits. *Aquatic Botany* 40:363-377.
- Dupont V., Lucas M., (2017). La loi pour La reconquête De La biodiversité : Vers un renforcement du régime juridique de la compensation écologique ?. <https://Doi.Org/10.4000/Cdst.548>
- Edgar, G. J. (1990). Population regulation, population dynamics and competition amongst mobile epifauna associated with seagrass. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 144(2-3), 205-234.
- Figuerola, J., Green, A. J. (2002). Dispersal of aquatic organisms by waterbirds: a review of past research and priorities for future studies. *Freshwater biology*, 47(3), 483-494.
- Fonseca, M. S. (1998). Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters (Vol. 55). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Ocean Office.
- Ganthy, F. (2011). Rôle des herbiers de Zostères (*Zostera noltii*) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon. PhD Thesis, Université de Bordeaux 1.
- Goberville, E., Beaugrand, G., Sautour, B., Tréguer, P. (2011). Evaluation of coastal perturbations: A new mathematical procedure to detect changes in the reference state of coastal systems. *Ecological Indicators*, 11(5), 1290-1300.
- Green, E. P., Short, F. T., Frederick, T. (2003). *World atlas of seagrasses*. Univ of California Press.
- Greve, T. M., Binzer, T. (2004). Which factors regulate seagrass growth and distribution. *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, 19.

- Harwell, M. C., & Orth, R. J. (1999). Eelgrass (*Zostera marina* L.) seed protection for field experiments and implications for large-scale restoration. *Aquatic Botany*, 64(1), 51-61.
- Lee, K. S., & Park, J. I. (2008). An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 1015-1021
- Li, W. T., Kim, S. H., Kim, J. W., Kim, J. H., Lee, K. S. (2013). An examination of photoacclimatory responses of *Zostera marina* transplants along a depth gradient for transplant-site selection in a disturbed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 118, 72-79.
- Lipkin, Y., Beer, S., Zakai, D. (2003). The eastern mediterranean and the red sea. *World atlas of seagrasses*, 65.
- Lirman, D., Cropper, W. P. (2003). The influence of salinity on seagrass growth, survivorship, and distribution within Biscayne Bay, Florida : field, experimental, and modeling studies. *Estuaries*, 26(1), 131-141
- Marsh Jr, J. A., Dennison, W. C., Alberte, R. S. (1986). Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 101(3), 257-267.
- Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.
- Office Français de la Biodiversité, Direction Régionale Pays de la Loire, données SIG des herbiers de zostères naines du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.
- Office Français de la Biodiversité. (2021). Projet de restauration participative des herbiers de Zostère naine sur le Bassin d'Arcachon.
- Orth, R. J., Marion, S. R., Moore, K. A., & Wilcox, D. J. (2010). Eelgrass (*Zostera marina* L.) in the Chesapeake Bay region of mid-Atlantic coast of the USA: challenges in conservation and restoration. *Estuaries and Coasts*, 33(1), 139-150
- Orth, R. J., Harwell, M. C., & Fishman, J. R. (1999). A rapid and simple method for transplanting eelgrass using single, unanchored shoots. *Aquatic Botany*, 64(1), 77-85.
- Orth, R. J., Bieri, J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., Marion, S. R., Moore, K. A., ... & Van Montfrans, J. (2006). A review of techniques using adult plants and seeds to transplant eelgrass (*Zostera marina* L.) in Chesapeake Bay and the Virginia Coastal Bays. In *Proc. Conf. Seagrass Restoration: Success, Failure, and the Costs of Both*. March 11, 2003. Sarasota, Florida (pp. 1-17).
- Orth, R. J., Luckenbach, M., & Moore, K. A. (1994). Seed dispersal in a marine macrophyte: implications for colonization and restoration. *Ecology*, 75(7), 1927-1939
- Orth, R. J., Fishman, J. R., Harwell, M. C., & Marion, S. R. (2003). Seed-density effects on germination and initial seedling establishment in eelgrass *Zostera marina* in the Chesapeake Bay region. *Marine Ecology Progress Series*, 250, 71-79.
- Orth, R. J., Marion, S. R., Granger, S., & Traber, M. (2009). Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds. *Aquatic Botany*, 90(2), 204-208.
- Ouisse, V. (2010). Production primaire et respiration des communautés d'herbiers à zostères : rôle dans le cycle carbone en milieu côtier. PhD dissertation, Paris 6, France
- Paulo, D., Cunha, A. H., Boavida, J., Serrão, E. A., Gonçalves, E. J., & Fonseca, M. (2019). Open coast seagrass restoration. Can we do it? Large-scale seagrass transplants. *Frontiers in Marine Science*, 6, 52.
- Pickerell, Christopher H., Stephen Schott, and Sandy Wyllie-Echeverria. "Buoy-deployed seeding: demonstration of a new eelgrass (*Zostera marina* L.) planting method." *Ecological Engineering* 25.2 (2005): 127-136.
- Ribaudo, C., Plus, M., Ganthy, F., & Auby, I. (2016). Carbon sequestration loss following *Zostera noltei* decline in the Arcachon Bay (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 179, 4-11.

- de los Santos, C. B., Brun, F. G., Bouma, T. J., Vergara, J. J., Pérez-Lloréns, J. L. (2010). Acclimation of seagrass *Zostera noltii* to co-occurring hydrodynamic and light stresses. *Marine Ecology Progress Series*, 398, 127-135.
- SHOM, 2015. MNT Topo-Bathymétrie Côtier des Pertuis Charentais (Projet Homonim). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_COTIER_PERTU »IS_HOMONIM_20m_WGS84
- Short, F. T., Burdick, D. M., Wolf, J. S., Jones, G. E. (1993). Eelgrass in estuarine research reserves along the East Coast, USA.
- Short, F. T., Kopp, B. S., Gaeckle, J., & TAMAKI, H. (2002). Seagrass ecology and estuarine mitigation: a low-cost method for eelgrass restoration. *Fisheries science*, 68(sup2), 1759-1762
- Short, F. T., Coles, R. G. Pergent-Martini, C. (2001). Global seagrass distribution. *Global seagrass research methods*, 5-30
- SOUQUET, M., SIBORA, N. (2018) - Guide méthodologique de l'étude d'impact environnemental des projets et de la mise en œuvre de la séquence ERC (Éviter-Réduire-Compenser) en Nouvelle-Calédonie. Communauté du Pacifique et provinces de Nouvelle-Calédonie. 123 p. + annexes.
- Suykerbuyk, W., Govers, L. L., Bouma, T. J., Giesen, W. B., de Jong, D. J., van de Voort, R., ... & van Katwijk, M. M. (2016). Unpredictability in seagrass restoration: analysing the role of positive feedback and environmental stress on *Zostera noltii* transplants. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 774-784.
- Tan, Y. M., Dalby, O., Kendrick, G. A., Statton, J., Sinclair, E. A., Fraser, M. W., ... & Sherman, C. D. (2020). Seagrass restoration is possible: Insights and lessons from Australia and New Zealand. *Frontiers in Marine Science*, 7, 617.
- Tanner, C. E., & Parham, T. (2010). Growing *Zostera marina* (eelgrass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects. *Restoration Ecology*, 18(4), 527-537
- Touchette, B. W. (2007). Seagrass-salinity interactions: physiological mechanisms used by submersed marine angiosperms for a life at sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1-2), 194-215.
- Unsworth, R. K., Bertelli, C., Cullen-Unsworth, L., Esteban, N., Lilley, R., Jones, B. L., ... & Rees, S. (2019). Sowing the seeds of seagrass recovery using hessian bags. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 311.
- Valle, M., Garmendia, J. M., Chust, G., Franco, J., & Borja, Á. (2015). Increasing the chance of a successful restoration of *Zostera noltii* meadows. *Aquatic Botany*, 127, 12-19.
- van Katwijk, M. M., Thorhaug, A., Marbà, N., Orth, R. J., Duarte, C. M., Kendrick, G. A., ... & Verduin, J. J. (2016). Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, 53(2), 567-578.
- Villanueva R., Paul M., Taphorn M., (2019). Natural geo-textiles as base layer for artificial seagrass
- Villazán, B., Brun, F. G., González-Ortiz, V., Moreno-Marín, F., Bouma, T. J., Vergara, J. J. (2016). Flow velocity and light level drive non-linear response of seagrass *Zostera noltei* to ammonium enrichment. *Marine Ecology Progress Series*, 545, 109-121.
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kenworthy, W. J., Short, F. T., Williams, S. L., Kendrick, G. A. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377-12381.
- Zhang, P. D., Fang, C., Liu, J., Xu, Q., Li, W. T., & Liu, Y. S. (2015). An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: implications for their large-scale restoration. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 89-99.
- Zhou, Y., Liu, P., Liu, B., Liu, X., Zhang, X., Wang, F., & Yang, H. (2014). Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique. *PLoS one*, 9(4), e92982.

Site web :

Article L163-1 Compensation des atteintes à la biodiversité. Legifrance. < https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033025728/#:~:text=I,II%20de%20l'article%20L.&ext=Les%20mesures%20de%20compensation%20des%20atteintes%20%C3%A0%20la%20biodiversit%C3%A9%20visent,votre%20de%20gain%20de%20biodiversit%C3%A9> Dernière consultation : 03/2021.

SeaART – Long term establishment of SEAgrass ecosystems through biodegradable ARTificial meadows. < <http://www.sea-art.org/en/home.html> >. Dernière consultation: 03/2021. >

Zostera noltei Hornem., 1832. Inventaire National du Patrimoine Naturel. < https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/674883/tab/statut >. Dernière consultation : 03/2021.

SHOM, Courants de marée 2D – Courants – Vitesses maximales. Dernière mise à jour : 2018. Accessible via « DATA.SHOM.FR »

ANNEXE 1 – LISTE DES MOTS CLES UTILISES POUR LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Recherchés entre septembre 2020 et juin 2021.

seagrass restoration, zostera noltei restoration, zostera marina restoration, eelgrass restoration,

innovative methods for seagrass restoration

innovative techniques for seagrass restoration

seagrass restoration project*

zostera marina restoration project*

zostera noltei restoration project*

eelgrass restoration project*

seagrass restoration strateg*

zostera marina restoration strateg*

zostera noltei restoration strateg*

eelgrass restoration strateg*

seagrass restoration using seeds

zostera marina restoration using seeds

zostera noltei restoration using seeds

large scale seagrass restoration

large scale zostera marina restoration

large scale zostera noltei restoration

zostera noltei transplantation, zostera marina transplantation, seagrass transplantation

seagrass transplanting technique

eelgrass transplanting technique

seagrass transplanting method*

eelgrass transplanting method*

zostera marina transplanting method

zostera noltei transplanting method

passiv method for seagrass restoration

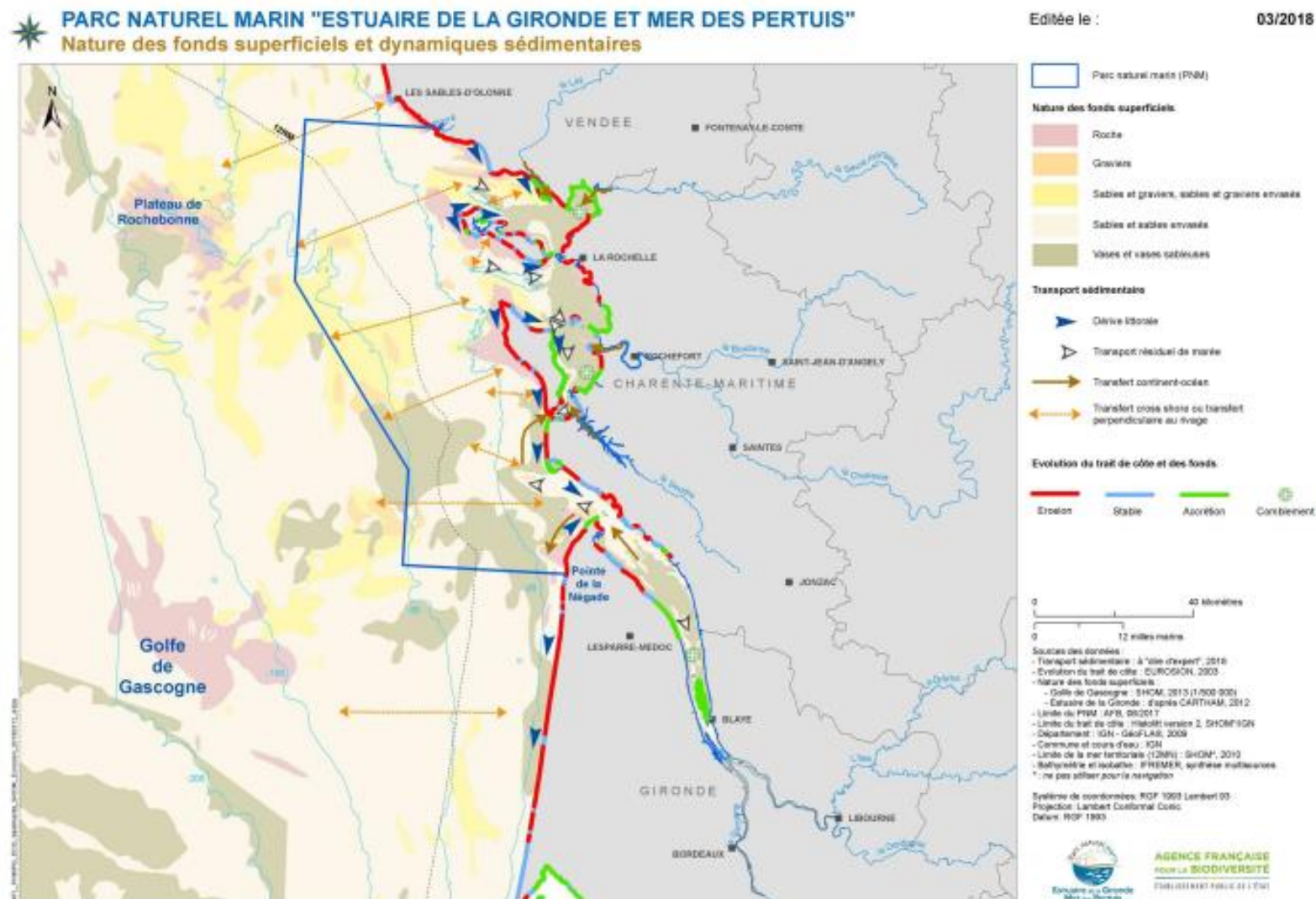
passiv restoration of zostera noltei

passiv restoration of zostera marina

active restoration of zostera noltei

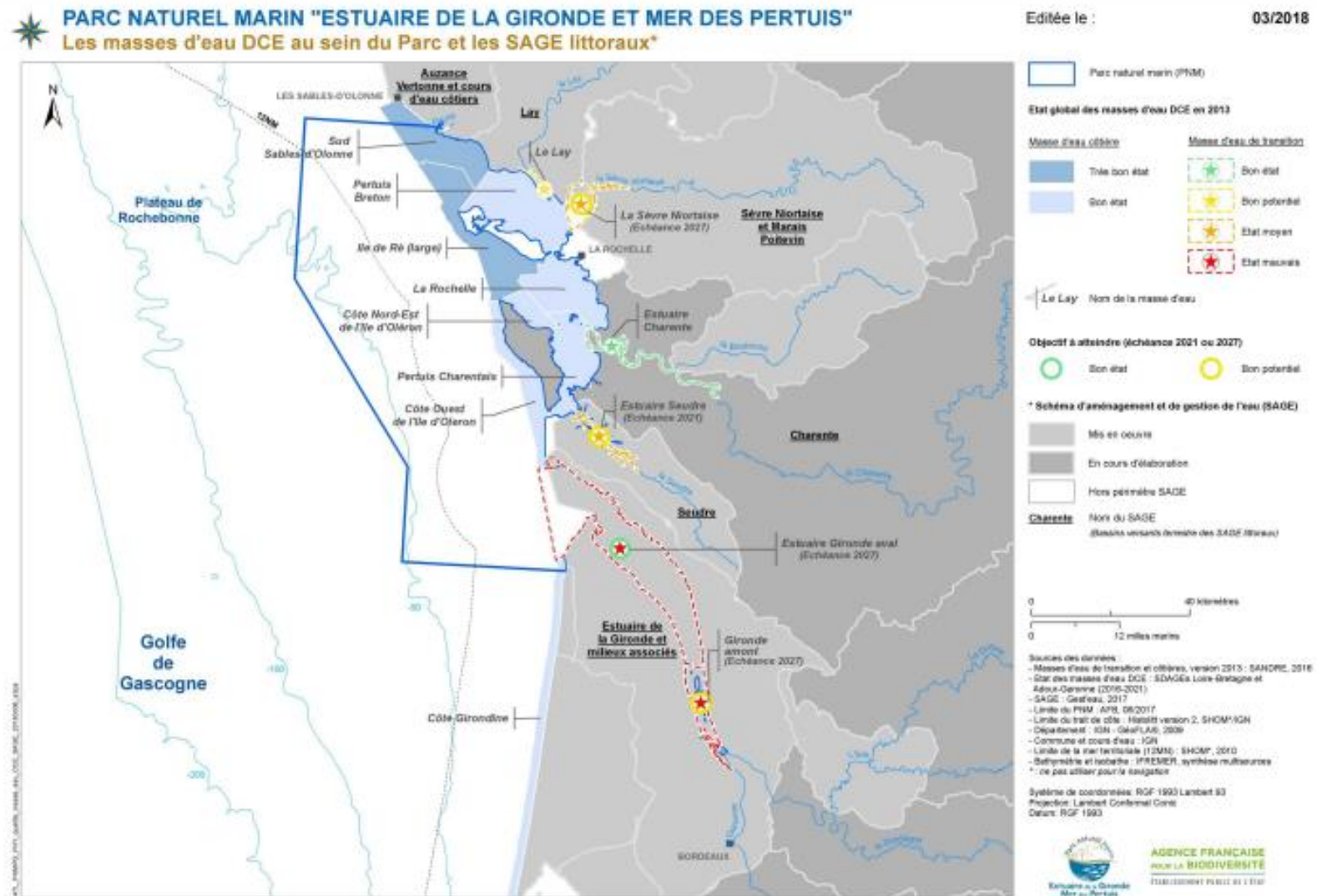
active restoration of zostera marina

ANNEXE 2 - CARTE – NATURE DES FONDS SUPERFICIELS ET DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES



Source : Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.

ANNEXE 3 – CARTE - LES MASSES D'EAU DCE AU SEIN DU PARC ET LES SAGE LITTORAUX



Source : Office Français de la Biodiversité. (2018). Atlas cartographique ; Plan de gestion du Parc naturel marin de l'Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis.

ANNEXE 4 – FICHES TERRAIN

Fiche stationnel Zostera noltei

Station : A

Date : 18/09/2020

Agents : Alice et Mathis

Code point	Recouvrement Est terrain	Rec image J	Macro-algues			PRÉL MACRO- ALGUES	Observ
			V	R	B		
A1	90	0.875	-	-	-		
B1	100	1	-	-	-		
C1	100	1	-	-	-		
D1	55	0.625	x	-	-	OUI	
E1	95	0.875	x	-	-	OUI	
A2	100	1	x	-	-		ulve
B2	100	1	-	-	-		
C2	65	0.625	x	-	-	OUI	
D2	100	1	-	-	-		
E2	100	1	-	-	-		Très fluide
A3	100	1	x	-	-		

B3	100	1	x	-	-		Très faible quantité de MA
C3	100	1	-	-	-		
D3	100	1	-	-	-		
E3	100	1	-	-	-		
A4	100	1	x	-	-		
B4	100	1	-	-	-		
C4	100	1	-	-	-		
D4	100	1	-	-	-		
E4	20	0.125	x	-	-	OUI	
A5	50	0.625	x	-	-		MA en quantité
B5	80	0.625	x	-	-		
C5	70	0.625	x	-	-	OUI	
D5	0	0	x	-	-		ulve
E5	30	0.375	x	-	-		
A6	5	0.125	-	-	-		
B6	100	1	x	-	-		MA en faible quantité
C6	0	0	x	-	-		
D6	70	0.625	x	-	-	OUI	

E6	100	1	-	-	-		Patch de MA à côté du quadrat
----	-----	---	---	---	---	--	-------------------------------

Commentaires généraux :

- Présence d'épiphytes
- Quelques « zones clarières » clairsemée en herbier avec colonisation de macroalgues et d'ulve
- De C5 à C6 : vase très fluide
- De C6 à B6 : très mou et fluide, herbier épars et discontinu. Brin d'herbier brun et présence de MA.

Fiche stationnel *Zostera noltei*

Station : B

Date : 18/09/2020

Agents : Alice et Mathis

Code point	Recouvrement Est terrain	Rec image J	Macro-algues			Prél macro-algues	Observ
			V	R	B		
A1	100	1	-	-	-		
B1	3	0.125	x	-	-		
C1	25	0.125	X	-	-		MA en quantité Rebord d'estay
D1	100	1	-	-	-		

E1	80	0.875	-	-	-		Les espaces vides ne sont pas colonisées par des MA
F1	70	0.625	x	-	-		
A2	100	1	-	-	-		Presence d'épiphytes
B2	15	0.125	x	-	-	OUI	MA et herbier brun
C2	60	0.625	X	-	-		
D2	100	1	-	-	-		
E2	100	1	X	-	-		
F2	100	1	-	-	-		
A3	5	0.125	X	-	-		MA et tiges d'herbier brunies et détachées
B3	5	0.125	x	-	-	OUI	Très vaseux, gros amas d'herbier mort, MA, herbier avec très longues feuilles Présence d'estay
C3	100	1	-	-	-		
D3	100	1	-	-	-		
E3	90	0.875	-	-	-		Herbier clairsemé, très vert

F3	70	0.625	x	-	-		Présence de limaces gélatineuses
A4	100	1	-	-	-		Présence d'épiphytes en quantité Proche des rochers du bord
B4	80	0.875	x	-	-	OUI	Herbier de couleur verte plus clair
C4	100	1	x	-	-		Epiphyte Entre les 2 traces de conduite
D4	15	0.125	x	-	-	OUI	Flaque MA mortes et MA dans le sédiment Herbier noir
E4	100	1	-	-	-		
F4	100	1	-	-	-		
A5	100	1	x	-	-		MA très faible quantité
B5	25	0.125	x	-	-	OUI	Amas d'herbier mort et algues détachées
C5	100	1	-	-	-		De C5 à D5: passage de la

							conduite, vase très molle
D5	80	0.875	x	-	-		MA en faible quantité
E5	100	1	-	-	-		
F5	90	0.875	-	-	-	OUI	

Commentaires généraux :

De A5 à F5 : quelques patchs dispersés de macroalgues

Sur toutes la station, présence en quantité d'épiphytes.

Fiche stationnel *Zostera noltei*

Station : C

Date : 17/09/2020

Agents : Alice et Mathis

Code point	Recouvrement Est terrain	Rec image J	Macro-algues			Prél macro- algues	Observ
			V	R	B		

A1	100	1	X	-	-		Très peu d'algues, herbier dense
B1	100	1	-	-	-		Herbier très dense
C1	100	1	-	-	-		Herbier très dense
D1	100	1	X	-	-	OUI	Herbier très dense, amas de MA sur une grosse épaisseur
E1	75	0.875	X	-	-	OUI	MA en très faible quantité
F1	100	1	X	-	-		
A2	100	1	-	-	-		
B2	100	1	-	-	-		
C2	100	1	-	-	-		Traces d'engins. Herbier restauré
D2	100	1	-	-	-		
E2	100	1	x	-	-		Un gros amas de MA
F2	100	1	X	-	-	OUI	
A3	20	0.125	X	-	-	OUI	
B3	20	0.125	X	-	-	OUI	Très vaseux, beaucoup de MO
C3	100	1	-	-	-		Très vaseux, beaucoup de MO

D3	100	1	X	-	-		Herbier très dense, peu de MA
E3	60	0.625	X	-	-	OUI	
F3	100	1	-	-	-		
A4	100	1	-	-	-		
B4	100	1	-	-	-		
C4	35	0.125	X	-	-		Piscine tidale, herbier brun, trace de chantier
D4	100	1	-	-	-		
E4	100	1	-	-	-		Trace de dérivation
F4	95	0.875	X	-	-		
A5	15	0.125	X	-	-		Bordure d'herbier, proche de la digue, pneu, galet, vase très fluide
B5	80	0.875	X	-	-		Ulve
C5	0	0	X	-	-		Piscine tidale
D5	100	1	-	-	-		
E5	100	1	X	-	-		
F5	100	1	-	-	-		

Fiche stationnel Zostera noltei

Station : D

Date : 17/09/2020

Agents : Alice et Mathis

Code point	Recouvrement Est terrain	Rec image J	Macro-algues			Prél macro- algues	Observ
			V	R	B		
A1	100	1	-	-	-		
B1	80	0.875	-	-	-		Micro piscine tidale et débris coquiller
C1	100	1	-	-	-		
D1	100	1	-	-	-		
E1	100	1	-	-	-		
F1	100	1	-	-	-		
A2	100	1	-	-	-		Début d'un herbier inhomogène
B2	100	1	-	-	-		

C2	100	1	-	-	-		
D2	100	1	-	-	-		
E2	100	1	-	-	-		
F2	100	1	-	-	-		
A3	100	1	-	-	-		
B3	70	0.875	-	-	-		
C3	100	1	-	-	-		
D3	100	1	-	-	-		
E3	100	1	--	-	-		
F3	100	1	-	-	-		
A4	100	1	-	-	-		
B4	100	1	-	-	-		
C4	100	1	-	-	-		
D4	100	1	-	-	-		
E4	100	1	-	-	-		
F4	100	1	-	-	-		
A5	100	1	-	-	-		
B5	100	1	-	-	-	OUI	
C5	100	1	-	-	-		
D5	100	1	-	-	-		
E5	100	1	-	-	-		

F5	100	1	-	-	-		
----	-----	---	---	---	---	--	--

Commentaires généraux :

- Herbiers très denses, très immergé qui retient beaucoup d'eau