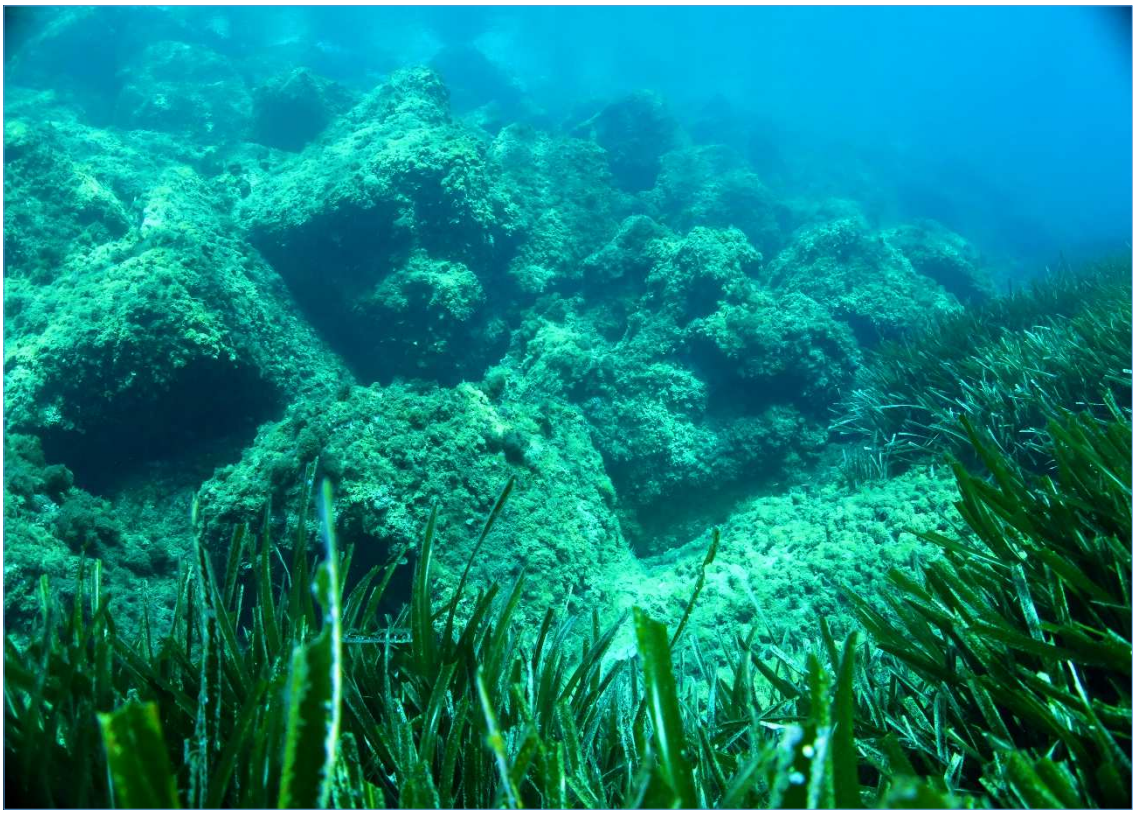
PRÉFET
DE LA RÉGION
PROVENCE- ALPES-
CÔTE D'AZUR

Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement

Préservation des herbiers de posidonie à proximité des ouvrages : quelle distance minimale ?

Évaluation de l'état de l'herbier de posidonie au voisinage d'ouvrages maritimes



Avril 2025

suez Consulting

GIS POSIDONIE

mio Mediterranean Institute of Oceanography

Actimar OCÉANOGRAPHIE OPÉRATIONNELLE

WAELES MARINE CONSULTANTS

Titre de l'étude

Préservation des herbiers de posidonie à proximité des ouvrages : quelle distance minimale ? Évaluation de l'état de l'herbier de posidonie au voisinage d'ouvrages maritimes.

Commanditaire

DREAL PACA Service Biodiversité, eau et paysages – Mission Milieux marins et littoraux
16 rue Zattara CS 7024813331 - Marseille cedex 3

Réalisation

GIS Posidonie
MIO – case 901
Campus de Luminy
163, avenue de Luminy
13009 Marseille

SUEZ Consulting SAFEGE SAS
Avenue Henri Malacrida Bâtiment D 30
13100 AIX EN PROVENCE – France

Institut Méditerranéen d'Océanologie – MIO
Campus de Luminy
163 avenue de Luminy
13288 MARSEILLE cedex 09

Actimar SAS
36, quai de la Douane
29200 Brest – France

Waeles Marine Consultants
53 rue du commandant Groix
29200 Brest

Responsables de l'étude

Fabrice Javel (SUEZ Consulting), Patrick Astruch (GIS Posidonie)

Participation à l'acquisition de données sur le terrain

Patrick Astruch, Bruno Belloni, Romain Bricout, Camille Carpentier, Thomas Schohn (GIS Posidonie), Fabrice Javel, Candice Puissant (SUEZ consulting), Marie Borriglione, Thierry Thibaut, Bastien Thouroude, (MIO), Éric Pironneau (indépendant)

Rédaction du rapport final

Patrick Astruch, Bruno Belloni, Camille Carpentier, Thomas Schohn (GIS Posidonie)

Crédits photographiques

GIS Posidonie sauf mention contraire.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des gestionnaires des ports dans lesquels nous avons réalisé cette étude.

Citation du document

Schohn T., Astruch P., Belloni B., Berrebha A., Bricout R., Caplanne S., Carpentier C., Javel F., Lavaud L., Michaud S., Pavec M., Puissant C., Thibaut T., Waeles B., 2025. Préservation des herbiers de posidonie à proximité des ouvrages : quelle distance minimale ? Évaluation de l'état de l'herbier de posidonie au voisinage d'ouvrages maritimes. Contrat SUEZ consulting-GIS Posidonie / DREAL PACA. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 44 p + Annexes.

SOMMAIRE

1 Introduction 5
1.1 Contexte....5
1.2 Objectifs de l'étude....7
2 Matériel et Méthodes 8
2.1 Choix des sites d'études....8
2.2 Caractérisation de la vitalité et de la structure des herbiers à proximité d'ouvrages...9
2.2.1 Stratégie d'échantillonnage 9
2.2.2 Paramètres d'évaluation de la vitalité 11
2.2.3 Paramètres d'évaluation de la structure 14
2.2.4 Descripteurs de l'hydrodynamisme et analyse croisée 16
2.3 Analyse et représentation des données....18
3 Résultats 20
3.1 Description par site....20
3.2 Analyse des descripteurs de vitalité et de structure de l'herbier de posidonie....20
3.2.1 Paramètre d'évaluation de la vitalité 20
3.2.2 Paramètre d'évaluation de la structure 22
3.3 Analyse combinée des descripteurs de vitalité et de structure de l'herbier de posidonie....29
3.4 Analyse des résultats des données de modélisation de l'hydrodynamisme et croisement avec les descripteurs de l'herbier de posidonie....31
3.4.1 Résumé des résultats de la modélisation de l'hydrodynamisme (pour le détail, *cf.* 6.5 Annexe 5) 31
3.4.2 Croisement avec les données d'hydrodynamisme 32
4 Discussion et conclusion 47
5 Références 51
6 Annexes 53
6.1 Annexe 1 : Coordonnées géographiques des 3 transects des 8 sites d'étude....53
6.2 Annexe 2 : Fiches descriptives par site d'étude....54
6.2.1 Marseille Digue des Catalans 54
6.2.2 La Ciotat 56
6.2.3 Bandol 58
6.2.4 Hyères 60
6.2.5 Le Lavandou 62
6.2.6 Saint-Tropez 64
6.2.7 Cannes 66
6.2.8 Saint-Jean-Cap-Ferrat 68

6.3 Annexe 3 : Résumé des données de vitalité de l'herbier de posidonie.....70
6.3.1 Densité de faisceaux 70
6.3.2 Déchaussement des rhizomes 70
6.3.3 Proportion des rhizomes plagiotropes 71
6.3.4 Recouvrement de l'herbier de posidonie 71
6.3.5 Nombre de segments de posidonie 72
6.3.6 Ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments 72
6.4 Annexe 4 : Résumé des résultats statistiques obtenus pour l'évaluation de l'état de l'herbier et la relation avec les données hydrologiques.....73
6.4.1 Densité de faisceaux 73
6.4.2 Déchaussement des rhizomes 73
6.4.3 Proportion des rhizomes plagiotropes 74
6.4.4 Nombre de segments de posidonie 74
6.4.5 Ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments 75
6.4.6 Recouvrement de l'herbier en fonction des paramètres hydrodynamiques 75
6.4.7 Déchaussement des rhizomes en fonction des paramètres hydrodynamiques77
6.5 Annexe 5 : Rapport d'étude sur la modélisation hydrodynamique de la présente étude 78

1 Introduction

1.1 Contexte

Située en Méditerranée, *Posidonia oceanica* est une espèce de magnoliophytes qui créée de vastes prairies sous-marines appelées herbiers, depuis la surface de l'eau jusqu'à une profondeur de 30 à 40 mètres, selon la transparence des eaux (Duarte et al., 2008). L'herbier de posidonie est l'un des écosystèmes les plus importants du littoral méditerranéen. La posidonie se présente en faisceaux de 4 à 8 feuilles environ, qui tombent principalement à l'automne. Ces feuilles mesurent en moyenne 40 à 80 cm de long et de 1 cm de large. Chaque faisceau de feuilles est porté par un axe qui se développe horizontalement (rhizome plagiotrope) ou verticalement (rhizome orthotrope). L'herbier forme avec le temps un enchevêtrement complexe et très compact de rhizomes et de racines, dont les interstices sont remplis de sédiments, ce qui forme la « matte ».

L'herbier de posidonie joue un rôle majeur dans le fonctionnement de l'écosystème côtier à travers les nombreux services écosystémiques qu'il fournit (Figure 1). Cet herbier est un pôle de biodiversité important où l'on retrouve plusieurs milliers d'espèces animales ou végétales (Boudouresque et al., 2006a). Ces espèces sont présentes de façon permanente ou simplement occasionnelle et utilisent l'herbier comme zone de nutrition, de reproduction, de recrutement, de développement pour les juvéniles et d'abri. L'herbier est également responsable d'une production d'oxygène considérable (54 à 119 mmol O_2/m²/j au printemps ; Koopmans et al., 2020) et de la fixation et de la séquestration de carbone à long terme (1.62 tonnes de carbone fixé/ha/an, dont 27.8 % séquestrés en moyenne pour l'herbier de la plaine orientale de Corse) (Monnier, 2020 ; Monnier et al., 2020 ; Marx et al., 2021 ; Pergent-Martini et al., 2021). Enfin, il est également essentiel pour atténuer l'effet de l'hydrodynamisme de la zone côtière sur certaines plages, en réduisant de 10 à 75 % la force des vagues sous couvert des feuilles, de la houle et des courants (Jeudy de Grissac, 1984, Gambi et al., 1989, Gacia et al., 1999). Les fonds sableux sont ainsi stabilisés par la fixation des sédiments dans le lacis des rhizomes. Sans cette protection contre l'érosion, l'équilibre des rivages sableux serait fortement modifié.

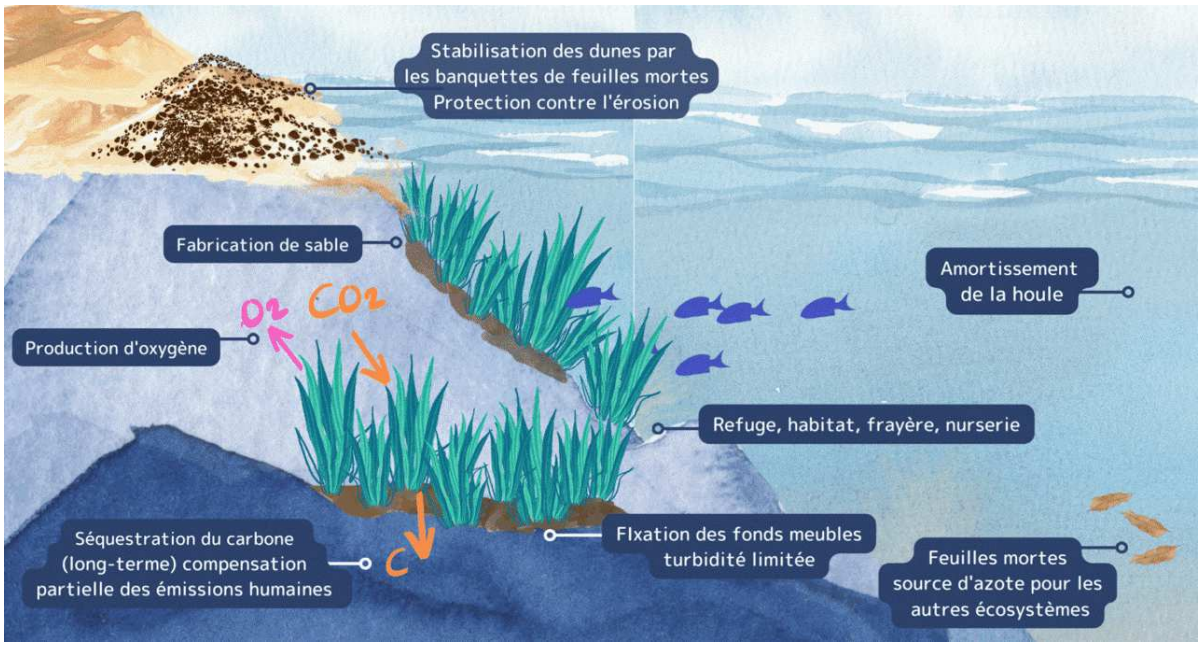


Figure 1. Services écosystémiques rendus par les herbiers de posidonie (GIS Posidonie, modifié d'après Boudouresque C.F. et Pergent G).

Cependant, les herbiers à *Posidonia oceanica* sont soumis à de multiples pressions naturelles (hydrodynamisme, herbivorie) et également à des pressions dont l'origine est imputable aux différentes activités humaines (Boudouresque et al., 2006a ; Pazzaglia et al., 2020, Tang et Hadibarata, 2022), telles que les aménagements littoraux qui constituent une cause importante de leur régression. La nature des impacts induits par un aménagement maritime (brise-lame, épis, digues, etc.) sur le littoral et les fonds marins peut être 'direct' (par recouvrement des habitats) ou 'indirect' à travers la diminution de l'accès à la lumière (par l'augmentation de la turbidité) générée lors de la phase de travaux, ou due aux modifications hydrodynamiques étant donné la présence de l'ouvrage, ou encore à la diffusion de polluants liée à l'exploitation d'un port dans le cas d'une digue portuaire. Ces pressions tuent par recouvrement, ou diminuent la capacité de survie des herbiers de posidonie via l'altération de l'efficacité de la photosynthèse. Les ouvrages maritimes modifient l'hydrodynamisme et localement les houles et les courants, puis, indirectement, les processus de transports sédimentaires littoraux. Les digues parallèles au rivage modifient également les courants et provoquent la déflexion des houles, ce qui peut engendrer des modifications de la courantologie avec hyper-sédimentation en amont et érosion en aval (Boudouresque et al., 2006b).

Les modifications de l'hydrodynamisme et de la dynamique sédimentaire peuvent être préjudiciables pour la posidonie. La sensibilité de la posidonie à ces pressions est qualifiée de moyenne et variable par La Rivière et al. (2016). Une accumulation excessive de sédiments peut ensevelir les apex végétatifs de la plante, et lorsque le taux de sédimentation dépasse 5 à 7 cm par an, cela entraîne la mortalité des points végétatifs (Boudouresque et al., 2006b). Inversement, si ce taux est nul ou négatif (départ de sédiment), les rhizomes se déchaussent et deviennent alors sensibles aux cassures pouvant être causées par l'hydrodynamisme, les ancres, etc. Les ouvrages de protection portuaires et brise-lame modifient donc l'hydrodynamisme, influençant directement l'état de l'herbier de posidonie à leur proximité.

1.2 Objectifs de l'étude

En France, les herbiers à *Posidonia oceanica* sont protégés par un arrêté ministériel datant du 19 juillet 1988. Étant donné la difficulté de prédire l'impact réel d'un enrochement sur l'herbier, le principe de précaution a été appliqué et une distance minimale de 10 m entre un enrochement artificiel et les *P. oceanica* vivantes les plus proches est recommandée et constitue la doctrine de l'État (Boudouresque et al., 2006a). Cette distance minimale a été définie à dire d'expert.

L'objectif de la présente étude est d'analyser la distance d'influence d'ouvrages maritimes sur l'état de vitalité et la structure des herbiers de posidonie selon différents cas de figure en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, selon un gradient d'éloignement par rapport au pied de digue. Le rapport restitue l'analyse des données collectées sur plusieurs descripteurs de l'herbier, et le croisement avec les modélisations hydrodynamiques (*cf.* 6.5 Annexe 5).

2 Matériel et Méthodes

2.1 Choix des sites d'études

L'objectif de la présente étude est d'analyser la distance d'influence d'ouvrages maritimes sur l'état de vitalité et la structure des herbiers de posidonie selon différents cas de figure en région PACA et selon un gradient d'éloignement par rapport au pied des digues. Le plan d'échantillonnage est construit en respectant différents critères listés ci-dessous, afin que l'observation d'un gradient d'état de vitalité de l'herbier de posidonie en fonction de la distance au pied de la digue puisse être fortement mis en relation avec la présence de la digue à proximité (limitation d'autres perturbations dans les sites). Pour ce travail, 8 sites d'étude ont donc été sélectionnés selon plusieurs critères :

- l'herbier de posidonie était présent sous l'ouvrage ou à proximité immédiate avant sa construction (Andromède, 2012a, 2012b et 2012c) ;
- le type d'ouvrage concerne les digues des ouvrages maritimes (enrochements artificiels et naturels) dont la taille est supérieure à 200 m linéaire d'emprise au sol ;
- la distance entre le pied des digues et les premiers patchs d'herbiers de posidonie doit être inférieure à 50 mètres en 2024 ;
- la profondeur doit être inférieure à 20 mètres ;
- l'ancienneté de la digue et celle des derniers travaux de réfection éventuels doivent être supérieures à 5 ans ;
- différentes expositions et caractéristiques ont été sélectionnées (profondeurs, exposition aux vents dominants).

Sur la base de ces différents critères, les 8 sites d'étude choisis sont présentés dans le Tableau 1 et la Figure 2.

Figure 2. Cartographie des sites d'étude sur l'ensemble de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

*Tableau 1 : Coordonnées géographiques des 8 sites d'étude. * Sites où un ADCP a été déployé.*

Site	Département	Latitude N	Longitude E
Digue des Catalans - Marseille*	Bouches-du-Rhône	43.2897417	5.3487083
Chantiers navals - La Ciotat		43.1664972	5.6124194
Port de Bandol	Var	43.131741	5.755772
Port Saint-Pierre - Hyères*		43.0799056	6.1593139
Port du Lavandou		43.1360222	6.3770250
Port de Saint-Tropez		43.2732528	6.6342694
Port Pierre-Canto - Cannes	Alpes-Maritimes	43.5399111	7.0297222
Port de Saint-Jean-Cap-Ferrat		43.6905778	7.3364861

2.2 Caractérisation de la vitalité et de la structure des herbiers à proximité d'ouvrages

2.2.1 Stratégie d'échantillonnage

L'analyse de la vitalité et de la structure de l'herbier de posidonie prend en compte plusieurs indicateurs : la densité de faisceaux par m², la proportion de rhizomes plagiotropes en limite de patch, le déchaussement des rhizomes et la proportion de rhizomes enfouis, ainsi que le taux de recouvrement et la fragmentation de l'herbier. Ces descripteurs, classiques et simples à mettre en œuvre, ont été déterminés *in situ* selon un gradient de distance par rapport à l'ouvrage en plongée sous-marine (scaphandre autonome) entre avril et juillet 2024. Ce travail de terrain a été mené conjointement par les plongeurs biologistes de SUEZ Consulting, du MIO et du GIS Posidonie, mobilisant entre 4 à 6 opérateurs par jour pour l'évaluation des mesures sur un ouvrage, avec un total de 11 personnes différentes ayant participé à l'étude. Le temps de plongée total ayant permis de réaliser l'ensemble des mesures est estimé à environ 90h00 équivalent plongeur, pour une moyenne de 67' de travail par personne et par transect (à raison de 3 plongeurs par ouvrages).

Pour chaque site étudié, plusieurs paramètres de vitalité et de structure de l'herbier ont été mesurés sur 3 transects (S01, S02, S03) à 5 distances du pied de l'ouvrage : 0-1 m, 5 m, 10 m, 20 m et **30 m (distance de référence)** (Figure 3 et Figure 4). Pour chaque distance d'éloignement à la digue et chaque transect, 50 m de linéaire ont été parcourus parallèlement à l'ouvrage, représentant un linéaire d'échantillonnage de 150 m par site et par distance d'éloignement à l'ouvrage.

La distance à **30 m** de l'ouvrage est considérée comme la **distance de référence**, en étant suffisamment éloignée de l'ouvrage pour ne plus subir les effets de celui-ci, tout en étant suffisamment proche du pied de l'ouvrage pour ne pas être influencée par d'autres pressions extérieures que celles potentiellement générées par la présence de l'ouvrage. Les profondeurs relevées entre les mesures réalisées au pied de la digue (0-1 m) et celles relevées à 30 m sont considérées comme suffisamment faible pour ne pas avoir d'influence significative sur les mesures de structures et de vitalité de l'herbier de posidonie (écart moyen des profondeurs relevées aux extrémités des radiales perpendiculaires aux ouvrages = 0.86 m, max = 2.0 m). De ce fait, toutes différences significatives observées entre les distances de 0-1 m, 5 m, 10 m et 20 m avec la distance de 30 m sera considérée comme induite par une perturbation causée par la présence de l'ouvrage maritime à proximité.

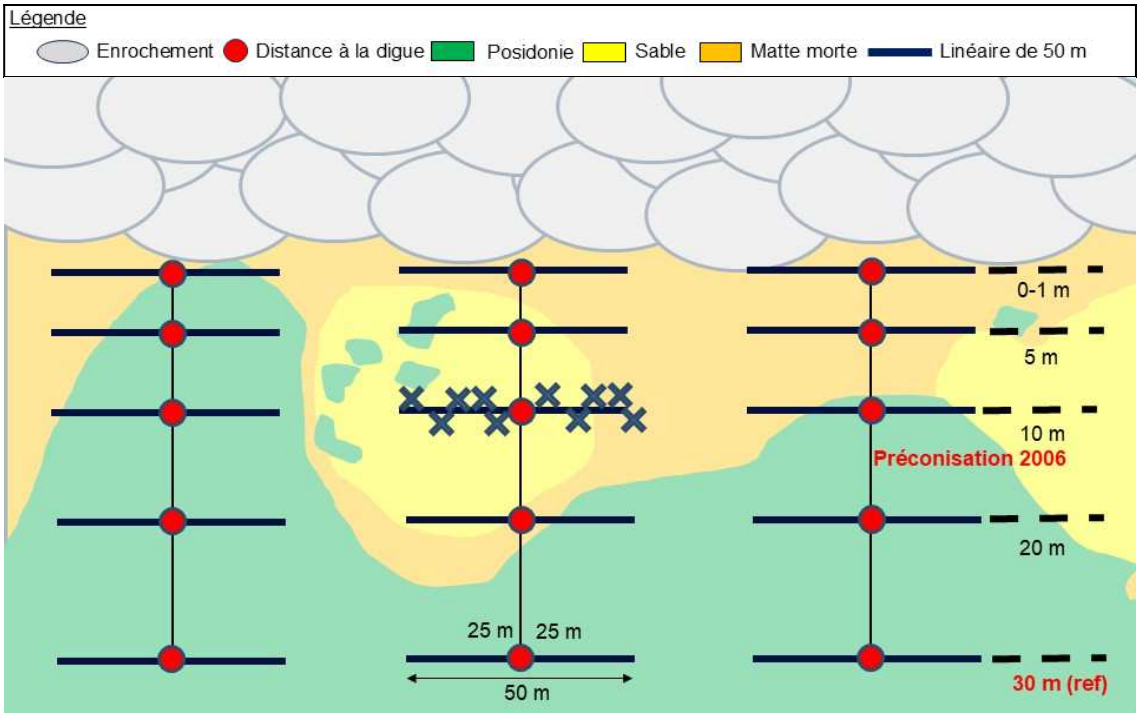


Figure 3. Schéma du protocole mis en place pour les différents paramètres mesurés (densité de faisceaux, déchaussement, proportion de rhizomes plagiotropes et taux de recouvrement).

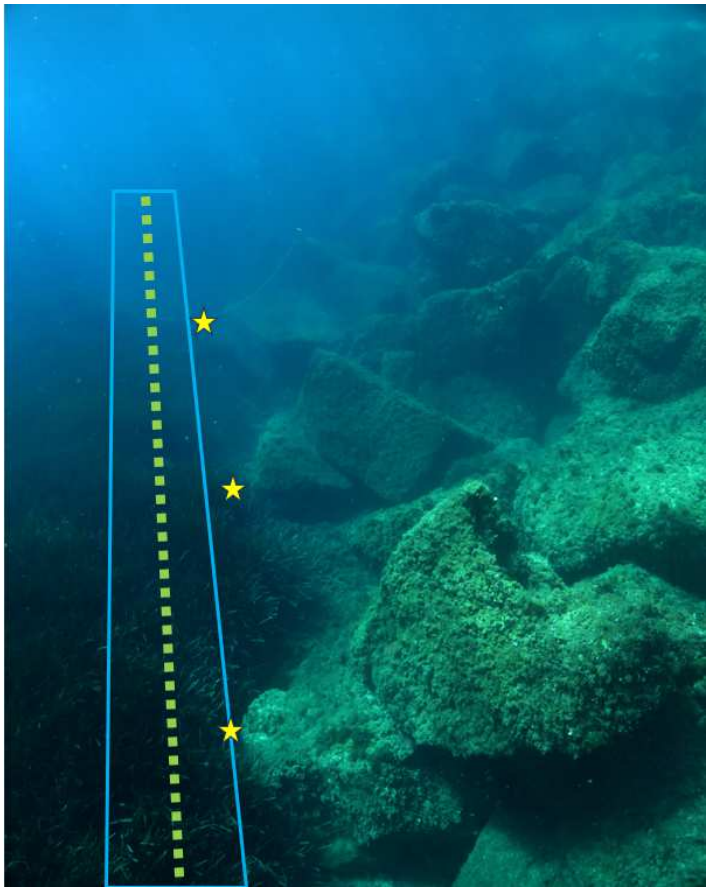


Figure 4. Représentation schématique d'un transect de 1 m de large le long du pied de digue. Les étoiles matérialisent le contact entre l'herbier de posidonie et le pied de la digue.

2.2.2 Paramètres d'évaluation de la vitalité

2.2.2.1 Densité de faisceaux

La densité de faisceaux de feuilles correspond au nombre de faisceaux de posidonie présents par m² (dans l'herbier en dehors des intermattes). Celle-ci varie en fonction de la profondeur et des conditions du milieu (lumière, sédimentation, type de substrat, abrasion mécanique). Une classification de la densité de faisceaux est proposée par Pergent-Martini *et al.*, 2010. La densité a été mesurée à l'aide de quadrats de 20 cm x 20 cm. Trente mesures ont ainsi été réalisées de façon aléatoire pour chaque distance à l'ouvrage de chaque site, et réparties sur les 3 transects (10 mesures par transects) (Figure 5), excepté sur la digue des Catalans sur laquelle les densités ont été réalisées uniquement le long du transect n°1 afin de s'affranchir du problème de profondeur sur ce site (typologie du site particulière).

Figure 5. Plongeur en cours de comptage pour l'estimation de la densité de faisceaux de posidonie dans un quadrat.

Ces mesures de densité permettent de classer l'herbier en cinq catégories, selon les valeurs de densité mesurées en fonction de la profondeur : densité très bonne, bonne, moyenne, médiocre et mauvaise (Tableau 2).

Tableau 2 : Classification de l'état de l'herbier selon les densités (nb de faisceaux par m²) en fonction de la profondeur (m) d'après Pergent et al., 2008 ; Pergent-Martini et al., 2010.

Profondeur (en m)	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
1	>1133	<930 à ≤1133	<727 à ≤930	<524 à ≤727	<524
2	>1067	<863 à ≤1067	<659 à ≤863	<456 à ≤659	<456
3	>1005	<808 à ≤1005	<612 à ≤808	<415 à ≤612	<415
4	>947	<757 à ≤947	<567 à ≤757	<377 à ≤567	<377
5	>892	<709 à ≤892	<526 à ≤709	<343 à ≤526	<343
6	>841	<665 à ≤841	<489 à ≤665	<312 à ≤489	<312
7	>792	<623 à ≤792	<454 à ≤623	<284 à ≤454	<284
8	>746	<584 à ≤746	<421 à ≤584	<259 à ≤421	<259
9	>703	<547 à ≤703	<391 à ≤547	<235 à ≤391	<235
10	>662	<513 à ≤662	<364 à ≤513	<214 à ≤364	<214
11	>624	<481 à ≤624	<338 à ≤481	<195 à ≤338	<195
12	>588	<451 à ≤588	<314 à ≤451	<177 à ≤314	<177
13	>554	<423 à ≤554	<292 à ≤423	<161 à ≤292	<161
14	>522	<397 à ≤522	<272 à ≤397	<147 à ≤272	<147
15	>492	<372 à ≤492	<253 à ≤372	<134 à ≤253	<134
16	>463	<349 à ≤463	<236 à ≤349	<122 à ≤236	<122
17	>436	<328 à ≤436	<219 à ≤328	<111 à ≤219	<111
18	>411	<308 à ≤411	<204 à ≤308	<101 à ≤204	<101
19	>387	<289 à ≤387	<190 à ≤289	<92 à ≤190	<92
20	>365	<271 à ≤365	<177 à ≤271	<83 à ≤177	<83

2.2.2.2 Proportion de rhizomes plagiotropes

En limite d'herbier ou en bordure de patch de posidonie, la présence de nombreux rhizomes plagiotropes est un indice de bonne vitalité de l'herbier, car elle traduit une tendance à la progression (Figure 6). Au sein même de l'herbier, un pourcentage élevé de rhizomes plagiotropes peut être une réponse de l'herbier à un stress, causé par exemple par l'abrasion mécanique répétée des ancres, qu'elle soit passée ou présente.

Dix mesures de proportion de rhizomes plagiotropes ont été réalisées à chaque distance à la digue et chaque transect pour les 8 sites d'étude, correspondant à un total de 30 mesures par distance par site. Une mesure correspond au comptage le long d'une limite de patch, sur 10 rhizomes consécutifs, du nombre de plagiotropes et d'orthotropes, permettant de calculer un pourcentage de rhizomes plagiotropes. Un pourcentage de rhizomes plagiotropes compris (i) entre 0 et 10 est considéré comme faible, (ii) entre 11 et 29 comme moyen, et (iii) entre 30 et 100 comme fort.

Figure 6. Rhizomes plagiotropes colonisant une zone de matte morte.

2.2.3 Paramètres d'évaluation de la structure

2.2.3.1 Déchaussement des rhizomes et proportion de rhizomes enfouis

Le lacis des rhizomes et les feuilles de la posidonie constituent un piège à sédiment (Boudouresque et al., 2016). Les espaces entre les rhizomes vont, en se comblant de sédiments, constituer la matte. Les rhizomes de posidonie sont caractérisés par une croissance lente, horizontale (rhizomes plagiotropes) de 10 à 60 mm ou verticale (rhizomes orthotropes) de 5 à 7 mm/an (Boudouresque & Jeudy De Grissac, 1983 ; Marbà & Duarte, 1998). L'édification d'une matte correspond à un équilibre entre la croissance naturelle de rhizomes luttant pour l'accès à la lumière et l'accumulation de sédiments piégés. La croissance verticale est à l'origine de l'édification des mattes de posidonie et permet à la plante de lutter contre l'enfouissement lié à la sédimentation. L'évaluation du déchaussement permet donc d'apprécier rapidement et précisément l'hydrodynamisme d'une zone et les déplacements sédimentaires qui y ont lieu (Figure 7).

Figure 7. Photo de rhizomes fortement déchaussés.

Le déchaussement a été évalué pour chaque distance à la digue et chaque transect des 8 sites suivis. Trente mesures de déchaussement ont ainsi été réalisées, de façon aléatoire, pour chaque distance de chaque site. L'échelle d'évaluation du déchaussement (faible, moyen, important) établie par Charbonnel et al. (2000) est utilisée pour cette étude (Tableau 3).

Tableau 3. Échelle d'évaluation du déchaussement en fonction des valeurs moyennes mesurées le long du balisage (d'après Charbonnel et al., 2000).

Déchaussement (valeurs seuils)	Interprétation
Inférieur à 5 cm	Déchaussement faible
5- 15 cm	Déchaussement moyen
Supérieur à 15 cm	Déchaussement important

Lorsque le déchaussement est nul ou négatif (e.g., caractérisé par un taux de sédimentation supérieur à la croissance verticale de l'herbier, pouvant dépasser 5 à 7 cm/an), le rhizome est considéré comme enfoui, ce qui peut provoquer la mortalité des points végétatifs de l'herbier (Boudouresque et al., 2006a). La proportion de rhizomes enfouis peut être calculé comme le rapport entre le nombre de rhizomes dont le déchaussement est inférieur ou égal à 0 cm et le nombre de rhizomes total échantillonné (n = 30 par distance et par site).

2.2.3.2 Recouvrement et fragmentation de l'herbier

Le recouvrement de l'herbier correspond au pourcentage du substrat recouvert par la canopée formée par les feuilles de posidonie par rapport aux zones non couvertes (sable, matte morte, roche). Le recouvrement de l'herbier de posidonie peut être conditionné par des pressions naturelles (i.e. hydrodynamisme) ou anthropiques, de façon directe (i.e. enfouissement de la posidonie par du sédiment, arrachage par une ancre) ou de façon indirecte en affectant la vitalité de la posidonie pouvant aller jusqu'à la mort des faisceaux (i.e. perturbation chimique provoquant une baisse de la densité de faisceaux).
Dans le cas d'un herbier continu, présentant une vitalité élevée, le recouvrement dépasse 80 %. Ce recouvrement peut présenter des valeurs beaucoup plus faibles lorsque l'herbier est soumis à des conditions de développement défavorables ou à des perturbations d'origine anthropique. Les valeurs diminuent également avec la profondeur (au niveau de la limite inférieure, le recouvrement est généralement compris entre 5 % et 40 %) et à proximité de zones perturbées par des aménagements ou des rejets. Le recouvrement varie également de manière naturelle, selon la saison d'observation (du fait de la variation de la longueur des feuilles) ou, par exemple, dans des secteurs soumis à un fort hydrodynamisme ou à une hypersédimentation.

Dans cette étude, le recouvrement et la fragmentation de l'herbier ont été étudiés selon la méthode du Line Intercept Transect (LIT) (Figure 8). Pour chaque distance à la digue et chacun des 3 transects, 10 tronçons de 5 m de long ont été réalisés parallèlement à la digue(n = 30 par distance avec 150 m échantillonnés). À chaque changement de substrat (sable, matte morte, herbier vivant, etc.), la longueur du substrat est évaluée à 10 cm près. Le recouvrement de la posidonie est donc évalué par tronçon de 5 m à partir du ratio entre la longueur cumulée des segments de posidonie et la longueur totale du tronçon échantillonné (5 m), et est exprimé en pourcentage de recouvrement. Deux variables ont ensuite été testées afin de mettre en évidence une potentielle fragmentation de l'herbier : (i) le nombre de segments de posidonie par tronçon de 5 m et (ii) le ratio entre le nombre de segments de posidonie et le nombre total de segments observés par tronçon de 5 m. Ce ratio est compris entre 0 et 1. Plus le ratio est proche de 0, plus l'herbier est considéré comme fragmenté, voire absent lorsque le ratio = 0 ; supérieur à 0.5, ce ratio indique une majorité de patch d'herbier par rapport au nombre total de segments (Figure 9).

Figure 8. Plongeur réalisant un Line Intercept Transect pour estimer la fragmentation de l'herbier de posidonie.

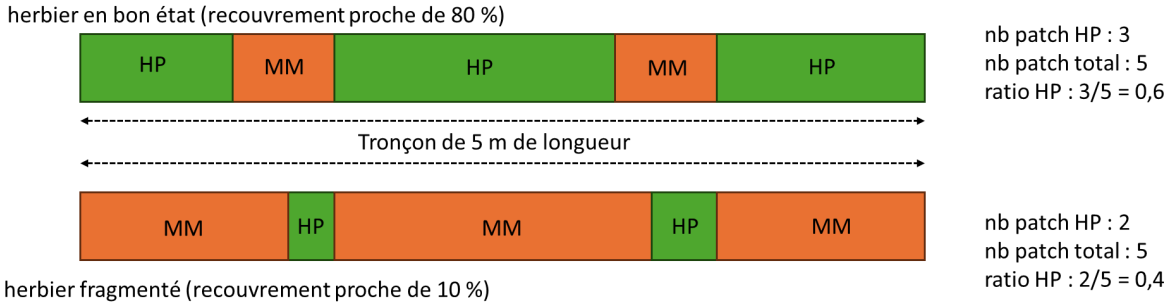


Figure 9. Exemple de section mesurée par LIT. Le calcul du nombre de segments et du ratio est montré pour un herbier en bon état (en haut, ratio > 0.5) et un herbier en mauvaise état (en bas, ratio < 0.5).

2.2.4 Descripteurs de l'hydrodynamisme et analyse croisée

Les modifications d'hydrodynamisme (houle et courants) en fonction de la distance à la digue ont été évaluées grâce aux outils de modélisation numérique globaux et locaux, couplés au déploiement d'un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler* : courantomètre acoustique à effet Doppler) pendant 3 jours sur 2 des digues étudiées (du 09/01/2024 au 12/01/2024 à la digue du port Saint-Pierre à Hyères et du 16/01/2024 au 19/01/2024 à la digue des Catalans à Marseille) (Figure 10) au cours d'évènements « énergétiques » (mer de vent et houle significative). Le déploiement des ADCP a été géré par Waeles Marine Consultant. Cet outil permet d'analyser la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue afin de calculer la vitesse de l'eau et sa direction en fonction des différentes barrières que l'onde rencontre sur son chemin (particules, enrochements, etc.).

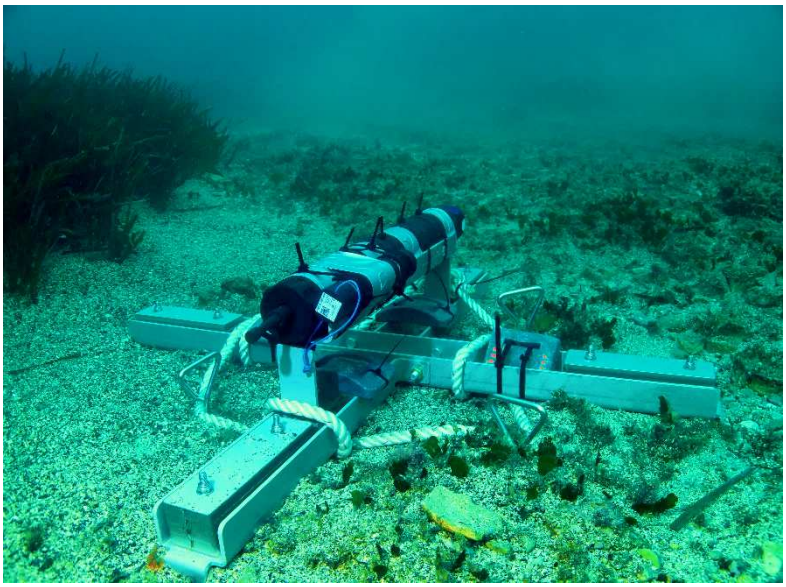


Figure 10. Photo de l'ADCP déployé à Marseille (Digue des Catalans). ©SUEZ Consulting

Ces données permettent ensuite de calibrer différents modèles numériques développés par la société Actimar (*cf.* 6.5 Annexe 5). Ces modèles prennent en compte différentes variables telles que la hauteur de houle, la profondeur, la réflexion des vagues sur un ouvrage ou les caractéristiques de la végétation présente dans le milieu (ici la posidonie) en fonction de la taille des feuilles, de la hauteur et de la densité.

Différents scénarios de conditions peuvent ensuite être modélisés en fonction de conditions météorologiques fournies en entrée appelées « forçage ». Ces scénarios de maximum d'efforts et de contraintes sur le fond correspondent aux conditions de vagues les plus fortes de la série temporelle disponible (hauteur significative la plus forte). Ces conditions correspondent à des événements avec une période de retour de 20 à 30 ans.

Les sorties de modèle permettent de produire différents descripteurs du milieu tels que la vitesse orbitale, la contrainte de cisaillement ou l'effort hydrodynamique qui vont potentiellement s'exercer sur les habitats, et peuvent être utilisés pour tester leur relation avec les descripteurs de vitalité et de structure de l'herbier de posidonie.

La robustesse du protocole d'échantillonnage, la diversité des descripteurs de l'herbier de posidonie et les différentes configurations des sites d'étude ont pour but de tenter d'identifier des tendances quant à l'influence de l'ouvrage sur l'état de l'herbier. Les mesures réalisées sur deux sites fournissent des descripteurs complémentaires que nous croiserons ci-après dans nos analyses. Les descripteurs hydrodynamiques testés pour cette comparaison sont la contrainte de cisaillement, la vitesse orbitale et la contrainte hydrodynamique moyenne. Les données numériques disponibles sont extraites de sections perpendiculaires à la digue, sur la base des paramètres du modèle prenant en compte un scénario de contrainte de cisaillement maximal, et un coefficient de traînée de la végétation (Cd) de 0.2 (scénario n°1, *cf.* 6.5 Annexe 5). Les sections n°1 et 2 des Catalans à Marseille, et n°1 et 2 au port de Hyères sont utilisées dans l'analyse car proches de la zone d'évaluation de l'herbier de posidonie sur ces sites (Figure 11). Les autres sections correspondent à la modélisation hydrodynamique de situations trop éloignées des points d'évaluation de l'herbier (section n°3

trop profonde aux Catalans ; sections n°3 et 4 sont placées sur d'autres ouvrages du port de Hyères) et n'ont donc pas été prises en compte.

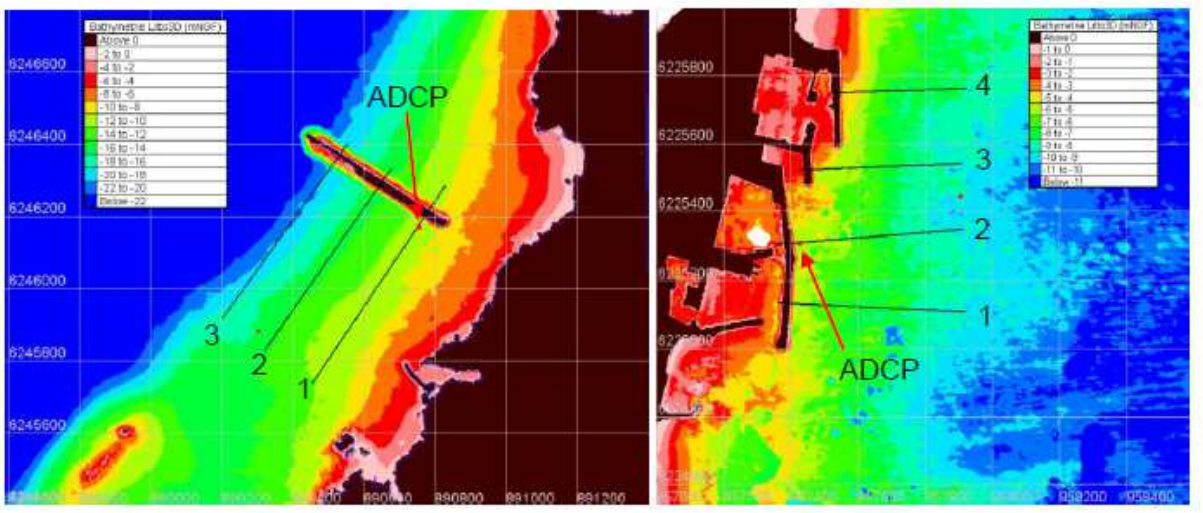


Figure 11. Sections sélectionnées pour réaliser les modélisations hydrodynamiques sur le site de Marseille Digue des Catalans (à gauche) et sur le site du port d'Hyères (à droite).

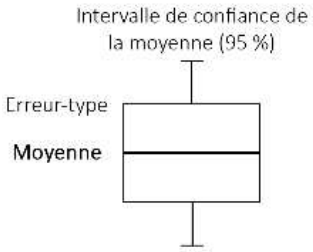
2.3 Analyse et représentation des données

L'influence de la distance à l'ouvrage (*distance* au pied de la digue (0-1 m, 5 m, 10 m, 20 m et 30 m) sur le déchaussement des rhizomes, la densité de faisceaux, la proportion en rhizomes plagiotropes, le recouvrement et la fragmentation de l'herbier de posidonie ont été analysées avec des PERMANOVA (Anderson, 2001). La variable *distance* a été emboitée dans la variable *site*, permettant de réaliser les permutations de manière stratifiée par site. Ce point de méthode permet notamment de s'affranchir du problème lié à la prise en compte de la profondeur (considérée comme homogène au sein de chaque site, mais parfois variable entre les sites), notamment pour l'analyse de la densité.

Dans le cas où une différence significative entre les modalités est détectée pour chaque élément biologique (résultats significatifs à un seuil de 5 %) les 5 modalités de distance au pied de la digue sont analysées 2 à 2 par des tests post hoc dont la p-value est corrigée par méthodes « False Discovery Rate », permettant de maintenir le risque global à 5 %. Les différences entre distances à la digue sont retranscrites sous formes de lettres (a, b, c, d, etc.) pour les représentations graphiques. Deux distances portant la même lettre ne sont pas considérées comme significativement différentes. Ces analyses sont réalisées sur les données transformées par double racine carrée, et la matrice de dissimilarité est générée en utilisant la distance euclidienne.

La proportion de rhizomes plagiotropes a été analysée grâce à un modèle linéaire généralisé (GLM) de loi Binomiale à lien '*logit*' en tenant compte de la distance à l'ouvrage maritime. Le test post-hoc utilisé ici est le test de Tukey.

L'ensemble des paramètres par distance à la digue sont représentés sous forme de boites à moustache dont la barre centrale représente la moyenne, dont les limites de la boite représentent l'erreur-type et les moustaches représentent l'intervalle de confiance de la moyenne à 95 %.



L'ensemble des moyennes données dans les résultats et discussions sont exprimées ± l'erreur type.

Les liens entre les paramètres hydrodynamiques et de vitalité d'herbier sont analysés 2 à 2, en testant les corrélations d'ordre 1 (linéaire), 2 et 3 (non linéaires), grâce des modèles additifs généralisés (GAM). Ces analyses sont réalisées indépendamment sur le site des Catalans et le site de Hyères pour chaque paramètre.

L'ensemble des analyses ont été réalisées avec le logiciel R 4.1.0 (R Core Team, 2024), à l'aide des librairies *ggplot*, *vegan*, *RVAideMemoire* et *mgcv*.

Les cartographies ont été réalisées sous le logiciel ArcGIS Pro Version 3.3.0 La cartographie des biocénoses des masses d'eau est issue du programme Surfstat (Andromède, 2014).

3 Résultats

3.1 Description par site

Une description succincte est présentée en annexe 2 pour chaque site d'étude afin de présenter la configuration de chaque site (profondeur, orientation, exposition, date de construction, etc.) et l'état de l'herbier sous influence de l'ouvrage.

3.2 Analyse des descripteurs de vitalité et de structure de l'herbier de posidonie

3.2.1 Paramètre d'évaluation de la vitalité

3.2.1.1 Densité de faisceaux

La densité de faisceaux est un paramètre très corrélé avec la profondeur. Pour une valeur de densité, la profondeur permet de classer les valeurs de densité dans un état de très bon à mauvais. Dans le cadre de cette étude, la densité varie de moyenne à médiocre, quel que soit le site d'étude (Figure 13). Aucune variation significative de la densité de faisceaux en fonction de la distance à la digue n'est observée (PERMANOVA, p = 0.485). La densité de faisceaux est relativement constante au sein de chaque site (profondeur considérée comme homogène au sein de chaque site), et cela quelle que soit la distance à l'ouvrage et quelle que soit la configuration du site (exposition, profondeur moyenne) (Figure 12).

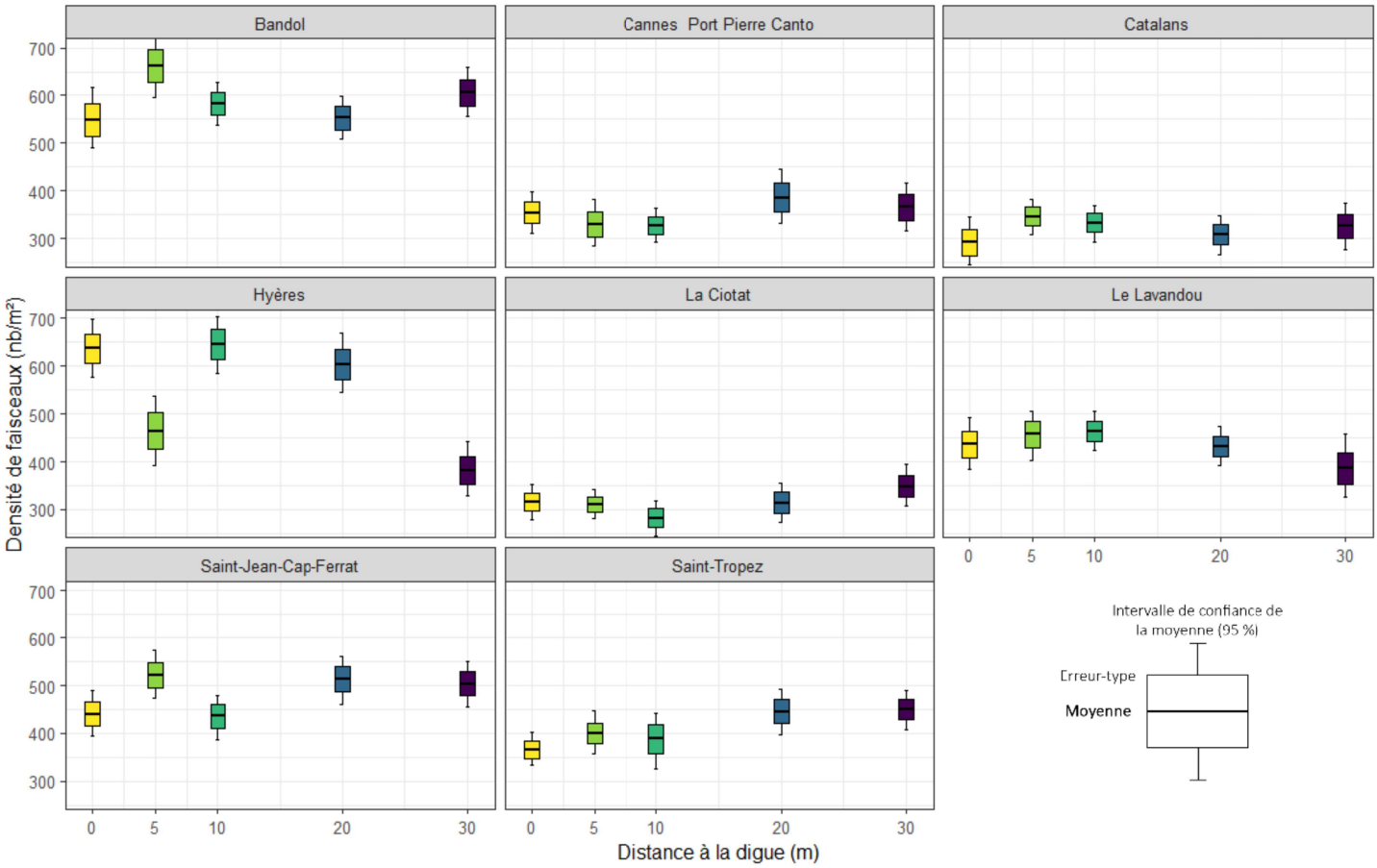


Figure 12. Représentation de la densité de faisceaux (nb de faisceaux/m²) en fonction de la distance à la digue pour chacun des sites d'étude.

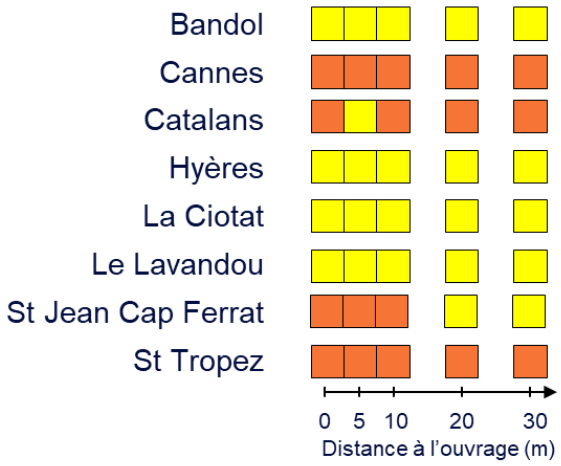


Figure 13. Classification des moyennes de densité selon la grille de lecture de Pergent-Martini et al., 2010 en fonction de la distance à la digue (en m) par site d'étude. Orange : médiocre ; jaune : moyen.

3.2.1.2 Proportion de rhizomes plagiotropes

L'analyse globale tous sites confondus de la proportion des rhizomes plagiotropes ne montre aucune différence significative en fonction de la distance à la digue (PERMANOVA, p = 0.646 ; Figure 14). Les valeurs oscillent entre 47.4 ± 2.0 % de plagiotropes au pied de la digue et 53.9 ± 2.3 % à 30 m de la digue.

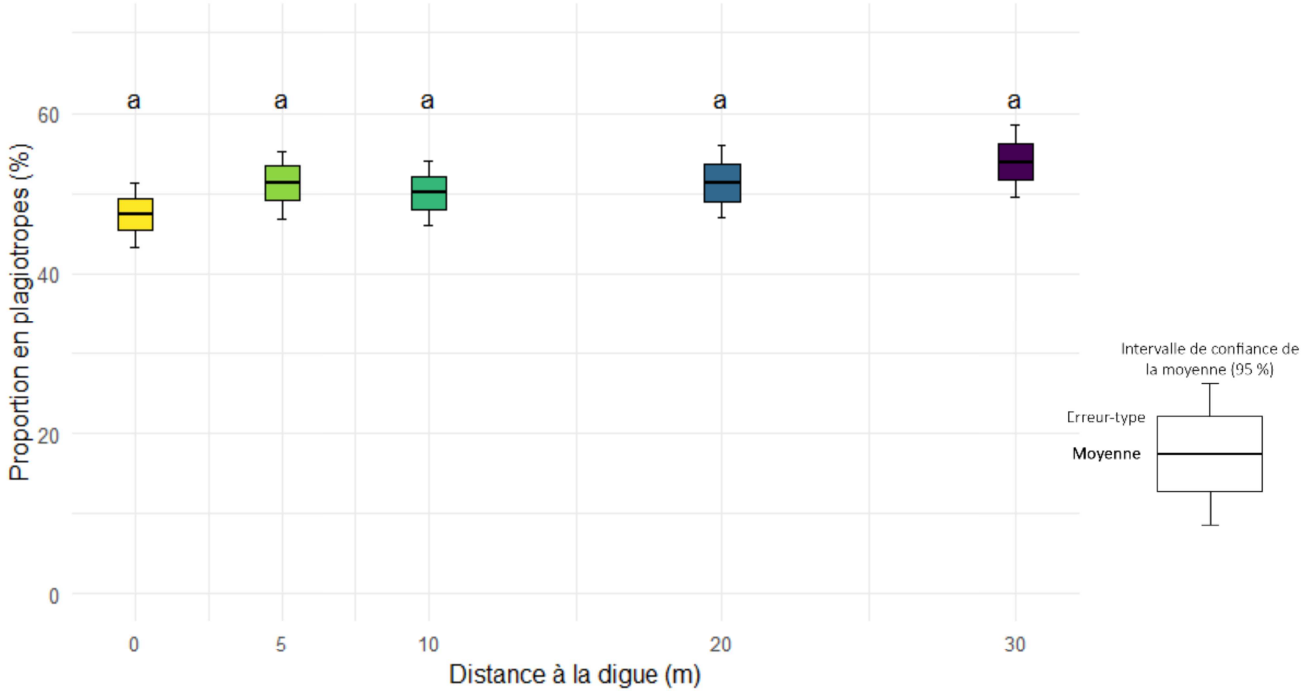


Figure 14. *Variation de la proportion de plagiotropes (%) en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus.*

La distance par rapport à la digue n'a pas d'impact visible sur la proportion en plagiotropes et donc sur la dynamique de l'herbier.

L'analyse de la proportion des plagiotropes par site montre une variabilité entre les sites (PERMANOVA, $p < 0.001$), et la faible variabilité intra-site de la proportion en rhizomes plagiotropes vont dans le sens de l'analyse globale tous sites confondus (Figure 15).

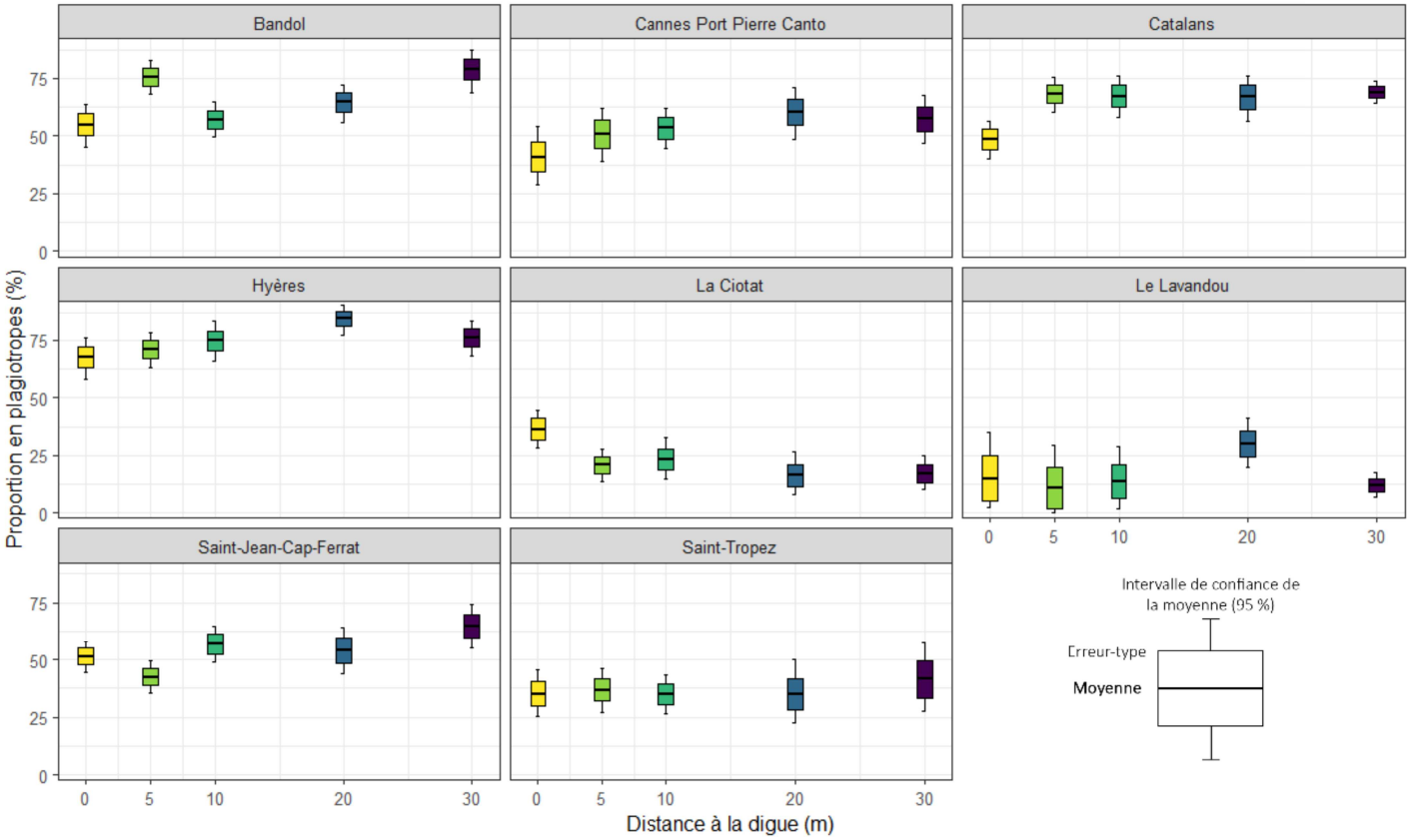


Figure 15. Variation de la proportion de rhizomes plagiotropes (%) en fonction de la distance à la digue (m) par site d'étude.

3.2.2 Paramètre d'évaluation de la structure

3.2.2.1 Déchaussement des rhizomes

Tous sites confondus, le déchaussement des rhizomes est significativement différent en fonction de la distance à la digue (PERMANOVA, $p < 0.001$). On observe que le déchaussement augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pied de la digue (test post-hocs tous significatifs) (Figure 16).

L'analyse globale tous sites confondus montre une tendance linéaire entre le déchaussement et la distance à la digue. Au pied de la digue, le déchaussement moyen est minimal et mesuré à 2.7 ± 0.1 cm, alors qu'il est maximal à 30 m de la digue avec une valeur moyenne de 6.5 ± 0.3 cm. Les valeurs moyennes observées jusqu'à 10 m de la digue (4.4 ± 0.2 cm) sont qualifiées de faibles, alors que les valeurs mesurées à 20 m et 30 m sont qualifiées de moyennes.

L'observation d'un déchaussement plus faible à proximité des ouvrages peut traduire un phénomène de sédimentation induit par une modification de l'hydrodynamisme que l'on ne retrouve pas à 20 et 30 m de l'ouvrage.

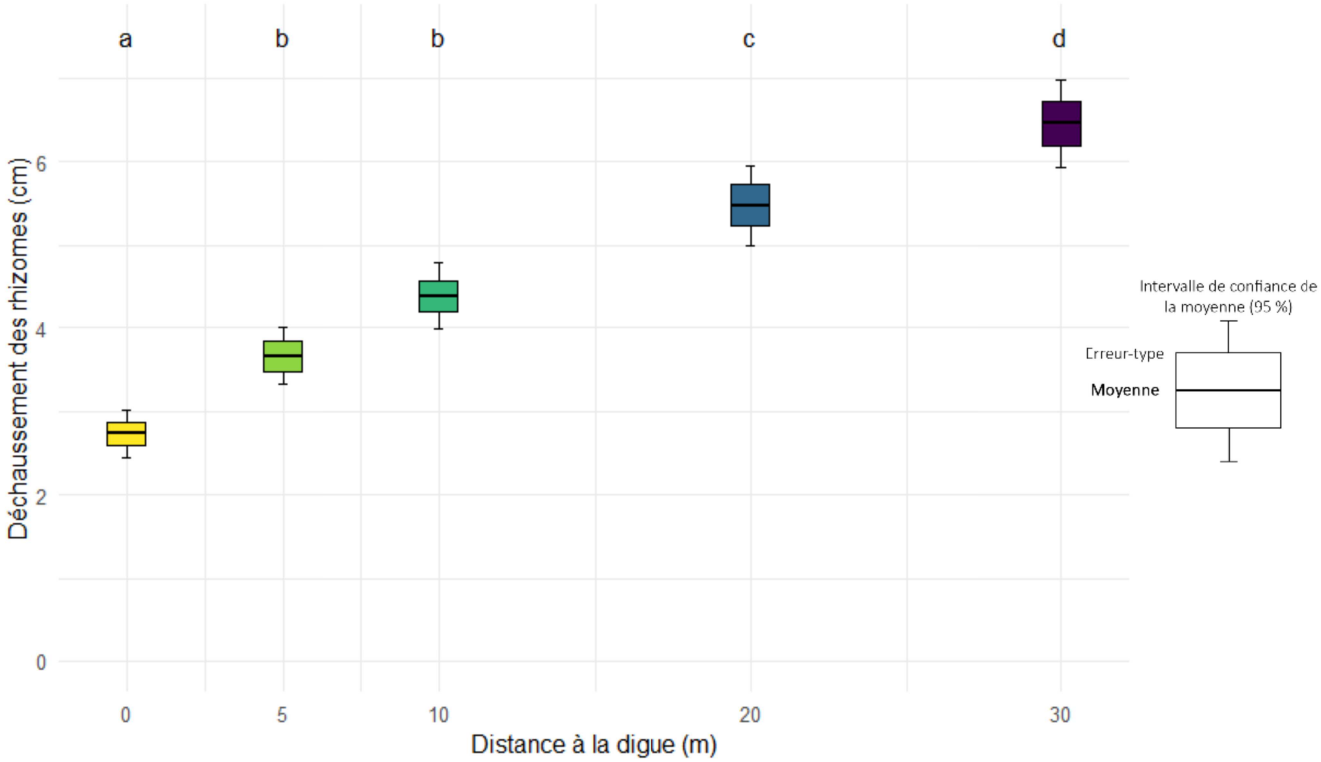


Figure 16. *Variation du déchaussement des rhizomes (cm) en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus.*

Des différences entre sites sont observées, avec des valeurs moyennes toutes distances confondues variant de 2.5 ± 0.3 cm à Hyères (site envasé où des déchaussements négatifs ont été observés indiquant un enfouissement de certains rhizomes), à 8.2 ± 0.3 cm à La Ciotat. Cependant, les tendances globales d'augmentation du déchaussement des rhizomes en fonction de l'éloignement à la digue sont visibles sur la majorité des sites (Figure 17).

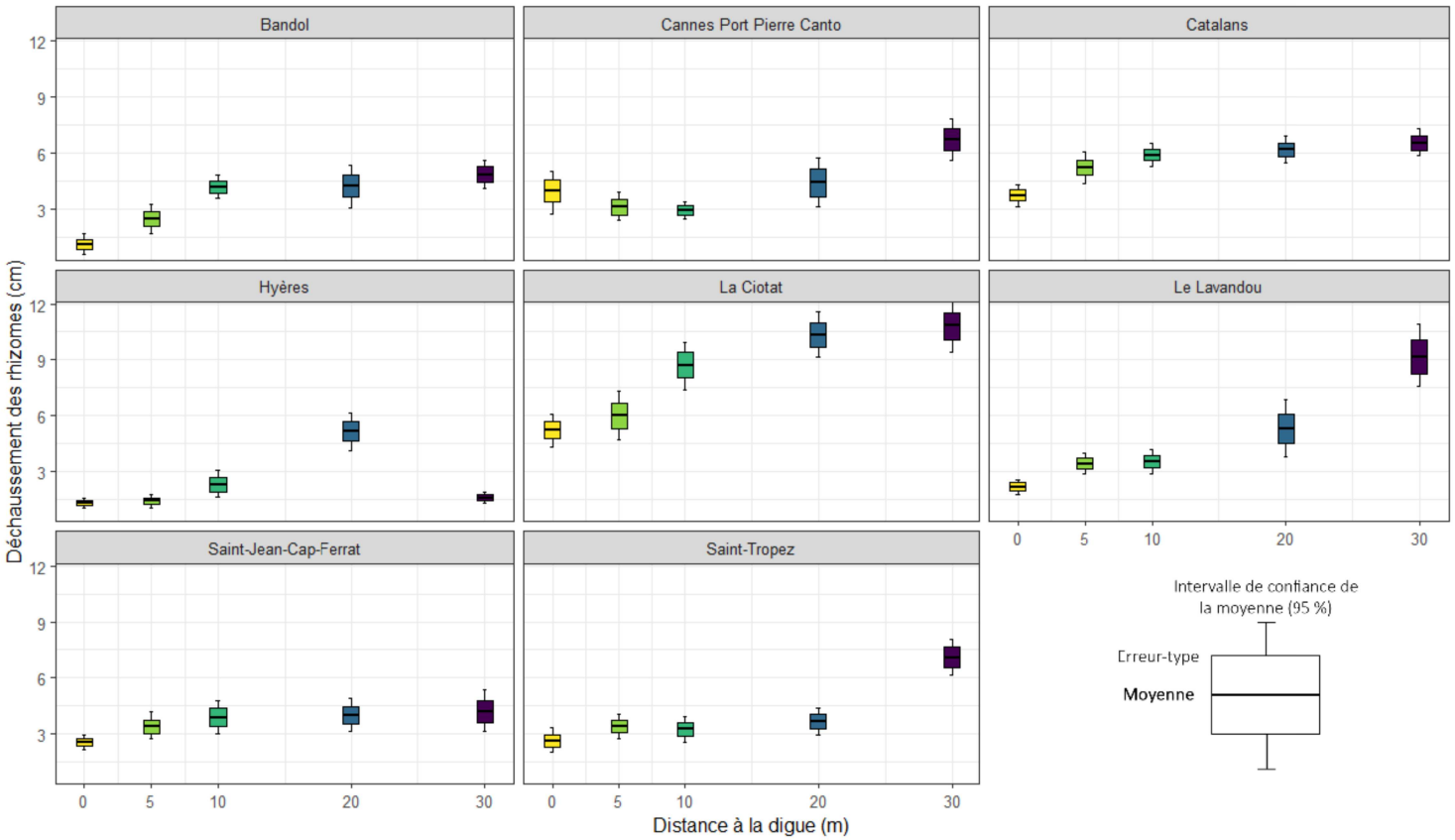


Figure 17. Variation du déchaussement des rhizomes (cm) en fonction de la distance à la digue (m) par site d'étude.

La prise en compte de la proportion des rhizomes enfouis (dont le déchaussement est inférieur ou égal à 0) montre un effet significatif de la distance à la digue (GLM Binomiale, p<0.001). En effet, la proportion mesurée au niveau du pied de digue (enfouissement = 11.6 % tous site confondu) est significativement plus importante qu'à 20 m et 30 m (post-hoc de Tukey, p < 0.007). Le taux maximal d'enfouissement est observé à Bandol avec 45.7 % de rhizomes enfouis. A 5 m et 10 m du pied de la digue, les différences sont moins prononcées avec la proportion mesurée à 30 m, mais peuvent être considérées comme marginales, avec des proportions en rhizomes enfouis respectivement de 5.9 % et 5.1 %, contre 0.4 % à 30 m (test de Tukey, respectivement p = 0.062 et p = 0.093).

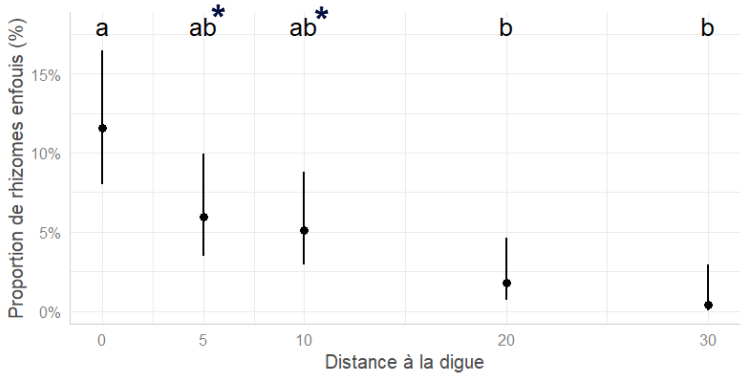


Figure 18. Variation de la proportion de rhizomes enfouis (%) en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus (: différence significative avec 30 m à un seuil de 0.10).*

3.2.2.2 Recouvrement de l'herbier de posidonie

Tous sites confondus, le recouvrement en herbier de posidonie est significativement différent en fonction de la distance à la digue (PERMANOVA, $p < 0.001$; Figure 19). Les tests post-hocs montrent qu'il n'y a pas de différence entre les recouvrements à 20 m et à 30 m des digues (respectivement 70.3 ± 2.2 % et 72.8 ± 2.2 %, $p = 0.757$). Les recouvrements moyens observés à ces deux distances sont significativement différents des recouvrements observés à 0 m, 5 m et 10 m. Les valeurs observées au plus près de la digue sont les plus faibles du jeu de données (33.5 ± 2.1 % à 0 m et 44.5 ± 2.4 % à 5 m) et ne sont pas différentes entre elles ($p = 0.280$). Elles sont cependant significativement différentes de toutes les autres distances.

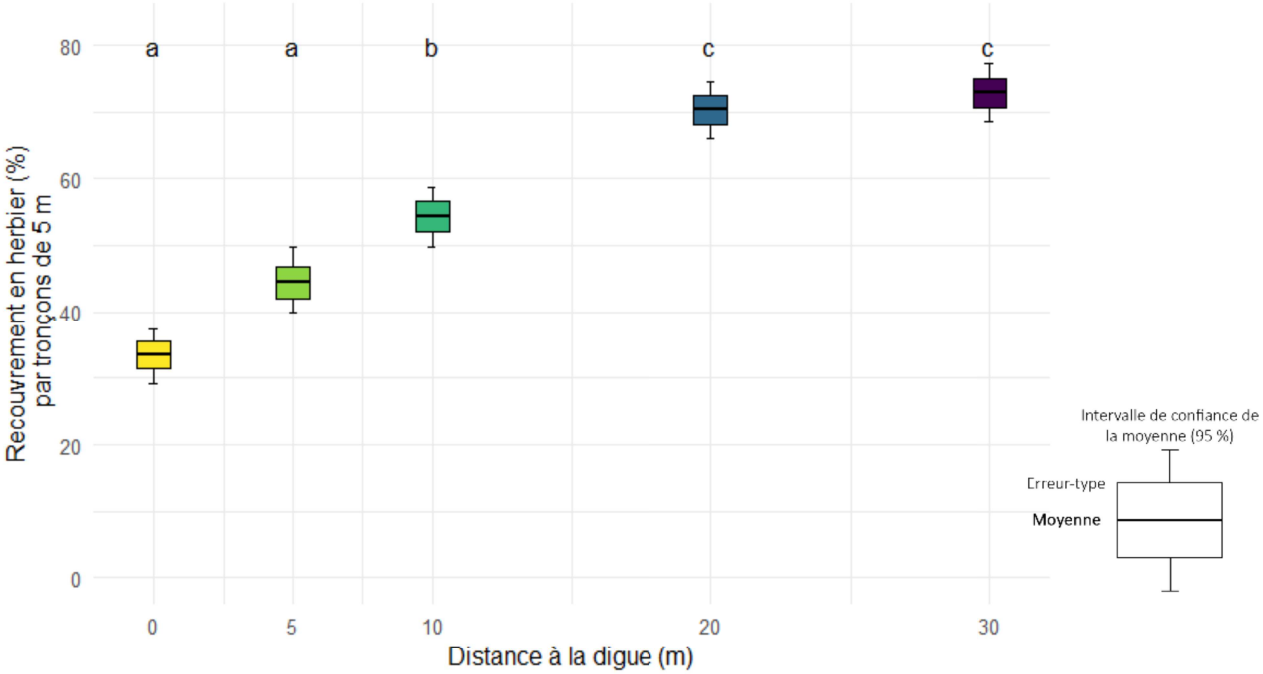


Figure 19. *Variation du recouvrement en herbier par tronçon de 5 mètres (%) en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus.*

Plus on s'éloigne de la digue, plus le recouvrement en posidonie semble augmenter, atteignant son maximum à 20 m et 30 m de distance. La présence de la digue semble avoir un effet négatif sur le recouvrement des herbiers proches de celle-ci jusqu'à une distance comprise entre 10 m et 20 m, suggérant que l'effet perturbateur de la digue s'atténue au-delà de 20 m.

Malgré une variabilité entre les sites, cette tendance globale s'observe au sein de chaque site (Figure 20). Le site du port de Hyères, site le moins profond, avec une profondeur d'étude comprise entre 3.0 et 6.0 m, mérite une description plus détaillée car les recouvrements sont certes stables, mais proches de 25 % quelle que soit la distance à la digue. La structure de cet herbier pourrait être expliquée par des pressions s'exerçant en synergie ou masquant l'effet de la digue, soit :

(i) un contexte global en baie de Hyères, proche de l'embouchure du Gapeau induisant une perturbation naturelle (eau douce, turbidité élevée) de l'herbier qui y est moins recouvrant ;

(ii) un impact plus large de la digue, en raison de la faible profondeur du site, allant au-delà des 30 m, observé dans l'analyse tous sites confondus.

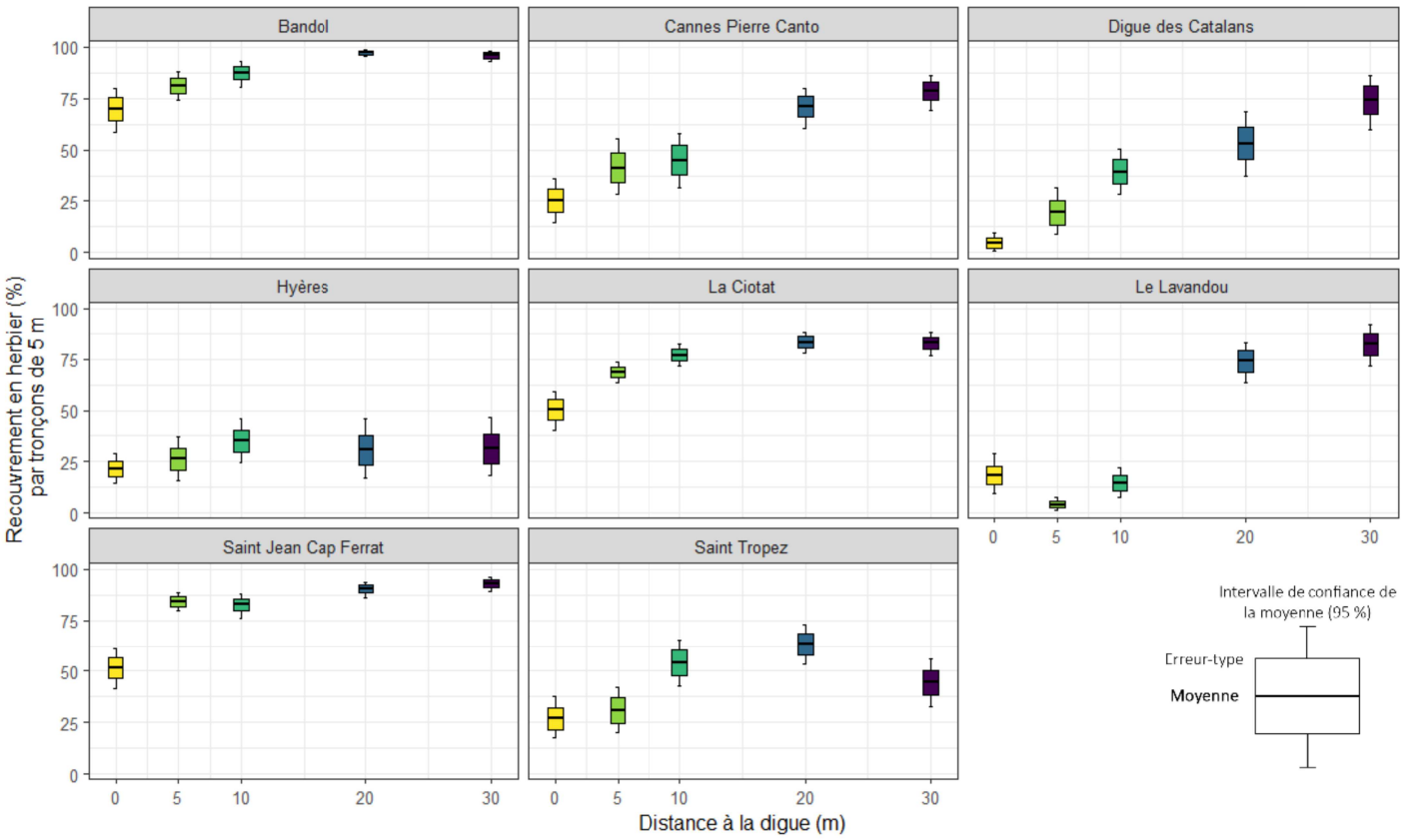


Figure 20. Variation du recouvrement en herbier par tronçon de 5 mètres (%) en fonction de la distance à la digue (m) par site d'étude.

3.2.2.3 Nombre de segments de posidonie

L'analyse tous sites confondus montre une évolution significative du nombre de patchs en fonction de la distance à la digue, mais sans gradient entre 0 m et 30 m (PERMANOVA, $p < 0.001$; Figure 21).

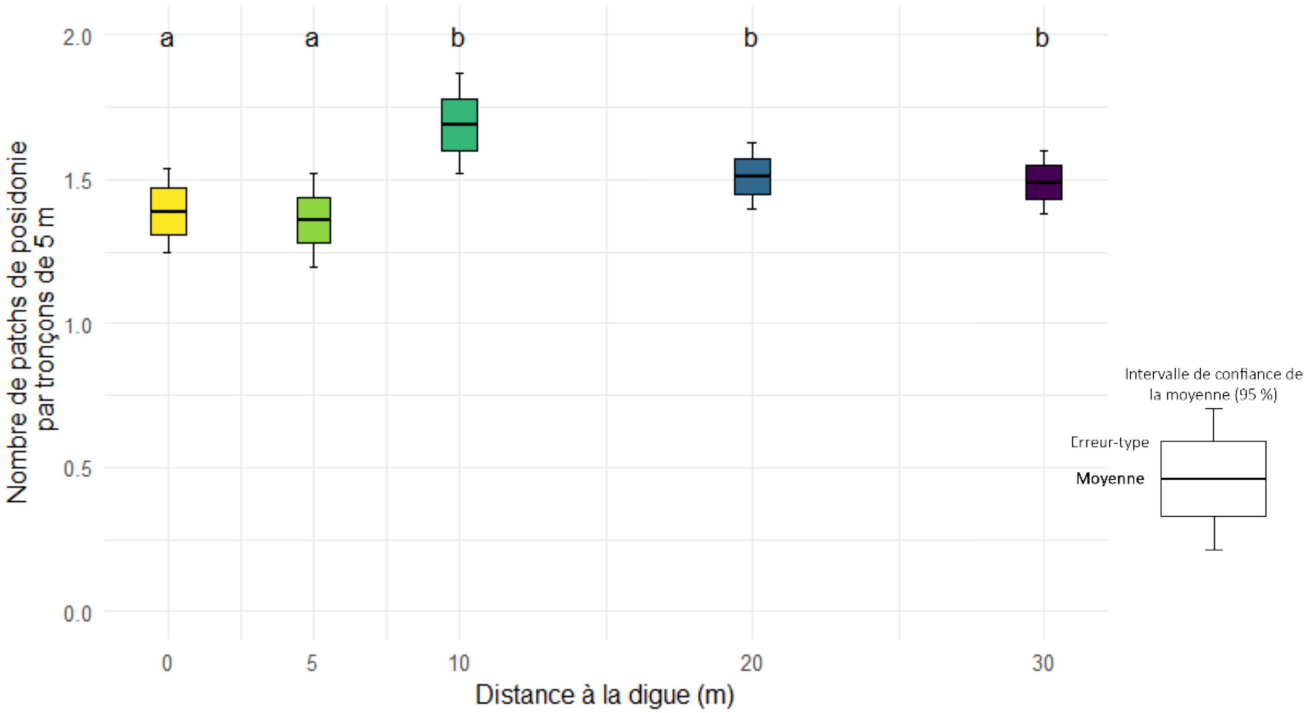


Figure 21. Variation du nombre de segments de posidonie par tronçon de 5mètres en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus.

- A 0 et 5 m : le nombre de segments de posidonie atteint en moyenne une valeur de 1.4 ± 0.1 patch par tronçon de 5 mètres au pied de la digue, et 1.4 ± 0.1 segment à 5 m. Ces 2 distances ne sont pas significativement différentes l'une de l'autre (p=0.619) ;
- A 10, 20 et 30 m : la moyenne du nombre de segments de posidonie par tronçon de 5 mètres augmente de manière significative, atteignant 1.7 ± 0.1 segments à 10 m, et 1.5 ± 0.9 patch à 20 m et 30 m. Le nombre de segments observé à ces distances est différent de celui observé à 0 et 5 m.

Le nombre de patchs de posidonie par tronçon de 5 mètres augmente avec la distance à la digue jusqu'à 10 m et se stabilise ensuite à des distances plus grandes (20 m et 30 m). Cela suggère que la distance à la digue a un effet significatif sur la présence de posidonie, avec une augmentation notable du nombre de segments à partir de 10 m de distance. Ce paramètre doit être considéré avec le recouvrement de l'herbier. Un herbier peu recouvrant à proximité d'un ouvrage peut également être moins fragmenté.

3.2.2.4 Ratio du nombre de segment de posidonie sur le nombre total de segment dénombré par tronçon de 5 m de long

Tous sites confondus, l'analyse du ratio du nombre de segments d'herbier par rapport au nombre total de segments montre une évolution significative en fonction de la distance à la digue (PERMANOVA, $p < 0.001$; Figure 22). Les ratios moyens du nombre de patchs d'herbier calculés à 0 m et 5 m de la digue ne sont pas significativement différents l'un de l'autre et s'élèvent respectivement à 0.34 ± 0.02 et 0.37 ± 0.02. Ces valeurs inférieures à 0.5, montrent que plus de la moitié des segments d'habitat observés près de la digue ne sont pas de l'herbier de posidonie, et indiquent un herbier fragmenté et dégradé. A l'inverse, les ratios

moyens observés à 20 m et 30 m de la digue, respectivement 0.61 ± 0.02 et 0.64 ± 0.02 dont la différence n'est pas significative, montrent un herbier moins fragmenté puisque la majorité des segments observés par tronçon de 5 m sont des segments d'herbier de posidonie (ratio > 0.5).

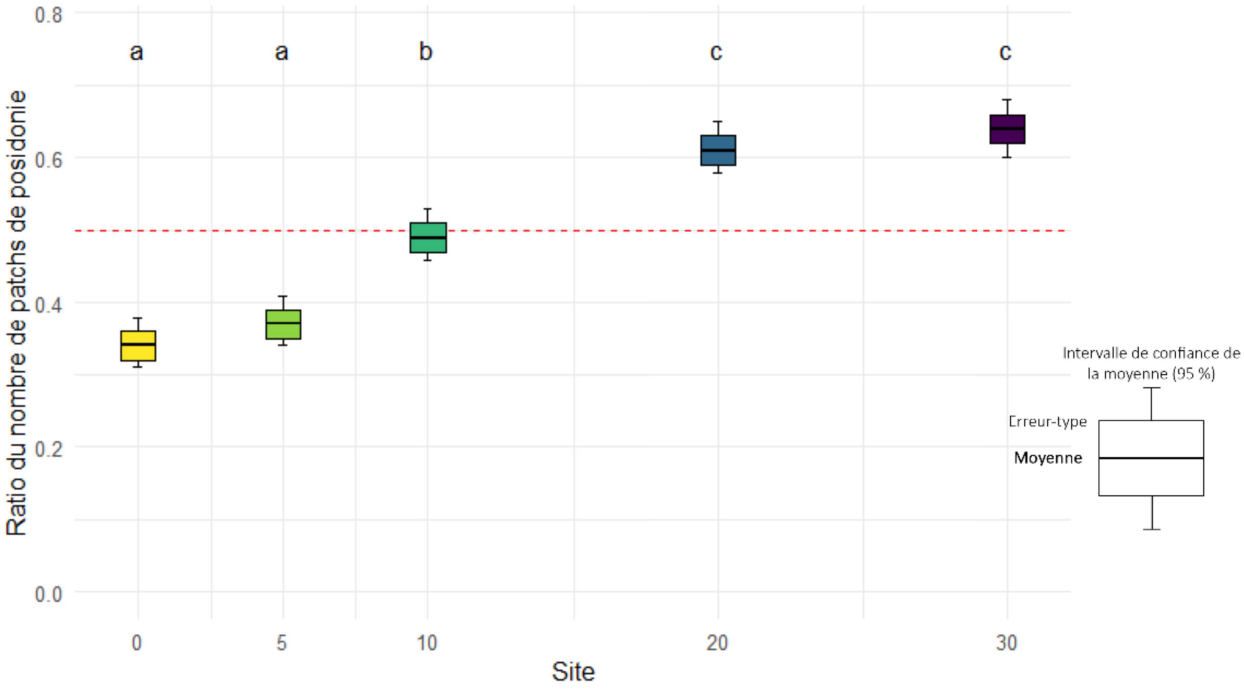


Figure 22. Variation du ratio du nombre de segments d'herbier par rapport au nombre total de segments dénombrés par tronçon de 5 mètres en fonction de la distance à la digue (m) tous sites confondus. La ligne horizontale en pointillé rouge indique un ratio = 0.5. Une valeur supérieure à cette limite indique que le nombre total de segments est dominé par des segments d'herbier de posidonie.

Cette tendance à l'augmentation du ratio en fonction de la distance s'observe sur la majorité des sites d'étude, avec des valeurs de ratio à 20 m et 30 m de la digue supérieures à 0.5 (Figure 23).

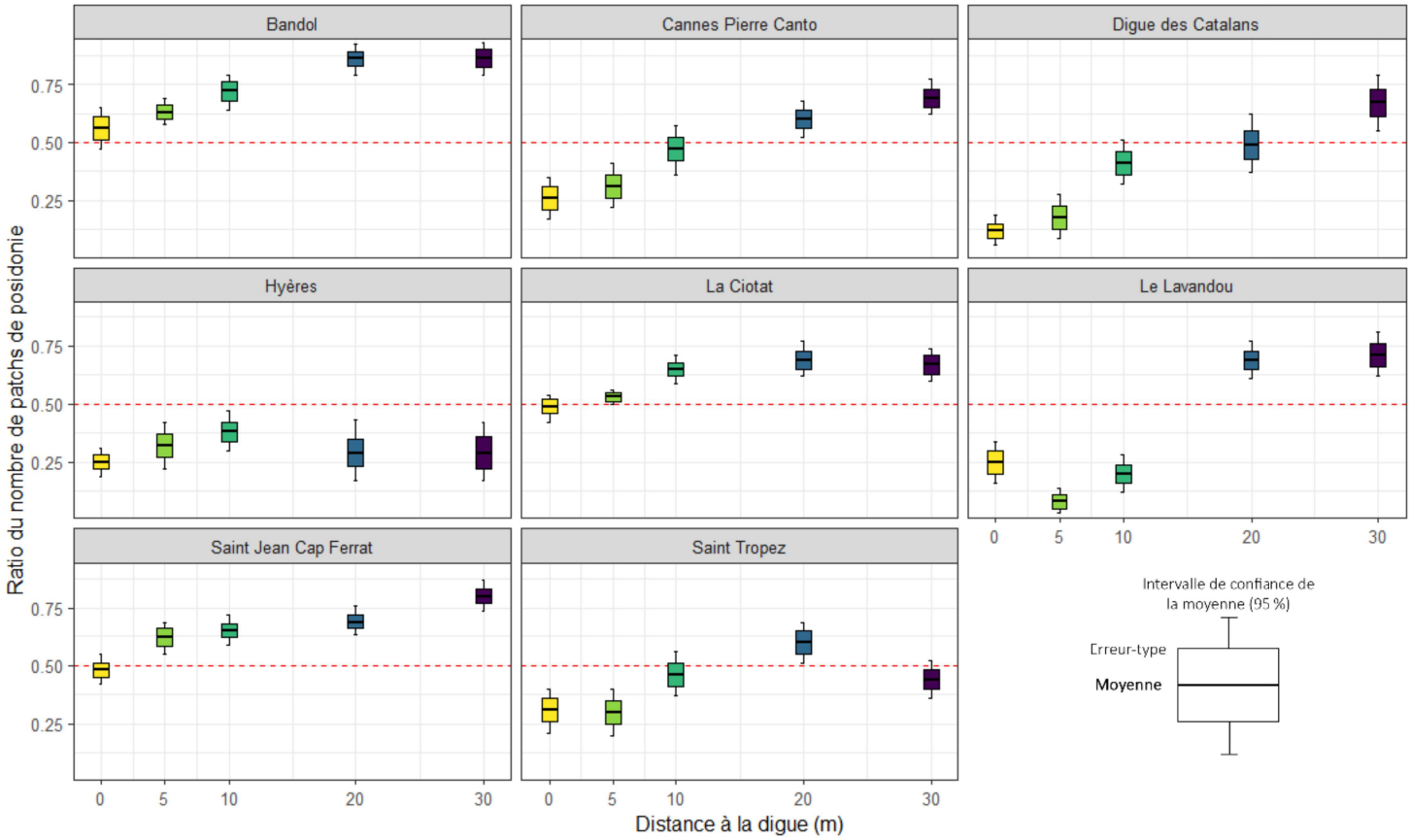


Figure 23. Variation du ratio du nombre de segments d'herbier par rapport au nombre total de segments dénombrés par tronçon de 5 mètres en fonction de la distance à la digue (m) par site d'étude. La ligne horizontale en pointillé rouge indique un ratio = 0.5. Une valeur supérieure à cette limite indique que le nombre total de segments est dominé par des segments d'herbier de posidonie.

3.3 Analyse combinée des descripteurs de vitalité et de structure de l'herbier de posidonie

Une ACP a été réalisée en incluant les descripteurs de l'herbier comme variables à l'exception de la densité de faisceaux qui est trop influencée par les différences de profondeurs observées entre les différents sites (Figure 24). Les axes 1 (69.8 %) et 2 (19.4 %) expliquent ensemble 89.2 % de la variance totale des données. Ces deux axes correspondent aux deux premières composantes principales, qui capturent la plus grande partie de la variation observée dans les variables d'origine. L'axe 1 est fortement corrélé avec le recouvrement, le ratio de patchs de posidonie et le nombre de patchs, indiquant que ces variables expliquent principalement les différences observées entre les groupes. L'axe 2 ajoute une composante supplémentaire à la variation, principalement associée à la variable de déchaussement.

La projection du ratio du nombre de segments d'herbier, du recouvrement et du nombre de patchs de posidonie pointe dans des directions similaires, suggérant que ces trois variables sont corrélées positivement entre elles. La variable de déchaussement des rhizomes est, quant à elle, projetée de manière orthogonale à ces variables, et indique qu'elle est faiblement corrélée avec ces trois variables.

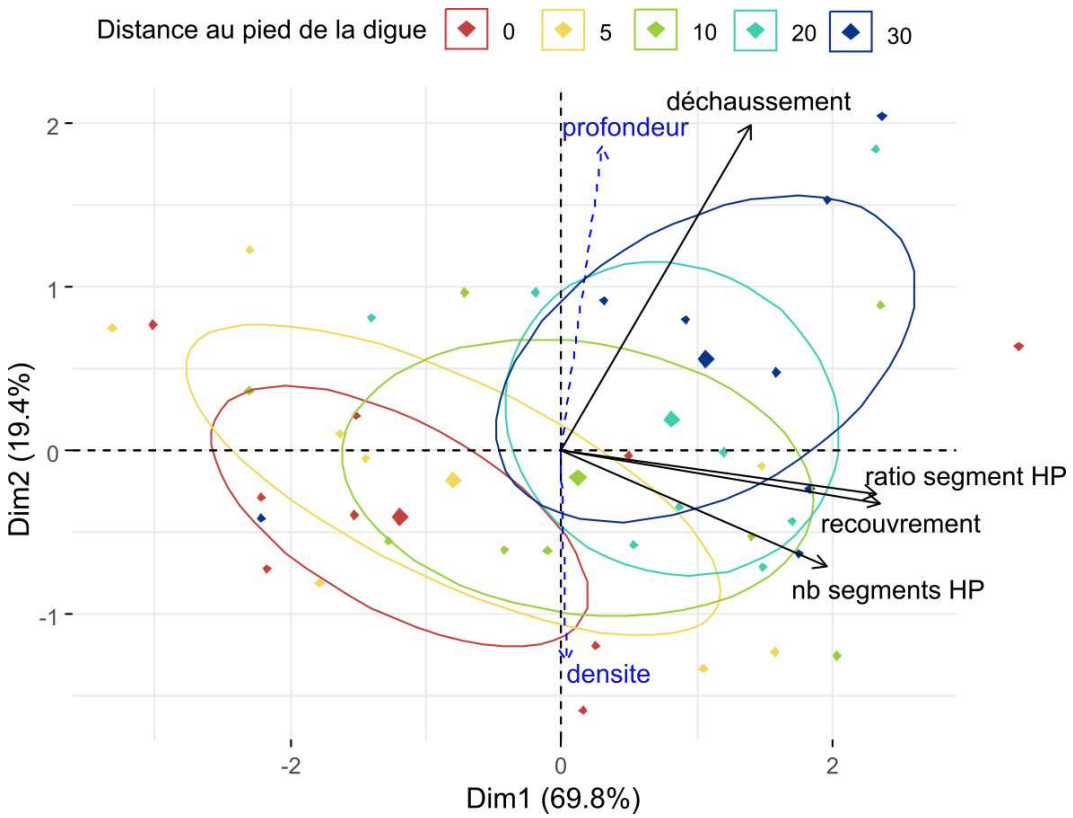


Figure 24. Projection de l'axe 1 et 2 de l'ACP des différents paramètres de vitalité de l'herbier mesurés in situ. Les points projetés correspondent aux moyennes des paramètres par distance au pied des ouvrages et par transects (5 distances par transects, 3 transects par ouvrage). Les ellipses regroupent les projections par distance au pied des ouvrages. La profondeur moyenne de chaque distance à chaque transect et le paramètre de densité sont projetés comme variables supplémentaires.

Les ellipses colorées autour des points regroupent les individus par groupe de distance (0 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m). On observe un gradient entre le pied de la digue (en rouge, 0 m) et 30 m (en bleu foncé), s'établissant du bas-gauche vers le haut-droite de l'ACP.

Les ellipses correspondant aux distances 0 m et 10 m (rouge et jaune) sont projetées à l'opposé de la variable recouvrement et de la variable déchaussement, et sont donc associées à un recouvrement et à un déchaussement plus faible. Les ellipses correspondant aux distances plus éloignées de la digue, 20 et 30 m (vert et bleu) sont davantage associées à un fort déchaussement, et à un recouvrement de posidonie plus important que les distances proches de la digue.

Au vu des résultats détaillés par paramètres, et des différentes corrélations entre variables observées dans l'ACP, deux paramètres peuvent être sélectionnés pour le croisement avec les données hydrodynamiques : (i) le recouvrement en herbier de posidonie, plutôt corrélé aux paramètres du nombre de segments de posidonie et au ratio du nombre de segments de posidonie par rapport au nombre total de segments, mais plus intuitif à appréhender d'un point de vue écologique ; et (ii) le déchaussement des rhizomes, qui ne présente pas de lien direct avec le recouvrement.

3.4 Analyse des résultats des données de modélisation de l'hydrodynamisme et croisement avec les descripteurs de l'herbier de posidonie

3.4.1 Résumé des résultats de la modélisation de l'hydrodynamisme (pour le détail, *cf.* 6.5 Annexe 5)

Afin d'évaluer les perturbations hydrodynamiques au niveau des herbiers, plusieurs paramètres sont tracés le long des profils modélisés sur chaque site. Les résultats de modélisation présentés discutent de différents paramètres, tels que :

- La **hauteur significative des vagues** ;
- La **vitesse orbitale** à proximité du fond induite par les vagues ;
- La **contrainte de cisaillement sur le fond** : force de frottement de l'eau générant une contrainte sur le fond (contrainte tangentielle de la colonne d'eau exercée sur le fond) ;
- Les **efforts hydrodynamiques** sur les herbiers : l'hydrodynamisme (vagues, courants) exercent sur les herbiers des forces agissant perpendiculairement (force de portance, négligée dans le cas présent), et parallèlement à la direction du courant. Ces dernières sont :
  - La force de traînée qui est une force de résistance qu'exerce le fluide sur l'herbier lorsque que l'un est en mouvement par rapport à l'autre ;
  - La force d'inertie (ou d'accélération) existante dans le cas d'un fluide décrivant un mouvement orbital, comme c'est le cas en présence de vagues ;
- La **bathymétrie** de la section avec localisation du pied de digue (trait horizontal pointillé).

Pour rappel, plusieurs paramètres permettent de caractériser la houle : la hauteur H (distance de la crête à un creux), la longueur d'onde λ (distance entre deux crêtes), la période T (durée entre deux crêtes) et la célérité C (vitesse de propagation de l'onde).

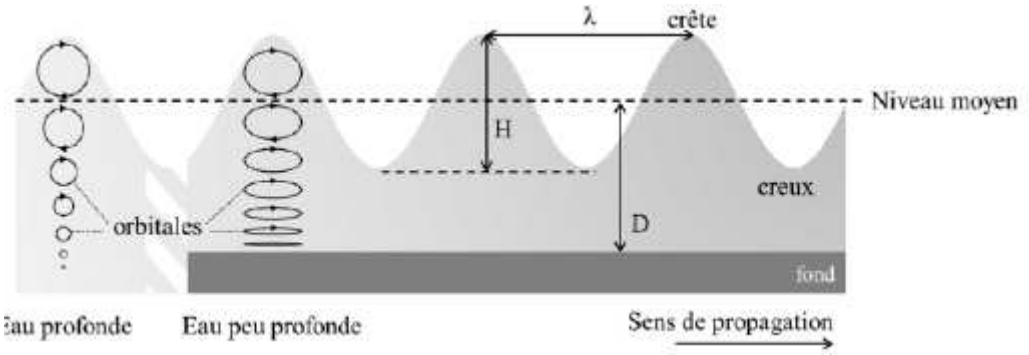


Figure 25. Caractéristiques principales de la houle (Burel, 2020).

De manière générale, le comportement des différents paramètres le long du profil reste similaire quel que soit le scénario : pour un paramètre tracé, on retrouve des minimums et des maximums locaux semblables entre les différents scénarios. Le calcul du percentile 98 permet de bien mettre en évidence ces évolutions.

Ainsi, les évolutions le long du profil sont semblables, seules les valeurs changent : plus les vagues forcées en entrée de modèle sont fortes, plus les valeurs des efforts sont importantes.

Les scénarios modélisant les évènements des valeurs maximales d'efforts et de contraintes (évènement de type tempête avec une période de retour de 20 à 30 ans) sont ceux engendrant le plus de contraintes de cisaillement et d'efforts hydrodynamiques sur les herbiers (scénario 1 à Marseille ; 1 et 4 à Hyères).

Au niveau de la **digue des Catalans** à Marseille, pour les 3 sections étudiées, **les contraintes de cisaillement sont plus importantes sur les premiers mètres précédant le pied de digue**. Cette distance est de l'ordre d'une quinzaine de mètres pour les 3 scénarios. La radiale 1 située au niveau de l'ADCP dans des fonds les moins profonds (environ 10 m) est celle sur laquelle les contraintes de cisaillement sont les plus fortes.

Au **port d'Hyères**, les profils des différentes sections sont assez similaires : au large, la profondeur est d'environ -9 m et au pied de digue autour de -5 m. Ce qui varie entre les transects est la pente de l'ouvrage « perçue » par les vagues. La section 4 est celle avec la pente la plus forte et la section 1 celle avec la pente la plus faible. Comme pour les résultats à Marseille, la **contrainte de cisaillement est plus forte sur les premiers mètres devant la digue**.

La distance varie entre les sections du fait de la pente de la digue. Plus la pente est importante, plus la distance sur laquelle il y a une plus forte contrainte de cisaillement est importante. Néanmoins, la distance ne dépasse pas la quinzaine de mètres avant le pied de digue. Les efforts hydrodynamiques sont plutôt minimaux au niveau du pied de digue pour les deux sites d'étude. Dans le calcul des efforts, la force de traînée a la plus forte contribution. La force d'inertie est assez faible.

Au vu des résultats des modélisations, il semblerait que l'impact des ouvrages soit le plus significatif sur les premiers mètres avant le pied de digue. En se basant sur les scénarios modélisés, **les efforts se feraient ressentir significativement sur une distance maximale de l'ordre de 15 m**. Cela pourrait se traduire par une altération voire la destruction localisée des herbiers de posidonie.

3.4.2 Croisement avec les données d'hydrodynamisme

Sur les sites de la digue des Catalans et le site du port de Hyères, les données issues des modèles hydrodynamiques peuvent être mises en regard des données de certains des paramètres de vitalité de l'herbier les plus discriminants. Le recouvrement et le déchaussement sont choisis pour ces comparaisons pour les données écologiques. La contrainte de cisaillement moyenne, la vitesse orbitale moyenne et l'effort hydrodynamique moyen sont sélectionnés parmi les données hydrodynamiques.

Sur le site de la digue des **Catalans** à Marseille, le déchaussement des rhizomes de posidonie est significativement plus faible très près de la digue à 0 m (3.8 ± 0.3 cm) qu'à 10 m (5.9 ± 0.3 cm), 20 m (6.2 ± 0.4 cm) et 30 m (6.6 ± 0.4 cm) (PERMANOVA, $p < 0.001$) (Figure 26, A.). Le déchaussement moyen mesuré à 5 m de la digue est également différent des mesures réalisées sur le point témoin à 30 m (PERMANOVA, $p = 0.045$). Ces observations montrent une tendance à un apport sédimentaire plus important (déchaussement plus faible) près de la digue (entre 0 et 10 m) qu'à 30 m.

L'analyse du recouvrement montre une distance d'influence similaire avec des recouvrements moyens à 0 m et 5 m (respectivement de 4.5 ± 2.3 % et 19.5 ± 6.0 %), non différents entre eux, plus faibles qu'à 10 m (39.3 ± 6.0 %), 20 m (53.0 ± 7.9 %) et 30 m (74.1 ± 6.8 %) (PERMANOVA, $p < 0.001$) (Figure 26, B.). Les recouvrements entre 10 m et 30 m montrent des signes de différence ($p = 0.060$ proche du seuil de 0.05) mais aucune différence entre 20 m et 30 m ($p = 0.138$). Ces observations montrent donc des signes de baisse du recouvrement à partir de 10 m jusqu'au pied de la digue sur ce site des Catalans.

Tel qu'expliqué dans le paragraphe 3.4.1, le maximum de la contrainte de cisaillement moyenne est observé autour de 15 m sur la section 1 la moins profonde avec une augmentation observée à partir d'une distance de 40 m de la digue (Z = - 11 m) (Figure 27 A), alors que sur la section 2 (Z = -15 m), **cette contrainte semble augmenter à partir de 20 m, et cela, jusqu'au pied de la digue, pour atteindre son maximum à 0 m de distance** (Figure 27 B).

La vitesse orbitale est sensiblement comparable entre la section 1 et la section 2 sur la digue des Catalans (Figure 28 A et B). Les valeurs les moins importantes sont observées près de la digue, et augmentent au fur et à mesure que l'on s'en éloigne pour atteindre un maximum entre 30 m et 40 m.

L'évolution de l'effort hydrodynamique est proche de celle de la vitesse orbitale sur les 2 sections (section 1 et 2 respectivement Figure 29 A et B). Les efforts maximums sont observés entre 30 m et 40 m du pied de la digue alors que les valeurs les plus faibles sont observées près de l'ouvrage.

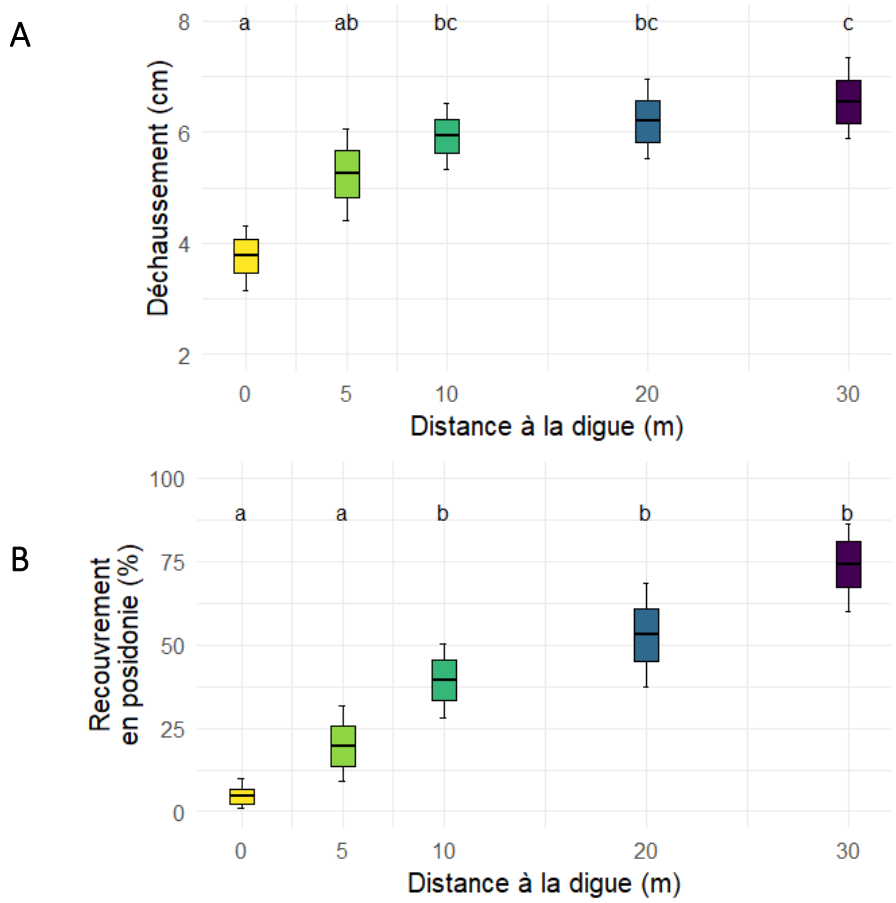


*Figure 26. Variation du déchaussement des rhizomes de posidonie (**A**) et du recouvrement en herbier de posidonie par tronçon de 5 m de long (**B**) à la digue des Catalans (Marseille) en fonction de la distance au pied de la digue.*

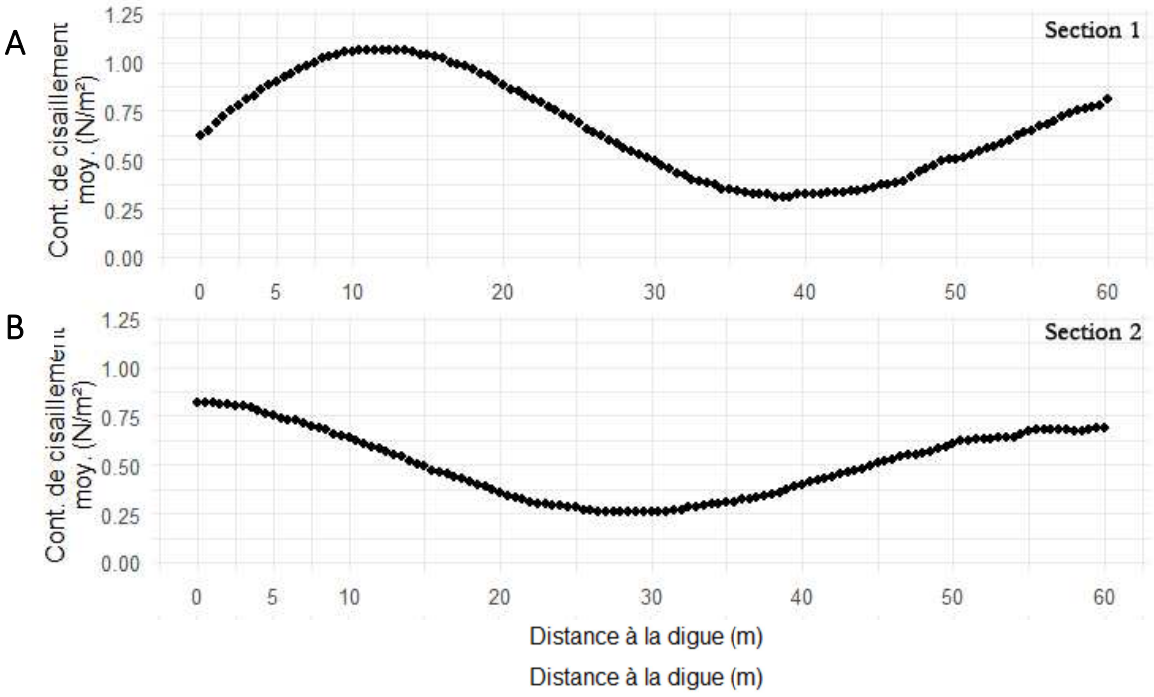


*Figure 27. Évolution de la contrainte de cisaillement (N/m²) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-11 m) (**A**) et la section 2 (-15 m) (**B**) de la digue des Catalans (Marseille).*

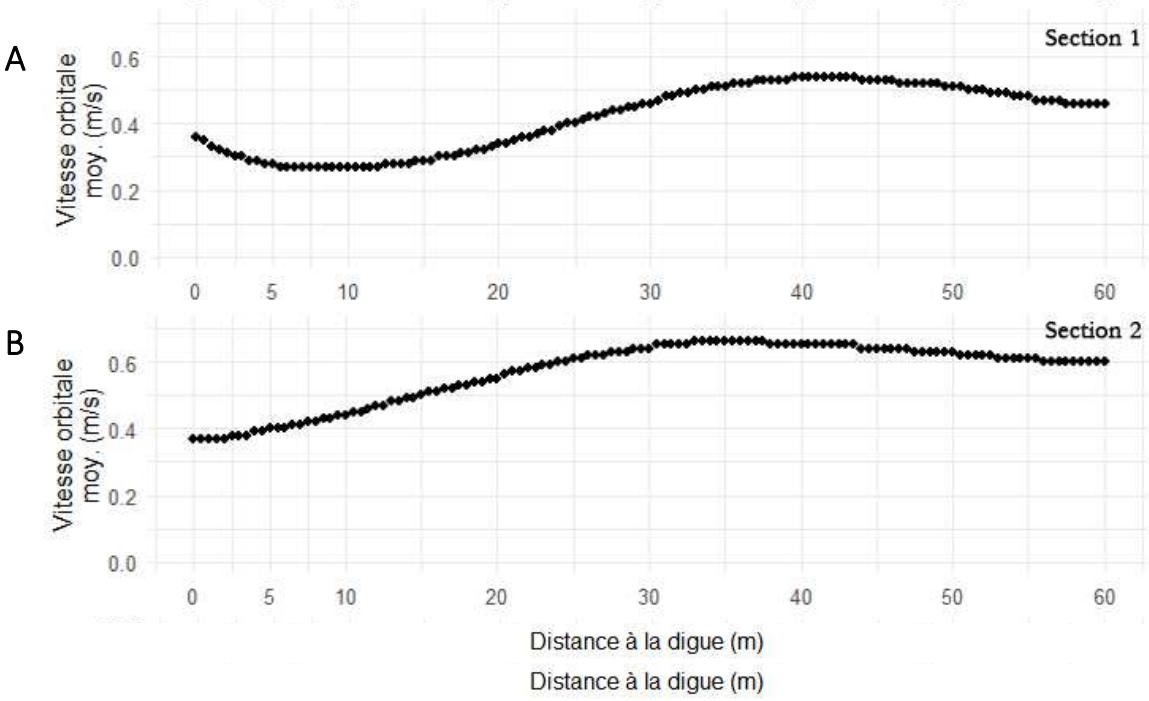


*Figure 28. Évolution de la vitesse orbitale (m/s) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-11 m) (**A**) et la section 2 (-15 m) (**B**) de la digue des Catalans (Marseille).*

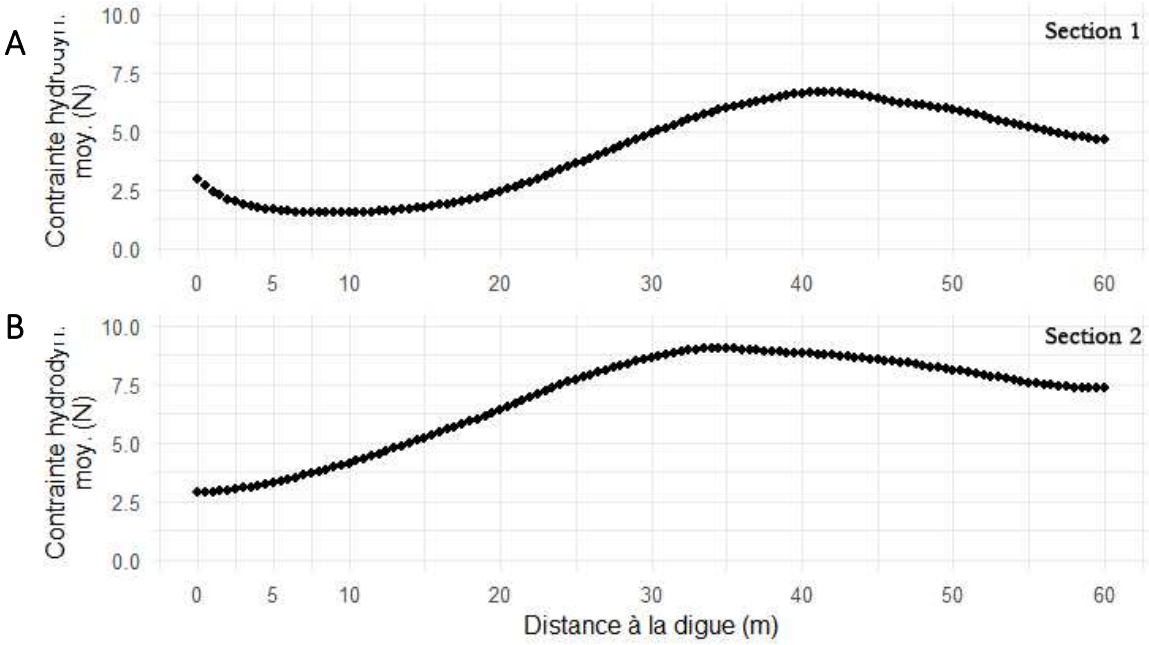


*Figure 29. Évolution de la contrainte hydrodynamique (N) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-11 m) (**A**) et la section 2 (-15 m) (**B**) de la digue des Catalans (Marseille).*

Les mesures de vitalité réalisées sur le site de **Hyères** montrent très peu de différences en fonction de la distance à la digue comparée aux tendances plus marquées observées sur la digue des Catalans à Marseille. Ce site est dans un contexte de fond de baie, peu profond et à proximité de l'embouchure du Gapeau. Le déchaussement y est plus homogène entre 0 m et

30 m, avec uniquement des valeurs plus importantes mesurées à 20 m (5.2 ± 0.5 cm) par rapport à l'ensemble des autres distances (PERMANOVA, $p<0.003$) (Figure 30, A.).

Le recouvrement de l'herbier de posidonie est homogène sur l'ensemble des distances à la digue (Figure 30, B), mais peut être qualifié de médiocre, avec des valeurs moyennes de recouvrement assez faibles comprises entre 21.5 ± 3.9 % à 0 m de la digue et 35.1 ± 5.4 % à 10 m. Dans ce cas de figure, sans y voir de différences significatives, la valeur la plus élevée du site est observée à 10 m, dans la zone où les contraintes de cisaillement semblent être les plus faibles.

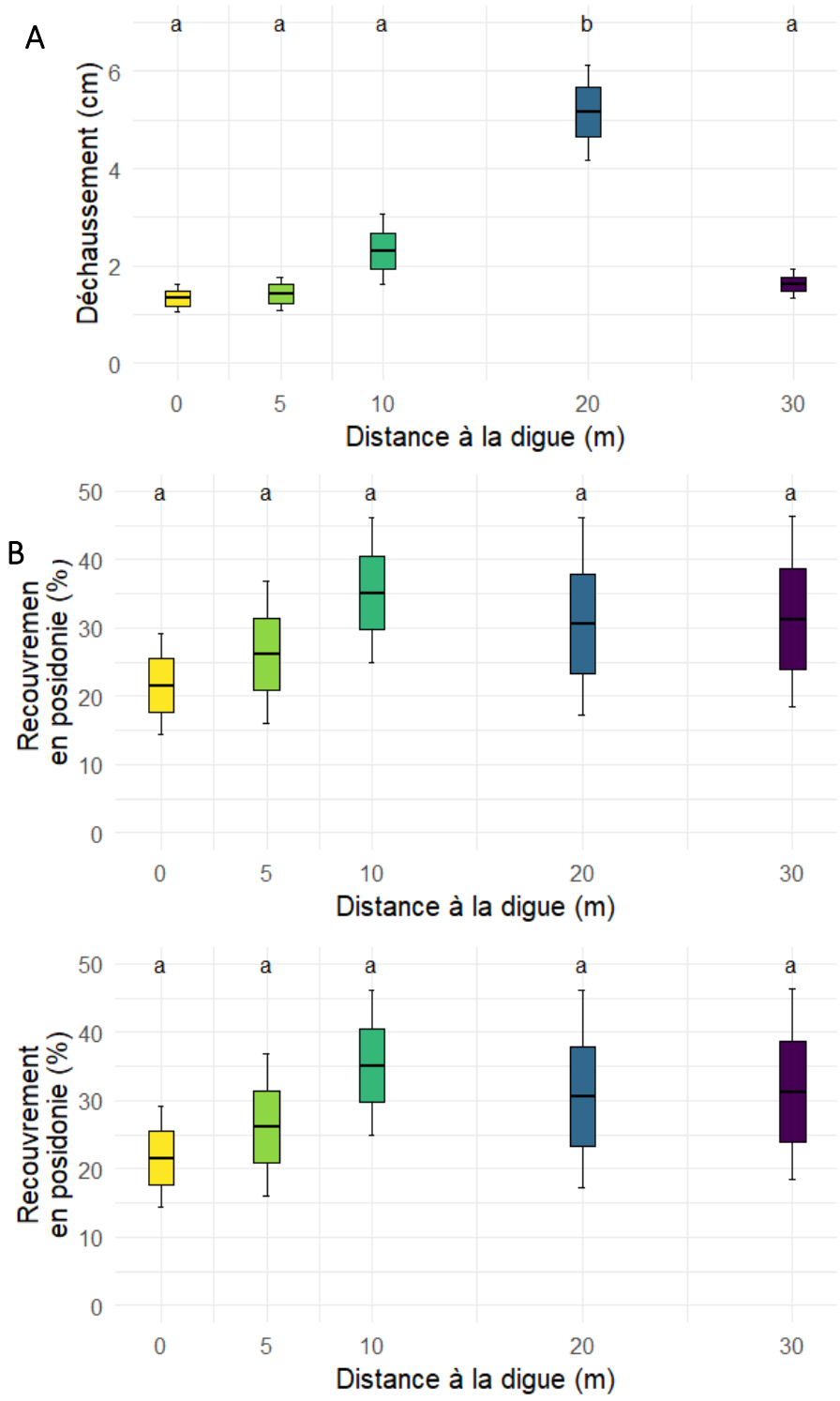


*Figure 30. Variation du déchaussement des rhizomes de posidonie (**A**) et du recouvrement en herbier de posidonie par tronçon de 5 m de long (**B**) au port d'Hyères en fonction de la distance au pied de la digue.*

L'analyse des simulations des contraintes de cisaillement sur le fond montre sur les sections 1 et 2 (Figure 31 A et B), une augmentation des contraintes en provenance du large, à partir de 35 m, jusqu'à atteindre un premier pic à plus de 20 m du pied de digue, puis de rechuter

jusqu'à 7 m de la digue avant de remonter et d'atteindre un nouveau pic proche de la digue à 0 m.

Les vitesses orbitales les plus faibles sont observées près de la digue (0 m) avec une augmentation rapide jusqu'à un pic observé entre 5 m et 10 m du pied de l'ouvrage (Figure 32 A et B). Cette vitesse diminue ensuite jusqu'à une distance de 20 m, avant de remonter progressivement jusqu'à 60 m sur la section 1, et en observant un second pic autour de 35 m sur la section n°2.

Les mêmes évolutions sont observées pour les efforts hydrodynamiques, avec des valeurs faibles près de la digue, un premier pic observé entre 5 m et 10 m de l'ouvrage, une diminution des efforts jusqu'à 20 m puis une nouvelle augmentation, progressive jusqu'à 60 m sur la section 1, et en observant un second pic autour de 35 m sur la section 2 (Figure 33 A et B).

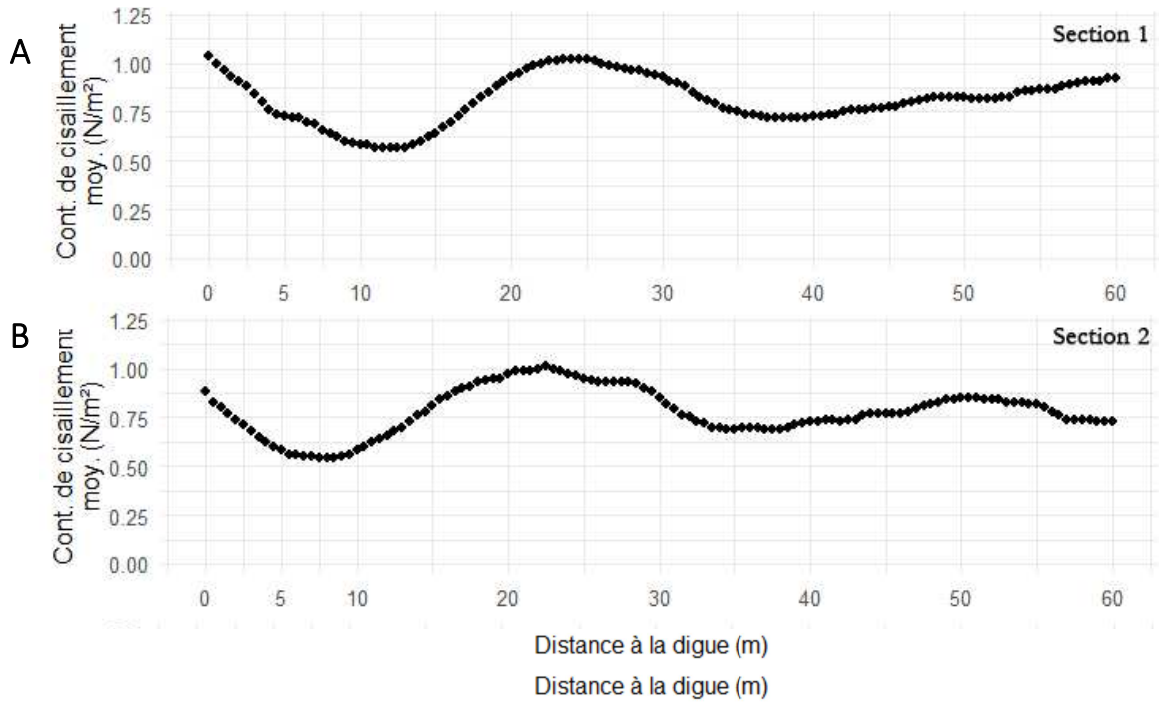


*Figure 31. Évolution de la contrainte de cisaillement (N/m²) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-5.3 m) (**A**) et la section 2 (-5.8 m) (**B**) au port de Hyères.*

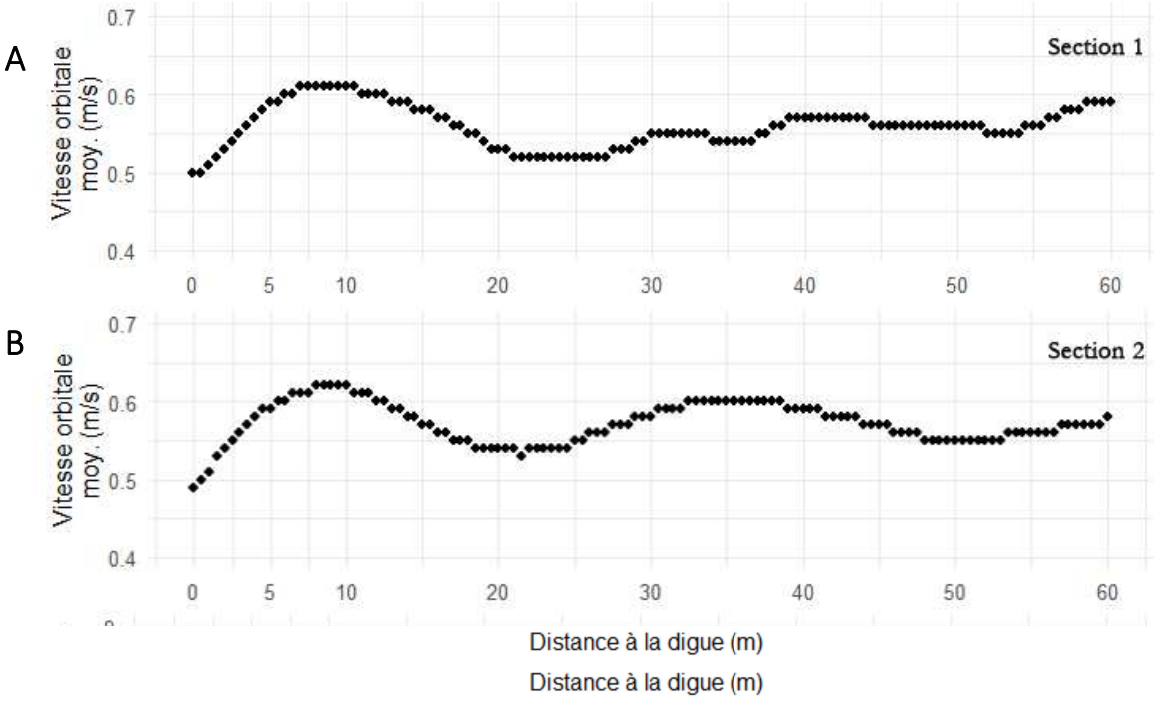


*Figure 32. Évolution de la vitesse orbitale (m/s) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-5.3 m) (**A**) et la section 2 (-5.8 m) (**B**) au port de Hyères.*

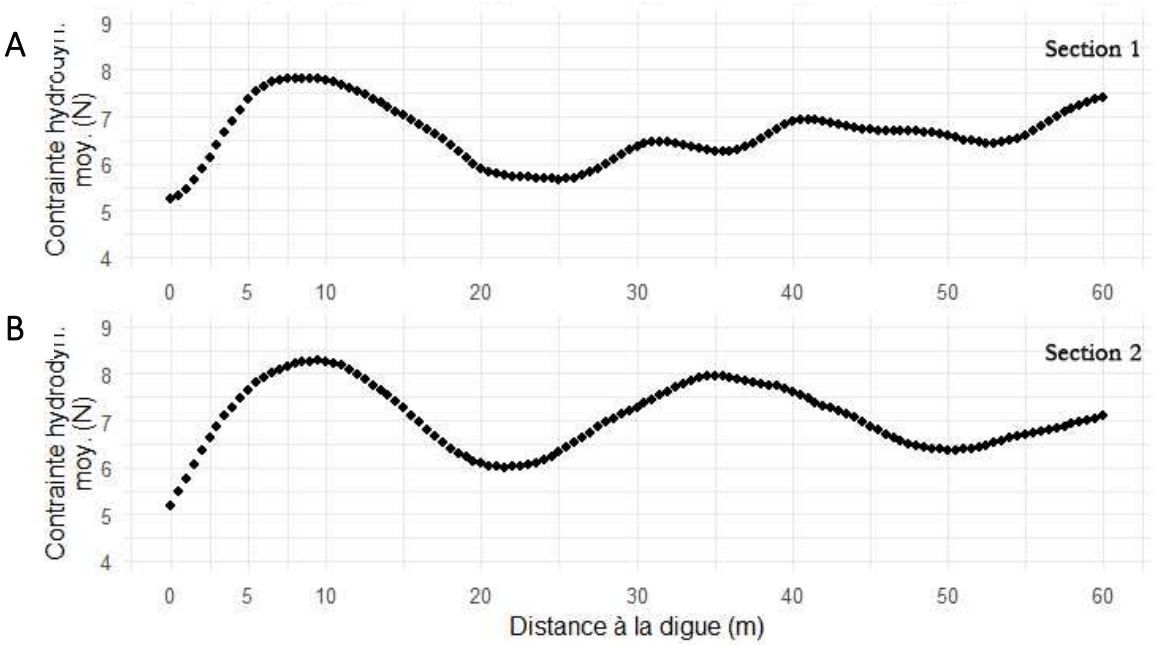


*Figure 33. Évolution de la contrainte hydrodynamique (N) modélisée en fonction de la distance à la digue sur la section 1 (-5.3 m) (**A**) et la section 2 (-5.8 m) (**B**) au port de Hyères.*

De façon descriptive, une première hypothèse sur l'explication de l'augmentation du déchaussement à 20 m de la digue du port de Hyères pourrait être de relier cela au pic de contrainte de cisaillement mesuré à cette distance, pouvant produire une augmentation de

l'érosion avec des forces qui retirent le sédiment de la zone pour l'emporter plus près de la digue.
La mise en relation directe des données écologiques et des données hydrodynamiques est très hétérogène, et ne montre pas les mêmes corrélations entre les sites, ni même entre les sections d'un même site. La vitesse orbitale est corrélée positivement au recouvrement moyen de l'herbier de posidonie uniquement sur la section 2 de la digue des Catalans (GAM, R^2 ajusté = 0.92 ; p = 0.007), alors que la relation ressort de manière chaotique sur la section n°1 (GAM, R^2 ajusté = 0.09, p = 0.326) (Figure 34). Sur le site de Hyères, aucune tendance n'est observée entre le recouvrement et les variables hydrodynamiques (Figure 34, Figure 35 et Figure 36). Des relations semblables sont observées entre le recouvrement et l'effort hydrodynamique, alors que des relations inverses sont observées avec la contrainte de cisaillement (corrélation négative sur la section 2 ; Figure 35). Cette dernière relation semble plus intuitive dans un contexte d'explication de cause et d'effet, avec l'observation d'une augmentation de recouvrement lorsque la contrainte de cisaillement diminue (GAM, R^2 ajusté = 0.92, p=0.007).

Aucune corrélation significative ne ressort entre le déchaussement moyen des rhizomes à chaque distance de la digue et les paramètres hydrodynamiques modélisés (Figure 37, Figure 38 et Figure 39). Les relations dont le modèle est significativement le plus proche du seuil de 5 %, pour lesquelles un R^2 ajusté est mesuré à plus de 0.7 concernent des liens non linéaires entre le déchaussement et (i) la vitesse orbitale de la section 2 de la digue des Catalans (GAM, R^2 adj. = 0.71, p=0.148 ; Figure 37), (ii) la contrainte de cisaillement de la section 2 de la digue des Catalans (GAM, R^2 adj. = 0.81, p=0.097 ; Figure 38) et (iii) la contrainte de cisaillement de la section 2 du port de Hyères (GAM, R^2 adj. = 0.82, p=0.095 ; Figure 38).

Il peut être tout de même intéressant de commenter ces observations même si elles ne sont pas significatives car le nombre de réplicats du jeu de données est assez faible (5 valeurs par section), et les tests peuvent donc manquer de puissance pour détecter des liens significatifs.

Malgré cette prise en compte, les relations commentées ci-dessus montrent des résultats contradictoires comme pour le lien entre le déchaussement et la contrainte de cisaillement, avec une potentielle diminution du déchaussement lorsque cette contrainte augmente aux Catalans (section 2), alors que sur le port de Hyères (section 2), le déchaussement semble plutôt augmenter lorsque la contrainte de cisaillement augmente.

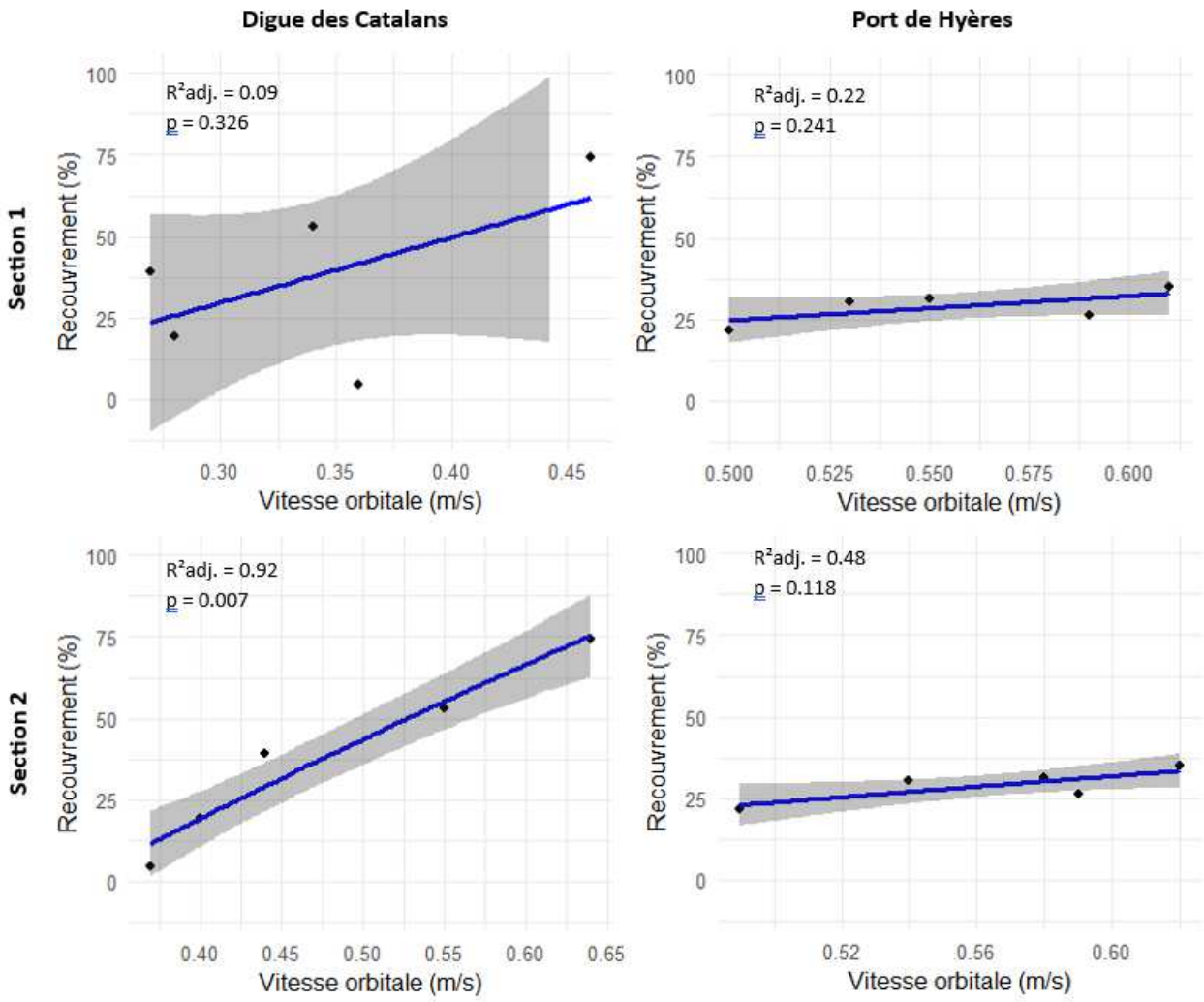


Figure 34. Relations entre le recouvrement moyen mesuré à chaque distance de la digue et la vitesse orbitale mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

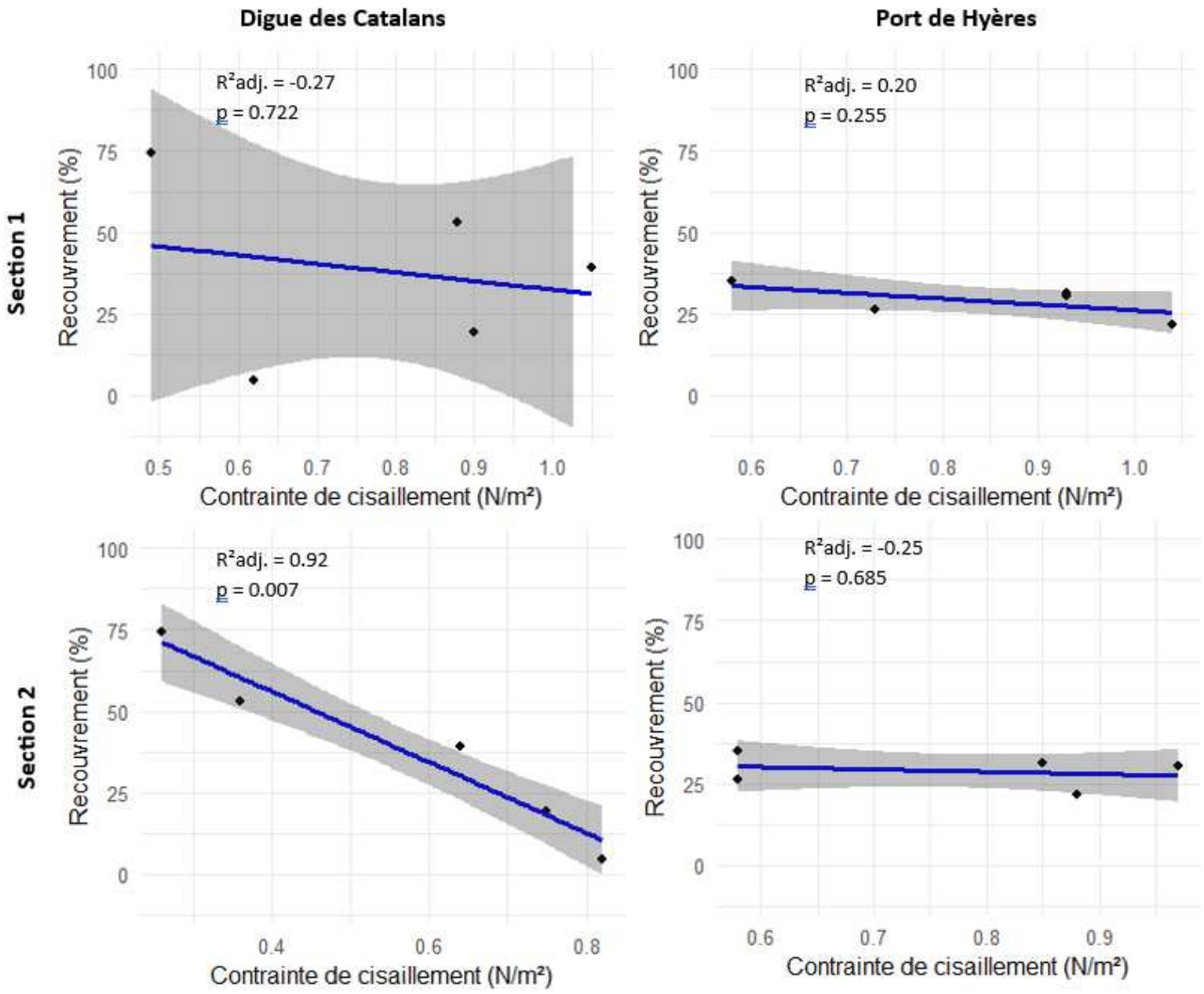


Figure 35. Relations entre le recouvrement moyen mesuré à chaque distance de la digue et la contrainte de cisaillement mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

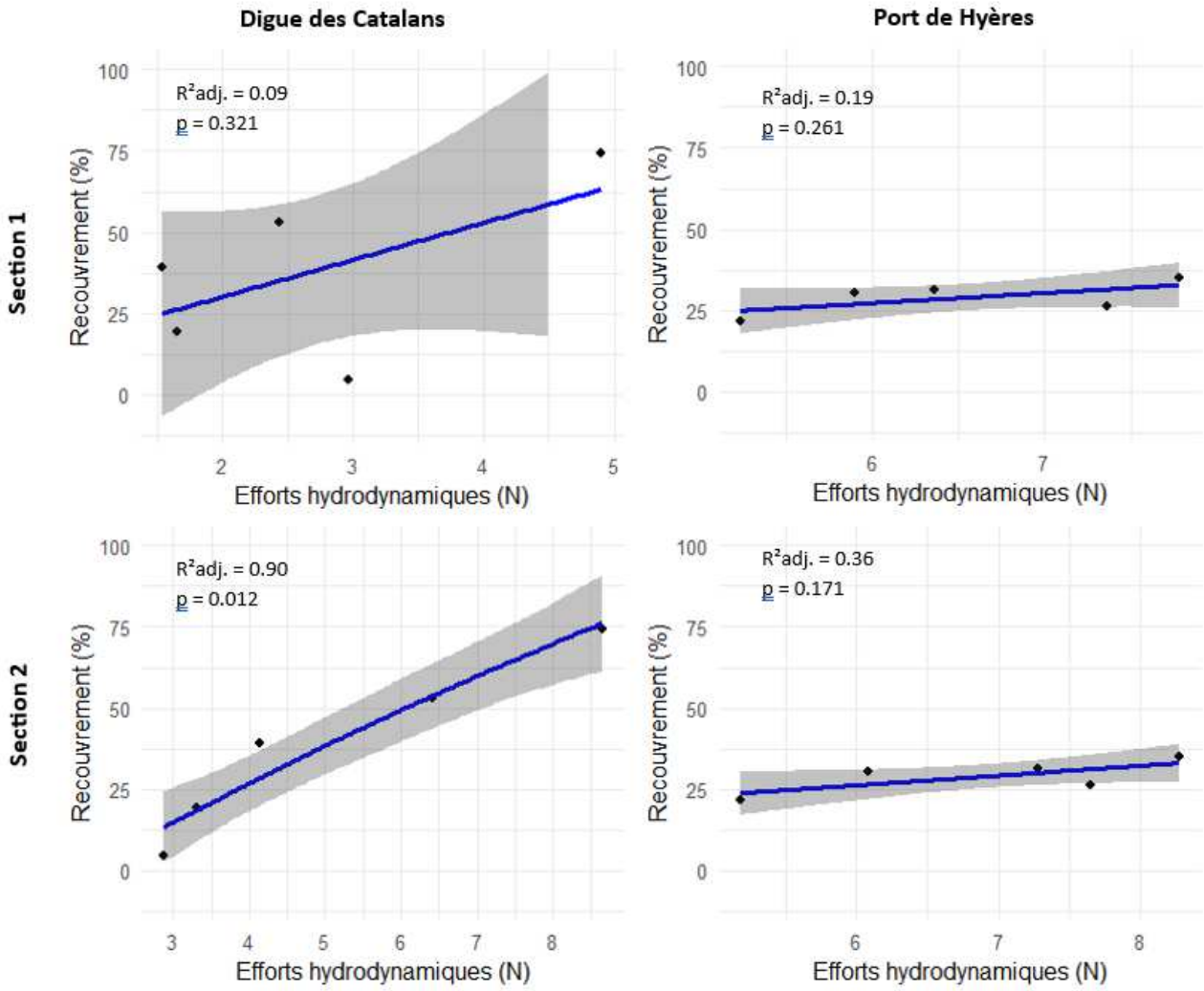


Figure 36. Relations entre le recouvrement moyen mesuré à chaque distance de la digue et l'effort hydrodynamique mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

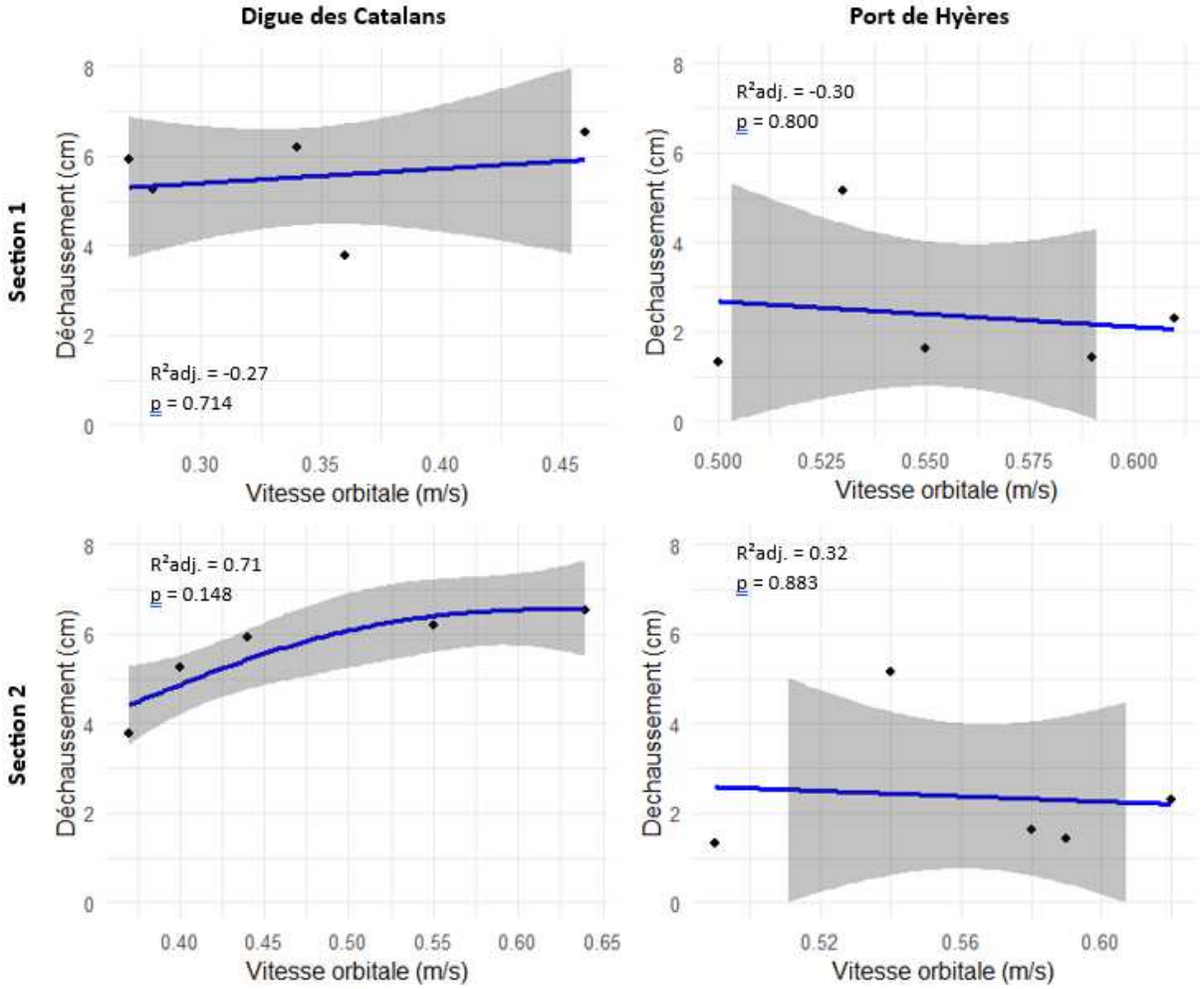


Figure 37. Relations entre le déchaussement moyen des rhizomes mesuré à chaque distance de la digue et la vitesse orbitale mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

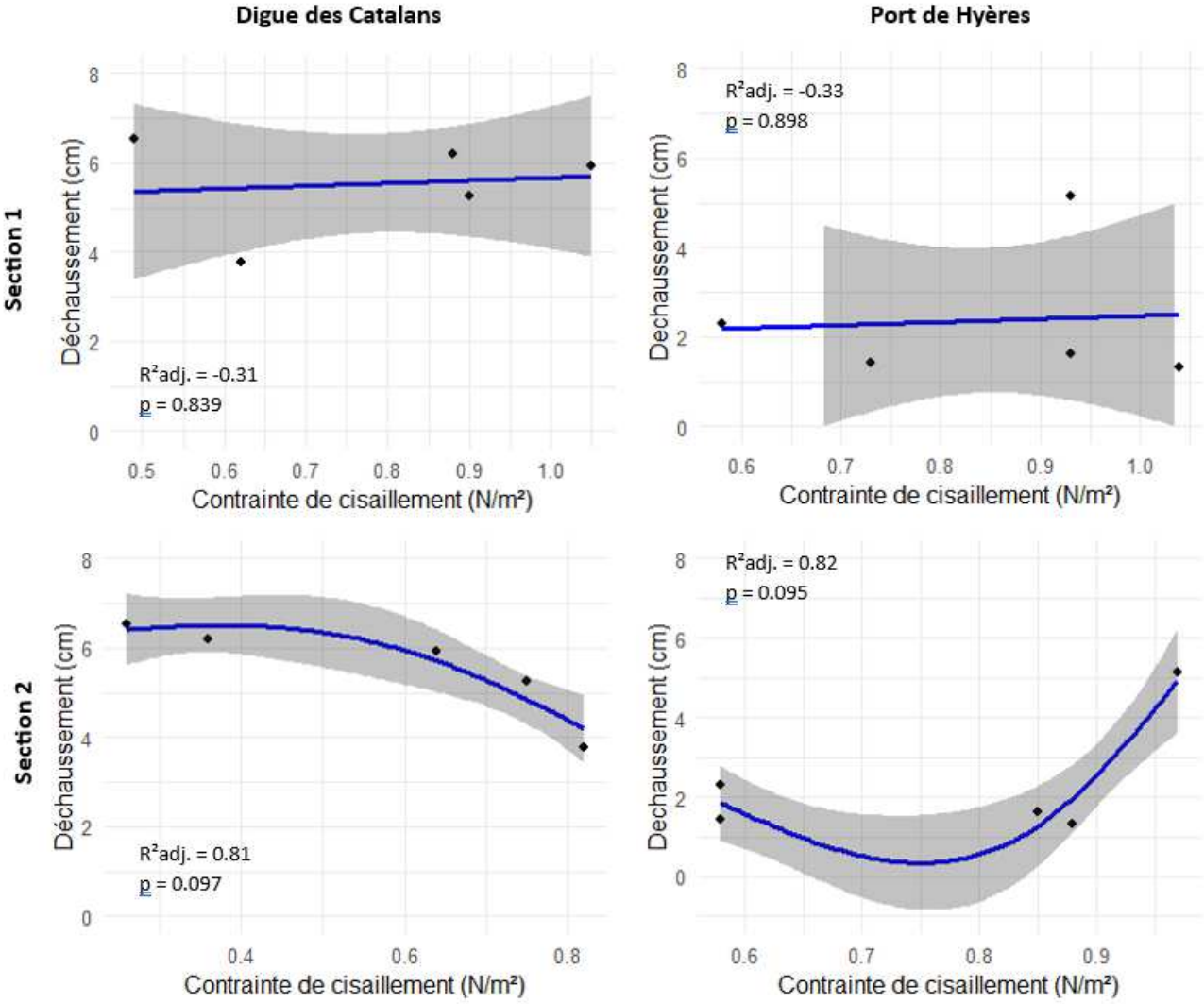


Figure 38. Relations entre le déchaussement moyen des rhizomes mesuré à chaque distance de la digue et la contrainte de cisaillement mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

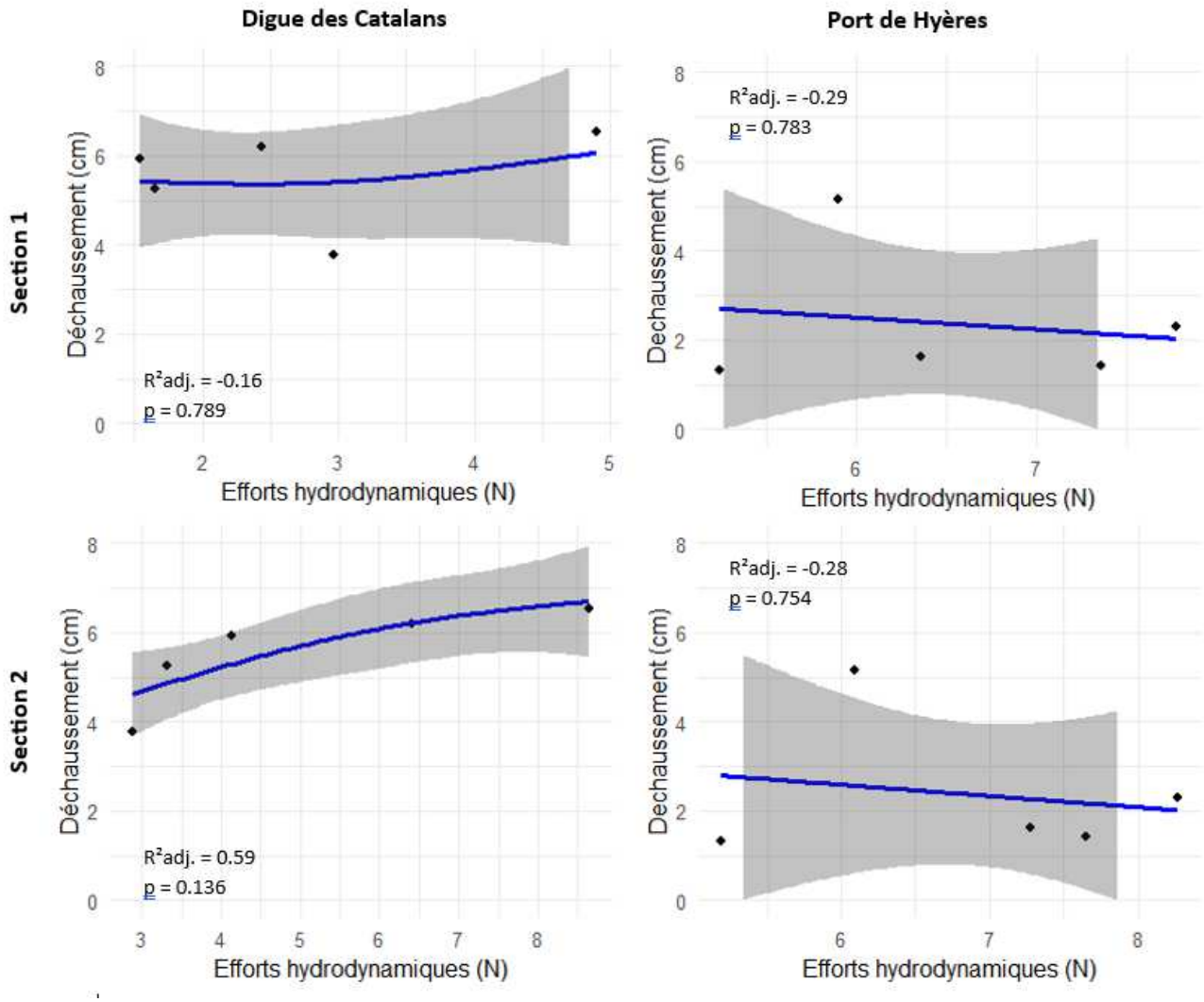


Figure 39. Relations entre le déchaussement moyen des rhizomes mesuré à chaque distance de la digue et l'effort hydrodynamique mesurées sur les sections 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. Les R² ajustés (R² adj.) et la p-value sont issues d'un modèle additif généralisé réalisé entre les 2 variables.

L'ensemble des relations énumérées au cours de ce chapitre, caractérisé comme non significatives ou par moment, contradictoires au sein d'un même site entre les différentes sections étudiées ne permettent pas de tirer de conclusions claires sur le lien entre l'évaluation de la structure de l'herbier de posidonie et les paramètres hydrodynamiques modélisés.

4 Discussion et conclusion

L'analyse des résultats n'a pas mis en évidence d'effets significatifs de la distance à la digue sur la densité de faisceaux. Ce paramètre semble être influencé par d'autres facteurs environnementaux tels que la profondeur, l'exposition lumineuse et la nature du substrat (Ruiz et Romero, 2003).

Il est également intéressant de noter que pour les 8 sites, la proportion de rhizomes plagiotropes situés en bordure d'herbier demeure relativement constante et élevée (environ 45-55 %) quelle que soit la distance à la digue. Boudouresque et al. (2021) soulignent l'importance des rhizomes plagiotropes dans la colonisation et la stabilisation des herbiers marins. La proportion élevée de plagiotropes (environ 50 % en moyenne à toutes les distances) indique une dynamique stable, voire progressive à proximité de la limite supérieure de l'herbier, peu importe le degré de morcellement de l'herbier de posidonie.

L'étude montre ainsi que **l'état de vitalité des herbiers de posidonie est homogène** sur toutes les distances au pied de digues, à l'échelle de l'ensemble des sites. Cette vitalité est décrite par des densités moyennes à médiocres, et présentent une dynamique de croissance sur l'ensemble des sites. Cette vitalité n'est pas affectée par la présence des ouvrages.

Les **descripteurs de la structure de l'herbier** de posidonie montrent en revanche des tendances sans équivoque quant à l'influence de l'ouvrage sur cet habitat. Les résultats montrent que le taux de recouvrement de l'herbier de posidonie, estimé par la méthode du Line Intercept Transect est plus faible à proximité des ouvrages qu'à 20 m de distance et au-delà. Les tests statistiques effectués révèlent des différences significatives de recouvrement entre les distances proches (0, 5 et 10 m) et éloignées de la digue (20 et 30 m), suggérant que l'effet de l'ouvrage s'étend au-delà de 10 m, et donc de la précédente distance préconisée (Boudouresque et al., 2006a).

En parallèle, le déchaussement des rhizomes diminue également à mesure que l'on s'approche des ouvrages, jusqu'à mettre en évidence une augmentation de la proportion en rhizomes enfouis dans le sédiment proche de la digue (rhizome dont le déchaussement est négatif ou nul). Ce paramètre, soumis à une variabilité saisonnière, est lié à la modification de l'hydrodynamisme (lors d'une tempête par exemple) qui peut remobiliser et déplacer les sédiments en peu de temps. Cette mesure est donc une vision de l'environnement à un instant t. Néanmoins, les occurrences d'enfouissement significativement plus élevées proche du pied des ouvrages traduisent une probabilité plus importante d'enfouissement des rhizomes dans le temps, puisqu'elle a été mesurée sur de nombreux sites. L'enfouissement de zones d'herbier à proximité de grands ouvrages est un phénomène documenté, comme à Monterosso (Ligurie, Italie), où Gongora-Gonzalez et al (1996) ont observés l'enfouissement de l'herbier de posidonie sous les sédiments fins en liaison avec un aménagement littoral gagné sur la mer. Des observations similaires ont été réalisées dans le sud de l'Espagne (Ruiz-Fernandez, 2000 ; Boudouresque et al., 2006) et dans les Bouches-du-Rhône (Bonhomme et al., 2010). Or, de nombreuses études ont permis de mettre en évidence qu'un enfouissement prolongé de la base des rhizomes de posidonie peut provoquer la mortalité des points végétatifs de ce dernier (Boudouresque et al., 2006).

À plus ou moins long terme, c'est la structure spatiale de l'herbier qui peut être dégradée, provoquant par exemple une diminution du recouvrement et/ou une augmentation de la fragmentation.

Les ouvrages littoraux provoquent une modification des courants et de la propagation des vagues. C'est pour estimer ces modifications de l'hydrodynamisme que la modélisation de différents paramètres hydrodynamiques a été réalisée à proximité de l'ouvrage des Catalans à Marseille et celui du port de Hyères. Ces modifications peuvent entraîner des zones de faible énergie où vont s'accumuler les sédiments les plus fins, comme provoquer une concentration de l'énergie sur d'autres zones où de l'érosion peut alors se produire. C'est pour estimer ces modifications de l'hydrodynamisme que la modélisation de différents paramètres hydrodynamiques a été réalisée à proximité de l'ouvrage des Catalans à Marseille et celui du port de Hyères. Pour rappel, les vagues induisent un mouvement orbital des particules d'eau sur toute la colonne d'eau. Ce mouvement plutôt circulaire en eau profonde s'aplatit à l'approche de la côte : le mouvement orbital est alors plutôt elliptique en proche côtier. À ce mouvement est associée la vitesse orbitale. Une faible vitesse orbitale favorise le dépôt de sédiment fin. Ce sont ces vitesses orbitales qui engendrent aussi des forces comme les contraintes de cisaillement, qui dépendent également de la rugosité du fond. Cette contrainte de cisaillement est la force de frottement de l'eau sur le fond et pourrait s'appréhender comme la force qui participe à l'arrachage des rhizomes de posidonie.

La mise en relation des données hydrodynamiques et écologiques de l'herbier produite dans le cadre de cette étude sur uniquement deux sites ne permet pas de confirmer les variables hydrodynamiques à suivre pour modéliser les effets des ouvrages maritimes sur les herbiers de posidonie. En effet, intuitivement, on s'attend à constater une diminution des paramètres de vitalité et/ou structure de l'herbier de posidonie avec l'augmentation de contraintes hydrodynamiques telles que la contrainte de cisaillement. Les résultats observés sur la section 2 de la digue des Catalans, soit une diminution du recouvrement de l'herbier en même temps qu'une augmentation de la contrainte de cisaillement, est une piste intéressante, mais cette observation n'est pas clairement retrouvée sur les autres sections du même site, ni même sur le site de Hyères. Sur ce site, l'analyse est complexe. Des pics de contraintes de cisaillement sont observés à plus de 30 m de distance de la digue ce qui pourrait être expliqué par une profondeur globalement faible sur ce site, favorisant un hydrodynamisme global plus élevé (naturel ou induit par la digue). Les données écologiques de l'herbier étant non discriminantes (vitalité et structure), il est possible que l'herbier de posidonie ne soit (i) pas perturbé par la proximité de la digue mais plutôt par la profondeur et/ou la proximité de l'embouchure d'un fleuve côtier.

Dans la littérature scientifique la vitesse orbitale est couramment utilisée comme variable explicative de la modélisation de la limite d'extension de l'herbier de posidonie en limite supérieure. Ainsi, des corrélations négatives sont mises en évidence entre la présence de la posidonie et l'augmentation de cette vitesse. Sur l'ile de Majorque en Espagne (Infates et al., 2009), un seuil de vitesse orbitale compris entre 0.38 et 0.42 m/s et calculé sur la base d'une moyenne des hauteurs de vagues significatives sur 44 ans de données, semble déterminant pour la modélisation des limites supérieures de l'herbier de posidonie. D'autres résultats suggèrent des vitesses orbitales seuils proches de 0.80 m/s dans le sud de la Sardaigne (Ruju et al., 2008). La vitesse orbitale considérée du point de vue énergétique, peut limiter la croissance et la fixation de la posidonie dans le milieu.

Les vitesses orbitales mesurées dans la présente étude montrent une corrélation inverse, et présentent une diminution de la vitesse lorsqu'on se rapproche du pied de la digue des Catalans et de celle du port d'Hyères, là où le recouvrement de l'herbier de posidonie diminue. La vitesse orbitale ne permet donc pas d'expliquer la diminution du recouvrement en herbier de posidonie dans notre étude, contrairement au cas des limites supérieures naturelles.

Cependant, il est également connu dans la littérature scientifique, que la vitesse orbitale participe au transport de sédiment. En effet, plus la vitesse orbitale est élevée, plus le potentiel de transport sédimentaire est important (Van Rijn ; 1993 ; Héquette, 2001). L'asymétrie des vitesses orbitales en fonction des zones peut aussi entraîner un transport net des sédiments, des zones soumises à une vitesse élevée (*e.g.* à quelques dizaines de mètre des ouvrages), vers les zones soumises à une vitesse faible (*e.g.* proche des ouvrages) (Van Rijn, 1993 ; Bertin et al., 2018). Certains résultats hydrodynamiques montrent dans la présente étude que les vitesses orbitales mesurées diminuent lorsqu'on se rapproche du pied des digues des Catalans et du port d'Hyères. Cette relation est une hypothèse intéressante pour expliquer les zones d'enfouissement des rhizomes de posidonie proches des digues par un apport en sédiment plus important. Cet enfouissement, même temporaire, peut augmenter la vulnérabilité de la posidonie, voire entraîner la mortalité de ses rhizomes.

La modélisation des vagues par petits fonds et à proximité d'ouvrages est un exercice délicat, tant les phénomènes en jeu sont complexes à représenter. Les résultats des modélisations ont été confrontés aux mesures réalisées sur site, et ces comparaisons ont permis de constater la difficulté de l'exercice puisque si le modèle correspond bien aux mesures terrain sur la digue des Catalans, il a été impossible de reproduire totalement la dynamique observée au port de Hyères. La modélisation, bien qu'elle soit un outil très puissant, peut donc présenter des lacunes liées aussi bien à des phénomènes hydrodynamiques complexes qu'à des configurations locales particulières. **Son utilisation ne peut donc pas être systématiquement proposée, et son interprétation devra toujours faire l'objet de vérifications poussées.** Dans un contexte similaire pour des travaux de modélisation du comportement du trait de côte et du stock sableux et l'impact du départ de sable vers le large sur l'herbier de posidonie du secteur Nord-Ouest du golfe de Saint-Tropez, GLADYS (2023) indique clairement qu'il est impossible de déterminer par la modélisation numérique l'impact du départ de sable vers le large sur l'herbier d'une manière robuste. En effet, les scénarios modélisés sont ultra-sensibles à la calibration du modèle, pour lequel certains paramètres comme l'effet dissipatif des herbiers est largement simplifié et impossible à caractériser dans le détail. Certains résultats peuvent donc être suspicieux malgré une physique embarquée dans le modèle qualifié d'irréprochable. GLADYS (2023) conclue que certains des résultats de la morphodynamique du trait de côte peuvent néanmoins être interpréter qualitativement et avec prudence, pour évoquer des tendances à long terme définies selon différents scénarios, mais en aucun cas être utilisées quantitativement et précisément.

En conclusion, bien que l'herbier puisse se maintenir sur le long terme à proximité, voire au contact d'ouvrages, **les résultats mettent en évidence une atteinte significative de sa structure (enfouissement/déchaussement, taux de fragmentation et de recouvrement) et indirectement de ses fonctions écologiques à l'approche des digues**.

Boudouresque et al. (2006a), sans données quantitatives précises et contextualisées, préconisaient une distance minimale de 10 m entre l'herbier et de nouveaux ouvrages (ou travaux de réfection d'ouvrages) avec la volonté d'être conservatif et pragmatique. Cette étude montre que plusieurs descripteurs de la structure des herbiers (déchaussement/enfouissement, fragmentation, recouvrement) sont **significativement influencés par l'ouvrage jusqu'à une distance de 20 m**. A la lumière de ces nouveaux éléments empiriques robustes, la distance minimale fixée en 2006 par Boudouresque et al. semble sous-estimée.

Par ailleurs, les difficultés de modélisations hydrodynamiques intégrant la complexité des petits fonds côtiers hétérogènes ajoutées à la vulnérabilité des herbiers de posidonie au regard des pressions cumulées qui s'exercent rendent complexe l'évaluation réelle des impacts au cas par cas. **Ce constat conforte la nécessité d'appliquer une distance conservatrice par principe de précaution.**

Au regard des impacts révélés par cette étude sur les herbiers de posidonie jusqu'à 20 m de distance à la digue, cette distance semble devoir être redéfinie.

5 Références

Andromède. (2012a). Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA depuis 1924 : Etude sur le département du Var, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, France, 381p.

Andromède. (2012b). Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA depuis 1927 : Etude sur le département des Bouches-du-Rhône, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, France, 184p.

Andromède. (2012c). Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA sur la période 1922-2011 : Etude sur le département des Alpes-Maritimes, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, France, 176p.

Anderson M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. Austral Ecol 26 : 32-46.

Bertin, X., De Bakker, A., Van Dongeren, A. P., Coco, G., André, G., Ardhuin, F., Bonneton P., Bouchette F., Castelle B., Crawford W.C., Davidson M., Deen M., Dodet G., Guérin T., Inch K., Leckler F., McCall R., Muller H., Olabarrieta M., Roelvink D., Ruessink G., Sous D., Stutzmann E., Tissier M. (2018). Infragravity waves: From driving mechanisms to impacts. Earth-Science Reviews, *177*, 774-799.

Bonhomme D., Astruch P., Bricout R., Charbonnel E., Bretton O., Monin M. (2010). Prolongement de la digue Ouest du port de Sausset-les-Pins (Bouche-du-Rhône). Phase 4, suivi de l'herbier de Posidonie trois ans après travaux. Contrat Marseille Provence Métropole & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr. : 1-198.

Boudouresque C.F., Bernard P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006a). Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ramoge publ., Monaco, 1-200.

Boudouresque C.F., Mayot N., Pergent G. (2006b) The outstanding traits of the functioning of the *Posidonia oceanica* seagrass ecosystem. Biol Mar Medit 13(4):109–113

Boudouresque C.F., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Thibaut T., & Verlaque M. (2016). The necromass of the *Posidonia oceanica* seagrass meadow: fate, role, ecosystem services and vulnerability. Hydrobiologia, 781, 25-42.

Boudouresque C.F., Blanfuné A., Pergent G., Thibaut T. (2021). Restoration of Seagrass Meadows in the Mediterranean Sea: A Critical Review of Effectiveness and Ethical Issues. Water, 13, 1034. https://doi.org/10.3390/w13081034

Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Bernard G., Bonhomme P., Patrone J., Kruczek R., Cottalorda J.M., Bertrandy M.C., Foret P., Ragazzi M.., Le Direach L. (2000). Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence- Alpes-Côte d'Azur. Première partie : présentation et guide méthodologique. Année 2000. Région PACA, Agence de l'Eau RMC, GIS Posidonie, CQEL 13, CQEL 83, Conseil Général 06, GIS Posidonie publ. : 1-76.

Clark Murray C., Mach M., Martone R. G. (2014). Cumulative effects in marine ecosystems: scientific perspectives on its challenges and solutions. WWF-Canada and Center Ocean Solution. 60 pp.

Duarte C., Borum J., Short F., & Walker D. (2008). Seagrass ecosystems: Their global status and prospects. Aquatic Ecosystems. 281-294. 10.1017/CBO9780511751790.025.

GLADYS (2023). Rapport final projet SEDIGST, GLADYS report 32, Gladys Beach Institute, Université de Montpellier, pp 58.

Héquette, A. (2001). Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling/Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. Géomorphologie: relief, processus, environnement, *7*(1), 5-16.

Gacia E., Granata T.C., Duarte C.M. (1999). An approach to measurement of particule flux and sediment retention within seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows. Aquat. Bot. 65: 255-268.

Gambi M.C., Buia M.C., Casola E., Scardi M., 1989. Estimates of water movement in *Posidonia oceanica* beds: a first approach. In:Boudouresque, C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. edits. International workshop on *Posidonia* beds. GIS Posidonie publ., Fr., 2: 101-11.

Infantes E., Terrados J., Orfila A., Canellas B., Alvarez-Ellacuria A. (2009). Wave energy and the upper depth limit distribution of *Posidonia oceanica*. Botanica Marina, 52 : 419-427. DOI 10.1515/BOT.2009.050

Jeudy De Grissac A. (1984). Effets des herbiers à *Posidonia oceanica* sur la dynamique marine et la sédimentologie littorale. In:Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, GIS Posidonie publ.,Fr., 1: 437-443

Koopmans, D., Holtappels, M., Chennu, A., Weber, M., & De Beer, D. (2020). High net primary production of Mediterranean seagrass *(Posidonia oceanica*) meadows determined with aquatic eddy covariance. *Frontiers in Marine Science*, *7*, 118.

La Rivière M., Michez M., Aish A., Bellan-Santini D., Bellan G., Chevaldonné P., Dauvin J.-C., Derrien-Courtel S., Grall J., Guérin L., Janson A.-L., Labrune C., Sartoretto S., Thibaut T., Thiébaut E. et Verlaque M. (2016). Evaluation de la sensibilité des habitats benthiques de Méditerranée aux pressions physiques. Rapport SPN 2015-70. MNHN. Paris, 101 pp.

Marx L., Flecha S., Wesselmann M., Morell C., Hendriks I.E. (2021) Marine macrophytes as carbon sinks: comparison between seagrasses and the non-native alga *Halimeda incrassata* in the Western Mediterranean (Mallorca). Front Mar Sci 8:746379.

Monnier B. (2020). Quantification et dynamique spatio-temporelle des puits de carbone associés aux herbiers à *Posidonia oceanica*. Thèse de doctorat. Ecologie, Environnement. Université Pascal Paoli, 262 pp.

Monnier, B., Pergent, G., Valette-Sansevin, A., Boudouresque, C. F., Mateo, M. A., & Pergent-Martini, C. (2020). The Posidonia oceanica matte: a unique coastal carbon sink for climate change mitigation and implications for management. *Vie et Milieu/Life & Environment*, *70*.

Pazzaglia J., Santillán-Sarmiento A., Helber S.B., Ruocco M., Terlizzi A., Marín-Guirao L., Procaccini G. (2020) Does warming enhance the effects of eutrophication in the seagrass *Posidonia oceanica*? Front Mar Sci 7:564805.

Pergent G., Pergent-Martini C., & Boudouresque C.F. (1995). Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée : État des connaissances. Mésogée. 54. 3-27.

Pergent G., Leonardini R., Lopez y Royo C., Mimault B., Pergent-Martini C. (2008). Mise en œuvre d'un Réseau de Surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse – Rapport de synthèse 2004-2008. Contrat Office de l'Environnement de la Corse et GIS Posidonie Centre de Corse, GIS Posidonie Publ., Corte : 1 – 273

Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2010). Propositions de lignes directrices pour la standardisation des méthodes de cartographie et de surveillance des magnoliophytes marines en Méditerranée. PNUE-PAM-CAR/ASP. Contrat N°72/2009, Tunis : 1–66.

Pergent-Martini C., Pergent G., Monnier B., Boudouresque C.F., Mori C., & Valette-Sansevin A. (2021). Contribution of *Posidonia oceanica* meadows in the context of climate change mitigation in the Mediterranean Sea. Marine Environmental Research, 165, 105236.

Ruju A., Angelo I., Porta M., Buosi C., Passarella M., De Muro S. (2018). The rôle of hydrodynamic forcing, sediment transport processes and bottom substratum in the shoreward development of *Posidonia oceanica* meadow. Estuarine, Coastal and Shelf Science 212 : 63-72.

Ruiz J.M., & Romero J. (2003). Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. Marine pollution bulletin, 46(12), 1523–1533. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.08.021

Tang K.H.D., & Hadibarata T. (2022) Seagrass meadows under the changing climate: a review of the impacts of climate stressors. Res Ecol 4(1):27–36.

Van Rijn L.C. (1993) Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. [part I]. Amsterdam : Aqua Publications ISBN90-800356-2-9.

6 Annexes

6.1 Annexe 1 : Coordonnées géographiques des 3 transects des 8 sites d'étude

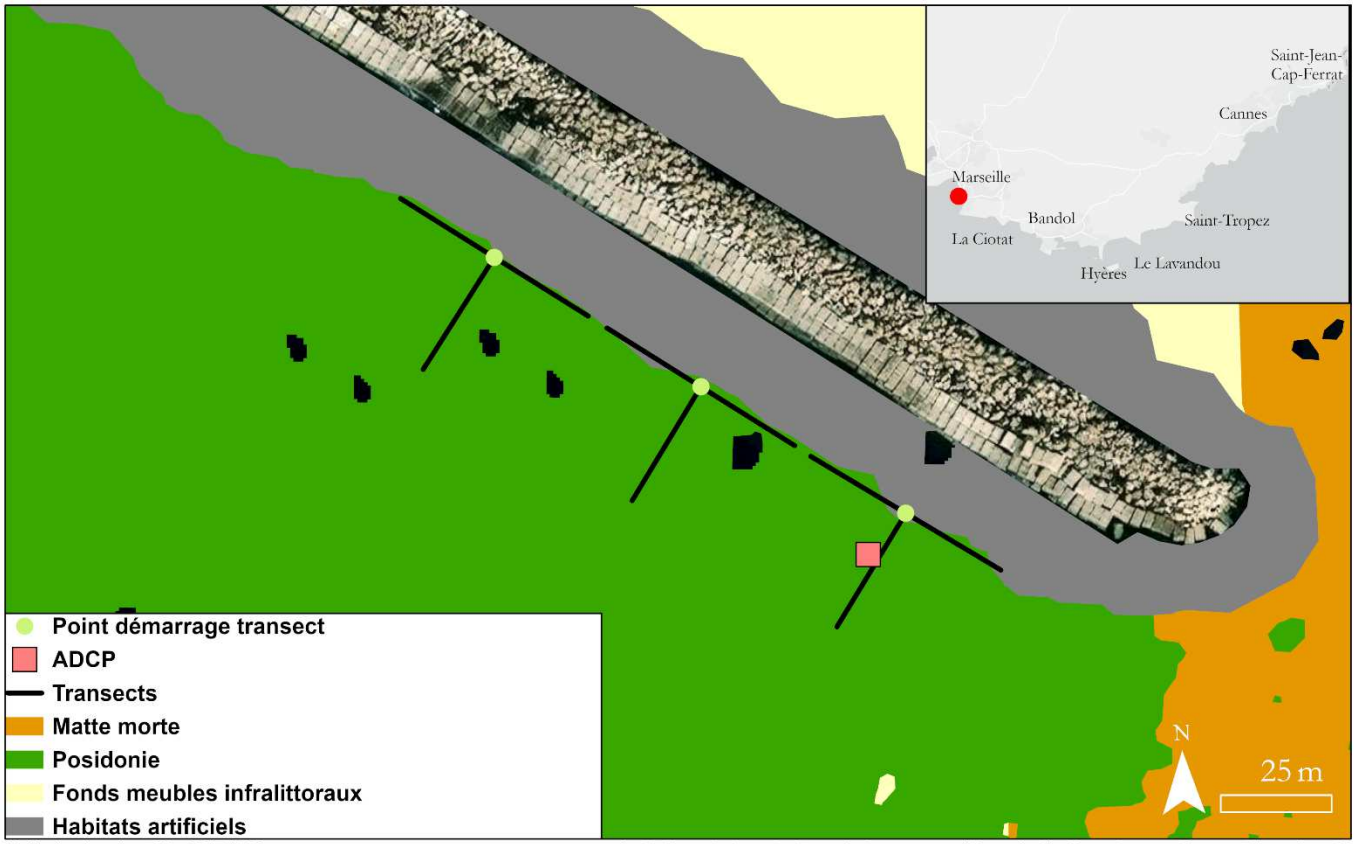
Site	TS01		TS02		TS03	
	Latitude N	Longitude E	Latitude N	Longitude E	Latitude N	Longitude E
Digue des Catalans - Marseille	43.2892861	5.3494750	43.2897417	5.3487083	43.2899889	5.3481861
Chantiers navals - La Ciotat	43.1659778	5.6118667	43.1664972	5.6124194	43.1671556	5.6131167
Port de Bandol	43.132124	5.756449	43.131741	5.755772	43.131348	5.755056
Port Saint-Pierre - Hyères	43.0791583	6.1592194	43.0799056	6.1593139	43.0806778	6.1593389
Port du Lavandou	43.1362639	6.3778000	43.1360222	6.3770250	43.1358139	6.3765972
Port de Saint-Tropez	43.2731861	6.6337472	43.2732528	6.6342694	43.2735028	6.6352556
Port Pierre-Canto-Cannes	43.5403056	7.0295417	43.5399111	7.0297222	43.5394833	7.0299028
Port Saint-Jean-Cap-Ferrat	43.6901806	7.3370417	43.6905778	7.3364861	43.6910556	7.3361111

6.2 Annexe 2 : Fiches descriptives par site d'étude

6.2.1 Marseille Digue des Catalans

Site : Digue des Catalans	**Orientation de l'ouvrage** : Sud-ouest
Exposition à l'hydrodynamisme : forte	**Année de construction** : 1975
Profondeur : 10 à 20 m	**Caractéristiques de l'ouvrage** : blocs naturels et artificiels

Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

L'herbier de posidonie était présent tout autour de la digue avant 1975. Les zones de matte morte observées autour de la digue sont caractérisées comme étant liées à un impact supposé indirect de l'artificialisation du littoral (Andromède., 2012b).

Observations *in situ*

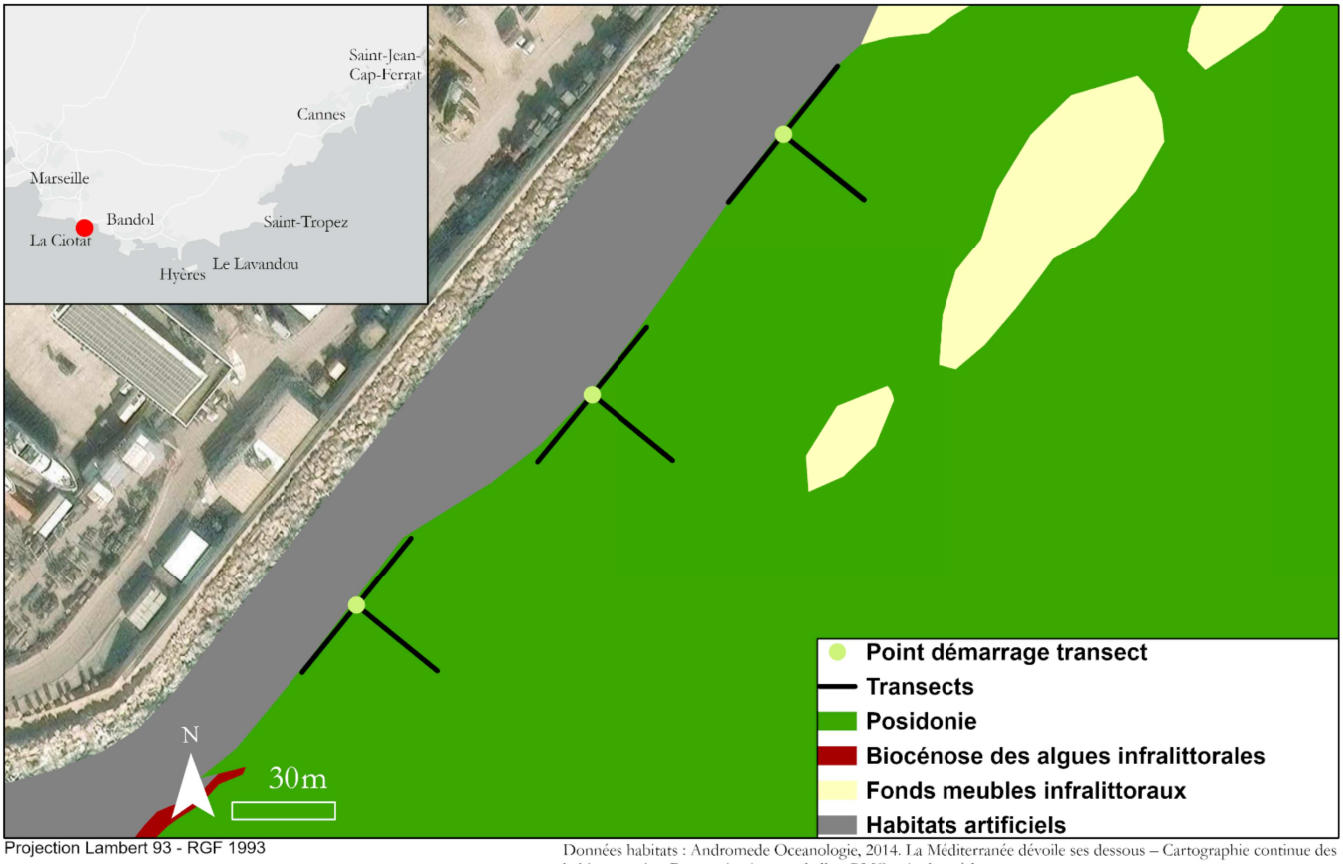
L'herbier de posidonie au droit de la digue est un herbier de plaine très fragmenté avec un recouvrement qui augmente au fur et à mesure de l'éloignement à la digue. Il se situe sur une pente assez marquée entre les transects, allant de 15.0 à 9.8 mètres de profondeur. Les stations proches de la digue (contact 0-1 m, 5 m, 10 m) des trois transects présentent une forte fragmentation de l'herbier avec plusieurs zones continues de matte de morte. Plusieurs blocs d'enrochement sont visibles au-delà du pied de la digue. La densité de faisceaux est caractérisée de moyenne à médiocre suivant les distances au pied de digue.

Illustrations de la digue des Catalans (SUEZ Consulting ©)

6.2.2 La Ciotat

Site : Chantiers navals-La Ciotat	Orientation de l'ouvrage : Sud-est
Exposition à l'hydrodynamisme : moyenne	Année de construction : 1973
Profondeur : 14-15 m	Caractéristiques de l'ouvrage : blocs naturels

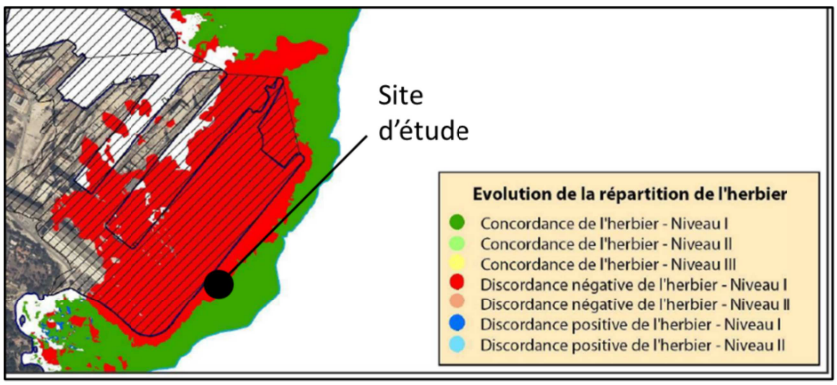
Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

L'herbier de posidonie était présent de manière étendue avant la construction de l'ouvrage en 1973. Près de 5.8 ha d'herbier dégradé aux abords de la zone d'étude dont la qualité est attribuée à un impact indirect de la construction de l'ouvrage portuaire de La Ciotat (Andromède 2012b).



Régression de l'herbier de posidonie analysée entre 1927 et 2011 (Andromède, 2012b).

Observations *in situ*

L'herbier de posidonie au droit de la digue de La Ciotat est un herbier de plaine avec un recouvrement moyen à bon en fonction de la distance à la digue. Il se situe sur une pente faible sur l'ensemble des transects, allant de 15.0 à 13.9 m de profondeur. La densité de faisceaux est considérée comme moyenne sur l'ensemble des distances au pied de la digue. Le déchaussement est relativement important à l'échelle de l'ensemble des sites d'étude (valeurs moyennes comprises entre 5.2 ± 0.5 et 10.8 ± 0.8 cm. La fragmentation de l'herbier n'est pas totalement homogène en fonction des transects, avec un herbier qui est quasiment au contact de l'ouvrage sur le transect n°1 et 2, et des étendues significatives de matte morte observées sur le transect n°3 proche de la digue.

Illustrations des transects 1, 2 et 3 (de haut en bas) sur la digue du port de la Ciotat (SUEZ Consulting ©).

6.2.3 Bandol

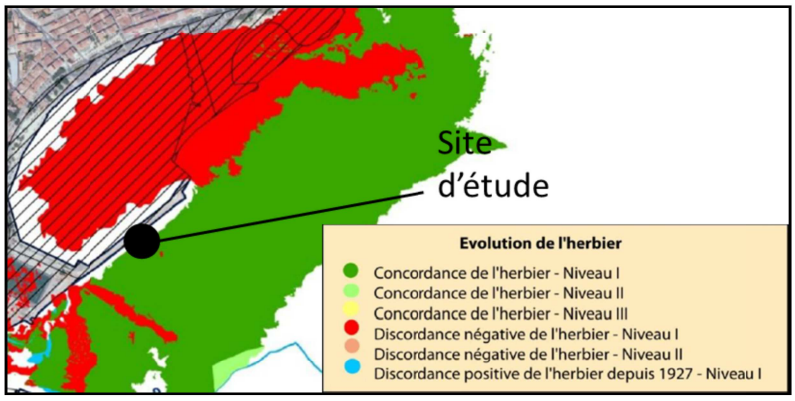
Site : Port de Bandol	Orientation de l'ouvrage : Sud-est
Exposition à l'hydrodynamisme : moyenne à faible	Année de construction : 1960
Profondeur : 5-6 m	Caractéristiques de l'ouvrage : blocs naturels

Cartographie du site

Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

Un peu plus de 16 ha d'herbier de posidonie ont été dégradés à la suite de la construction de l'ouvrage maritime du port de Bandol, dont 9.9 ha sont attribués à un impact indirect de l'ouvrage (en rouge non hachuré, Andromède, 2012a). La zone suivie dans le présent rapport est référencée comme non impactée par l'ouvrage en 2012.



Régression de l'herbier de posidonie analysée entre 1927 et 2008 (Andromède, 2012a).

Observations *in situ*

L'herbier de posidonie observé sur ce site remonte très près de l'ouvrage (<1 m) et son recouvrement est relativement bon jusqu'à l'approche de la digue (69.9 ± 5.9 % de recouvrement au pied de la digue, moyenne la plus élevée des sites d'étude). Malgré tout, une légère fragmentation s'observe tout de même comparée aux stations éloignées (20 m et 30 m) avec l'apparition de larges taches de matte morte. Le déchaussemet est compris entre 4 et 5 cm jusqu'à 10 m et diminue ensuite à 5 m et 0 m. La densité de faisceaux est considérée comme moyenne sur l'ensemble des distances échantillonnées.

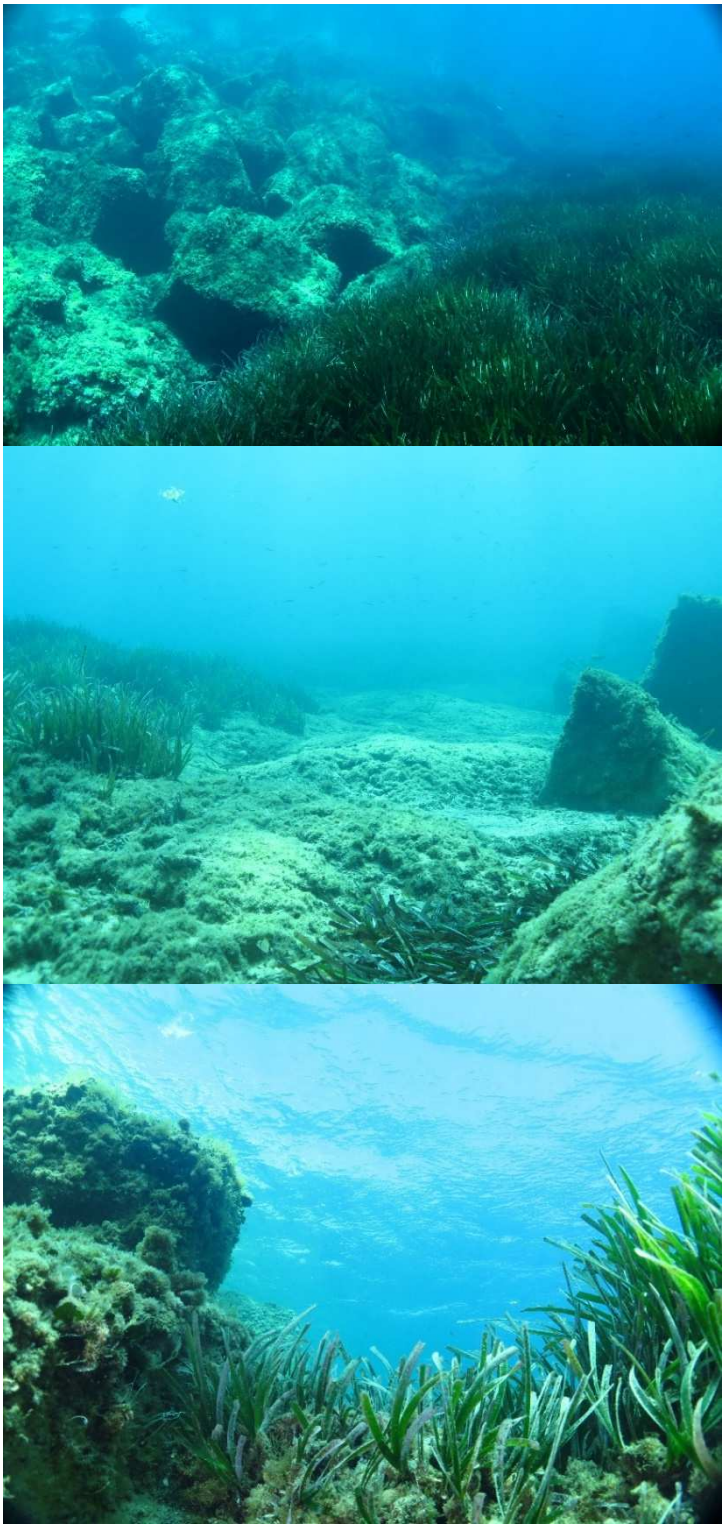


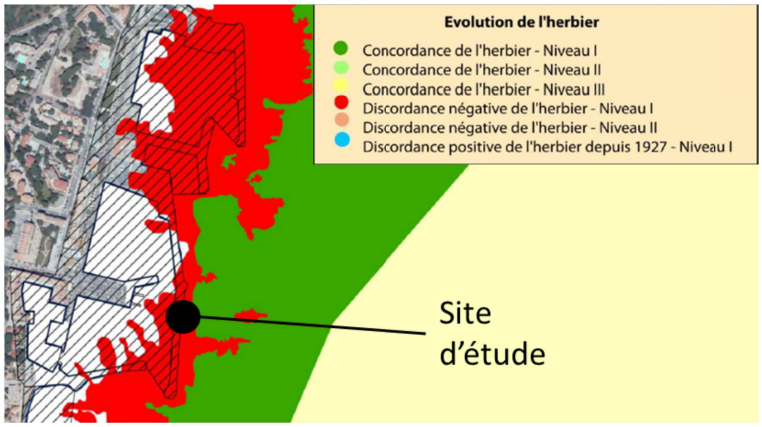
Illustration des transects 2 (en haut) et 3 (milieu et bas) sur la digue du port de Bandol (SUEZ Consulting ©).

6.2.4 Hyères

Site : Port Saint-Pierre (Hyères)	**Orientation de l'ouvrage** : Est
Exposition à l'hydrodynamisme : forte	**Année de construction** : 1950
Profondeur : 5-6 m	**Caractéristiques de l'ouvrage** : blocs naturels

Cartographie du site

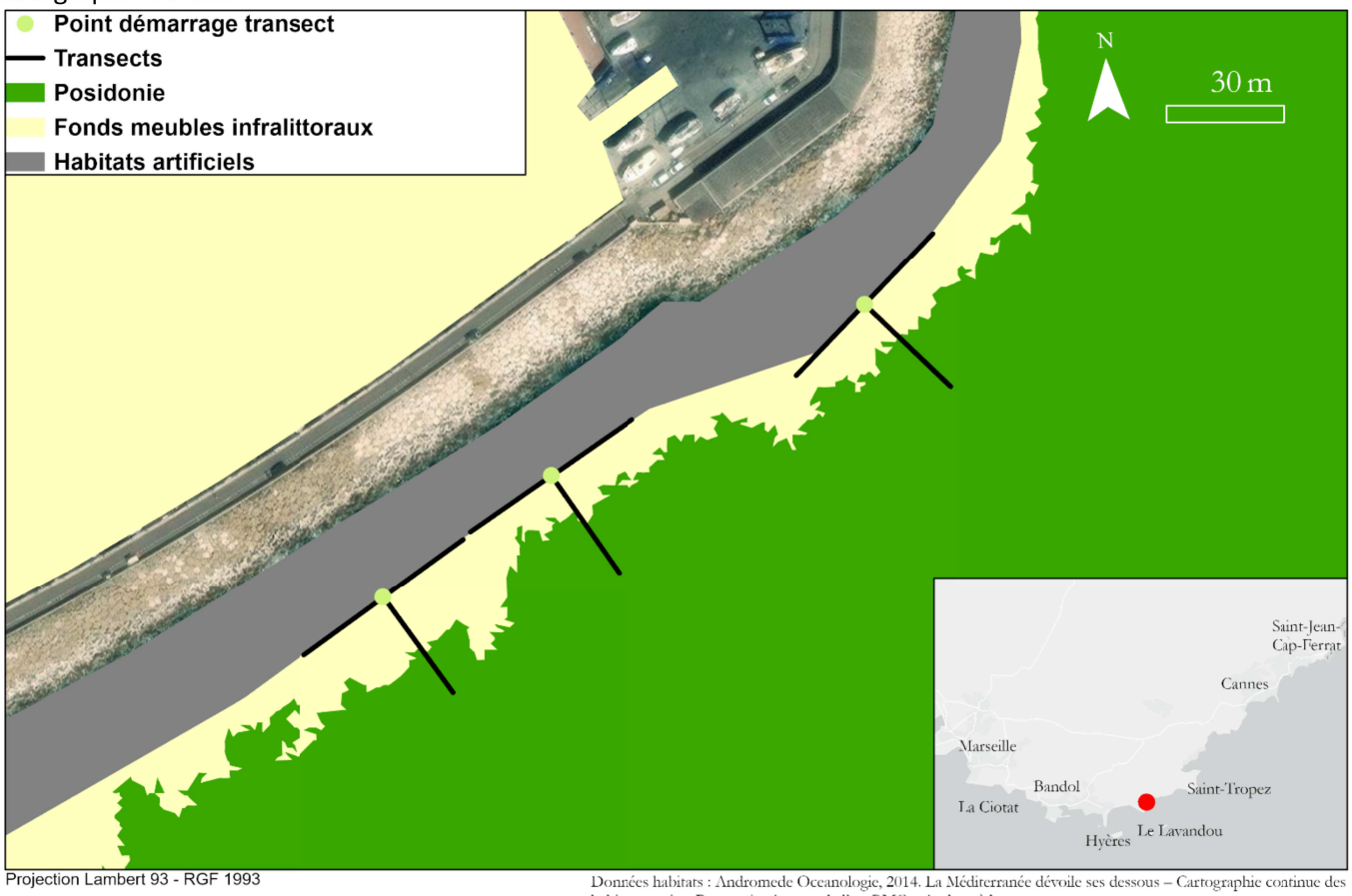
La régression de près de 23 ha d'herbier de posidonie est imputable à la construction du port de Hyères, dont une surface de 14.4 ha potentiellement induite par l'impact indirect de l'ouvrage (Andromède, 2012a).


Evolution de l'herbier
Concordance de l'herbier - Niveau I
Concordance de l'herbier - Niveau II
Concordance de l'herbier - Niveau III
Discordance négative de l'herbier - Niveau I
Discordance négative de l'herbier - Niveau II
Discordance positive de l'herbier depuis 1927 - Niveau I
Site
d'étude

6.2.5 Le Lavandou

Site : Port du Lavandou	**Orientation de l'ouvrage** : Sud-est
Exposition à l'hydrodynamisme : forte	**Année de construction** : 1910
Profondeur : 11-13 m	**Caractéristiques de l'ouvrage** : blocs artificiels

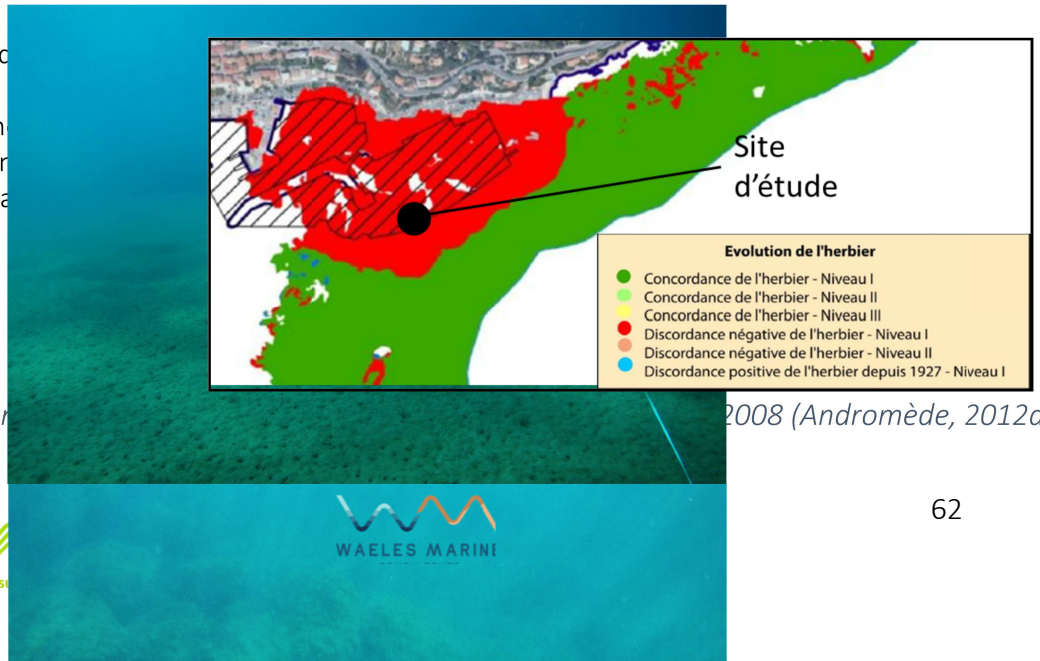
Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

Une large zone d'herbier d
été détruite au moment de
du port du Lavandou, et un
négligeable est imputable ir
la présence de l'ouvra
(Andromède, 2012a).



Régr *2008 (Andromède, 2012a).*

Observations *in situ*

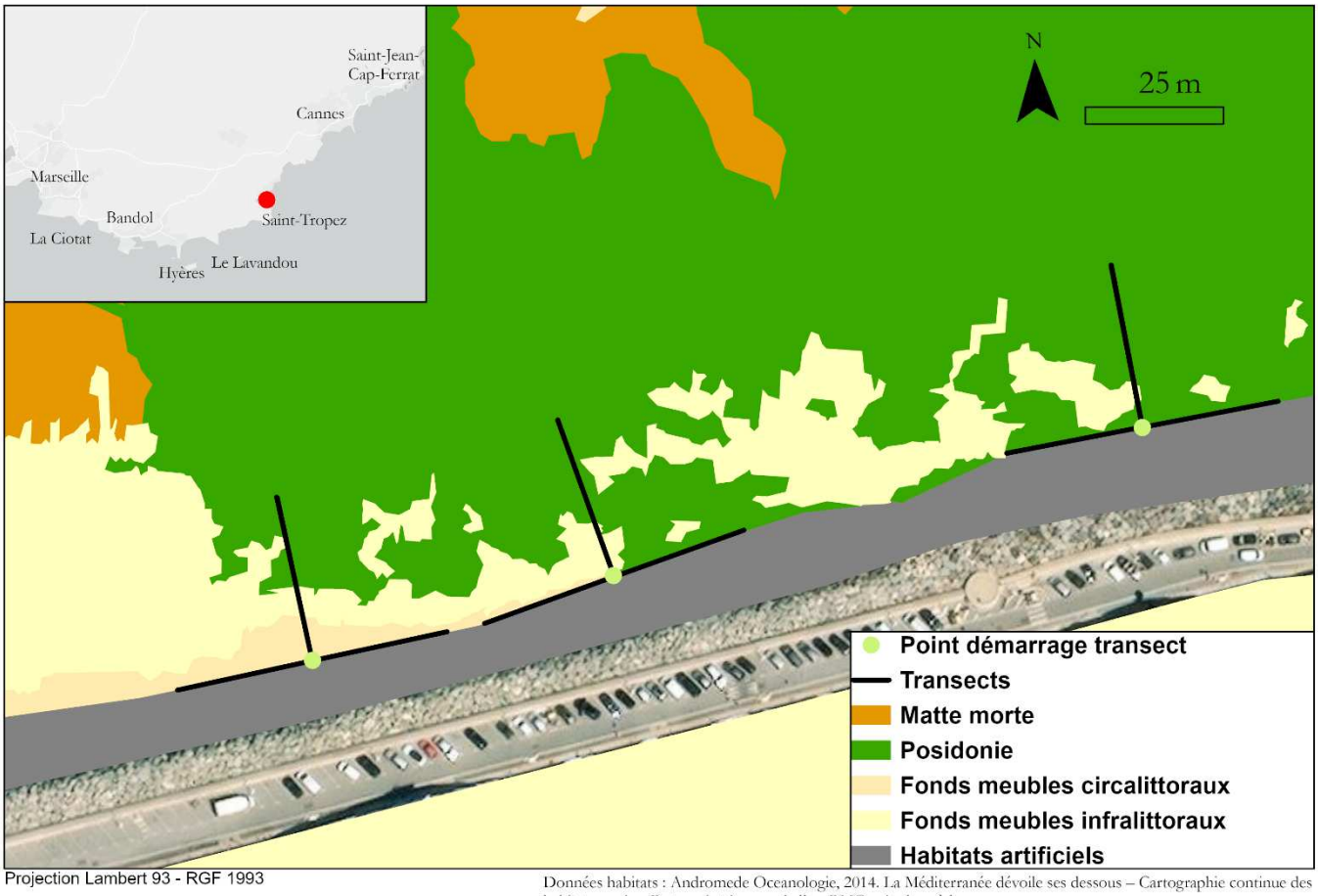
L'herbier de posidonie au dr e avec un fort recouvrement observé sur les stations à 20 recouvrement est observée en se rapprochant de la dig ternance de plusieurs zones d'intermatte de sable fin et sur l'ensemble des stations. L'herbier se situe sur une pe suellement, la régression de l'herbier est nettement visi ance, laissant apparents de nombreux faisceaux morts, e environ 75 mètres.

Illustrations du pied de la digue du transect 2 (haut) et 3 (milieu) ainsi que de sa limite supérieure de l'herbier sur le port du Lavandou.

6.2.6 Saint-Tropez

Site : port de Saint-Tropez	**Orientation de l'ouvrage** : Nord
Exposition à l'hydrodynamisme : faible	**Année de construction** : 1860
Profondeur : 6-10 m	**Caractéristiques de l'ouvrage** : blocs naturels

Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

La construction très ancienne de l'ouvrage (1860) rend impossible une comparaison avant et après construction car aucune photo aérienne n'est disponible avant cette date.

Observations *in situ*

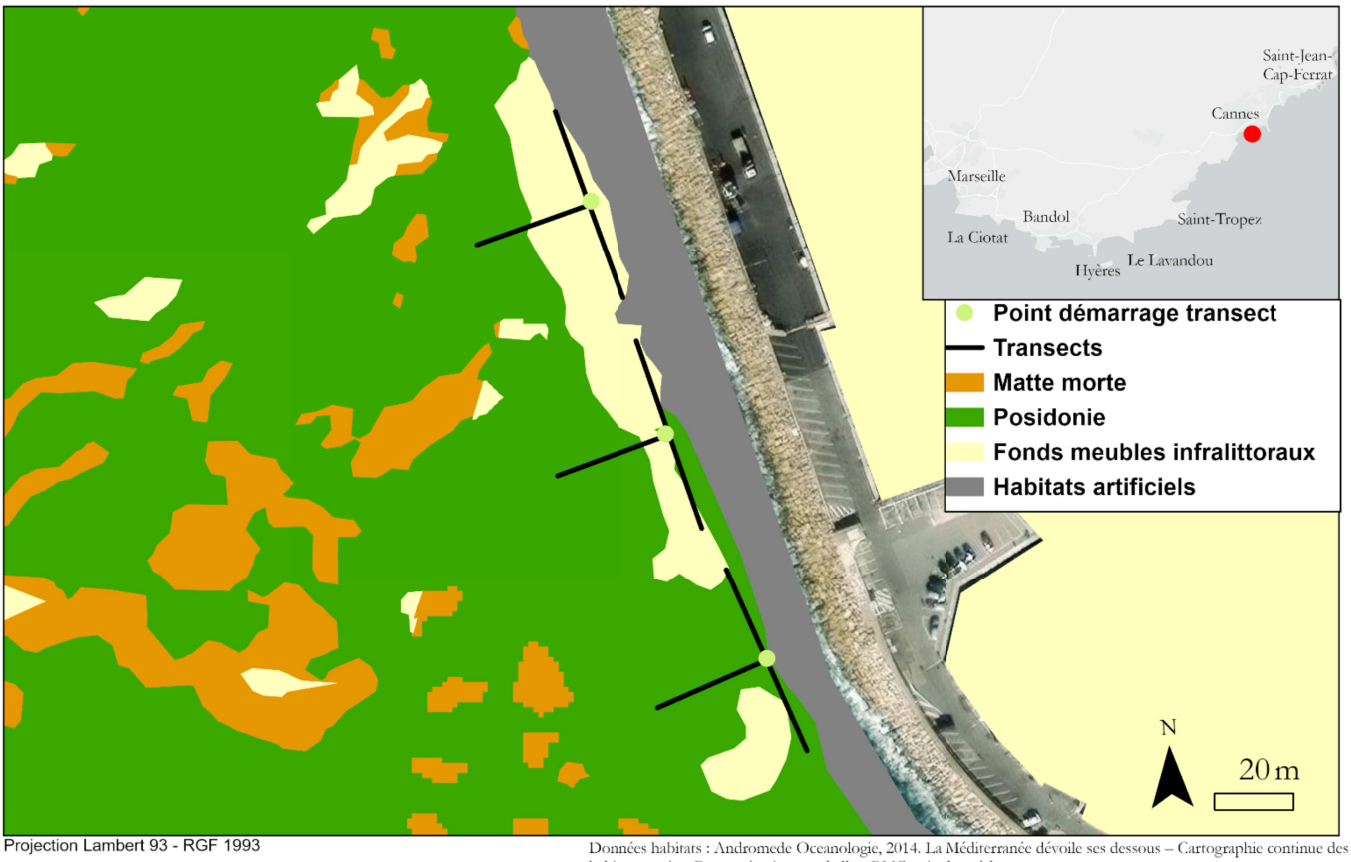
L'herbier de posidonie au droit de la digue est un herbier de plaine avec un recouvrement moyen dont les valeurs sont comprises entre 27 % et 31 % entre 5 m et le pied de digue, et entre 44 et 64 % à partir de 10 m de distance. Les densités de faisceaux sont caractérisées de médiocres sur l'ensemble des transects et le déchaussement est relativement faible du pied à 20 m de la digue. L'herbier se situe sur une pente modérée allant de 9.5 à 6.2 mètres de profondeur. Entre les transects 1 et 3, une nette différence entre la charge en épiphytes est visible sur les feuilles de posidonie, sans doute en lien avec l'affluence des eaux intérieures du port. Au plus proche de la digue (<0.5 m), plusieurs taches d'herbier sont présentes sur les enrochements.

Illustrations de la fragmentation visible à 10 m de la digue (haut), zone de matte morte (milieu) sur le transect 1 et amas de roches au-devant de la digue dans l'herbier du transect 3 du port de Saint-Tropez.

6.2.7 Cannes

Site : Port Pierre Canto	**Orientation de l'ouvrage** : Sud-ouest
Exposition à l'hydrodynamisme : moyenne	**Année de construction** : 1964
Profondeur : 7-9 m	**Caractéristiques de l'ouvrage** : blocs naturels

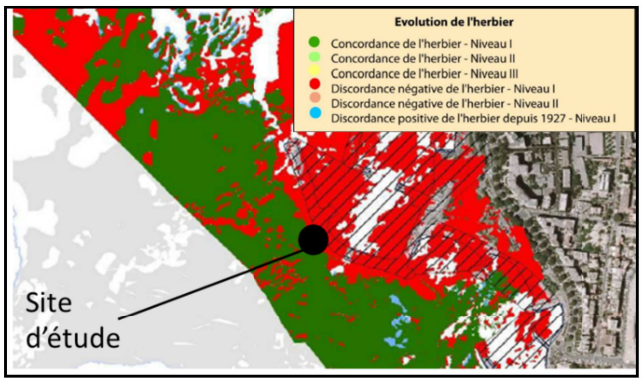
Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

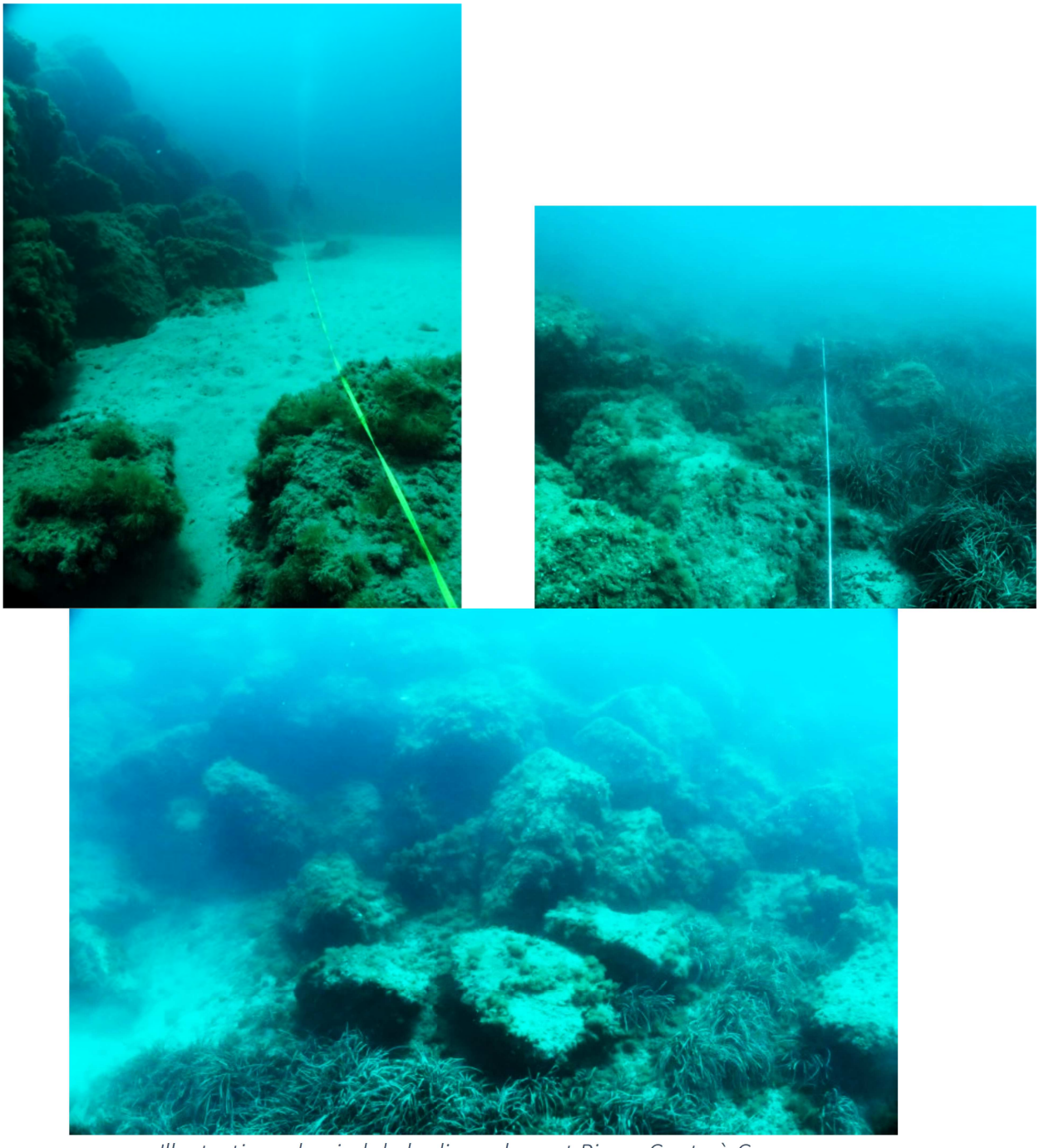
La construction de l'ouvrage des 3 ports de Cannes a recouvert environ 16.7 ha d'herbier de posidonie. L'impact indirect de l'ouvrage du port Pierre Canto pourrait avoir fait régresser environ 23.2 ha de posidonie (Andromède, 2012c).



Régression de l'herbier de posidonie analysée entre 1924 et 2011 (Andromède, 2012c)

Observations *in situ*

L'herbier de posidonie au droit de la digue est un herbier de plaine avec un fort recouvrement à 20 m et 30 m de la digue, qui diminue progressivement au fur et à mesure que l'on se rapproche, pour atteindre 25 % au pied de l'ouvrage. La densité de faisceaux est qualifiée de médiocre sur l'ensemble du site, et le déchaussement est relativement moyen, compris entre 4 et 7 cm/ L'herbier se situe sur une pente modérée allant de 7.1 à 9.2 m de profondeur. Il est interrompu par plusieurs structures érosives, tombant de "matte" d'environ 1.0 à 1.4 m de hauteur sur l'ensemble des stations. La limite supérieure franche de l'herbier de posidonie continue se situe à environ 14 m du pied de digue. Quelques taches de posidonie éparses sont présentes en pied de digue avec des zones d'intermattes comblées par du sable fin et du sable coquillier. De nombreux enrochements sont présents au-devant du pied de digue.

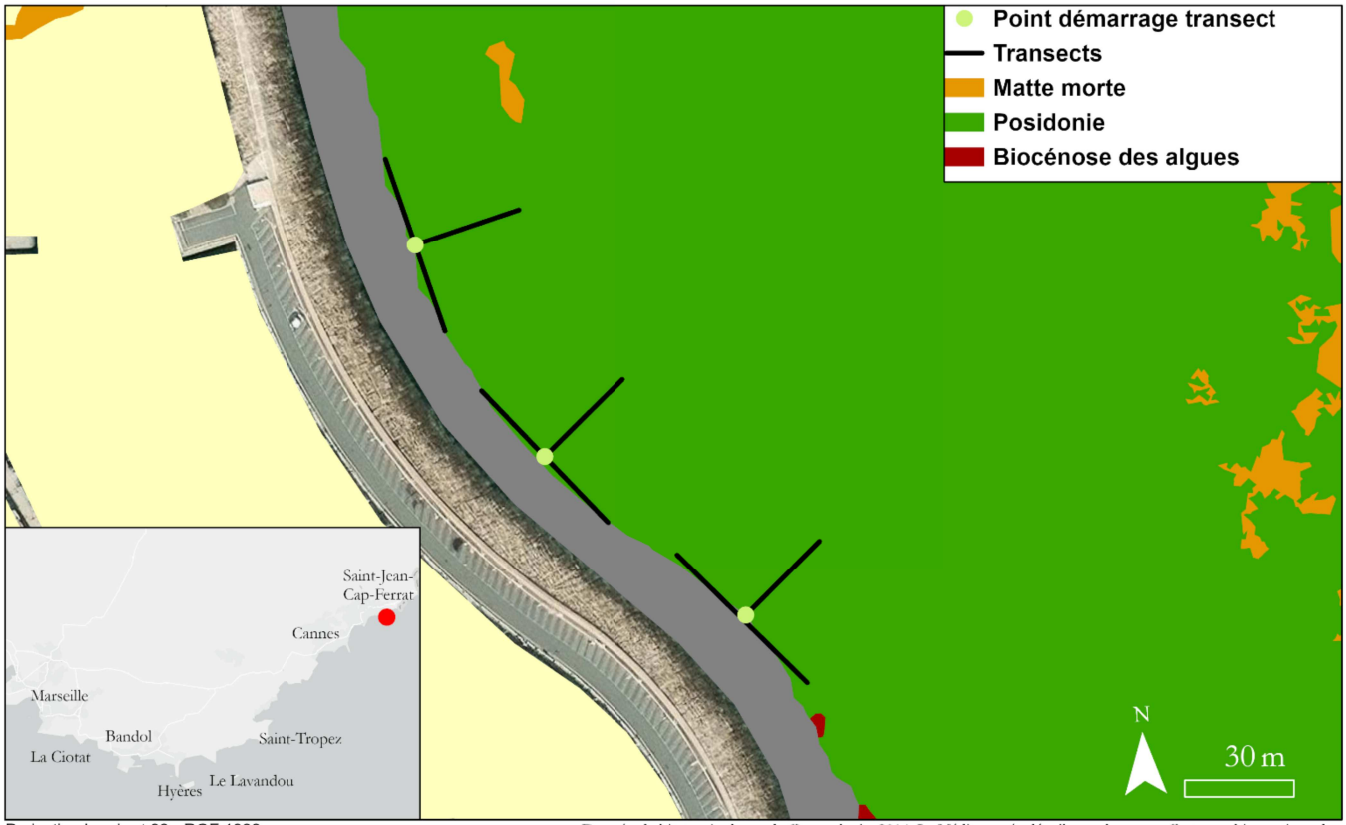


Illustrations du pied de la digue du port Pierre Canto à Canne.

6.2.8 Saint-Jean-Cap-Ferrat

Site : Port Saint-Jean-Cap-Ferrat	Orientation de l'ouvrage : Nord-est
Exposition à l'hydrodynamisme : forte	Année de construction : 1876 et agrandissement en 1972
Profondeur : 5-8 m	Caractéristiques de l'ouvrage : blocs naturels

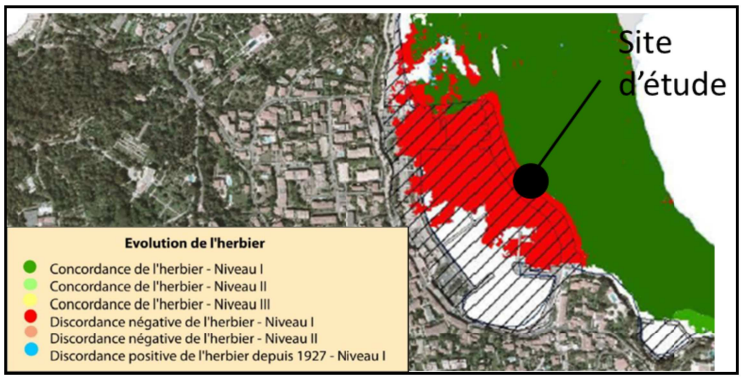
Cartographie du site



Projection Lambert 93 - RGF 1993

Données habitats : Andromede Oceanologie, 2014. La Méditerranée dévoile ses dessous – Cartographie continue des habitats marins. Partenariat Agence de l'eauRMC – Andromède

L'agrandissement du port en 1972 a directement détruit 5.7 ha d'herbier. Cependant, aucune régression liée à un impact indirect de la digue du port de Saint-Jean-Cap-Ferrat n'est identifiée à large échelle (Andromède, 2012c).



Régression de l'herbier de posidonie analysée entre 1924 et 2011 (Andromède, 2012c).

Observations *in situ* :

L'herbier de posidonie au droit de la digue est un herbier de plaine avec un fort recouvrement supérieur à 80 % jusqu'à 5 m de la digue, qui chute à 51.6 ± 4.8% au pied de l'ouvrage. La densité est qualifiée de moyenne à 20 et 30 m, puis de médiocre entre 0 m et 10 m de la digue. L'herbier se situe sur une pente modérée allant de 7.8 à 4.6 m de profondeur. Malgré le bon recouvrement général, une fragmentation de l'herbier est visible à partir de 20 m de distance avec plusieurs zones d'intermattes de matte morte et d'herbier peu dense, au plus proche de la digue. Quelques enrochements sont présents au-devant du pied de digue.

Illustrations de la fragmentation de l'herbier sur les transects 1, 2 et 3 (de haut en bas) sur le port de St-Jean-Cap-Ferrat.

6.3 Annexe 3 : Résumé des données de vitalité de l'herbier de posidonie.

6.3.1 Densité de faisceaux

Valeur moyenne des densités de faisceaux mesurées (nb de faisceaux / m²) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m). Les couleurs correspondent à la grille de lecture de Pergent et al., 2008 et tient compte de la profondeur de l'échantillonnage (rouge = mauvais, orange = médiocre, jaune = moyen, vert = bon, bleu = très bon).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	548.3 ± 33.5	662.1 ± 35.1	582.5 ± 24.6	552.9 ± 24.8	606.3 ± 27.5
Cannes Port Pierre Canto	354.0 ± 22.7	330.2 ± 26.2	326.7 ± 19.0	385.8 ± 30.3	365.0 ± 27.1
Catalans	291.2 ± 27.2	346.1 ± 19.7	333.1 ± 20.3	309.2 ± 21.0	325.8 ± 24.9
Hyères	636.7 ± 31.3	463.9 ± 38.4	645.8 ± 30.6	603.4 ± 32.5	381.7 ± 29.8
La Ciotat	315.9 ± 18.9	311.3 ± 15.5	282.2 ± 19.8	313.6 ± 22.4	348.7 ± 22.2
Le Lavandou	436.3 ± 28.1	457.7 ± 27.7	464.4 ± 21.5	432.4 ± 21.2	385.8 ± 32.9
Saint-Jean-Cap-Ferrat	440.8 ± 23.9	521.7 ± 26.4	435.8 ± 24.3	512.5 ± 26.6	504.2 ± 24.4
Saint-Tropez	366.4 ± 18.2	400.0 ± 22.0	388.3 ± 30.4	445.8 ± 25.4	449.2 ± 21.3

6.3.2 Déchaussement des rhizomes

Valeur moyenne des déchaussements de rhizomes mesurés (cm) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	1.1 ± 0.3	2.5 ± 0.4	4.2 ± 0.3	4.3 ± 0.6	4.9 ± 0.4
Cannes Port Pierre Canto	4.0 ± 0.6	3.2 ± 0.4	3.0 ± 0.3	4.5 ± 0.7	6.7 ± 0.6
Catalans	3.8 ± 0.3	5.3 ± 0.4	5.9 ± 0.3	6.2 ± 0.4	6.6 ± 0.4
Hyères	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2	2.3 ± 0.4	5.2 ± 0.5	1.6 ± 0.2
La Ciotat	5.2 ± 0.5	6.0 ± 0.7	8.7 ± 0.7	10.3 ± 0.7	10.8 ± 0.8
Le Lavandou	2.2 ± 0.2	3.4 ± 0.3	3.6 ± 0.3	5.3 ± 0.8	9.2 ± 0.9
Saint-Jean-Cap-Ferrat	2.6 ± 0.2	3.4 ± 0.4	3.9 ± 0.5	4.0 ± 0.5	4.2 ± 0.6
Saint-Tropez	2.6 ± 0.3	3.4 ± 0.3	3.3 ± 0.4	3.7 ± 0.4	7.1 ± 0.6

6.3.3 Proportion des rhizomes plagiotropes

Valeur moyenne des proportions de rhizomes plagiotropes mesurées (%) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	54.9 ± 4.8	75.6 ± 3.8	57.1 ± 4.0	64.6 ± 4.3	78.9 ± 4.7
Cannes Port Pierre Canto	40.9 ± 6.7	50.8 ± 6.0	53.3 ± 4.6	60.3 ± 5.8	57.3 ± 5.2
Catalans	48.5 ± 4.3	68.3 ± 4.0	67.3 ± 4.6	66.8 ± 5.3	69.0 ± 2.6
Hyères	67.6 ± 4.6	71.0 ± 3.9	74.7 ± 4.3	84.4 ± 3.5	76.0 ± 4.2
La Ciotat	36.3 ± 4.7	20.7 ± 3.6	23.3 ± 4.6	16.3 ± 4.8	17.0 ± 3.9
Le Lavandou	15.0 ± 9.6	10.9 ± 9.0	13.5 ± 7.3	30.0 ± 5.8	12.0 ± 2.7
Saint-Jean-Cap-Ferrat	51.3 ± 3.6	42.3 ± 3.7	56.8 ± 4.6	54.0 ± 5.4	64.7 ± 5.1
Saint-Tropez	35.0 ± 5.4	36.7 ± 4.8	35.0 ± 4.4	35.0 ± 6.8	41.4 ± 8.1

6.3.4 Recouvrement de l'herbier de posidonie

Valeur moyenne des recouvrements mesurés par tronçon de 5 m de long (%) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	69.9 ± 5.6	81.2 ± 3.6	87.3 ± 3.3	97.2 ± 0.9	95.9 ± 1.5
Cannes Port Pierre Canto	25.2 ± 5.5	41.3 ± 7.2	45.1 ± 6.9	71.2 ± 4.9	78.8 ± 4.4
Catalans	4.5 ± 2.3	19.5 ± 6	39.3 ± 6	53 ± 7.9	74.1 ± 6.8
Hyères	21.5 ± 3.9	26.2 ± 5.2	35.1 ± 5.4	30.6 ± 7.3	31.3 ± 7.4
La Ciotat	50.3 ± 4.8	68.4 ± 2.6	76.9 ± 2.7	83.3 ± 2.7	82.9 ± 2.9
Le Lavandou	18.3 ± 4.6	4.1 ± 1.6	14.6 ± 3.9	73.9 ± 5.3	82.1 ± 5.2
Saint-Jean-Cap-Ferrat	51.6 ± 4.8	84.2 ± 2.3	82.7 ± 2.9	90.3 ± 1.9	92.9 ± 1.7
Saint-Tropez	27 ± 5.3	30.8 ± 6	53.9 ± 6.4	63.3 ± 5.4	44.4 ± 6

6.3.5 Nombre de segments de posidonie

Valeur moyenne du nombre de segments comptés par tronçon de 5 m de long (%) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	1.7 ± 0.2	2.0 ± 0.2	1.7 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.4 ± 0.1
Cannes Port Pierre Canto	1.3 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.8 ± 0.2	1.8 ± 0.1
Catalans	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.1 ± 0.1
Hyères	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.9 ± 0.2	0.6 ± 0.1
La Ciotat	2.1 ± 0.2	2.6 ± 0.2	2.6 ± 0.2	1.9 ± 0.2	1.9 ± 0.2
Le Lavandou	0.9 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2	1.7 ± 0.2	1.6 ± 0.2
Saint-Jean-Cap-Ferrat	2.3 ± 0.2	2.5 ± 0.3	2.9 ± 0.3	1.8 ± 0.1	1.7 ± 0.2
Saint-Tropez	1.3 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.7 ± 0.3	1.7 ± 0.2	1.9 ± 0.2

6.3.6 Ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments

Valeur moyenne du ratio (%) du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments par tronçon de 5 m de long (%) ± l'erreur type en fonction des sites et des distances au pied des ouvrages maritimes (en m).

	Distance au pied de l'ouvrage maritime (m)				
site	0	5	10	20	30
Bandol	55.8 ± 4.7	62.8 ± 3.0	71.7 ± 3.7	86.1 ± 3.5	85.7 ± 3.6
Cannes Port Pierre Canto	26.0 ± 4.7	31.3 ± 4.9	46.7 ± 5.3	59.8 ± 4.1	69.4 ± 3.7
Catalans	12.4 ± 3.4	17.7 ± 5.0	41.3 ± 5.0	49.4 ± 6.5	67.0 ± 6.2
Hyères	25.0 ± 3.1	32.1 ± 4.8	38.3 ± 4.2	29.3 ± 6.5	28.6 ± 6.8
La Ciotat	48.8 ± 3.4	53.0 ± 1.5	64.8 ± 3.1	68.8 ± 4.0	67.0 ± 3.8
Le Lavandou	25.2 ± 4.6	8.2 ± 2.6	20.3 ± 4.2	68.9 ± 4.4	71.5 ± 4.6
Saint-Jean-Cap-Ferrat	48.4 ± 3.2	61.6 ± 3.8	65.2 ± 3.5	69.3 ± 3.4	80.4 ± 3.5
Saint-Tropez	30.7 ± 4.8	30.1 ± 5.1	46.2 ± 5.2	60.0 ± 5.1	43.9 ± 4.1

6.4 Annexe 4 : Résumé des résultats statistiques obtenus pour l'évaluation de l'état de l'herbier et la relation avec les données hydrologiques.

6.4.1 Densité de faisceaux

Résultats de la PERMANOVA (999 permutations, distance euclidienne) réalisée pour tester la variabilité de la densité de faisceaux en fonction de la distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site.

	Df	SumOfSqs	F	p-value
distance(site)	1	0.127	0.469	0.485
residual	1142	308.113		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1				

6.4.2 Déchaussement des rhizomes

Résultats de la PERMANOVA (999 permutations, distance euclidienne) réalisée pour tester la variabilité du déchaussement des rhizomes en fonction de la distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site.

	Df	SumOfSqs	F	p-value
distance(site)	1	20.848	155.8	**0.001** ***
residual	1141	152.718		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1				

Résultats des tests post-hocs par paires (p-value) réalisés pour comparer la variabilité du déchaussement des rhizomes entre chaque distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site. Les p-values en gras indiquent une différence significative entre 2 distances à un seuil de 5 %.

	0 m	5 m	10 m	20 m
5 m	**0.003**	-	-	-
10 m	**0.002**	0.075	-	-
20 m	**0.002**	**0.002**	**0.003**	
30m	**0.002**	**0.002**	**0.002**	**0.018**

6.4.3 Proportion des rhizomes plagiotropes

Résultats de la PERMANOVA (999 permutations, distance euclidienne) réalisée pour tester la variabilité de la proportion en rhizomes plagiotropes en fonction de la distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site.

	Df	SumOfSqs	F	p-value
distance(site)	1	0.49	0.516	0.677
residual	1043	990.39		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1				

6.4.4 Nombre de segments de posidonie

Résultats de la PERMANOVA (999 permutations, distance euclidienne) réalisée pour tester la variabilité du nombre de segments de posidonie en fonction de la distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site.

	Df	SumOfSqs	F	p-value
distance(site)	1	6.348	29.23	**0.001** ***
residual	1198	260.171		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1				

Résultats des tests post-hocs par paires (p-value) réalisés pour comparer la variabilité du nombre de segments de posidonie entre chaque distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site. Les p-values en gras indiquent une différence significative entre 2 distances à un seuil de 5 %.

	0 m	5 m	10 m	20 m
5 m	0.619	-	-	-
10 m	**0.007**	**0.002**	-	-
20 m	**0.002**	**0.002**	0.534	
30m	**0.002**	**0.002**	0.534	0.917

6.4.5 Ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments

Résultats de la PERMANOVA (999 permutations, distance euclidienne) réalisée pour tester la variabilité du ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments en fonction de la distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site.

	Df	SumOfSqs	F	p-value
distance(site)	1	104.19	88.43	**0.001** ***
residual	1198	1410.19		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

Résultats des tests post-hocs par paires (p-value) réalisés pour comparer la variabilité du ratio du nombre de segments d'herbier sur le nombre total de segments entre chaque distance à l'ouvrage tous sites confondus. La variable distance est emboitée dans la variable site. Les p-values en gras indiquent une différence significative entre 2 distances à un seuil de 5 %.

	0 m	5 m	10 m	20 m
5 m	0.978	-	-	-
10 m	**0.001**	**0.001**	-	-
20 m	**0.001**	**0.001**	**0.006**	
30m	**0.001**	**0.001**	**0.001**	0.797

6.4.6 Recouvrement de l'herbier en fonction des paramètres hydrodynamiques

6.4.6.1 Lien avec la vitesse orbitale

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le recouvrement moyen de l'herbier et les mesures de vitesse orbitale moyenne modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	1.37	0.924	0.326

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(vitesse orbitale)	1.119	1.224	41.75	0.924	**0.007**	**

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	2.12	0.219	0.241

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	4.71	0.481	0.118

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.4.6.2 Lien avec la contrainte de cisaillement

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le recouvrement moyen de l'herbier et les mesures de contrainte de cisaillement moyen modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(contr. cisail.)	1	1	0.15	0.269	0.722	

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(contr. cisail.)	1	1	44.82	0.916	**0.007**	**

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(contr. cisail.)	1	1	1.97	0.196	0.255

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(contr. cisail.)	1	1	0.20	0.250	0.685

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.4.6.3 Lien avec l'effort hydrodynamique

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le recouvrement moyen de l'herbier et les mesures de l'effort hydrodynamique moyen modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1	1	1.41	0.093	0.321

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1	1	1.91	0.185	0.261

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(effort hydro.)	1.179	1.325	30.19	0.903	**0.012**	*

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1	1	3.20	0.355	0.171

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.4.7 Déchaussement des rhizomes en fonction des paramètres hydrodynamiques

6.4.7.1 Lien avec la vitesse orbitales

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le déchaussement moyens des rhizomes et les mesures de vitesse orbitale modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	0.16	0.265	0.714

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1.569	1.814	6.94	0.712	0.148

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	0.08	0.300	0.800

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(vitesse orbitale)	1	1	0.03	0.322	0.883

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.4.7.2 Lien avec la contrainte de cisaillement

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le déchaussement moyen des rhizomes et les mesures de contrainte de cisaillement moyen modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(contr. cisail.)	1	1	0.05	0.312	0.839

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(contr. cisail.)	1.738	1.931	8.56	0.814	0.097	.

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(contr. cisail.)	1	1	0.02	0.325	0.898

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value	
s(contr. cisail.)	1.932	1.995	9.01	0.819	0.953	.

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.4.7.3 Lien avec l'effort hydrodynamique

Résultats des modèles généralisés additifs réalisés entre le déchaussement moyen des rhizomes et les mesures de l'effort hydrodynamique moyen modélisée sur la section 1 et 2 de la digue des Catalans et du port de Hyères. 's(vitesse orbitale)' correspond à la fonction 'smooth' du modèle permettant de tester des relations non linéaires entre les variables.

Catalans Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1.211	1.378	0.33	0.155	0.789

Catalans Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1.332	1.553	5.06	0.593	0.136

Hyères Section 1

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1	1	0.09	0.294	0.783

Hyères Section 2

	edf	Ref.df	F	R² ajust.	p-value
s(effort hydro.)	1	1	0.12	0.283	0.754

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

6.5 Annexe 5 : Rapport d'étude sur la modélisation hydrodynamique de la présente étude

Citation : Michaud M., Pavec M. 2024. Préservation des herbiers de Posidonie à proximité des ouvrages : quelle distance minimale ? Modélisation hydrodynamique. DREAL PACA, Actimar, SUEZ, GIS Posidonie, MIO. 81p + Annexes.