

Élaboration et mise en oeuvre d'un protocole de suivi des zostères, de la faune associée dans le lac marin du port d'Albret



Mahina THEAU Master 1 Dynamique des écosystèmes aquatiques

Ana DETCHART Master 1 Qualité des milieux aquatiques

Eva TEILETCHEA Master 1 Dynamique des écosystèmes aquatiques

Yann LALANNE TUTEUR PÉDAGOGIQUE

Mathis Jorge TUTEUR DE PROJET

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à **Yann Lalanne**, notre tuteur pédagogique, pour son accompagnement et ses précieux conseils tout au long de cette étude. Ainsi qu'à Mathis Jorge, notre tuteur de projet, pour la cartographie et son expertise sur le sujet.

Un grand merci au **Syndicat Intercommunal de Port d'Albret (SIPA)** et à **Atlantique Landes Récifs (ALR)** pour leur confiance et pour nous avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet.

Nous remercions particulièrement **Anne-Catherine Roch** (ALR) et **Marylou Pourret** (Mairie de Vieux-Boucau) pour leur soutien et leur savoir, ainsi que **Valentin** (SIPA) pour sa disponibilité et son aide précieuse lors de la cartographie en bateau. Un immense merci également à **Irène** (ALR) pour son rôle de plongeuse et ses conseils avisés.

Sans oublier **Manon Harrewyn**, pour nous avoir laissé à disposition un espace chaleureux de travail, et de nous avoir supporté durant cette longue période. Puis nous tenons à remercier nos camarades pour leur soutien sans faille et leur bonne humeur.

Nous remercions également **Laurent Lanceleur** et **Muriel Lissardy** pour leurs renseignements et les documents fournis.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

Résumé

Ce projet se concentre sur la mise en place d'un protocole de suivi scientifique des herbiers de *Zostera marina* dans le lac marin artificiel de Port d'Albret, situé entre Vieux-Boucau-les-bains et Soustons. Ces habitats, essentiels sur le plan écologique, s'inscrivent dans des suivis nationaux menées dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau. Cette étude vise à combler l'absence de suivi de cet écosystème sur ce site. À travers une recherche bibliographique approfondie, deux méthodologies adaptées ont été développées selon les conditions locales et aux moyens de l'association Atlantique Landes Récifs (ALR). Un protocole de cartographie incluant l'extension horizontale, le détourage manuel et le suivi stationnel des herbiers, ainsi qu'un protocole d'étude de la faune associée utilisant la méthode des belt-transects ont été décrits. Ces méthodes ont été conçues pour être réalisables par des plongeurs amateurs, permettant ainsi un suivi pérenne et accessible de ces herbiers, jusqu'alors non étudié dans ce lac artificiel. Ces données seront comparables à des sites de référence à proximité, et permettront d'analyser l'évolution spatio-temporelle ainsi que l'état de santé de ces habitats.

Mots-clés

Zostera marina - herbiers - phanérogames - lac marin - suivi stationnel - macrofaune associée

Table des tableaux, figures et annexes

Fig. 1 : Vue aérienne du lac de Port d'Albret (Vieux-Boucau/Soustons).....	3
Fig. 2 : <i>Zostera marina</i> (à gauche) et <i>Zostera noltei</i> (à droite).....	4
Fig. 3 : Cartographie des herbiers de zostères du lac de Vieux-Boucau suite à l'essai du détourage manuel.....	8
Fig. 4 : Proposition des zones d'échantillonnage pour le protocole de suivi des zostères.....	10
Fig. 5 : Exemple de quadrat utilisé pour l'échantillonnage de pieds de zostères.....	11
Fig. 6 : Prélèvement de pieds de <i>Z. marina</i> pour analyse de dépérissement.....	12
Fig. 7 : Structure d'un pied de <i>Z. marina</i> , modifiée à partir de Auby et al. (2018).....	12
Fig. 8 : Evaluation de la maladie du dépérissement d'après l'échelle de Burdick et al. (1993).....	13
Fig. 9 : Propositions d'emplacements des belt-transects pour la station de Port d'Albret.....	16
Tab. 1 : Synthèse des différentes métriques pouvant être prises en compte dans le protocole de suivi des zostères (Auby et al., 2018).....	6
Tab. 2. Matériel nécessaire à la cartographie des herbiers.....	8
Tab.3. Matériel nécessaire pour l'échantillonnage des <i>Z. marina</i>	11
Tab.4 : Synthèse des protocoles pouvant être intégrés dans un protocole de suivi non exhaustif de la macrofaune dans les herbiers à <i>Z. marina</i>	14
Tab.5. Matériel nécessaire pour l'échantillonnage de la macrofaune associée aux herbiers.....	16
Tab. 6. Analyses statistiques possibles en fonction de l'interprétation des données.....	18
Annexe 1 : Diagramme de Gantt.....	29
Annexe 2 : Exemple de compte-rendu de réunion (partie 1).....	30
Annexe 3 : Exemple de compte-rendu de réunion (partie 2).....	31
Annexe 4 : Fiche terrain pour le suivi des herbiers de <i>Z. marina</i> - Densité des pieds et recouvrement des algues vertes.....	32
Annexe 5 : Fiche terrain pour le suivi des herbiers de <i>Z. marina</i> - Maladie de dépérissement et biométrie.....	33
Annexe 6 : Extrait des fichier Excel proposés pour bancariser les données du suivi des herbiers de <i>Z. marina</i> d'après la base de données Quadrige (Auby et al., 2018)V.....	34
Annexe 7 : Exemple de protocole de prélèvement de l'épifaune dans les herbiers en complément du suivi de la macrofaune associée.....	35
Annexe 8 : Exemple de résultats pour le densité et la biométrie des pieds de <i>Z. marina</i> station de référence DCE de Courbey (Arcachon amont), d'après Auby et al. (2021).....	36
Annexe 9 : Exemple de résultats pour le degré d'atteinte par la maladie de dépérissement (Wasting Index) pour la station de référence DCE de Courbey (Arcachon amont), d'après Auby et al. (2021)..	37
Annexe 10 : Résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).....	38
Annexe 11 : Suite des résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).....	39
Annexe 12 : Suite des résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).....	40

Sommaire

I - Introduction	1
II - Site d'étude	3
III- Intérêts des zostères	4
IV- Suivi des herbiers de <i>Zostera marina</i>	6
IV.1 - Choix de la méthode.....	6
IV.2 - Cartographie des herbiers	8
IV.2.1 - Détourage manuel	8
IV.2.2 - Cartographie par drone	9
IV.2.3 - Programmation du drone	9
IV.2.4 - Prérequis avant utilisation du drone sur le terrain	9
IV.2.5 - Utilisation du drone sur le terrain et récupération des données.....	9
IV.2.6 - Cartographie	9
IV.3 - Protocole de suivi stationnel de <i>Zostera marina</i>	10
IV.3.1 - Date et fréquence d'acquisition	10
IV.3.2 - Station et points.....	10
IV3.3. - Matériel échantillonnage des zostères marines.....	11
IV.3.4 - Densité des pieds de zostères marines et quadrats.....	11
IV.3.5 - Échantillonnage aléatoire.....	11
IV.4 Degré d'atteinte par la maladie de dépérissement (“wasting disease”)	12
IV.4.1 - Prélèvement	12
IV.4.2 - Estimation du degré d'atteinte et biométrie.....	12
IV.5 - Compilation et analyse des données	13
V - Suivi faunistique associée aux herbiers de zostères marines.....	13
V.1 - Intérêt du suivi faunistique.....	13
V.2 - Choix de la méthode.....	14
V.3 - Méthodologie pour caractériser la diversité et la structure de la faune associée aux herbiers de <i>Zostera marina</i>	15
V.3.1 - Contexte et Objectifs.....	15
V.3.2 - Zone d'étude.....	16
V.3.3 - Organisation des plongées.....	16
V.3.4 - Organisation des transects.....	17
V.3.5 - Déroulement de l'échantillonnage.....	17
V.3.6 - Bancarisation des données.....	18

Sommaire

VI. - Critique/Perspectives.....	19
VI.1 - Contraintes environnementales et logistiques	19
VI.2 - Enjeux du déclin des herbiers et facteurs de pression	19
VI.3 - Problématique des algues vertes et surveillance des nutriments	20
VI.4 Sensibilisation	21
VII - Conclusion	22
VIII- Bibliographie	23
IX- Annexes	30

Lexique

Algues épiphytes : Algues vivant fixées sur d'autres organismes, notamment les phanérogames marines ou d'autres algues, sans être parasites mais pouvant limiter la photosynthèse de leur support.

Avifaune : Ensemble des espèces d'oiseaux vivant dans un écosystème.

Belt-Transect : Transect en bande

Biomasse : Quantité totale de matière organique vivante dans un écosystème ou un groupe d'organismes, exprimée en poids sec, poids frais ou en carbone organique par unité de surface ou volume.

Endofaune : Faune benthique vivant enfouie dans les sédiments.

Hydrodynamisme : Ensemble des mouvements de l'eau dans un milieu aquatique, influencés par les courants marins, les échanges entre masses d'eau, la houle et la marée.

Intertidale : Zone située sur l'estran entre le niveau des plus hautes marées et celui des plus basses marées annuelles. Elle intègre les zones de végétations et les habitats non végétalisés.

Invertébrés : Organismes dépourvus de colonne vertébrale (ex : mollusques, crustacés, échinodermes, cnidaires et annélides).

Macrofaune : Ensemble des organismes benthiques dont la taille est supérieure à 1 mm vivant sur ou dans les sédiments marins ou d'eau douce.

Microbrouteurs : Petits organismes herbivores qui se nourrissent notamment de microalgues, de biofilms, ou d'algues épiphytes sur des substrats durs ou végétaux (ex. : gastéropodes).

Microfaune : Ensemble des organismes benthiques dont la taille est inférieure à 0,5 mm vivant dans les sédiments ou en suspension dans l'eau.

Nurserie : Zone où beaucoup d'espèces marines trouvent des conditions favorables au développement et à la croissance des juvéniles.

Oligotrophes : Milieux pauvres en nutriments.

Lexique

Phanérogames marines : Plantes à fleurs aquatiques adaptées au milieu marin, appartenant à l'embranchement des angiospermes, capables de réaliser la photosynthèse et de produire des graines, comme les zostères.

Quadrats : Cadres de dimensions fixes permettant de quantifier et d'analyser la biodiversité et l'abondance des espèces sur une zone donnée.

Régimes hydrologiques : Ensemble des variations du débit et des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau au cours du temps, influencées par les précipitations, la fonte des neiges, l'évapotranspiration et les usages anthropiques.

Réseau benthique : Ensemble des organismes vivant sur ou dans le fond des écosystèmes aquatiques (benthos), incluant la microfaune, macrofaune et méiofaune.

Sessile : Désigne les organismes fixés à un substrat et incapables de se déplacer activement (ex. : anémones, moules).

Subtidale : Zone située en-dessous de la zone de balancement des marées et ne découvrant pas à marée basse.

Transects : Lignes définies dans un milieu permettant un échantillonnage structuré des organismes et de leur distribution le long d'un gradient.

Vagile : Désigne les organismes capables de se déplacer activement dans leur environnement, contrairement aux organismes sessiles (ex. : poissons, crustacés mobiles).

Wasting disease : Maladie affectant notamment les phanérogames marines (*Zostera* spp.), causée par le pathogène *Labyrinthula zosterae*, entraînant la nécrose des feuilles et une régression des herbiers.

Zostères : plante aquatique à fleurs de la famille des Zosteraceae, que l'on trouve sur les fonds marins sableux, formant de vastes prairies sous-marines appelées « herbiers ».

I-Introduction

Les écosystèmes côtiers subissent des bouleversements majeurs depuis plusieurs décennies, plaçant la conservation des herbiers de zostères au cœur des préoccupations environnementales (Orth et al., 2006 ; Waycott et al., 2009). Ces phanérogames marines, véritables ingénieurs écosystémiques, constituent l'un des habitats les plus productifs de la planète. Seize espèces sont comptabilisées dans le monde (Aquaportail, 2025). Leur présence fournit des services écologiques essentiels : rôle de nurserie pour de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés, stabilisation des sédiments limitant l'érosion côtière (Boström et al., 2014), amélioration de la qualité de l'eau par la filtration des nutriments (Hemminga et Duarte, 2000), et contribution significative au stockage du carbone bleu (Duarte et al., 2005). Cependant, ces écosystèmes font face à des menaces croissantes : pollution des eaux, modification des régimes hydrologiques, augmentation des températures et maladies comme le "wasting disease" (Burdick et al., 1993 ; Ben Hartog, 1987 ; Giesen, 1990).

La surveillance de ces herbiers s'organise à différentes échelles géographiques. À l'échelle mondiale, les suivis des herbiers de zostères ont débuté en 1998 avec le programme Seagrass-Watch en Australie, soulignant leur importance écologique. Aujourd'hui, ces suivis couvrent 259 sites mondiaux (Hily et al., 2010 ; Orth et al., 2009). En France, seules deux espèces de zostères sont présentes : la zostère marine (*Zostera marina*), subtidale, et la zostère naine (*Zostera noltei*), intertidale. Depuis 2003, le réseau REBENT coordonne la surveillance de ces herbiers sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (Hily et al., 2010). Des protocoles standardisés (Auby et al., 2018) permettent de suivre leur évolution, principalement par des méthodes de télédétection satellitaire et des suivis in situ. Les suivis combinent des mesures de densité, de biomasse et de surface des herbiers, ainsi que l'évaluation de leur état de santé. Les méthodes employées vont de l'observation directe sur le terrain à l'utilisation d'outils technologiques comme les drones pour la cartographie (Little, 2023).

Le lac marin du Port d'Albret à Vieux-Boucau, ancienne embouchure de l'Adour, représente un site d'étude particulièrement intéressant pour ces écosystèmes. Ce plan d'eau artificiel de 48 hectares, créé dans les années 70 lors des travaux d'aménagement du littoral aquitain, présente des conditions environnementales complexes. Avec une profondeur maximale de 8 mètres et un substrat principalement sableux, il offre un habitat propice au développement des herbiers de zostères (Hodgson et al., 2023). Cependant, sa connexion limitée avec l'océan, régulée par un système de vannes, entraîne une faible dissipation de l'onde de marée, réduisant l'oxygénation des eaux profondes. Cette situation est aggravée par l'apport d'eaux douces chargées en nutriments, causant des problèmes d'envasement, favorisant la prolifération d'ulves (CEVA - Centre d'Étude et de Valorisation des Algues, 2020 ; Bajjouk et al., 2010) et l'arrivée récente de sargasses sp. (Com. pers. SIPA).

La *Zostera marina*, présente dans le lac marin constituent un paradoxe écologique. D'une part, leur prolifération peut entraver la circulation de l'eau, freinant l'hydrodynamisme et favorisant l'ensablement (Hily, 2006a). D'autre part, les herbiers sont connus pour abriter une biodiversité remarquable, notamment des hippocampes et d'autres espèces associées, justifiant leur préservation (Bajjouk et al., 2019). Au sein de ces habitats, plus de 500 espèces ont notamment pu être identifiées lors de suivis du réseau Rebent (Bajjouk et al., 2010). Leur suivi représente donc un défi important, nécessitant l'adaptation des protocoles standards aux spécificités du site. Les conditions de turbidité variables, la profondeur, et l'accessibilité sont autant de paramètres à prendre en compte dans l'élaboration d'une stratégie de surveillance efficace (Bajjouk et al., 2010).

Crée en 1996, l'association Atlantique Landes Récifs vise à renforcer les ressources halieutiques de la côte landaise. Elle se consacre à la création et gestion de récifs artificiels pour protéger et étudier la faune et la flore marines, développer un observatoire sous-marin et sensibiliser le public à l'environnement marin. En partenariat avec le Syndicat Intercommunal du Port d'Albret (SIPA), gestionnaire du lac marin, l'association assure le suivi écologique du site, pour lequel le SIPA cherche à équilibrer les enjeux touristiques et environnementaux. Ce suivi inclut un inventaire de la biodiversité, mené pour la première fois en 2009 (Penne, 2009), et actualisé en 2023 (Jorge et Biais, 2023) et comme perspective, collecter des données physico-chimiques (nutriments, salinité).

Bien que d'autres herbiers en Aquitaine soient surveillés Arcachon (Bernard et al., 2023a) dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau, Port d'Albret n'avait pas encore bénéficié de suivi standardisé jusqu'à ce partenariat. Ce site est classée zone spéciale de conservation par Natura 2000 (FR7200717) « Zone Humide de l'arrière-dune du Marensin » (INPN, 2024)

Dans ce contexte, la problématique centrale de cette étude est la suivante : comment assurer un suivi efficace des herbiers de *Zostera marina* et de leur faune associée dans le lac du Port d'Albret, tout en prenant en compte leur double rôle d'habitat essentiel pour la biodiversité et de potentiel perturbateur de l'hydrodynamisme du lac ?

Ce projet tuteuré a pour objectif de développer une méthodologie adaptée aux ressources de l'association, en combinant des approches traditionnelles d'échantillonnage (quadrats, transects) et des technologies modernes de cartographie (drone, GPS). L'enjeu est de mettre en place un protocole robuste, reproductible et comparable, permettant un suivi à long terme de cet écosystème clé et assurant une gestion durable du lac marin, tout en s'intégrant dans le cadre actuel de surveillance DCE des herbiers de zostères. Pour encadrer efficacement le suivi de ces herbiers, il est essentiel de se poser les questions suivantes :

- **Quels descripteurs pertinents et mesurables l'Association peut-elle suivre de manière reproductible afin d'évaluer l'état de conservation des herbiers de *Zostera marina* et leur évolution ?**
-

- Comment mesurer l'étendue horizontale des herbiers ?
- Quelle est la densité des herbiers et leur état (maladie de dépérissement) ?
- Quelle approche méthodologique adopter pour caractériser la diversité et la structure de la faune associée aux herbiers de *Zostera marina* du lac marin ?

II- Site d'étude

Le site d'étude est le lac marin du Port d'Albret, lac artificiel ancien lit de l'Adour, situé dans le sud-ouest de la France, entre Vieux-Boucau-les-Bains et Soustons. Ce plan d'eau semi-fermé, en communication avec l'océan Atlantique par un chenal, est influencé par les marées.

La zone d'étude se caractérise par quatre types de substrats : sableux, sablo-vaseux, récifs et herbiers à zostère marine (*Zostera marina*), chacun abritant des communautés faunistiques qui leur sont spécifiques.

Son eau saumâtre résulte d'un mélange entre l'eau salée et les apports d'eau douce, principalement issus de l'étang de Pinsolle et du courant de Soustons, souvent chargés en nutriments (nitrates et phosphates). Cet excès de nutriments favorise la prolifération des ulves, qui peuvent concurrencer les herbiers de zostères en réduisant la lumière disponible et en contribuant à l'asphyxie du milieu (Sfriso et Marcomini, 1997).

Classé zone spéciale de conservation dans le réseau Natura 2000, le lac bénéficie d'une protection particulière en raison de sa richesse écologique, notamment ses herbiers sous-marins, essentiels pour la biodiversité, offrant des habitats privilégiés pour de nombreuses espèces de la faune marine (L414-1 du code de l'environnement).



Fig. 1 : Vue aérienne du lac de Port d'Albret (Vieux-Boucau/Soustons)

III- Intérêts des zostères



Fig. 2 : *Zostera marina* (à gauche) et *Zostera noltei* (à droite).

En tant qu'espèces ingénieres, les zostères structurent désormais communautés benthiques qui favorisent la diversité de la faune et flore associée (Hily et Bouteille, 1999). La zostère marine possède de longues feuilles pouvant atteindre 1,2 mètre, tandis que la zostère naine a des feuilles plus courtes, d'environ 20 cm. L'organisation de ces communautés dépend de multiples paramètres environnementaux tels que la luminosité, les conditions hydrodynamiques, la disponibilité en nutriments, les variations thermiques et la nature du substrat (Phillips et al., 1983, Wetzel et Penhale, 1983, Dennison et al., 1993, Dunton, 1994, Lee et Dunton, 1996). Dans les zones subtidales préservées, les herbiers de *Zostera marina* peuvent abriter plus de 500 espèces pour la faune, incluant une grande variété d'organismes spécifiques à cet habitat (Bajjouk et al., 2010).

La productivité primaire constitue une autre fonction essentielle des herbiers, maintenue même pendant la période hivernale. Ces plantes marines démontrent une remarquable capacité à optimiser les ressources nutritives en conditions oligotrophes. Leur activité photosynthétique contribue significativement à l'oxygénation des eaux, un processus crucial dans les zones peu agitées où des déficits en oxygène peuvent survenir près du fond (Hily, 2006a).

Le système racinaire et foliaire des herbiers transforme considérablement la dynamique sédimentaire des zones côtières. Ces végétaux marins, qui s'installent sur une grande variété de substrats meubles, modifient leur environnement de plusieurs façons. Leurs racines entrelacées maintiennent le sédiment en place, pendant que leurs feuilles réduisent les mouvements d'eau à proximité du fond. Cette diminution de l'agitation limite la remise en suspension des particules sédimentaires, ce qui améliore la clarté de l'eau. Cette augmentation de la transparence favorise alors l'activité photosynthétique dans l'ensemble de l'écosystème côtier, bénéficiant ainsi à la production primaire des zones littorales (Ganthy, 2011).

Ces phanérogames marines jouent un rôle tampon et exercent également une fonction régulatrice essentielle dans le cycle des éléments nutritifs des environnements lagunaires (Auby, et al., 2011). Leur particularité réside dans leur capacité à extraire l'azote et le phosphore simultanément de deux sources : la colonne d'eau et les sédiments. Ces végétaux peuvent stocker ces nutriments dans leurs tissus quand ils sont abondants dans l'environnement, constituant ainsi des réserves qu'ils mobiliseront ultérieurement pendant leurs phases de développement (Bajjouk, et al. 2019).

La complexité structurelle des herbiers offre un habitat privilégié pour de nombreux organismes. Les feuilles servent de support aux algues épiphytes à cycle court, adaptées au renouvellement des feuilles. Cette végétation attire une faune de microbrouteurs (Hily et al, 2004). La densité des plantes procure un abri idéal pour diverses espèces mobiles, notamment les crustacés et les poissons, qui y trouvent refuge et nourriture. Cette superposition des communautés de substrats meubles et durs explique la richesse biologique exceptionnelle de ces milieux.

Les herbiers constituent des sites privilégiés pour la reproduction et le développement des juvéniles de nombreuses espèces marines. L'abondance de nourriture et la protection offerte par la végétation attirent des espèces d'importance commerciale. Cette concentration de proies attire naturellement des prédateurs, notamment les bars et les labridés, particulièrement actifs la nuit. Concernant leur rôle trophique, si la consommation directe des feuilles par la faune marine reste limitée, elles représentent une ressource alimentaire cruciale pour l'avifaune migratrice hivernante (Hily, 2006a).

Concernant l'aspect réglementaire, il y a à l'échelle européenne un contexte favorable pour l'acquisition de connaissance sur les herbiers de zostères et leur protection. Ils sont inclus dans la "Directive Habitat" (92/34) en tant qu'habitat menacé, ce qui requiert des mesures de gestion et de conservation spécifiques (Bajjouk et al., 2010). Ils sont également retenus Dans la DCE (2000/60/CE), c'est également un habitat à considérer pour l'évaluation de la qualité des masses d'eau (Bajjouk et al., 2010). Ils font également partie de la liste des espèces et habitats menacés et/ou en déclin de la "Convention OSPAR" (2004) (Bajjouk et al., 2010).

A l'échelle nationale, les herbiers de zostères disposent d'un statut de protection par la loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral (Bajjouk et al., 2010). De plus, d'après Légifrance, les zostères marines disposent d'une interdiction de coupe, de mutilation, d'arrachage et de cueillette par l'arrêté du 8 mars 2002.

IV- Suivi des herbiers de *Zostera marina*

IV.1 - Choix de la méthode

Dans le cadre de la DCE, il existe un protocole standardisé très complet pour le suivi stationnel des herbiers de zostères (Auby et al., 2018). Pour chaque métrique de ce protocole, la pertinence, le coût de la mesure et la faisabilité ont été considérées dans le cadre d'un suivi par l'ALR, comme synthétisé dans le tableau 1.

Tab. 1 : Synthèse des différentes métriques pouvant être prises en compte dans le protocole de suivi des zostères (Auby et al., 2018).

Métrique	Avantages	Inconvénients	Unité	Moyens et coût associés	Faisabilité par l'ALR	Réf	Adaptation possible
Extension horizontale (1)	Couverture large et suivi temporel Comparable	Dépend des conditions de visibilité	Lac de Port d'Albret	<ul style="list-style-type: none"> Paddle (200€) ou embarcation du SIPA (8 € d'essence) GPS Garmin Montana 700 (700 €) Drone Dji air 2s (1000 à 2000 €) 	****	DCE	
Densité des pieds (2)	Facile à mesurer Infos précises	Limité selon les conditions (vase, houle, turbidité,...)	Quadrat de 0,1 m ²	<ul style="list-style-type: none"> Cadres de quadrats de 0,1 m² (3 ou +) (17€) Plongeurs équipés (3 planquées de 2) Appareil photo étanche (> 500€) Gueuse, bouée, et bout gradué (50 à 150 €) 	****	DCE	
Maladie du déperissement (2)	Evalue l'état des zostères	Destruitur si prélèvement	Pied de zostère	<ul style="list-style-type: none"> 3 x 5 pieds Plongeurs équipés (3 planquées de 2) Appareil photo étanche (> 500€) Cuvette, papier millimétré plastifié, règle (10 à 30 €) 	****	DCE	Estimation in situ ou analyse photo
Biomasse des zostères (2)	Info précise sur la structure des herbiers	Destruitur Chronophage	Pied de zostère	<ul style="list-style-type: none"> Plongeurs équipés (2 par planquée) Laboratoire et consommables étuve, balance de précision temps 	**	DCE	
Biomasse des macroalgues opportunistes (2)	Mieux comprendre l'habitat	Destruitur	Quadrat de 0,1 m ²	<ul style="list-style-type: none"> Cadres de quadrats de 0,1 m² (3 ou +) (17€) Plongeurs équipés (3 planquées de 2) Gueuse, bouée, et bout gradué (50 à 150 €) Laboratoire, étuve, balance de précision 	*	DCE	Estimation du % de recouvrement à l'œil nu
Epibiontes (Poids Sec et Poids Sec Sans Cendres) (2)	Connaitre la biodiversité fixée sur les	Destruitur Chronophage Besoin de matériel coûteux (four à calcination)	Pied de zostère	<ul style="list-style-type: none"> Plongeurs équipés (3 planquées de 2) Laboratoire, four à calcination et consommables étuve, balance de précision, four à calcination temps 	**	DCE	
Gradient de salinité (3)	Mieux comprendre le site	Nécessite sonde adaptée	Point	<ul style="list-style-type: none"> Sonde multiparamètres Hanna HI98194 (> 2000€) Sonde multiparamètres haute fréquence : YSI EXO2 (Réf. 599502-00) (20 000 € + entretien) Embarcation du SIPA (8€ d'essence) 	/	/	Possibilité de sous-traiter des analyses physico-chimiques (Laboratoires certifiés COFRAC, UPPA...) (jusqu'à 30 €/échantillon)
Nutriments (3)	Intérêt direct avec zostères	Nécessite sonde adaptée Besoin de données en haute fréquence	Point	<ul style="list-style-type: none"> Analyseur automatique et laboratoire (> 40 000€) Embarcation du SIPA (8€ d'essence) 	/	/	Possibilité de sous-traiter des analyses physico-chimiques (Laboratoires certifiés COFRAC, UPPA...) (jusqu'à 30 €/échantillon)

(1) période d'échantillonnage recommandée : juin/septembre

(2) période d'échantillonnage recommandée : août-septembre

(3) suivi haute fréquence

Les épibiontes (algues et microfaune fixées) peuvent, en excès avoir un effet d'ombrage et donc limiter la croissance des feuilles (Bajjouk et al., 2010). Cependant la biomasse des macroalgues, des zostères et des épibiontes n'est pas incluse en raison des difficultés techniques et des coûts associés à leur mesure. L'extension horizontale, indicateur le plus communément utilisé pour suivre les herbiers (Borum et al., 2004 ; Krause-Jensen et al., 2003) a été sélectionnée pour le suivi des herbiers de zostères. Cette méthode consiste à mesurer la surface totale de l'enveloppe des herbiers (en m² ou km²), offrant une vision à grande échelle de leur évolution temporelle, qu'il s'agisse d'expansion ou de régression.

Dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), cette méthode repose sur l'analyse de l'évolution de l'étendue des herbiers par rapport à leur extension maximale observée (Auby et al., 2010). Cependant, cette méthode présente certaines limites : elle ne permet pas d'observer les modifications internes des herbiers (densité, fragmentation) et reste dépendante des conditions de visibilité, notamment en cas de forte turbidité. Pour pallier ces limitations, le protocole de suivi stationnel des zostères établi dans le cadre de la DCE (Auby et al., 2018) a été adapté aux spécificités du site et aux moyens disponibles de l'association ALR, garantissant ainsi des données fiables.

La méthode au drone offre plusieurs avantages : elle est facile à utiliser, accessible et permet de produire des données scientifiquement exploitables. Les relevés effectués par drone peuvent être comparés avec ceux d'autres sites de la façade atlantique, tels que Txingudi, Hossegor et le bassin d'Arcachon (Sanchez et al., 2022 ; Auby et al., 2011 ; Bernard et al., 2023a, 2023b). Cependant, son utilisation nécessite le respect strict des réglementations françaises, particulièrement en raison de l'emplacement du lac de Vieux-Boucau en agglomération. En France, un tel survol relève de la catégorie "Spécifique" (scénario S-3), ce qui implique une déclaration préalable auprès de la préfecture, une formation et certification du télépilote (CATT), ainsi que le respect des conditions opérationnelles suivantes : maintien du drone en vue directe, interdiction de survol des tiers non impliqués, hauteur maximale limitée à 120 m, et absence d'enregistrement permettant d'identifier des personnes sans leur autorisation. De plus, la présence d'une seconde personne est requise pour assurer la sécurité en tant qu'observateur chargé de garder l'appareil en vue directe pendant le vol. Bien que dépendante des conditions de visibilité (turbidité), cette méthode est particulièrement adaptée pour cartographier les zones difficiles d'accès et contribue à une cartographie complète du site.

Le détourage manuel des herbiers est utilisé comme méthode complémentaire car il permet d'établir une cartographie précise des zones de présence des zostères tout en prenant en compte les particularités du terrain et les variations locales de densité. Cette approche garantit une délimitation fiable des zones à herbiers, servant ainsi de référence pour le suivi de leur évolution spatiale. Toutefois, cette méthode présente certaines contraintes opérationnelles importantes : l'accès en bateau est limité dans certaines zones en raison de la faible profondeur d'eau ou de la densité même des herbiers. Bien que plus chronophage que les méthodes par télédétection comme le drone, elle reste essentielle pour établir une cartographie préalable et détaillée.

L'ajout d'un suivi stationnel permet également de caractériser la structure interne des herbiers en évaluant les densités moyennes et la distribution des patches. Cette approche complémentaire fournit des informations essentielles sur la vitalité et la résilience des herbiers, paramètres qui ne peuvent être détectés par le seul suivi de l'extension horizontale.

Cette méthodologie complète, combinant relevés par drone et détourage manuel adaptés au site du lac de Vieux-Boucau ainsi qu'aux ressources disponibles au sein de l'association ALR et du SIPA, garantit la faisabilité et la reproductibilité des mesures. Elle permet également une comparaison avec les autres sites suivis dans le cadre de la DCE et contribue ainsi au programme global de surveillance et à la préservation durable des herbiers de zostères sur le littoral aquitain.

IV.2 - Cartographie des herbiers

Tab. 2 : Matériel nécessaire à la cartographie des herbiers

Drone Dji air 2s	Prise de vue aérienne
GPS Garmin Montana 700	Enregistrement des coordonnées
Embarcation du SIPA	Parcourir le lac

IV.2.1 - Détourage manuel

La cartographie des herbiers nécessite une approche combinée entre relevés de terrain et imagerie par drone. Le détourage manuel est effectué en binôme équipé d'un GPS Garmin Montana 700 et d'une embarcation flottante pour parcourir l'ensemble du lac. Cela permet de collecter les coordonnées géographiques correspondant au contour de l'herbier. Cette approche garantit une couverture peu exhaustive de la zone d'étude : les zones accessibles sont cartographiées directement sur le terrain, tandis que les secteurs difficiles d'accès sont représentés grâce aux images drone. Ces coordonnées seront ensuite récupérées et transférées dans un logiciel de cartographie (QGIS) pour cartographier les herbiers dans la zone d'étude. La période propice pour cette intervention est au mois de juin (extension maximale) ou au mois de septembre (impact de la saison estivale).

Une campagne de test pour le détourage manuel a été réalisée le 7 novembre 2024. Les données GPS récoltées ont permis de cartographier les contours des herbiers du lac (Fig 3).



Fig. 3 : Cartographie des herbiers de zostères du lac de Vieux-Boucau suite à l'essai du détourage manuel.

Cette campagne a permis une première estimation de l'étendue des herbiers, avec un herbier principal d'une surface d'environ 80 000 m² (79 530). Une autre zone, avec des herbiers en patch, a été identifiée, pour une surface de 15 000 m² (15 141 m²). Au moins deux opérateurs (pilotage et GPS) étaient nécessaires pour la phase terrain (2h), et un pour la cartographie (4h).

IV.2.2 - Cartographie par drone

En complément du détourage manuel, un drone (modèle DJI Air 2S) sera utilisé pour cartographier les herbiers de lac de Port d'Albret. Son utilisation permet d'obtenir efficacement des données précises, parfaitement adaptées dans le cadre d'un suivi temporel pérenne. Durant la même période que le détourage manuel, en privilégiant la marée haute et les forts coefficients de marée.

IV.2.3 - Programmation du drone

Avant toute chose, le drone doit être programmé (hauteur et itinéraire de vol). La hauteur des prises de vue est fixée à 50 m, ce qui assure un bon compromis entre la qualité de l'image et la surface photographiée. L'itinéraire de vol sera tracé de sorte à couvrir le lac dans son ensemble tout en minimisant la durée (estimée) du trajet en raison de l'autonomie de la batterie.

IV.2.4 - Prérequis avant utilisation du drone sur le terrain

Plusieurs précautions sont à prendre avant d'utiliser le drone sur le terrain. Il est nécessaire de vérifier l'état du drone, en particulier au niveau des hélices. Les conditions météorologiques doivent également être adaptées au survol du lac (idéalement un temps nuageux et sans vent). La principale contrainte est l'autonomie du drone (2h ou moins si les conditions sont défavorables). La batterie doit être chargée et la durée de l'itinéraire doit être réalisable au vu de l'autonomie du drone (une marge de sécurité entre la durée d'autonomie et la durée estimée de l'itinéraire est nécessaire). Une puissance de calcul est également importante pour pouvoir traiter les données, il faut s'assurer que l'espace de stockage soit suffisant avant la campagne. Enfin, il est indispensable de vérifier si le site d'étude est soumis à des autorisations de vol, et auquel cas, réaliser les démarches nécessaires afin de capturer les images aériennes.

IV.2.5 - Utilisation du drone sur le terrain et récupération des données

Sur le terrain, le drone est allumé dans une zone préalablement balisée et sécurisée. Une fois le pilotage automatique activé, le drone suit l'itinéraire prévu en complète autonomie. Une surveillance constante de l'engin en survol est nécessaire, pour intervenir avec les commandes manuelles en cas de besoin, et pour sécuriser l'atterrissement.

Les données du suivi par drone peuvent être récupérées avec une application et transférées sur QGis pour être cartographiées.

IV.2.6 - Cartographie

Les données GPS obtenues par les deux méthodes (détourage manuel et survol par drone) seront cartographiées en utilisant le logiciel QGIS.

Les surfaces d'herbiers seront comparées pour évaluer la précision et l'exactitude des deux méthodes. Une comparaison de l'extension horizontale actuelle par rapport à des données plus anciennes pourra également être réalisée à partir d'orthophotos récupérées sur Géoportail.

IV.3 - Protocole de suivi stationel de *Zostera marina*

Le protocole d'échantillonnages des zostères dans le cadre de la DCE (Auby et al., 2018) en milieu subtidal a été adapté en fonction du site et des moyens des partenaires, dans le but d'être faisable et reproductible, tout en fournissant des données exploitables et comparables avec d'autres sites suivis par la DCE (ex : Hossegor).

IV.3.1 - Date et fréquence d'acquisition

L'échantillonnage se fera de manière annuelle. En Nouvelle-Aquitaine, la période d'échantillonnage recommandée est d'août à septembre (Auby et al., 2018). En subtidal, il est nécessaire de plonger à marée haute, préférablement lors de périodes de coefficients importants. Les protocoles d'échantillonnage de la faune doivent également être appliqués en parallèle.

IV.3.2 - Station et points

Le lac de Port d'Albret sera considéré comme une unique station d'étude. Conformément au protocole de la DCE, trois "points" seront donc échantillonnés pour son suivi stationnel, à un même niveau bathymétrique. La localisation GPS des points sera déterminée à partir de la cartographie des herbiers obtenues. Les points seront placés dans des zones homogènes et représentatives de l'herbier, loin des zones de bordure (Fig. 4).



Fig. 4 : Proposition des zones d'échantillonnage pour le protocole de suivi des zostères.

IV.3.3 - Matériel échantillonnage des zostères marines

Tab.3 : Matériel nécessaire pour l'échantillonnage des zostères

Quadrats de 0,1m ² lesté	Délimiter la zone de comptage
Appareil photo étanche	Archivage visuel (état, densité...)
Fiche terrain	Renseigner les informations

IV.3.4 - Densité des pieds de zostères marines et quadrats

Avant l'échantillonnage, il serait recommandé de former les observateurs afin de standardiser la méthode de comptage et de réduire les biais lors du dénombrement des pieds dans les quadrats.

Pour chaque point, plusieurs quadrats seront échantillonnés. Les surfaces de quadrats utilisées dans le protocole DCE sont de 0,04m² (20cm de côté) ou 0,1m² (31,6 cm de côté). Le nombre de quadrats étant doublé pour ceux de 0,04m², une surface de 0,1m² a été choisie, pour faciliter l'échantillonnage par les plongeurs l'installation des quadrats sous l'eau pouvant être compliquée et chronophage.



Fig. 5 : Exemple de quadrat utilisé pour l'échantillonnage de pieds de zostères

Pour une taille de quadrat de 0,1m², il faudra réaliser pour chaque point deux à trois quadrats. Ce nombre sera déterminé sur place pour les 3 zones, à partir d'une évaluation visuelle de la densité des pieds de zostères. Si elle est estimée supérieure à 200 pieds/m², 2 quadrats seront échantillonnés pour ce point. En revanche, pour une densité inférieure à 200 pieds, il en faudra 3 par point. Le nombre total de quadrats sera donc compris entre 6 et 9 à l'échelle de la station.durée , nombre plongeur

IV.3.5 - Échantillonnage aléatoire

Pour chaque point, 2 à 3 quadrats seront échantillonnés de manière aléatoire du point désignant la zone. Les quadrats seront placés au fond et le nombre de pieds de zostères sera compté par une palanquée de deux plongeurs et renseigné dans une fiche de terrain prévu à cet effet (annexe 4). Un appareil photo étanche doit être utilisé pour photographier les quadrats.

IV.4 - Degré d'atteinte par la maladie de dépérissement

IV.4.1 - Prélèvements

Pour chaque point, cinq pieds de zostères seront prélevés de manière aléatoire (Fig.6), soit un total de 15 pour la station. Ils seront rangés avec précaution dans des sacs plastiques réutilisables (annotés selon le point de prélèvement) pour une observation plus détaillée.



Fig. 6 : Prélèvement de pieds de *Z. marina* pour analyse de dépérissement

IV.4.2 - Estimation du degré d'atteinte et biométrie

Les feuilles de chaque pied prélevé seront étudiées séparément pour l'estimation du degré d'atteinte et la biométrie. Elles sont numérotées de la plus jeune (la plus courte et internalisée) à la plus âgée (la plus longue si intacte, et la plus externe) et étudiées dans cet ordre (Fig. 7).

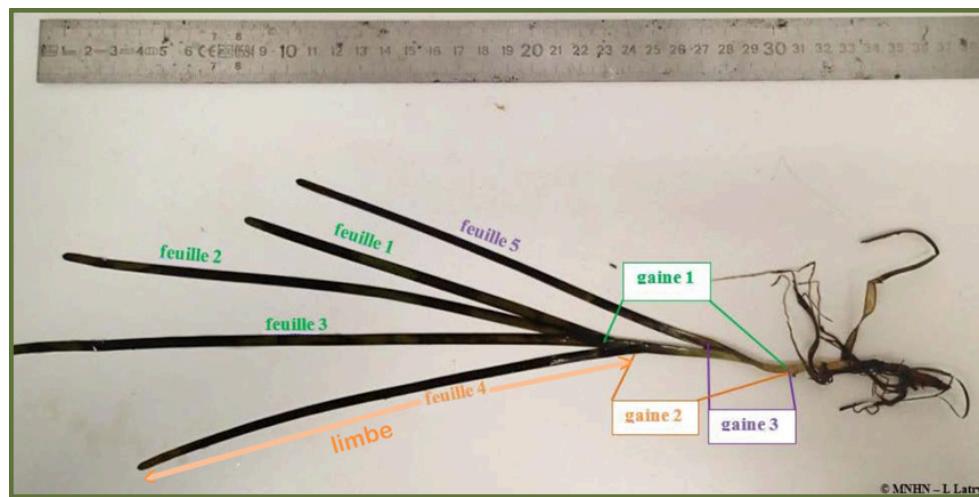


Fig. 7 : Structure d'un pied de *Z. marina*, modifiée à partir de Aubry et al. (2018).

Le degré d'atteinte par la maladie de dépérissement sera estimé par l'estimation du recouvrement de tâches noires selon l'échelle Burdick et al. (1993) (Fig. 8).

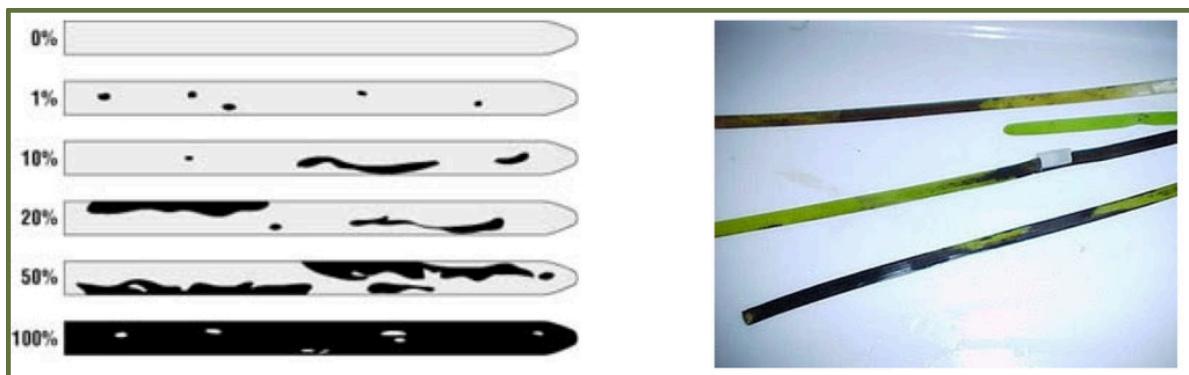


Fig. 8 : Evaluation de la maladie du dépérissement d'après l'échelle de Burdick et al. (1993).

Cette échelle permet de limiter le biais observateur en visualisant les limites des classes de pourcentages utilisées, qui sont les suivantes [0] ;]1-10%] ;]10-20%] ;]20-50%] ;]50-100%]. La longueur et la largeur des limbes sera également mesurée pour chaque feuille, en utilisant une règle graduée ou du papier millimétré. L'état de l'apex (extrémité de la feuille) sera aussi vérifié (cassé ou intact). Toutes ces informations seront renseignées dans une fiche de terrain (Annexe X). Il est important de distinguer la maladie de dépérissement avec des taches noires et non un biofilm ou des salissures. Ces données permettront d'être comparées sur les différentes années et sites.

IV.5 - Compilation et analyse des données

Toutes les données seront compilées dans des jeux de données sur Excel (Annexe 6) dont l'organisation est inspirée de la base de données Quadrigé du protocole DCE (Auby et al.,, 2018), pour permettre une compatibilité des résultats avec leur comparaison d'autres sites.

Il sera possible de calculer la moyenne et l'écart-type pour la densité de zostères, la longueur des feuilles, et le pourcentage de dépérissement, ce qui permettra de réaliser des représentations graphiques comme pour les suivis dans le cadre de la DCE (Auby et al., 2021). Des tests de comparaison de moyennes et de séries (ANOVA) peuvent également être réalisés (Hily, 2006b).

V. Suivi faunistique associée aux herbiers de zostères marines

V.1 - Intérêt du suivi faunistique :

L'échantillonnage de la faune aquatique du lac marin de Port d'Albret peut contribuer à une meilleure compréhension de la biodiversité locale et de l'état de l'écosystème. Un suivi régulier de la faune permettrait d'obtenir des données utiles pour évaluer d'éventuelles modifications internes du lac. Ces informations seraient utiles pour ajuster les pratiques de gestion et sensibiliser le grand public. Dans ce cas, la faune présente dans les herbiers représente un intérêt particulier pour ce suivi. En effet, ces herbiers servent de refuge, de nourricerie et de nurserie pour de nombreuses espèces aquatiques (Boström et al., 2014).

L'abondance et la diversité de cette faune seraient particulièrement pertinentes à étudier. En parallèle du suivi des herbiers de zostères, cela permettrait de voir les tendances et les dynamiques de cet habitat ainsi que la faune associée sur ce site.

Des suivis de la faune aquatique ont déjà été mis en place par l'ALR au lac de Port d'Albret en 2009 et 2023 (Penne, 2009 ; Jorge et Biais, 2023). L'objectif de celui-ci serait d'améliorer et de standardiser la méthode d'échantillonnage, pour mieux appréhender la diversité faunistique du lac, et mettre en place un suivi pérenne réalisable par l'ALR.

*Quelles sont les espèces présentes (macrofaune) dans les herbiers de *Zostera marina* ?*

V.2 - Choix de la méthode

Dans un premier temps, le type de faune à prendre en compte dans le suivi a été discuté. Un inventaire exhaustif comprendrait notamment l'endofaune, la microfaune (zooplancton) et la macrofaune, qui peuvent être sessiles ou vagiles. L'endofaune et la microfaune nécessitent des compétences particulières et seraient plus difficiles à mettre en place par l'ALR. Pour des soucis de pertinence et de faisabilité, un suivi centré uniquement sur la macrofaune observable (vagile et sessile) en plongée apparaît plus cohérent, même s'il exclut une part de la diversité biologique. Les protocoles présentés sont standardisés et tirés de la littérature scientifique. Ils servent de base à l'élaboration de ce suivi, bien que peu exhaustif, car adapté aux moyens de l'association. Si des modifications doivent être apportées pour des raisons logistiques, elles devront être appliquées à l'identique pour les futurs suivis. En prenant en compte les impacts potentiels sur l'effort d'échantillonnage, lors de la comparaison des données avec d'autres sites.

Tab. 4 : Synthèse des protocoles pouvant être intégrés dans un protocole de suivi non exhaustif de la macrofaune dans les herbiers à *Z. marina*.

Protocole	Avantages	Inconvénients	Unité	Moyens	Coût	Faisabilité par ALR	Réf	Adaptation possible
Protocole d'Observation Visuelle Simple	Facile à mettre en œuvre Accessible à tous les niveaux Permet un premier aperçu des espèces et habitats	Observations qualitatives uniquement Manque de reproductibilité et de standardisation, Résultats non robustes	Zone définie nage libre *	Plongeurs équipés Appareil photo	★★★★★	*****	/	Peut être combiné avec d'autres méthodes pour affiner les résultats
Protocole des Quadrats	Données plus précises sur l'abondance des espèces Bon compromis entre rigueur scientifique et facilité de mise en œuvre	Moins adapté aux espèces mobiles, nécessite un suivi régulier pour être pertinent	3 quadrats de 20 m ² (1/zone) *	Plongeurs équipés, quadrats	★★★☆☆	****	Jorge et Biais, 2023	Peut être adapté à des quadrats plus petits selon les besoins
Protocole des Belt-Transects Standardisé	Méthode rigoureuse et reproductible Standardisation permettant le suivi à long terme, exploration précise d'une grande surface (600 m ²) Estimation de la taille des individus rencontrés	Nécessite une bonne coordination des plongeurs Méthodologie plus exigeante (mise en place des transects)	3 transects de 50m ou 3 transects de 150 m ou *	Plongeurs équipés, bouées, bout gradué (100m)	★★★★★	***	Chalifour, 2017	Echantillonnage en présence/absence au lieu d'abondance possible
Protocole Havenau	Permet d'étudier l'épifaune mobile, protocole existant dans la DCSMM, méthode reproductible	Nécessite un matériel spécifique (filet, système de prélèvement), contraintes de marée descendante	10 m ² par passage	Filet Haveneau, contenants pour prélèvements	★★★★★	**	Janson et al., 2018	Peut être utilisé en complément des autres protocoles

Après concertation avec l'ensemble des acteurs et une analyse approfondie des différentes options, nous avons retenu le Protocole des Belt-Transects Standardisés.

Ce choix s'est imposé car il offre le meilleur équilibre entre la précision scientifique des données collectées, la faisabilité logistique sur le terrain, et l'optimisation du temps de plongée. De plus, cette méthode permet une standardisation des observations qui facilitera les comparaisons futures et le suivi à long terme des herbiers marins. Néanmoins, le Protocole Haveneau (Janson et al., 2018) pourrait être envisagé comme une méthode complémentaire pour des études plus spécifiques sur l'épifaune mobile dans les zones d'herbiers (Annexe 7).

Dans le cadre des méthodes d'échantillonnage, deux approches principales se distinguent : le dénombrement, qui consiste à quantifier l'abondance des éléments, et la méthode présence-absence, qui se focalise sur la simple détection ou non des espèces ciblées.

Un dénombrement des individus fournirait des données plus précises avec des valeurs d'abondance, mais présenterait également de nombreux biais pouvant affecter la fiabilité des résultats. Pour les deux méthodes d'échantillonnage, l'utilisation de bouteilles de plongée ou la présence de plongeurs et d'activités humaines (sports nautiques, nageurs) peuvent perturber les espèces et modifier temporairement leur distribution. La probabilité de détection varie également selon les conditions environnementales (turbidité, luminosité, vent) et les caractéristiques des espèces (taille, couleur, comportement), ce qui peut entraîner une sous ou surestimation de certains groupes. De plus, certaines espèces sont sur-représentées en raison de leur attrait ou de leur facilité d'observation, tandis que d'autres sont négligées, créant un biais taxonomique. Enfin sur une abondance, le risque de double comptage n'est pas à négliger.

Les conditions de visibilité du lac, pouvant être variables d'un suivi à l'autre, risqueraient de fausser les observations en modifiant la distance de perception et donc la surface échantillonnée, ce qui nuit à la comparabilité des résultats. La présence absence garantit des données plus fiables, mais présente tout comme l'abondance un biais observateur, et le risque de mauvaise identification des espèces par les plongeurs amateurs. Pour réduire ces biais, les plongeurs pourraient être formés à l'identification des espèces, et l'utilisation d'un appareil photo étanche et d'une gopro en continu permettra de vérifier les espèces rencontrées en cas de doute ou d'absence d'identification. Après échange avec les partenaires, un échantillonnage par dénombrement a finalement été préféré à de la présence/absence, dans la continuité de ce qui était fait dans les suivis précédents (Penne, 2009 ; Jorge et Biais, 2023).

V.3 - Méthodologie pour caractériser la diversité et la structure de la faune associée aux herbiers de *Zostera marina*

V.3.1 - Contexte et Objectifs

Cette étude a pour objectif de mettre en place une méthode d'échantillonnage standardisée et reproductible afin de caractériser la faune aquatique du lac marin du Port d'Albret. La méthode proposée est conçue pour garantir des suivis pérennes permettant de suivre l'évolution des espèces au fil du temps.

V.3.2 - Zone d'étude

Lors des précédents suivis du lac, la zone d'étude se limitait aux alentours du barrage en 2009 (Penne, 2009) puis a été étendue à la partie Nord-Ouest en 2023 (Jorge et Biais, 2023).

Trois zones d'échantillonnage ont été définies avec l'ALR pour l'emplacement des transects, en conservant celles établies lors de l'étude de la zostère (Fig. 9). Neuf transects sont positionnés de manière aléatoire afin de représenter la diversité des milieux, avec six transects en herbiers denses (homogène) et trois en zones de patchs.



Fig. 9 : Propositions d'emplacements des belt-transects pour la station de Port d'Albret

Avant toute immersion, un repérage préalable sera nécessaire pour identifier des zones de sécurité adaptées à l'entrée et à la sortie des plongeurs, notamment des plages abritées des courants et des variations de marée.

Tab.5 : Matériel nécessaire pour l'échantillonnage de la macrofaune associée aux herbiers

Support tablette et fiches terrains	Renseigner les données
3 Bouées	Signalisation des zones
Pentadécamètre plastique lesté	Mesure des 50m
Appareil photo et caméra étanche	Prise de photos et vidéos continues
Compas, ordinateur de plongée	Orientation, température, profondeur

V.3.3 - Organisation des plongées

Les observations seront effectuées en plongée autonome avec une équipe de deux par palanquée. Chaque palanquée comprendra un observateur chargé de reporter la faune rencontrée sur une feuille immergée et un photographe dont la mission sera de documenter visuellement les habitats et les espèces rencontrées.

La durée maximale d'immersion sera de 1h30 par palanquée, comme lors des suivis réalisés précédemment par l'ALR (Jorge et Biais, 2023). Chaque palanquée se verra attribuer une zone d'échantillonnage par session. Les zones seront identifiées par des bouées lestées (1 pour chaque zone) afin que les plongeurs gardent un point de repère.

V.3.4 - Organisation des transects

Neuf belt-transects seront réalisés dans les herbiers (3 par zone). Chaque transect aura une dimension de 50m de longueur, 2m de large (1m par plongeur) et 2 m de haut, correspondant à une surface totale de 300m² par transect (soit 900m² au total pour les trois transects). Chaque zone sera prise en charge par une palanquée, composée de deux plongeurs.

V.3.5 - Déroulement de l'échantillonnage

L'échantillonnage débute par la mise à l'eau des plongeurs depuis une zone de sécurité préalablement identifiée. Les plongeurs rejoignent à la nage, en surface, la première zone définie. Un plongeur, équipé d'un pentadécamètre lesté à son extrémité pour assurer son maintien sur le substrat, le déroule sur 50 mètres. Une période d'immobilité de 5 minutes est retenue pour minimiser les perturbations causées par l'arrivée des plongeurs (Chalifour, 2017).

La méthodologie implique deux plongeurs pour garantir une collecte de données précise et fiable : l'observateur principal, muni d'une fiche immergée, recense et comptabilise tous les individus rencontrés selon une liste prédéfinie des espèces potentiellement présentes dans le lac. Tandis que le second plongeur agit comme photographe, documentant plus précisément les espèces, tout en servant d'observateur secondaire. Cette double observation permet de réduire le biais observateur, car les deux plongeurs notent indépendamment leurs observations pour une mise en commun ultérieure. Un enregistrement vidéo continu est également réalisé pour permettre une évaluation *a posteriori* des espèces. Tous les individus observés sont comptabilisés et leur taille est estimée selon six catégories prédéfinies allant de moins de 5 cm à plus de 40 cm: < 5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, > 40 cm.

Cette approche combine les observations directes, photographies et vidéos. Elle assure une collecte de données plus robuste et exploitable pour l'analyse d'habitats spécifiques du lac, contrairement à une observation uniquement visuelle. La session se termine lorsque l'observateur signale au photographe que les 50 mètres ont été parcourus. Une fois toutes les zones échantillonnées ou la durée limite d'immersion atteinte, les plongeurs refont surface et rejoignent la zone de sécurité.

V.3.6 - Bancarisation des données

Pour standardiser les résultats, il sera nécessaire de pondérer les abondances obtenues par l'effort d'échantillonnage. Il sera néanmoins nécessaire de pondérer les résultats sous la forme de CPUE (Capture par unité d'effort) pour prendre en compte la différence d'effort d'échantillonnage (6 transects pour l'herbier dense, contre 3 pour l'herbier en patchs). Le temps de plongée, fixé à 30 min pour un transect de 50m, devrait être constant durant tout le suivi. Dans le cas contraire, une pondération par le temps d'échantillonnage pour chaque transect est à considérer.

Les données d'abondance pourront être comparées au fil du temps afin d'étudier les dynamiques des espèces ou des groupes trophiques. Il sera également possible de comparer les résultats entre les zones du site (herbier principal et en patchs), pour étudier le lien entre l'habitat et la colonisation de la macrofaune. Des comparaisons avec d'autres sites permettraient de mettre en relief les résultats par rapport à d'autres stations servir de référence par rapport aux tendances observées à proximité. Enfin, les suivis des récifs artificiels pourraient être étudiés pour étudier la dynamique de colonisation et de migration entre les espèces du lac et au large.

L'utilisation d'analyses multivariées pourrait permettre d'identifier les relations complexes entre les variables environnementales (température, oxygène, salinité nutriments...) et la structuration des communautés fauniques, de détecter des gradients écologiques et différencier les facteurs influençant la biodiversité (pressions, variations saisonnières). Des indicateurs biologiques sensibles aux changements environnementaux pourraient permettre de renseigner la résistance et la santé des herbiers. Enfin, l'acquisition de ce type d'informations pourrait faciliter la modélisation et la prédiction des dynamiques écosystémiques pour orienter les stratégies de gestion. Des analyses statistiques possibles sont synthétisés dans le Tab X.

Tab. 6 - Analyses statistiques possibles en fonction de l'interprétation des données.

Interprétation	Analyse statistique	Conditions d'application
Déetecter des tendances temporelles (augmentation ou diminution significative) pour l'abondance des espèces ou groupes trophiques	Test de Mann-Kendall	/
Comparer des abondances entre années, zones d'échantillonnage (herbier principal/patchs) et avec d'autres sites ou les suivis au large de Vieux-Boucau	Test de Student	Deux groupes, normalité des données, homoscédasticité
	ANOVA (Analyse de variance)	Plusieurs groupes, normalité des données, homoscédasticité
Identifier les relations entre les variables environnementales (température, oxygène, salinité nutriments...) et la structuration des communautés fauniques Déetecter des gradients écologiques et différencier les facteurs influençant la biodiversité (pressions, variations saisonnières) Faciliter la modélisation et la prédiction des dynamiques écosystémiques pour orienter les stratégies de gestion	Analyses multivariées	Variables selon le type d'analyse

VI - Critique/Perspectives

VI.1 - Contraintes environnementales et logistiques

La mise en œuvre des protocoles est fortement influencée par les variations environnementales locales, notamment les marées, le vent, la houle et l'ensoleillement (Loyer, 2001). En effet, les coefficients et horaires de marée ont un impact direct sur l'accessibilité des endroits et donc la durée d'échantillonnage, limitant ainsi les moments optimaux pour les plongées. Par ailleurs, la houle et le vent peuvent altérer la visibilité sous l'eau, affecter la stabilité et entraîner une surconsommation d'oxygène pour les plongeurs, pouvant représenter un biais potentiel dans la collecte des données (Isensee et al., 2016).

Les contraintes logistiques sont également importantes. La durée d'immersion des plongeurs est limitée par leur autonomie en air, la sécurité, ainsi que la nécessité de respecter un protocole rigoureux pour éviter toute perturbation des habitats étudiés. L'utilisation d'un drone pour cartographier les herbiers, est contrainte par l'autonomie de l'appareil et par les conditions météorologiques défavorables (vent, forte réflexion solaire sur l'eau).

Un autre défi important est la fiabilité des observations liées à la faune. La reconnaissance des espèces dépend des aptitudes des plongeurs, qui peuvent différer en fonction de leur expérience. Ce facteur peut engendrer des résultats erronés dans les données collectées, nécessitant une formation préalable des observateurs ainsi qu'un calibrage des méthodes de comptage (Arazy et al., 2021).

Concernant la gestion du projet, le nombre important d'acteurs impliqués et la difficulté à coordonner leurs disponibilités rendent la planification difficile, ralentissant ainsi la prise de décision et l'organisation des activités. D'autre part, les points de vue divergents des gestionnaires sur l'importance écologique et la nécessité de préservation de la zostère marine ont créé une difficulté supplémentaire dans le positionnement du projet, l'objectif étant de prendre en compte et de concilier les différents avis.

VI.2 - Enjeux du déclin des herbiers et facteurs de pression

Le déclin des herbiers de zostères dans ce lac marin représente une problématique écologique majeure, influencée par divers facteurs environnementaux et anthropiques. L'apport excessif en nutriments, particulièrement en phosphore et en azote, joue un rôle crucial dans ce phénomène (Angst et al., 2014). Ces apports favorisent la prolifération d'algues vertes opportunistes, indicatrices d'un déséquilibre écologique, et limitent la croissance des zostères en réduisant la disponibilité lumineuse (Bajjouk et al., 2010). Les sources des nutriments sont multiples, incluant la lixiviation des sols agricoles, les rejets urbains et la remise en suspension des sédiments enrichis en matière organique (Pinay, 2017). Les modifications hydrodynamiques, notamment celles liées à la gestion des vannes, ont un impact significatif sur la circulation de l'eau et la sédimentation.

Les ouvrages et la gestion actuels empêchent la vidange complète du lac pouvant entraîner un envasement excessif et des conditions anoxiques défavorables à la survie des herbiers. Ces conditions limitent le renouvellement de l'eau et augmentent l'accumulation des nutriments, favorisant davantage la prolifération des macroalgues opportunistes (Angst et al., 2014).

Il est important de noter que les changements dans la gestion hydrologique du lac peuvent avoir des conséquences importantes sur la composition des espèces de zostères. Une baisse du niveau d'eau pourrait entraîner la disparition de *Zostera marina*, une espèce subtidale, au profit de *Zostera noltei*, l'espèce intertidale également présente dans le lac d'Hossegor (Bernard et al., 2023b).

Le dépérissement des zostères peut également être exacerbé par des facteurs pathogènes. Historiquement, le "wasting disease" des années 1930, causée par le micro-organisme *Labyrinthula zosterae* (Ralph et Short, 2002), a décimé les herbiers de *Zostera marina* dans l'Atlantique Nord (Berthelot et al., 2018). Bien que cette maladie ait été initialement attribuée uniquement à ce pathogène, des recherches plus récentes suggèrent que des facteurs environnementaux stressants, tels que les changements de température de l'eau et la diminution de l'insolation, peuvent affaiblir les plantes et les rendre plus vulnérables à l'infection (Nejrup et Pedersen, 2008).

En fonction des demandeurs, de leurs moyens et de l'objectif visé par l'échantillonnage, celui-ci peut être réalisé une ou deux fois par an. S'ils optent pour deux prélèvements annuels, il est conseillé de les effectuer lors des équinoxes afin d'évaluer les variations intersaisonnieres (Hily, 2006b). En revanche, s'ils préfèrent un seul prélèvement par an, la période idéale serait la fin août – début septembre, correspondant au pic de biomasse de l'herbier (Auby et al., 2018).

VI.3 Problématique des algues vertes et surveillance des nutriments

Les macroalgues opportunistes, telles que les espèces du genre *Ulva*, colonisent les herbiers de zostères et entravent leur développement en entrant en compétition pour la lumière et les nutriments (Ruesink et al., 2018 ; Berthelot et al., 2018). Ce phénomène peut avoir des effets négatifs importants sur la santé et la croissance des zostères, particulièrement lorsque la biomasse de ces algues devient importante au printemps et en été (Berthelot et al., 2018).

Actuellement, l'absence des nutriments à haute fréquence constitue une limite majeure pour la compréhension des apports en nutriments et de leur variabilité temporelle dans le lac marin. Pour pallier ce manque, l'implantation de sondes permettant un suivi continu de paramètres tels que la salinité, la température et la concentration en nutriments à différentes périodes de l'année (crues, étiages, marées) pourrait être envisagée. Cette approche permettrait de mieux caractériser les dynamiques environnementales affectant les herbiers de zostères.

Toutefois, la mise en place d'un tel dispositif de surveillance environnementale à long terme nécessite des ressources financières et techniques importantes. L'ALR et le Syndicat Intercommunal de Port d'Albret (SIPA) ne disposant pas des moyens nécessaires, il pourra être intégré dans le cadre de programmes de recherche en partenariat avec des scientifiques (Universités, Ifremer...)

Il existe cependant une alternative plus simple et moins coûteuse qui consisterait à réaliser des prélèvements d'eau de 100 mL à intervalles réguliers et à les envoyer à des laboratoires certifiés COFRAC ou à l'université UPPA pour analyse. Cette solution permettrait d'obtenir des données sur les paramètres physico-chimiques essentiels sans nécessiter l'investissement dans un dispositif de surveillance en continu, tout en garantissant une fiabilité scientifique des résultats. Une meilleure caractérisation de l'origine des nutriments, qu'ils proviennent d'apports externes ou de la lixiviation des sols, serait également bénéfique pour orienter de nouvelles approches. Les traceurs isotopiques et l'analyse des rapports N/P dans l'eau pourraient être employées pour identifier les sources dominantes de pollution et adapter les stratégies de gestion (Howard, 2008). En parallèle, en phase d'immersion, les ordinateurs de plongée permettraient de relever la température de l'eau et la profondeur (Jorge et Biais, 2023). Egalement, après chaque plongée, un densimètre mécanique permettrait de mesurer la salinité (Jorge et Biais, 2023).

VI.4 - Sensibilisation

La sensibilisation et l'implication des acteurs locaux sont essentielles pour préserver les herbiers de zostères et la biodiversité associée; des habitats jouant un rôle clé dans le cycle du carbone, la stabilisation des sédiments et l'équilibre des écosystèmes côtiers (Duarte, 2002 ; Fourqurean et al., 2012). Pourtant, leur importance reste souvent méconnue du public et des usagers du lac. Pour pallier ce manque, des actions éducatives et participatives devraient être développées : installation de panneaux informatifs, organisation d'ateliers pédagogiques avec les écoles et clubs nautiques, et mise en place de journées de sciences participatives impliquant notamment les plongeurs lors des collectes de données (Kelly et al., 2020). L'implication des gestionnaires du lac est également cruciale pour adapter la gestion hydraulique et prévenir les dégradations des herbiers, notamment face à la prolifération d'algues opportunistes favorisée par l'eutrophisation (Burkholder et al., 2007 ; Harris et al., 2012).

VII - Conclusion

Le suivi des herbiers de zostères dans le lac marin de Port d'Albret représente un défi complexe mais indispensable pour la connaissance et la préservation de ce site. Les méthodes proposées dans ce rapport regroupent cartographie par drone, détourage manuel, suivi stationnel et inventaire de la faune associée, permettant d'établir une première base pour une surveillance à long terme.

Cette approche présente plusieurs avantages majeurs. La complémentarité des méthodes de cartographie offre une vision exhaustive de l'extension horizontale des herbiers, même dans les zones difficiles d'accès. Le protocole stationnel, adapté de standards DCE tout en tenant compte des contraintes locales, garantit des données comparables avec d'autres sites du littoral aquitain. Néanmoins, il est important de reconnaître les défis inhérents à cette méthodologie, tels que l'impact des conditions environnementales sur la qualité des données et les contraintes temporelles liées aux marées et à l'autonomie des plongeurs.

La méthode de dénombrement, bien que choisie pour sa capacité à fournir des données quantitatives sur l'abondance des espèces, et en continuité avec les suivis antérieurs (Penne, 2009 ; Jorge et Biais, 2023) présente des biais potentiels qu'il est important de prendre en compte lors de l'interprétation des résultats.

L'amélioration continue du protocole, notamment par l'intégration de mesures physico-chimiques plus complètes permettrait de mieux comprendre les facteurs influençant la dynamique des herbiers. Face aux changements climatiques, la surveillance de ces écosystèmes devient cruciale. L'augmentation des températures, les modifications des régimes hydrologiques, variations saisonnières constituent des menaces potentielles pour les zostères. Le protocole établi servira d'outil pour détecter d'éventuelles modifications dans leur distribution et leur état de santé.

La sensibilisation du public aux enjeux de conservation des herbiers de zostères constitue une partie primordiale de leur préservation. Ces écosystèmes, bien qu'essentiels pour la biodiversité marine et les services écologiques qu'ils rendent, restent mal perçus du grand public.

En définitif, ce protocole constitue une première étape essentielle dans la mise en place d'un suivi pérenne des herbiers de zostères de Port d'Albret. Sa réussite reposera sur la mobilisation des différents acteurs locaux : le Syndicat Intercommunal de Port d'Albret (SIPA), gestionnaire du lac, et l'association Atlantique Landes Récifs (ALR).

VIII- Bibliographie

Angst B., Philippe M., Urien M., Herry J., Balle-Beganton J., Pasco R., Casse M., Bailly D. (2014) Synthèse des connaissances sur les herbiers de zostères en appui à leur gestion dans le golfe du Morbihan. Rapport AMURE et SIAGM. 2014. Publications électroniques Amure, Série Rapports R-37-2014, 137p.

Aubin, S., Latry, L., Curti, C., Béguet, B., Lafon, V., Basuyaux, O., & Garcia, A. (2018). CARIOZA – Comparaison des méthodes cartographiques par imagerie optique des herbiers de zostères marines de l'ouest Cotentin (Manche). Rapport d'Etude, MNHN – I-SEA – SMEL, pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, 35 p.

AquaPortail., (2025). *Zostera.* **AquaPortail.**
<https://www.aquaportail.com/especies/taxonomie/genre/514/zostera#:~:text=Avec%202016%20esp%C3%A8ces%20il%20comprend%20certaines%20des%20rares,ou%20dans%20des%20estuaires%20submerg%C3%A9es%20ou%20partiellement%20flottantes>

Auby, I., Oger-Jeanneret, H., Sauriau, P.-G., Hily, C., & Barillé, L. (2010). *Angiospermes des côtes françaises Manche-Atlantique. Propositions pour un indicateur DCE et premières estimations de la qualité.* Rapport Ifremer RST/LER/MPL/10-15, 72 p + annexes.

Auby, I., Bost, C.-A., Budzinski, H., Dalloyau, S., Desternes, A., Belles, A., Trut, G., Plus, M., Pere, C., Couzi, L., Feigne, C., & Steinmetz, J. (2011). *Régression des herbiers de zostères dans le Bassin d'Arcachon : état des lieux et recherche des causes* (Ref. RST/ODE/LER/AR/11.007). Ifremer.

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

Auby, I., Rigouin, L., Ganthy, F., Trut, G., Méteigner, C., Devaux, L., Gouillieux, B., Aubert, F., Dalloyau, S., & Bournel, C. (2021). *Suivi stationnel (2006-2020) des herbiers de zostères (Zostera noltei et Zostera marina) et calcul de l'indicateur « Angiospermes » (2020) dans la masse d'eau côtière FRFC06 – Arcachon amont - Bassin Hydrographique Adour Garonne.* ODE/LER/AR/21.012.

Arazy, O., & Malkinson, D. (2021). A framework of observer-based biases in citizen science biodiversity monitoring: Semi-structuring unstructured biodiversity monitoring protocols. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9.

Bajjouk, T., Cordier, C., Auby, I., Liabot, P.-O., Kerninon, F., Le Bouffant, N., Trut, G., & Oger-Jeanneret, H.(2019). Cartographie des Herbiers de Zostères. Guide technique. Convention Ifremer-AQUAREF Thème Formation et outils 2016-2018. DYNECO/LEBCO/19-01/TB, 137 p.

Bajjouk, T., Hily, C., & Giacomini, E. (2010). Les herbiers de zostères. Convention Ifremer-DIREN-Bretagne. Fiche de Synthèse Habitat « Herbier ».

Ben Hartog, C. (1987). Wasting disease and other dynamic phenomena in *Zostera* beds. Aquatic Botany, 27, 3-14.

Bernard G., Ganthy F., Rigouin L., Marchand S., Devaux L., Bujan S., Gouillieux B., Aubert F., Dalloyau S., & Bournel C. (2023a). Suivi stationnel (2006-2022) des herbiers de zostères (*Nanozostera noltei* et *Zostera marina*) et calcul de l'indicateur « Angiospermes » (2023) dans la masse d'eau côtière FRFC06 – Arcachon amont - Bassin Hydrographique Adour-Garonne. (Rapport Ifremer/ODE/COAST/LERAR/24.018). Ifremer.

Bernard G., Auby I., Lissardy M., & Aubert F. (2023b). Suivi stationnel (2007-2022) de l'herbier de zostères naines (*Zostera noltei*) et calcul de l'indicateur DCE « Angiospermes » (2022) dans la masse d'eau côtière FRFC09 – Lac d'Hossegor. Ref. ODE/LER/AR/23.013. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00850/96228/>

Berthelot, A., Le Ny, V. & O. Basuyaux, (2018). Protocole pour la restauration de l'herbier de *Zostera marina* sur l'ouest cotentin. Rapport projet d'application Master II Aquacaen 2017-2018 / SMEL.

Borum, J., Duarte, C. M., Krause-Jensen, D., & Greve, T. M. (2004). European seagrasses: An introduction to monitoring and management. The M&MS project.

Burdick, D. M., Short, F. T., & Wolf, J. (1993). An index to assess and monitor the progression of wasting disease in eelgrass *Zostera marina*. Marine Ecology Progress Series, 94, 83-90.

Burdick, D. M., Short, F. T., & Wolf, J. (1993). A decline in eelgrass, *Zostera marina* L., linked to the wasting disease. Marine Ecology Progress Series, 94(1), 125-133.

Burkholder, J. M., Tomasko, D. A., & Touchette, B. W. (2007). “Seagrasses and eutrophication.” Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 350(1-2), 46-72._

CEVA - Centre d'Étude et de Valorisation des Algues. (2020, 20 octobre). Mécanismes et causes des marées vertes à ulves dérivantes - CEVA. CEVA.

Chalifour, J. (2017). Suivi de l'état de santé des communautés corallines et des herbiers de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Martin : État des lieux 2016 et évolution 2007-2016 (22 pages + annexes). Réserve Naturelle Nationale de Saint Martin.

De Casamajor, M.-N., Lissardy, M., & Sanchez, F. (2015). *Suivi stationnel de l'herbier à Zostera noltei de la masse d'eau FRFT8 Bidassoa - 2014 - Bassin Hydrographique Adour-Garonne*. Ref. DCN/RBE/HGS/LRHA 15-001.

Demetro, T., Landete, A., Rico, S., & Vincent, D. (2024). Port d'Albret Water Quality Assessment report.

Dennison, W. C., Orth, R. J., Moore, K. A., Stevenson, J. C., Carter, V., Kollar, S., Bergstrom, P. W., & Batiuk, R. A. (1993). Assessing water quality with submersed aquatic vegetation. *BioScience*, 43, 86–94.

Duarte, C. M. (2002). “The future of seagrass meadows.” *Environmental Conservation*, 29(2), 192-206.

Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon storage. *Biogeosciences*, 2(1), 1-8.

Dunton, K. H. (1994). Seasonal growth and biomass of the subtropical seagrass *Halodule wrightii* in relation to continuous measurements of underwater irradiance. *Marine Biology*, 120, 479–489.

Fletcher, S., Saunders, J., & Herbert, R. (2011). “A review of the ecosystem services provided by broad-scale marine habitats in the UK.” JNCC Report, No. 445.

Frossard, V., Goulon, C., Guillard, J., Hamelet, V., Jacquet, S., Laine, L., Rautureau, C., Rimet, F., & Tran-Khac, V. (2022). *Suivi de la qualité écologique du lac d'Annecy. Rapport 2021*. SILA & INRA-Thonon.

Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., ... & Serrano, O. (2012). “Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock.” *Nature Geoscience*, 5(7), 505-509.

Ganthy, F. (2011). Rôle des herbiers de *Zostera noltii* sur la dynamique sédimentaire du Bassin d’Arcachon [Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1]. Archimer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00060/17170/>

Giesen, W. B. J. T. (1990). Wasting disease and present eelgrass condition. *Rapp. Lab. of Aqua. Ecol.*, Catholic Univ. Nijmegen, The Netherlands, 138p.

Harris, P. M., Neff, A. D., & Johnson, S. W. (2012). Changes in eelgrass habitat and faunal assemblages associated with coastal development in Juneau, Alaska. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Alaska Fisheries Science Center.

Hemminga, M. A., & Duarte, C. M. (2000). Seagrass Ecology. Cambridge University Press.

Hily, C., Connan, S., Raffin, C., & Willie-Echeverria, S. (2004). Variability of the grazing pressure on *Zostera marinae* piphyton by gastropods. *Aquatic Botany*, 78(2), 183-195.

Hily, C. (2005). *Suivi stationnel des herbiers à Zostera marina* (RST/IFREMER/DYNECO/VIGIES/06-29/REBENT). Institut Universitaire Européen de la Mer – Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire des sciences de l'Environnement MARIn.

Hily, C. (2006). *Fiche de synthèse sur les biocénoses : Les herbiers de Zostères marines (Zostera marina et Zostera noltii)*. IUEM (UBO)/LEMAR, CNRS UMR, 6539.

Hily, C. (2006b, mai). *Suivi des herbiers de zostères* (FT-04-2006-01.doc). Réseau Benthique (REBENT).

Hodgson, B., & Bucher, D. J. (2023). Biological processes in seagrass beds of coastal lagoons to maintain estuary-dependent marine fisheries. *Marine Environmental Research*, 189, 106033.

Howarth, R. W. (2008). Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Biogeochemistry*, 88(1), 1-19.

Ifremer (2010). Contrôle de surveillance des eaux côtières – Herbier à *Zostera marina* (Fiche n°6, V7 – 05/10). Rebent.

INPN : Inventaire National du Patrimoine Naturel. (2024). *INPN - FSD Natura 2000 - FR7200717 - Zones humides de l'arrière dune du Marensin - Description*. MNHN. Consulté 6 février 2025, à l'adresse <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR7200717>

Isensee, K., Levin, L. A., Breitburg, D., Gregoire, M., Garçon, V., & Valdés, L. (2016). L'océan est à bout de souffle. Fiche scientifique, Plateforme Océan et Climat.

Janson, A.-L., Grall, J., & Maguer, M. (2018). *Extension méthodologique (protocole) pour le suivi stationnel de la macrofaune associée aux herbiers de Zostera marina – Recommandations DCSMM*. Rapport UMS PatriNat-IUEM-CNRS RESOMAR, 6 p. + annexe.

Jorge, M., & Biais, O. (2023). *Suivi Faunistique et Floristique 2009 : Lac marin de Port d'Albret*. Aquitaine Landes Récifs et Syndicat Intercommunal de Port d'Albret.

Kelly, R., Fleming, A., Pecl, G. T., von Gönner, J., & Bonn, A. (2020). Citizen science and marine conservation: A global review. *Frontiers in Marine Science*, 7, 567414. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

Krause-Jensen, D., Pedersen, M. F., & Jensen, C. (2003). Regulation of eelgrass (*Zostera marina*) cover along depth gradients in Danish coastal waters. *Estuaries*, 26(4), 866–877. <https://doi.org/10.1007/BF02803345>

Légifrance. (2002, 8 mars). Arrêté du 8 mars 2002 relatif à la liste des espèces végétales protégées en région Aquitaine complétant la liste nationale. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000225380>

Lee, K.-S., & Dunton, K. H. (1996). Effects of in situ light reduction on the maintenance, growth, and partitioning of carbon resources in *Thalassia testudinum*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 210, 53–73.

Little, L. (2023, 18 juillet). Using drones for mapping seagrass and coastal carbon inventories. *Seabee Norway*.

Loyer, S. (2001). Modélisation de la production phytoplanctonique dans la zone côtière atlantique enrichie par les apports fluviaux [Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI].

Macreadie, P., Jarvis, J., Trevathan-Tackett, S. M., & Bellgrove, A. (2017). Seagrasses and macroalgae: Importance, vulnerability and impacts. In *Climate change impacts on fisheries and aquaculture: A global analysis* (pp. 729–770). Wiley.

Nejrup L. B. & Pedersen M. F. (2008). Effects of salinity and water temperature on the ecological performance of *Zostera marina*. *Aquatic Botany*, 88(3) 239-246.

Orth, R. J., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., & Olyarnik, S. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56(12), 987–996.

Orth, R. J., Marion, S. R., Moore, K. A., & Wilcox, D. J. (2009). 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.

Penne, A. (2009). *Suivi Faunistique et Floristique 2009 : Lac marin de Port d'Albret*. Aquitaine Landes Récifs.

Pinay, G., Gascuel, C., Ménesguen, A., & Souchon, Y. (Éds.). (2017). Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. *Rapport d'expertise scientifique collective, CNRS, INRA, Ifremer, Irstea*.

Phillips, R. C., McMillan, C., & Bridges, K. W. (1983). Phenology of eelgrass, *Zostera marina* L., along latitudinal gradients in North America. *Aquatic Botany*, 15(2), 145-156.

Ralph, P. & Short, F. T. (2002). Impact of the wasting disease pathogen, *Labyrinthula zosterae*, on the photobiology of eelgrass *Zostera marina*. *Marine Ecology Progress Series*, 226, 265-271 p.

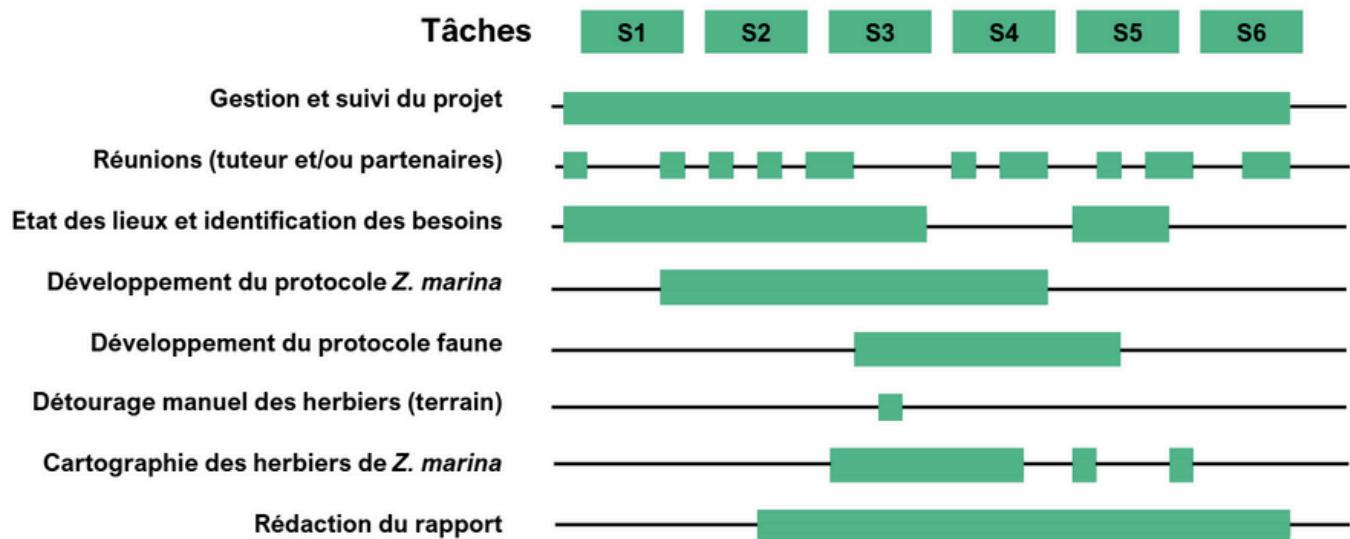
Sfriso, A., & Marcomini, A. (1997). Macrophyte production in a shallow coastal lagoon. Part I: Coupling with chemico-physical parameters and nutrient concentrations in waters. *Marine Environmental Research*, 44(4), 351-375.

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

Wetzel, R. G., & Penhale, P. A. (1983). Production ecology of seagrass communities in the lower Chesapeake Bay. *Marine Technology Society Journal*, 17, 22-31.

IX- Annexes

Annexe 1 : Diagramme de Gantt



Annexe 2 : Exemple de compte-rendu de réunion (partie 1)

Compte-Rendu de Réunion

Date : [Vendredi 11 octobre]



Participants :

- Mathis Jorge
- Marylou Pourret
- Irène Darcel
- Mahina Théau
- Eva Teiletchea
- Ana Detchart

Ordre du jour :

Présentation du site, contexte, rencontre avec les membres de l'association et les gestionnaires du site.

Points abordés :

A. Problématiques environnementales et hydrosédimentaires

- Lac de 48 hectares avec problèmes de qualité d'eau
- Faible dissipation de l'onde de marée réduisant l'oxygénation au fond du lac
- Prolifération de zostères entravant la circulation de l'eau
- Mais présence d'hippocampes et autres espèces associées aux zostères
- Eau douce chargée en nutriments et en vase, causant un problème d'envasement
- Problèmes liés aux ulves (algues vertes) et à l'arrivée de sargasses japonaises

B. Gestion et ouverture des courants

- Courant du Mouesan : ouverture lors de risques d'inondation
- Étang de Pinsolle se déversant via une porte à flot
- Canal de dérivation pour détourner le courant en amont de l'étang
- Gestion des niveaux d'eau : 3,20 m en été, 3,30 m en hiver

C. Cartographie et photogrammétrie

- Utilisation du drone DJI Air 2S pour la cartographie
- Contraintes techniques : prise de vue à 50 m de hauteur, météo nuageuse et sans vent
- Jusqu'à 1,4 Go par photo sur carte SD
- Vérification de l'état des hélices du drone pour la qualité des prises de vue
- Nécessité d'une puissance de calcul importante pour le traitement des données

D. Suivi des mesures saisonnières

- Mesures estivales sur 4 points : 20 cm, 1 m et fond du lac
- Paramètres : oxygène dissous, température, salinité, pH
- Surveillance des zones de baignade par les communes environnantes
- le SIPA possède un bateau pour aller sur le lac

E. Problèmes d'entretien

- Qualité de l'eau au fond du lac affectée par la faible dissipation de l'onde de marée
- Difficultés d'entretien liées à la prolifération des zostères et à l'envasement mais aussi des algues invasives
- Faucardage effectué, mais possibilité que cela ait créé des boutures de zostères

Annexe 3 : Exemple de compte-rendu de réunion (partie 2)

F. Utilisation du ROV (Remotely Operated Vehicle)

- Contraintes liées aux courants et au vent pour la stabilisation
- Nécessité d'une flottabilité neutre
- Possibilité d'ajout de modules payants (mesure de profondeur, prélèvements, GPS, etc.)

4. Actions à suivre

Description/Action	Responsable/Binôme/Group e	Délai	Livrable	Remarques
Se renseigner sur l'impact hydrosédimentaire (consultation Artelia)	Ana	8 novembre 2024	Rapport ou synthèse des informations	Inclure les recommandations d'Artelia pour le protocole ou les méthodes de suivi
Mise en œuvre de la cartographie par drone, incluant vérification des autorisations de vol et analyse SIG	Eva	7 novembre 2024	Données drone prêtes et cartographie SIG	Vérifier les conditions météo et obtenir les autorisations nécessaires avant le vol.
Détourage des herbiers	Groupe	7 novembre 2024	Données GPS pour les contours des herbiers	Comparer les données manuelles et celles obtenues par drone pour validation
Regrouper les disponibilités de chacun pour les réunions et le terrain (via Doodle)	Mahina	5 novembre 2024	Calendrier des disponibilités	Utiliser Doodle pour obtenir une réponse rapide et organiser efficacement les activités
Réfléchir à un protocole pour l'inventaire de la faune	Groupe	6 janvier 2025	Protocole de suivi validé par les partenaires	Prévoir une présentation en réunion pour validation collective

Fin de la réunion : [17:45]

Annexe 4 : Fiche terrain pour le suivi des herbiers de *Z. marina* - Densité des pieds et recouvrement des algues vertes

FICHE TERRAIN

Date :

Durée de la plongée :

Heure marée haute :

Nom des observateurs :

Coefficient de marée :

Profondeur :

Station :

Remarques :

DENSITÉ DES PIEDS DE ZOSTÈRES ET RECOUVREMENT DES ALGUES VERTES

MALADIE DE DEPERISSEMENT ET MESURES



Avez vous vu des *Zostera nolteii* ?

N° Photo(s) / Point GPS :

Annexe 5 : Fiche terrain pour le suivi des herbiers de *Z. marina* - Maladie de déperissement et biométrie

Annexe 6 : Extrait des fichier Excel proposés pour bancariser les données du suivi des herbiers de *Z.marina* d'après la base de données Quadrige (Auby et al., 2018) .

Annexe 6a : Extrait du fichier Excel pour bancariser les données de densité des herbiers de *Z. marina*

Annexe 6b : Extrait du fichier Excel utilisés pour bancariser les données de biométrie et du degré d'atteinte par la maladie de dépérissement

Annexe 7 : Exemple de protocole de prélèvement de l'épifaune dans les herbiers en complément du suivi de la macrofaune associée

Annexe 7a : Extension méthodologique pour le suivi stationnel de la macrofaune associée aux herbiers de *Zostera marina* - Recommandations DSCMM. (Janson et al., 2018).

En complément des protocoles d'échantillonnage présentés précédemment, il serait possible de réaliser des prélèvements de l'épifaune au niveau des herbiers. Un protocole de prélèvement existe déjà dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (Janson et al., 2018). Ce protocole semblerait réalisable et reproductible par l'ALR, et permettrait d'apporter des informations complémentaires.

Pour évaluer l'épifaune mobile dans les zones d'herbier, la méthodologie requiert l'utilisation d'une technique de prélèvement spécifique. L'échantillonnage s'effectue au moyen d'un dispositif de capture constitué d'un cadre d'un mètre de largeur équipé d'un filet à maillage millimétrique (Haveneau). Le processus d'échantillonnage comprend trois passages distincts, chacun couvrant une distance de 10m dans des eaux peu profondes comprises entre 15 et 50 cm.

La collecte doit être réalisée pendant la marée descendante, en prenant soin d'éviter tout chevauchement des zones déjà explorées. L'instrument de prélèvement peut être équipé soit d'un système de fermeture par pince, soit d'un dispositif de collecte modulable à son extrémité.

Au terme de chaque passage, l'équipement est extrait de l'eau avec précaution. Le nettoyage du filet s'effectue exclusivement par les parties latérales, toute manipulation par l'ouverture principale étant strictement interdite pour éviter la contamination par des organismes non ciblés. Les spécimens récoltés sont ensuite transférés dans des contenants appropriés (récipients, sachets ou collecteurs adaptables) via l'extrémité du filet. La superficie échantillonnée lors de chaque passage correspond à 10 m².

Annexe 7b : Haveneau (ouverture : 1m ; maille du filet : 1 mm) dont l'extrémité est équipée d'une pince (A à C) ou d'un collecteur ajustable et interchangeable (D à G) (Janson et al., 2018).

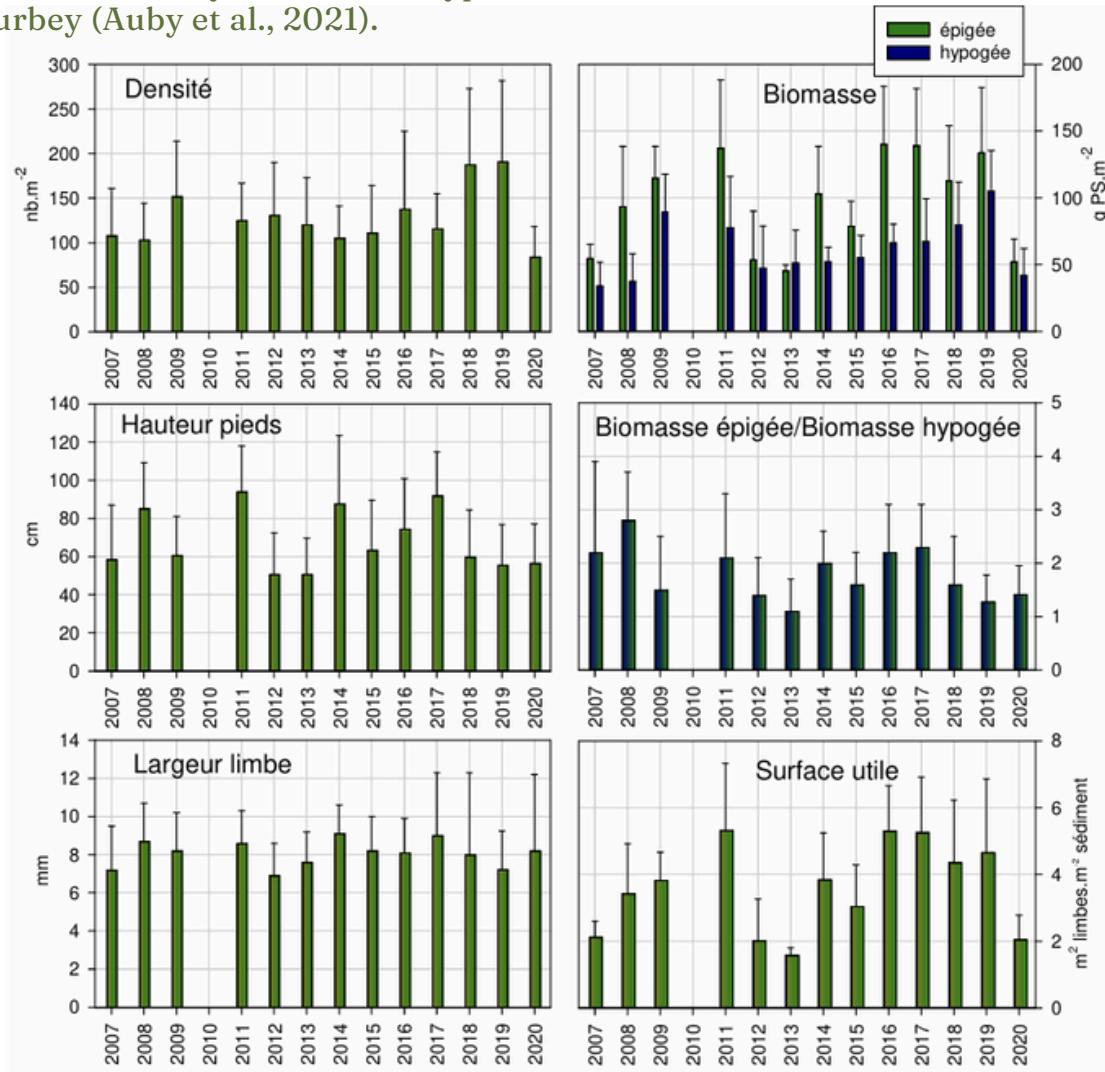


Annexe 8 : Exemple de résultats pour le densité et la biométrie des pieds de *Z. marina* station de référence DCE de Courbey (Arcachon amont), d'après Auby et al. (2021).

Annexe 8a : Tableau de l'évolution temporelle des paramètres démographiques des zostères (moyenne \pm écart-type) de l'herbier de *Zostera marina* de la station de Courbey (Auby et al., 2021).

	Densité pieds zostères (n.m ⁻²)	Biomasse épigée (g PS.m ⁻²)	Biomasse hypogée (g PS.m ⁻²)	Nb feuilles/pied	Largeur feuilles (mm)
2007	108 \pm 53	54,6 \pm 10,6	34,1 \pm 17,9	3,5 \pm 1,1	7,2 \pm 2,3
2008	103 \pm 41	93,4 \pm 45,0	37,5 \pm 20,7	3,9 \pm 1,1	8,7 \pm 2,0
2009	152 \pm 62	114,9 \pm 23,7	89,3 \pm 28,5	4,0 \pm 1,0	8,2 \pm 2,0
2011	125 \pm 42	137,1 \pm 51,2	77,9 \pm 38,2	4,5 \pm 1,0	8,6 \pm 1,7
2012	131 \pm 59	53,7 \pm 36,5	47,4 \pm 31,6	3,7 \pm 1,0	6,9 \pm 1,7
2013	120 \pm 53	45,3 \pm 4,6	51,4 \pm 24,6	3,8 \pm 1,1	7,6 \pm 1,6
2014	105 \pm 36	103,0 \pm 35,4	52,2 \pm 10,9	3,7 \pm 1,1	9,1 \pm 1,5
2015	111 \pm 53	78,7 \pm 18,9	55,1 \pm 16,8	3,6 \pm 1,0	8,2 \pm 1,8
2016	138 \pm 87	140,1 \pm 43,5	66,4 \pm 14,0	3,7 \pm 1,0	8,1 \pm 1,8
2017	116 \pm 39	139,0 \pm 42,8	67,3 \pm 31,9	4,5 \pm 0,8	9,0 \pm 3,3
2018	188 \pm 85	112,7 \pm 41,4	79,6 \pm 32,1	4,0 \pm 1,0	8,0 \pm 4,3
2019	191 \pm 91	133,6 \pm 49,0	105,0 \pm 30,5	3,7 \pm 0,8	7,2 \pm 2,0
2020	84 \pm 34	52,2 \pm 17,1	41,9 \pm 20,4	3,9 \pm 1,1	8,2 \pm 4,0

Annexe 8b : Graphique de l'évolution temporelle des paramètres démographiques des zostères (moyenne \pm écart-type) de l'herbier de *Zostera marina* de la station de Courbey (Auby et al., 2021).

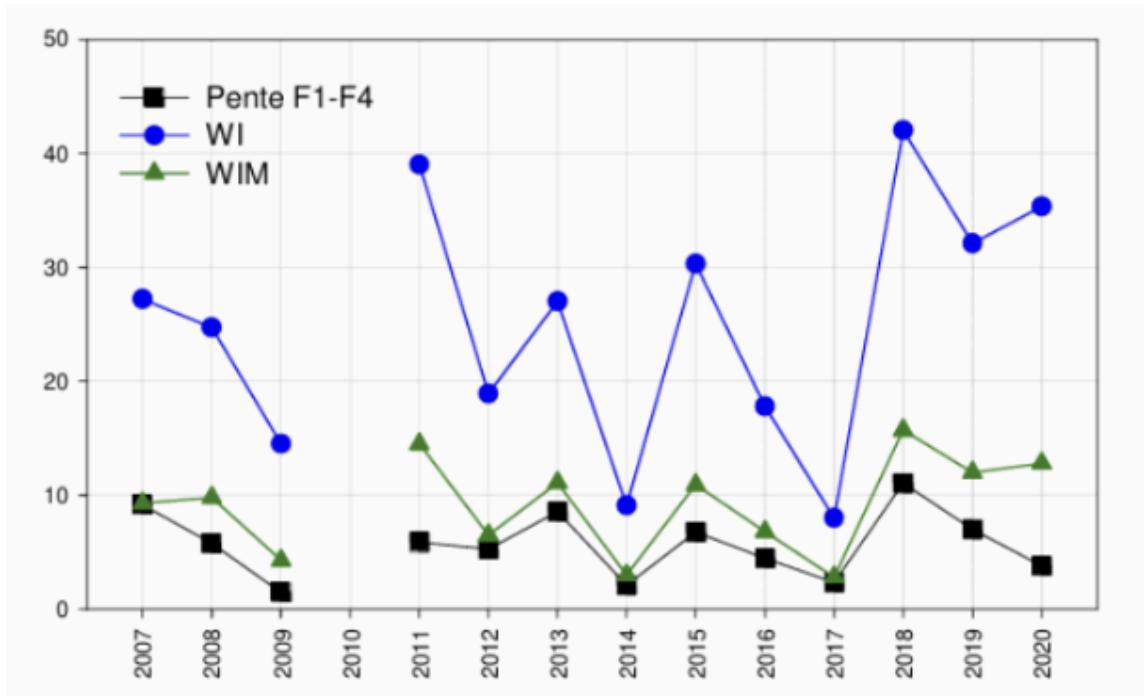


Annexe 9 : Exemple de résultats pour le degré d'atteinte par la maladie de dépérissement (Wasting Index) pour la station de référence DCE de Courbey (Arcachon amont), d'après Auby et al. (2021) .

Annexe 9a : Tableau des valeurs du Wasting Index (moyenne \pm écart-type) de l'herbier de *Zostera marina* de la station de Courbey (Auby et al., 2021).

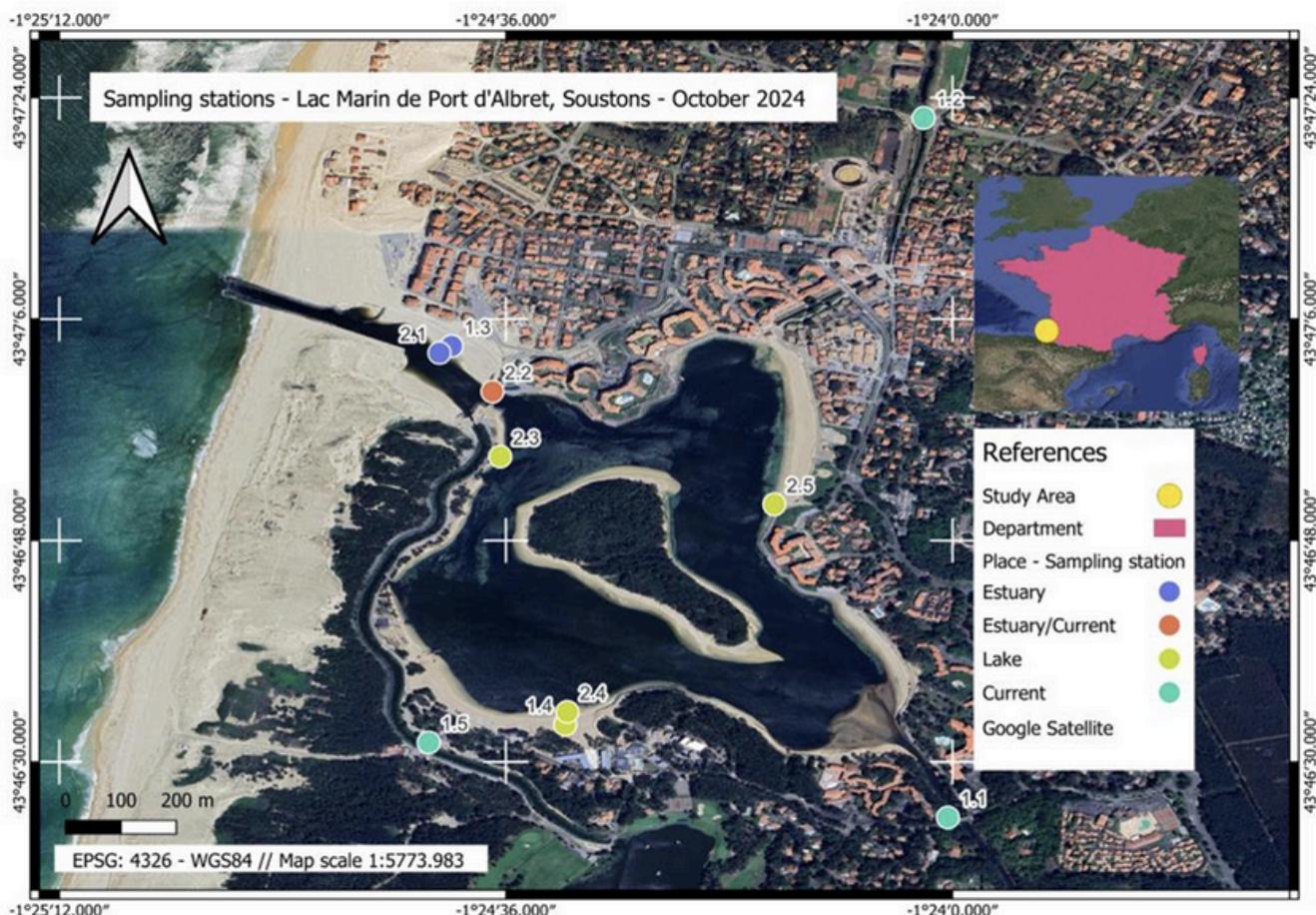
	WI (%)	WIM (%)	WI feuille 1 (la plus jeune)	WI feuille 2	WI feuille 3	WI feuille 4
2007	27,2 \pm 24,6	9,3 \pm 8,4	0,2 \pm 0,9	1,5 \pm 2,6	12,3 \pm 18,3	27,1 \pm 25,1
2008	24,7 \pm 16,0	9,8 \pm 6,2	0,1 \pm 0,3	5,1 \pm 5,4	10,7 \pm 10,6	17,5 \pm 11,7
2009	14,5 \pm 10,8	4,3 \pm 7,6	0,1 \pm 0,2	1,2 \pm 3,0	1,5 \pm 2,9	4,9 \pm 7,8
2011	39,0 \pm 22,9	14,5 \pm 18,7	0,6 \pm 2,0	4,0 \pm 4,5	9,6 \pm 6,2	18,3 \pm 10,0
2012	18,9 \pm 17,5	6,5 \pm 12,6	0,4 \pm 1,9	2,1 \pm 3,8	7,4 \pm 11,7	16,2 \pm 18,0
2013	27,0 \pm 18,4	11,1 \pm 16,2	0,2 \pm 0,4	5,0 \pm 10,2	11,9 \pm 12,0	26,5 \pm 19,1
2014	9,1 \pm 7,8	3,0 \pm 5,7	0,5 \pm 1,9	1,7 \pm 4,2	2,8 \pm 4,5	7,2 \pm 8,7
2015	30,3 \pm 16,7	10,9 \pm 14,8	0,2 \pm 0,4	2,2 \pm 3,8	8,0 \pm 6,1	20,8 \pm 11,9
2016	17,8 \pm 14,2	6,8 \pm 10,7	0,0 \pm 0,2	0,4 \pm 0,5	4,8 \pm 5,3	13,4 \pm 12,2
2017	8,0 \pm 5,3	2,8 \pm 4,6	0,0 \pm 0,0	0,6 \pm 1,8	2,2 \pm 3,4	7,3 \pm 5,6
2018	42,0 \pm 25,3	15,7 \pm 21,2	0,6 \pm 1,8	4,8 \pm 5,9	18,8 \pm 20,2	32,8 \pm 21,1
2019	32,1 \pm 25,9	12,0 \pm 18,5	0,1 \pm 0,3	3,3 \pm 4,2	9,1 \pm 13,2	21,5 \pm 24,9
2020	35,3 \pm 16,4	12,8 \pm 15,3	0,1 \pm 0,3	2,6 \pm 5,4	6,9 \pm 4,5	11,4 \pm 5,0

Annexe 9b : Graphique des valeurs du Wasting Index (moyenne \pm écart-type) de l'herbier de *Zostera marina* de la station de Courbey (Auby et al., 2021).



Annexe 10 : Résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).

Annexe 10a : Stations d'échantillonnage du lac marin de Port d'Albret, à Vieux-Boucau/Soustons, en octobre 2024 (Demetro et al., 2024).



Annexe 10b : Température et pH pour les différentes stations (Demetro et al., 2024).

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Temperature (°C)	17.71 ± 0.30	19.14 ± 0.20	19.55 ± 0.22	20.74 ± 0.16	20.77 ± 0.16	19.13 ± 0.16	19.90 ± 3.36	19.24 ± 0.21	19.89 ± 0.12	19.54 ± 0.32
pH	7.24 ± 0.10	6.85 ± 0.25	8.28 ± 0.17	8.49 ± 0.14	8.64 ± 0.42	7.59 ± 0.03	7.28 ± 0.43	7.72 ± 0.05	7.88 ± 0.17	8.12 ± 0.15

Annexe 11 : Suite des résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).

Annexe 11a : Concentrations en ions majeurs, total des cations, anions, dureté, pourcentages d'erreur associés pour chaque station d'échantillonnage (Demetro et al., 2024).

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Cations										
Sodium (mg L-1)	668.52	33.00	9098.08	3438.75	16.03	4659.68	43.66	3307.02	2843.57	5184.33
Potassium (mg L-1)	27.51	3.38	350.81	129.19	2.69	178.46	2.16	124.62	106.74	198.84
Calcium (mg L-1)	47.36	26.74	454.90	142.45	11.39	192.85	24.85	137.87	119.70	208.50
Magnesium (mg L-1)	73.35	5.42	84.79	443.65	30.34	606.33	5.77	425.72	363.77	673.58
Anions										
Fluorine (mg L-1)	1.83	0,00	26.28	2.65	-0.19	7.44	0,00	2.72	0.74	10.15
Chlorine (mg L-1)	1537.98	56.24	20655.22	7569.35	24.28	10456.98	68.45	7341.69	6321.15	12011.25
Nitrate (mg L-1)	1.96	1.70	45.98	23.99	2.40	29.53	12.74	23.21	22.09	32.91
Sulfate (mg L-1)	624.46	16.34	8464.00	2712.05	26.38	3868.10	26.76	2593.80	2155.44	4517.26
Cation and Anion Balance Error										
Total Cations (mEq L-1)	34.82	03.05	430.50	176.14	2.44	238.94	3.40	169.41	145.63	265.52
Total Anions (mEq L-1)	56.51	1.95	761.01	270.51	1.27	376.38	2,69	261,62	223,58	433,94
Error (%)	-23.76	21.95	-27.74	-21.13	31.41	-22.34	11.66	-21.39	-21.11	-24.08
Conductivity										
Conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	8700.00 ± 66.94	371.17 ± 18.15	45534.00 ± 15.72	23878.00 ± 305.66	200.17 ± 11.08	27993.33 ± 2140.28	411.17 ± 0.24	18427.87 ± 68.55	16623.80 ± 242.41	30456.73 ± 40.27
Hardness (Fresh Water and Freshwater Mixed Samples Only)										
CaCO ₃ Eq (mg L-1)	420.61	89.19	N/A	N/A	153.49	N/A	85.87	N/A	N/A	N/A

Annexe 11b : Matière particulaire en suspension (SPM) et Turbidité (Turbidity) pour les différentes stations (Demetro et al., 2024).

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
SPM (mg/L)	14.35	8.12	10.19	24.83	22.06	23.63	8.48	16.77	17.22	22.89
Turbidity (FNU)	5.50 ± 0.10	5.95 ± 0.56	0.43 ± 0.06	2.77 ± 0.12	7.67 ± 0.06	2.90 ± 0	4.73 ± 0.06	3.22 ± 0.33	4.07 ± 0.31	1.83 ± 0.06

Annexe 11c : Concentration en oxygène dissous (Dissolved Oxygen) et mesures du potentiel rédox (Redox potential) pour les stations d'échantillonnage (Demetro et al., 2024).

Les données pour les stations 2.1 et 2.5 ne sont pas disponibles, et notées (-).

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Dissolved Oxygen (mg L-1)	2.89 ± 0.69	4.17 ± 0.70	7.76 ± 1.11	9.46 ± 1.45	10.24 ± 0.99	7.03 ± 2.01	5.09 ± 1.13	7.78 ± 2.03	7.23 ± 1.30	6.71 ± 1.33
Redox potential (mV)	-20.77 ± 0.15	42.10 ± 10.23	46.25 ±	49.10 ± 0.44	35.35 ± 0.40	-	25.50 ± 7.40	38.97 ± 19.19	55.27 ± 0.06	-

Annexe 12 : Suite des résultats des études physico-chimiques des étudiants en Master 1 Mundus à l'issue de la campagne d'échantillonnage du 14 au 15 octobre 2024 (Demetro et al., 2024).

Annexe 12a : Concentration phosphore (Phosphorus) mesurées par spectrophotométrie à 610 nm (Demetro et al., 2024).

“ND” : non détecté ; “<LOQ” : sous la limite de quantification. Les concentrations sous la limite ont été estimées à partir de LOQ/2.

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Phosphorous (ug L-1)	67,83	183,36	ND	<LOQ (18,27)	<LOQ (18,27)	ND	142,79	ND	ND	ND

Annexe 12b : Comparaison des valeurs obtenues par spectrophotométrie à 665 nm en laboratoire ($\mu\text{g L}^{-1}$) et avec la sonde YSI (RFU) (Demetro et al., 2024).

(-) : données non disponibles.

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Chlorophyll a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	3.04	8.75	0.33	5.42	10.73	3.74	1.13	4.18	5.66	2.06
Chlorophyll a (RFU)	3.51 ± 0.25	3.47 ± 0.07	0.24 ± 0.03	4.22 ± 0.78	15.3 ± 2.83	-	2.17 ± 0.02	3.70 ± 0.40	6.47 ± 0.16	1.29 ± 0.06

Annexe 12c : Qualité de l'eau dans le lac marin de Port d'Albret : Qualité de l'eau des stations évaluée à l'aide de paramètres physico-chimiques (Oxygène dissous, T_0 , pH et NO_3^-) inclus dans la Directive Cadre sur l'Eau (Demetro et al., 2024).

