

Diagnostic de l'herbier de posidonie
(*Posidonia oceanica*)
en vue d'une opération de travaux
dans l'anse de la Potinière



Octobre 2014



**Diagnostic de l'herbier de posidonie
(*Posidonia oceanica*)
en vue d'une opération de travaux dans l'anse de la Potinière**

Commande :

Mairie de Hyères les Palmiers, Service Eau Littoral Propreté - 12 avenue Joseph Clotis - BP 709 - 83412 Hyères Cedex. Tél. : 04.94.00.78.50. Fax : 04.94.00.78.14.

Réalisation :

GIS POSIDONIE, Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'environnement marin - Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO), Case 901 - Campus de Luminy - 13 288 MARSEILLE Cedex 9. Tel. : 04.91.82.91.35. Fax. : 04.91.41.12.65.

Responsable scientifique :

Professeur Charles-François BOUDOURESQUE, Président du GIS Posidonie, Président du Comité Scientifique du Parc National de Port-Cros, Professeur Emérite à l'Université d'Aix-Marseille.

Responsable de l'étude :

Elodie ROUANET

Participants aux missions de terrain :

Patrick ASTRUCH, Denis BONHOMME, Elodie ROUANET

Réalisation de la cartographie :

Denis BONHOMME

Rédaction :

Denis BONHOMME, Elodie ROUANET

Crédits photographiques (sauf mention contraire) :

Elodie ROUANET

Dossier 1416

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

Rouanet E., Bonhomme D., Astruch P., 2014. Diagnostic de l'herbier de posidonie (*Posidonia oceanica*) en vue d'une opération de travaux dans l'anse de la Potinière. Contrat Mairie de Hyères les Palmiers & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr., 1-49.

Sommaire

1. Introduction.....	6
1.1. Contexte et objectifs de l'étude	6
1.2. <i>Posidonia oceanica</i>	10
2. Matériel et méthode	17
2.1. Cartographie.....	17
2.2. Paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie	22
2.2.1. Localisation des stations de mesures des paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie.....	22
2.2.2. Densité de faisceaux	23
2.2.3. Déchaussement	25
2.2.4. Orientation des rhizomes.....	26
3. Cartographies et observations.....	27
3.1. Cartographie générale des habitats et des espèces	27
3.2. Espèces protégées rencontrées	30
3.2.1. L'herbier de posidonie <i>Posidonia oceanica</i>	30
3.2.2. Les prairies de zostère <i>Zostera noltei</i> et de cymodocée <i>Cymodocea nodosa</i>	33
3.2.3. Grande nacre <i>Pinna nobilis</i>	35
3.3. Espèces invasive rencontrées	35
4. Discussion et recommandations	38
4.1. Evaluation sectorisée des risques.....	38
4.2. Recommandations	39
4.2.1. Impacts directs	39
4.2.2. Impacts indirects	41
5. Références bibliographiques.....	44

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs de l'étude

La ville d'Hyères envisage de procéder à la prolongation de la digue piétonnière dans l'anse de la Potinière. Dans un souci de respect de la législation en vigueur, une étude de site comportant notamment la cartographie de l'herbier de posidonie a été demandée.

L'anse de la Potinière se situe dans la rade d'Hyères, sur le tombolo de la presqu'île de Giens, au Sud du port de Saint Pierre d'Hyères. Par le passé cette anse était constituée uniquement de sable, mais à partir des années 1950 et la construction du port, des aménagements formés d'enrochements en ont modifié la physionomie.

L'anse de la Potinière est fortement impactée par les houles et par les courants induits par les conditions de Sud Est (Océanide, 2011a). L'étude de modélisation de la propagation de la houle réalisée par Océanide (2011a) indique qu'aux abords du rivage, l'anse est un des secteurs les plus érodés par l'attaque directe de la houle. Avec la construction du port de Saint Pierre au Nord, elle n'est plus sous l'influence du transit littoral du Nord vers le Sud et ne bénéficie plus d'apport sédimentaire naturel.

L'anse touche la digue du port de Saint Pierre au Nord et est fermée au Sud par un épi d'une longueur d'environ 105 m constitué d'enrochements. Elle abrite deux plages de sable dans ses parties Nord (environ 65 m de longueur) et Sud (environ 35 m de longueur). Ces plages ont fait l'objet de rechargements ponctuels et non systématiquement tous les ans (Océanide, 2010 ; Magali Pontier, *comm. pers.*). La plage Nord est composée de sable de rechargement issu de carrière sur le haut de plage et de sable naturel au niveau de la laisse de mer. La plage Sud a été rechargée sur toute sa surface de sable roulé-lavé issu de carrière. Les rechargements ont lieu chaque printemps depuis 2009. A la suite de la plage Sud, en allant vers le Nord, un passage piétonnier formé par un cordon d'enrochements long d'environ 95 m recouvert de graviers longe les clôtures des habitations. Des rechargements en graviers sont opérés chaque année, mais les tempêtes hivernales emportent ces sédiments dans la mer. Ce passage a été endommagé en septembre 2010 dans son extrémité Nord, vraisemblablement dû par des écoulements provoqués par des fortes pluies (Océanide, 2010). Entre l'extrémité Nord du passage piétonnier et la plage Nord, une passerelle d'une longueur de 50 m est mise en place chaque été devant les habitations (Figure 1).

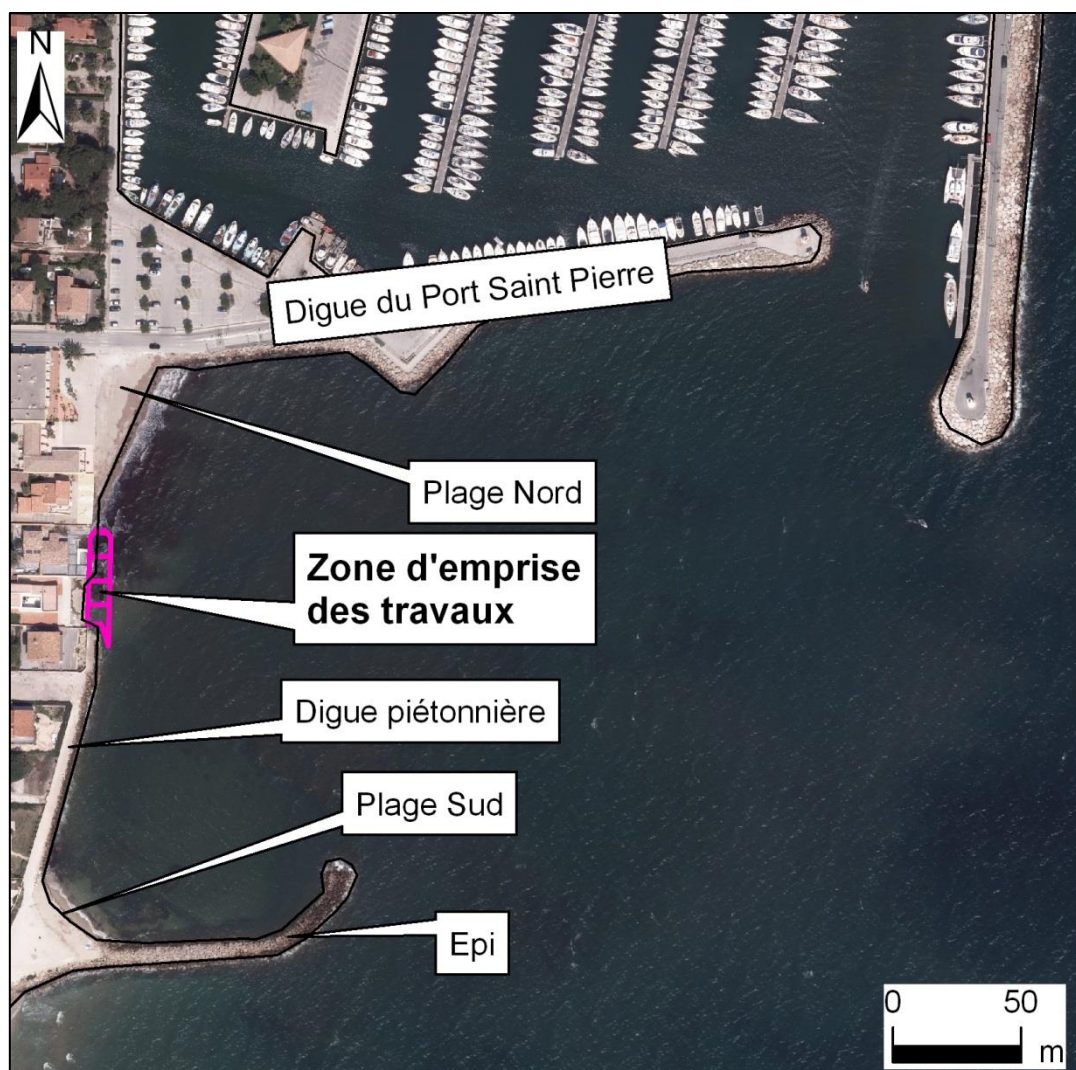


Figure 1. Toponymie de l'anse de la Potinière.

Les terrasses de ces habitations ont leur assise dans l'eau, sur une profondeur de plusieurs dizaines de centimètres (Océanide, 2010). Des affouillements et des problèmes de stabilité sont observés au pied des murs des terrasses. Au printemps 2014, la mairie a été autorisée, à titre expérimental, à aménager un accès piétonnier entre la plage Nord et l'enrochement existant avec l'apport de 717.8 t de sable de carrière roulé lavé. Par cette action, la mairie souhaitait stopper les impacts dus à l'érosion du littoral. Cette opération s'est soldée par un échec car tout le sable déposé a été emporté avant l'été (Magali Pontier, comm. pers.). Face à l'absence de succès de cette opération de rechargement, à l'inquiétude des riverains et à une demande d'accès aisée à la plage, la mairie envisage de prolonger le passage piétonnier pour relier la plage Nord. Pour cela, elle souhaite réaliser des travaux d'immersion d'enrochements.

La municipalité a commandé des études hydro-physiques au niveau de l'anse et différents scénarios d'aménagement ont été proposés par la société OCEANIDE. Les élus ont choisi de réaliser la solution 2 proposée, à savoir prolonger le talus en enrochements vers le Nord avec une décroissance progressive de la cote d'arase de ce sentier. Cette solution permettrait à la fois une amélioration de la protection de l'ensemble des bâtiments ainsi qu'une poursuite du chemin piétonnier (Océanide, 2011b). Pour cela, la société Océanide propose :

- un prolongement du sentier jusqu'à la plage Nord. L'emprise du prolongement est présentée à la Figure 2.

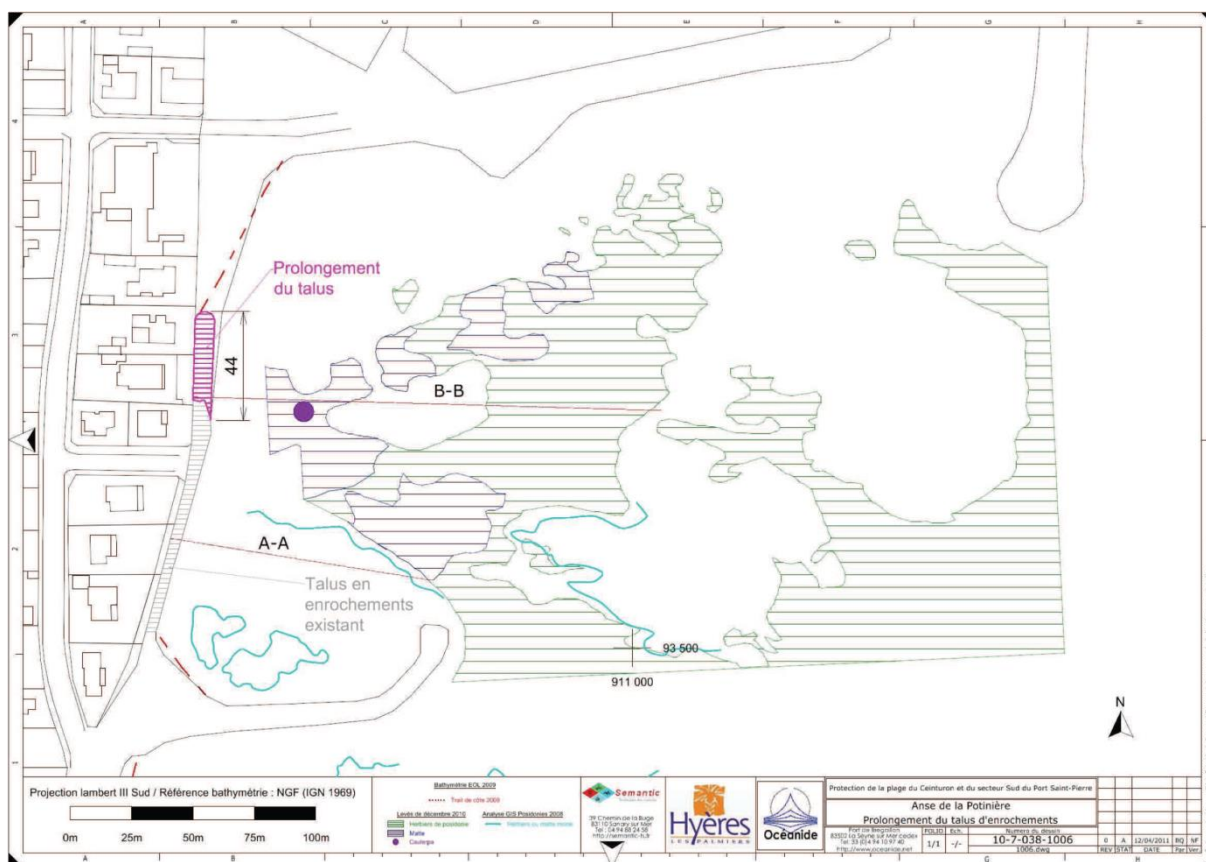


Figure 2. Emprise du prolongement du talus dans l'anse de la Potinière (extrait d'Océanide, 2011b).

- une restructuration de la partie supérieure du sentier avec une pente ou des décrochés pour diminuer progressivement son élévation en direction du Nord. Deux options sont proposées : soit un revêtement poreux de type Elastocoast, soit un béton coulé sur place en plusieurs sections et comprenant une pente favorisant les ruissellements en direction de la mer (Figure 3).

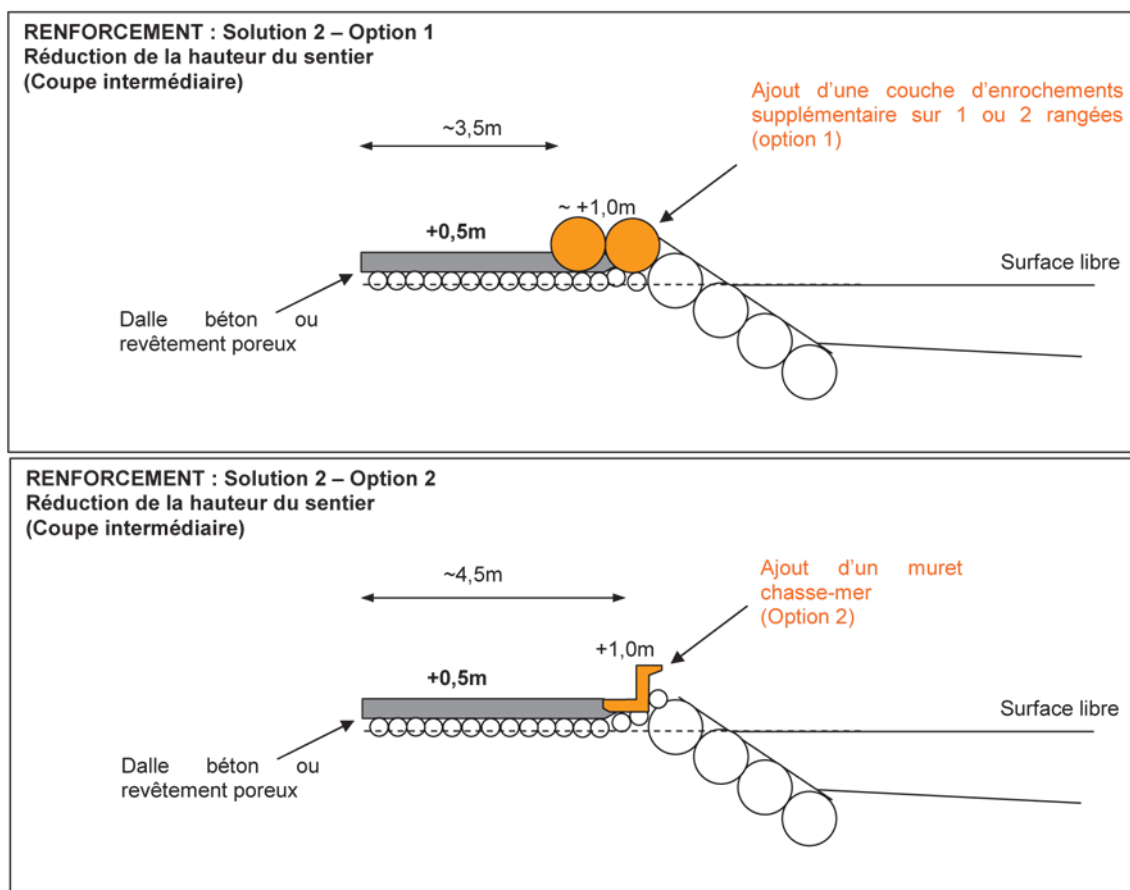


Figure 3. Coupe-types de restructuration de la partie supérieure du sentier selon les deux options proposées. Les côtes altimétriques sont issues du levé litto3D. Les courbes de niveau n'étant indiquées que tous les mètres, les schémas restent qualitatifs. De même, la composition exacte du talus (couches, type et taille enrochements) est estimée. Extrait d'Océanide, 2011b.

- une protection anti-franchissements pour sécuriser le sentier et protéger les habitations derrière. Deux options sont également proposées : soit l'ajout d'une (ou plusieurs) rangée(s) d'enrochements supplémentaires, côté mer, soit la construction d'un muret anti-franchissements (Figure 3).

L'anse de la Potinière est connu pour abriter un herbier de posidonie ainsi qu'une structure en récif barrière (Niéri *et al.*, 1992), véritable monument naturel jouant un rôle écologique et fonctionnel important. La réalisation des travaux risque d'impacter cet herbier et cette construction récifale. La mairie d'Hyères souhaite donc : (i) connaître la répartition actuelle de l'herbier et du récif barrière dans l'anse de la Potinière, (ii) disposer d'un avis concernant l'impact que pourrait avoir l'ouvrage sur l'herbier de posidonie, (iii) des préconisations à respecter lors des travaux.

1.2. *Posidonia oceanica*

Posidonia oceanica est une magnoliophyte endémique stricte de la Méditerranée, où elle constitue de vastes prairies sous-marines, appelées herbiers, depuis la surface de l'eau jusqu'à 30 m de profondeur, selon la transparence des eaux. L'herbier de posidonie est considéré comme l'un des écosystèmes les plus importants, voire l'écosystème-pivot des fonds littoraux méditerranéens au même titre que la forêt en milieu terrestre (Molinier et Picard, 1952 ; Boudouresque et Meinesz, 1982).

La posidonie est une plante dont les feuilles mesurent généralement de 40 à 80 cm de long et 1 cm de large ; elles sont regroupées en faisceaux de 4 à 8 feuilles environ, qui tombent surtout à l'automne. Chacun de ces faisceaux de feuilles est situé à l'apex d'un axe appelé rhizome (tige souterraine), qui croît horizontalement (rhizome plagiotrope) ou verticalement (rhizome orthotrope). L'herbier édifie au cours du temps un enchevêtrement complexe et extrêmement compact de rhizomes et de racines, dont les interstices sont comblés par du sédiment, formant la "matte". Ces mattes stabilisent les fonds meubles ; elles peuvent atteindre une épaisseur de plus de 8 m dans le Var. Les rhizomes, les écailles et les racines sont peu putrescibles et se conservent donc, à l'intérieur de la matte, pendant plusieurs siècles ou millénaires (Boudouresque et Judy de Grissac, 1983). Lorsque l'herbier se dégrade, il reste généralement des fonds de matte morte plus ou moins couverts de sédiments. Cependant, il faut noter que l'apparition de zones de matte morte peut avoir une origine naturelle comme par exemple l'hydrodynamisme. Dans la littérature, il n'est pas rare que la présence de matte morte ait été interprétée, à tort, comme le signe univoque d'un impact de l'homme.

La formation des herbiers, leur dynamique et leur densité dépendent étroitement du milieu environnant : nature du substrat sur lequel les posidonies se fixent, hydrodynamisme, courant, profondeur, qualité des eaux (Boudouresque *et al.*, 2006). Les herbiers de posidonie tolèrent des variations de température et d'hydrodynamisme d'amplitude relativement grande. Ils craignent, par contre, la dessalure ; il leur faut généralement une salinité comprise entre 36 et 39 PSU. Les herbiers de posidonie ne sont jamais rencontrés ni dans les lagunes, ni à l'ouverture des estuaires.

Importance écologique de l'herbier de posidonie

L'importance de l'herbier de posidonie est maintenant bien connue et documentée, ceci à plusieurs égards :

- l'herbier de posidonie représente un pôle de biodiversité important : 20 à 25% des espèces animales et végétales connues en Méditerranée y sont observées, soit plusieurs milliers d'espèces (Boudouresque *et al.*, 1994). Ces espèces sont présentes de façon permanente ou simplement occasionnelle et utilisent l'herbier comme zone de nutrition, de reproduction des adultes, de recrutement et de développement pour les juvéniles et comme abri (nocturne ou diurne). La biodiversité est d'autant plus importante dans l'herbier que sa complexité structurale est élevée (longues feuilles, alternance herbier/roches, présence de structures érosives - tombants de matte, intermattes - et édification d'une matte) ;
- l'herbier joue un rôle dans la qualité des eaux littorales grâce à une importante production d'oxygène (jusqu'à 14 l/j/m² ; Bay, 1978) ; et sur leur transparence par le piégeage des particules en suspension (Blanc et Jeudy de Grissac, 1984) ;
- la production primaire de biomasse végétale (à la fois celle de la posidonie elle-même et celle des épibiontes des feuilles) est très importante (Libes, 1984), comparable à celle d'une forêt tropicale ombrophile, soit plus de 20 tonnes/ha/an. Une grande partie de cette production (près de 40%) est exportée vers d'autres milieux côtiers et profonds sous forme de litière (feuilles mortes) (Boudouresque *et al.*, 1994 ; Rico-Raimondino, 1995 ; Fourt et Goujard, 2011). L'herbier de posidonie est un écosystème unique, car il juxtapose une production végétale à recyclage lent (la posidonie) et rapide (macrophytes épibiontes), ce qui explique son exceptionnelle richesse (Boudouresque *et al.*, 2006). La production de biomasse animale est également très importante dans l'herbier (Kikuchi et Pérès, 1973 ; Kikuchi, 1980 ; Francour, 1990). Cette formidable production végétale et animale a pour effet d'attirer et de concentrer une faune variée (Bell et Harmelin-Vivien, 1982 ; Francour, 1990 ; Ourgaud *et al.*, 2014) ;
- l'herbier se trouve à la base de nombreuses chaînes alimentaires et constitue un lieu de frayère et de nurserie pour de nombreuses espèces animales qui y trouvent nourriture et protection (Ledoyer, 1968 ; Harmelin-Vivien, 1983), en particulier pour des poissons d'intérêt économique pour la pêche (Harmelin-Vivien *et al.*, 1995).
- l'herbier joue également un rôle fondamental dans la protection hydrodynamique de la frange côtière et des plages, par atténuation de 50% de la puissance des

vagues, de la houle et des courants. Les fonds sableux sont ainsi stabilisés par la fixation des sédiments dans le lacs des rhizomes constituant la matre (Boudouresque et Jeudy de Grissac, 1983 ; Jeudy de Grissac, 1984 ; Jeudy de Grissac et Boudouresque, 1985). Sans cette protection contre l'érosion, le profil d'équilibre des rivages sableux serait fortement modifié. D'ailleurs, de nombreuses communes littorales sont confrontées au problème d'érosion des plages, suite à la régression des herbiers, situés au large, qui ne peuvent plus directement assumer ce rôle d'atténuation de l'hydrodynamisme. Des budgets conséquents sont ainsi annuellement consacrés par les communes à un apport régulier de sable pour compenser le lessivage systématique de leurs plages (Boudouresque *et al.*, 2006)

Récif-barrière de posidonie

L'édification de formations récifales par *Posidonia oceanica* est due à la montée de la matre, ensemble constitué par les rhizomes et les racines et dont les interstices sont colmatés par le sédiment piégé par les feuilles. En mode calme, la matre peut s'approcher suffisamment de la surface pour que, à marée basse, l'extrémité des feuilles émerge. On parle alors de formation récifale (récif). Ce processus, avec la formation d'un récif barrière isolant un lagon, a été découvert au début des années 1950s dans la baie de Port-Cros par Roger Molinier et Jacques Picard. Ils ont également décrit les stades initiaux de cette édification.

Dans un premier temps l'émersion de l'extrémité des feuilles se localise le long de la côte et constitue une formation d'herbier que l'on désigne sous le nom de récif-frangeant (Figure 4a). Par la suite, la poursuite de la montée de la matre élargit le récif-frangeant. Au sein du récif frangeant, les feuilles et la faible profondeur gênent la circulation des eaux ; la température peut descendre en-dessous (en hiver) ou s'élever au-dessus (en été) des limites de tolérance de *P. oceanica*. Il en va de même de la salinité, lors des épisodes de pluie. Entre la côte et le front d'émersion de *P. oceanica*, les posidonies meurent : il se forme ainsi un lagon (Molinier et Picard, 1952 ; Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Boudouresque *et al.*, 2006). Le front d'émersion de *P. oceanica* constitue alors un récif-barrière. Dans le lagon, des herbiers de *Cymodocea nodosa* et *Zostera noltei* se forment généralement dans ces eaux calmes et peu profondes (Figure 4b). Au cours du temps, le lagon peut se creuser, petit à petit, du fait d'aménagements du littoral, du mouillage ou par l'érosion induite par les courants générés par l'ouverture d'une ou de plusieurs brèches dans le récif-barrière (Figure 4c). Un récif frangeant peut au cours du temps, si la montée

de la matre est synchrone à l'élévation du niveau de la mer, former un front d'émerision et alors isoler un lagon, dont le fond ne sera donc pas tapissé de matre morte. Dans cette configuration il n'y a pas d'érosion démontrée de la matre morte (Figure 4d). La régression de l'herbier au niveau du front d'émerision du récif-barrière (mouillage, aménagements du littoral, pollution, navigation) laisse alors la place à un récif-barrière-fossile (Figure 4e).

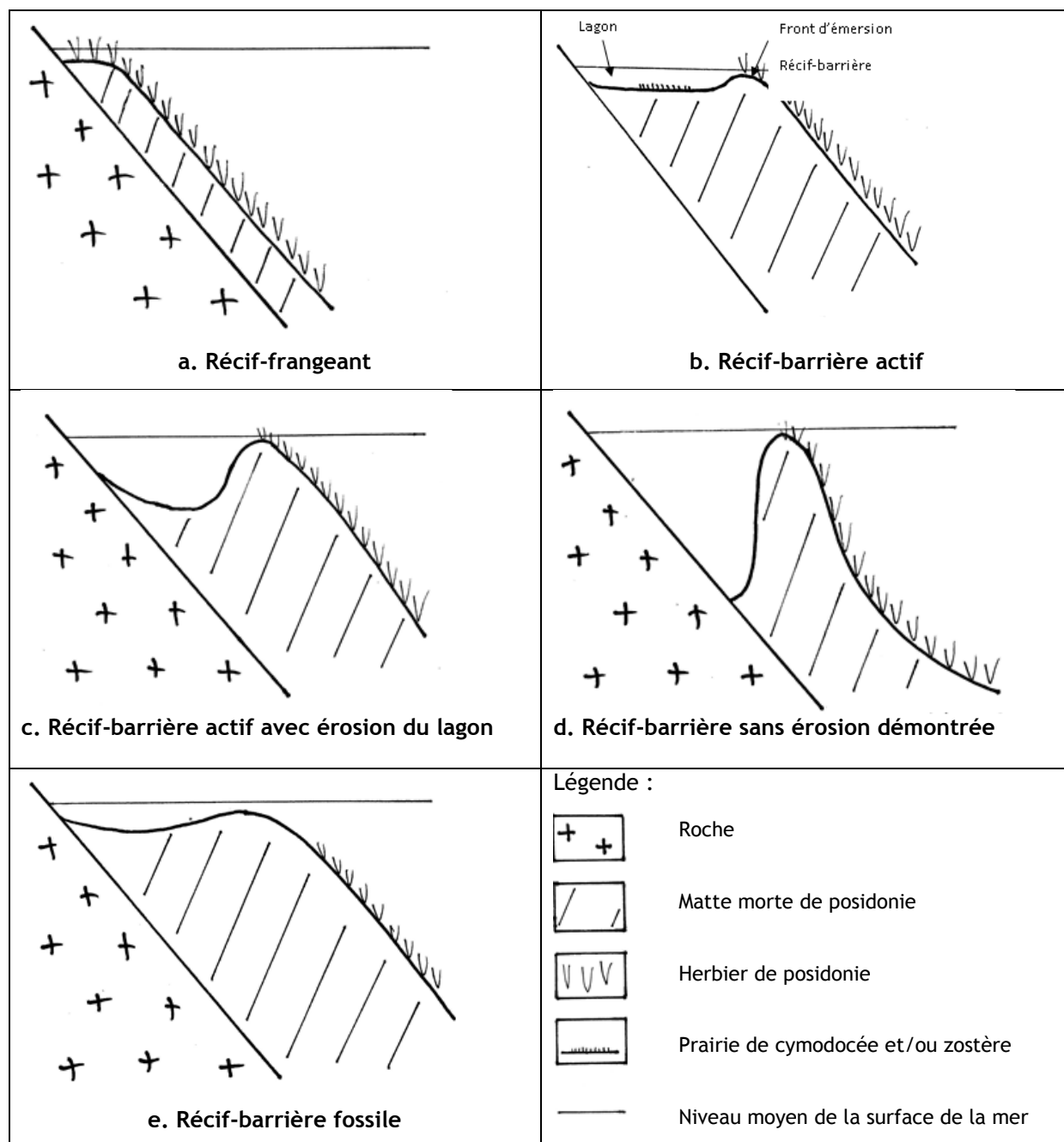


Figure 4. Formation d'un récif-barrière de posidonie en mode calme (d'après Boudouresque *et al.*, 2006, redessiné par Bonhomme *et al.*, 2014).

Protection et réglementation

L'importance écologique indéniable a motivé des initiatives concrètes au niveau de la législation, visant à préserver les herbiers : Arrêté de protection de la posidonie (19 juillet 1988, J.O. du 09 août 1988), prise en considération de l'herbier de posidonie dans le décret d'application (n 89.694 du 20 septembre 1989) de la "loi littoral" n86.2 du 3 janvier 1986 et dans le cadre de la conservation des habitats naturels (Directive Européenne "Habitats" du 21 mai 1992 - JOCE 92.43.CEE). Enfin, la posidonie apparaît dans les annexes de la Convention de Barcelone (adoptées en décembre 1995) et de la Convention de Berne (adoptées en février 1996) ; ces deux conventions ont été ratifiées par la France. De plus, les herbiers de magnoliophytes marines sont également pris en considération par l'Unesco, depuis la conférence de Rio en 1992.

Les herbiers de posidonie face aux aménagements littoraux

Les aménagements littoraux constituent une cause importante de régression des herbiers de posidonie. Le taux d'artificialisation du trait de côte est de 19.05% en région PACA. Dans le département du Var, ce taux est de 13.74%. Il est de 4.25% à l'échelle de la commune d'Hyères les Palmiers (Meinesz *et al.*, 2013). L'impact d'un aménagement en enrochements sur le littoral peut être direct par recouvrement ou indirect par :

- augmentation de la turbidité générée lors des travaux. La posidonie est sensible à la turbidité, même passagère, car elle diminue les capacités et l'efficacité de la photosynthèse et peut entraîner une sur sédimentation (Meinesz et Laurent, 1978 ; Boudouresque, 1996 ; Ruiz et Romero, 2001). En effet, le piégeage des particules fines par l'herbier contribue à la transparence des eaux ; cependant l'excès de ces particules entraîne un manque de lumière et une diminution de l'activité photosynthétique de la plante. Ces modifications altèrent l'équilibre entre la pousse naturelle verticale des rhizomes luttant pour l'accès à la lumière et l'accumulation des sédiments piégés. Par ailleurs, la lumière permet à la posidonie de réaliser la photosynthèse afin d'assurer sa croissance et de constituer pendant la période la plus lumineuse (l'été) des réserves stockées dans les rhizomes pour l'année suivante (Alcoverro *et al.*, 2001). Toute augmentation de la turbidité des eaux durant la période estivale limitera cette constitution de réserve et mettra en péril la posidonie.

- modification de l'hydrodynamisme. La réalisation d'ouvrages côtiers modifie localement les houles et les courants, et donc 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 hypersédimentation en amont et érosion en aval (Boudouresque *et al.*, 2006). Ces modifications d'équilibre sédimentaire entre le taux de croissance vertical des rhizomes et le taux de sédimentation peuvent être négatives pour la plante. Une accumulation excessive de sédiment peut recouvrir les apex végétatif de la posidonie ; si le taux de sédimentation dépasse 5-7 cm/an, les points végétatifs meurent (Boudouresque *et al.*, 1984). 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 ancras, etc. (Boudouresque *et al.*, 2006).

L'exemple des travaux d'aménagement des plages du Mourillon à Toulon illustre parfaitement les conséquences des impacts directs et indirects sur l'herbier de posidonie et donne un ordre d'idée des échelles surfaciques impactées (Astier, 1984). En effet, la destruction directe par recouvrement a représenté 22 ha d'herbier de posidonie, suivie par la destruction indirecte de 10 ha et de l'envasement de 27 ha supplémentaires. Les travaux de prolongement de la digue du port de Sausset les Pins sont un autre exemple. Aucun impact direct de destruction d'herbier par recouvrement n'est à déplorer. Par contre, 266 m² d'herbier ont été détruits par impact indirect de la nouvelle digue en l'espace de 3 ans après les travaux. La digue a en effet entraîné une modification de l'hydrodynamisme local avec une redistribution du stock de sédiments disponibles aux alentours provoquant un ensevelissement de l'herbier (Bonhomme *et al.*, 2010 ; Figure 5). Les conclusions de l'étude évoquaient alors une possible poursuite de la disparition de l'herbier, tant bien même les travaux terminés.

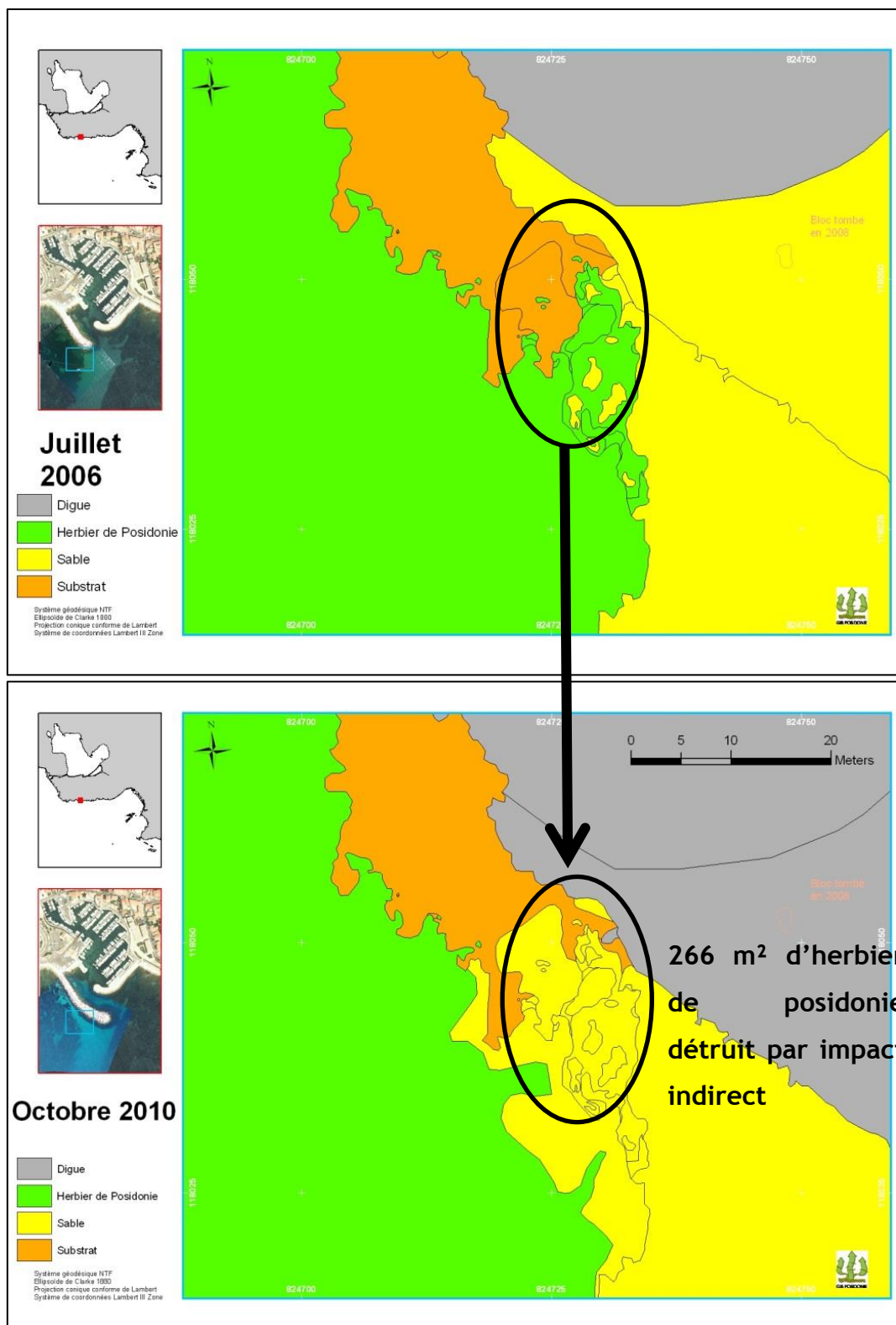


Figure 5. Evolution de la répartition de l'herbier de posidonie (avant et 3 ans après travaux) dû aux impacts indirects du prolongement de la digue du port de Sausset les Pins (extrait de Bonhomme *et al.*, 2010).

2. Matériel et méthode

2.1. Cartographie

L'objectif de la cartographie réalisé consiste à localiser les zones d'herbiers de posidonie continus et l'enveloppe des taches d'herbier isolées (Figure 6) afin que la plus grande attention soit apportée sur ces secteurs lors de la réalisation des travaux de mises en place du nouvel enrochement. Une option de réalisation de la cartographie de l'herbier de posidonie à partir d'une campagne de photographies aériennes spécifiques par ballon captif a été proposé, malgré la faible visibilité connue des eaux du secteur, afin d'essayer d'optimiser la localisation exhaustive des taches d'herbier isolées. Cette option n'a pas été retenue par la ville d'Hyères. La cartographie réalisée pour cette étude est donc basée sur les orthophotographies de l'IGN de 2011 et des vérités terrain. Etant donné les délais très courts de restitution de l'étude, la faible visibilité connue de la zone et la présence d'un herbier *a priori* très morcelé, la cartographie exhaustive de l'herbier de posidonie dans l'ensemble ne sera atteinte qu'au niveau de l'emprise de la zone du futur ouvrage et dans une zone de 30 m autour. Au-delà de 30 m, l'enveloppe des taches d'herbier isolés sera présentée et les zones d'herbiers continus.

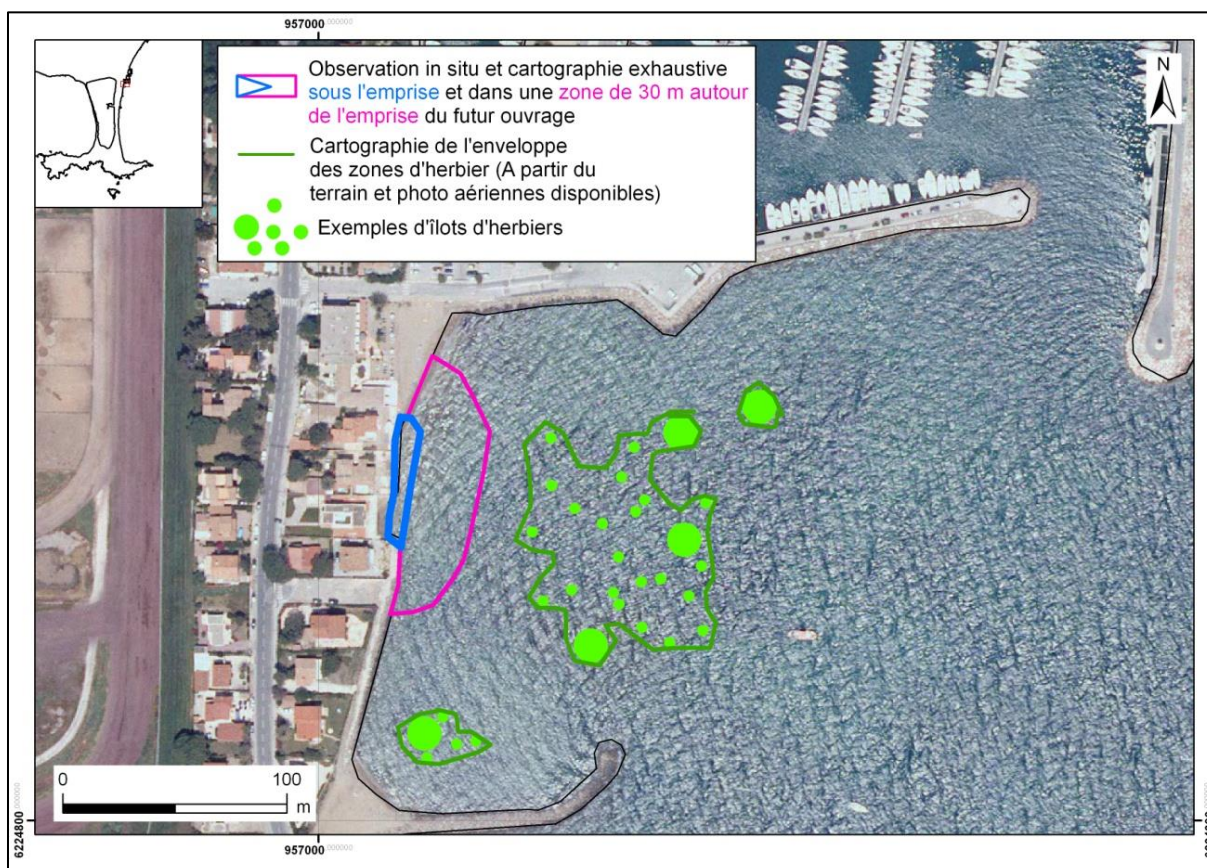


Figure 6. Objectif de la cartographie à réaliser : localiser les zones d'herbiers de posidonie continus et envelopper les taches d'herbier isolées.

Préparation de la mission de vérité terrain

La méthode a consisté à repérer, sur Système d'Information Géographique (SIG), en couplant les données de l'orthophotographie de l'IGN de 2011 (Figure 7), fournie par la ville, et de l'utilisation de la Base de données altimétrique Litto3D (Figure 8), les grandes unités d'habitat. Ce travail préliminaire a permis de repérer les bancs de matte morte de posidonie qui apparaissent de couleurs brunâtre sur l'orthophotographie et forment un relief marqué se détachant du fond de sédiment meuble. Ainsi un effort particulier d'observations sur le terrain, dans ces zones de matte morte, était consenti afin d'identifier et détourner d'éventuelles taches d'herbier de posidonie isolées non visibles sur les orthophotographies. Ces taches d'herbier, du fait de leur taille réduite et de la présence d'une fine pellicule de vase (dans le secteur confiné de la Potinière) sur les feuilles, apparaissent de la même couleur que la matte morte et le sable. Elles ne sont donc pas ou difficilement discernables d'après l'analyse des orthophotographies.

D'autre part, ce travail préalable sur SIG a permis de prioriser des secteurs en fonction de l'enjeu d'observation : proximité du futur ouvrage et difficulté d'interprétation des orthophotographies.

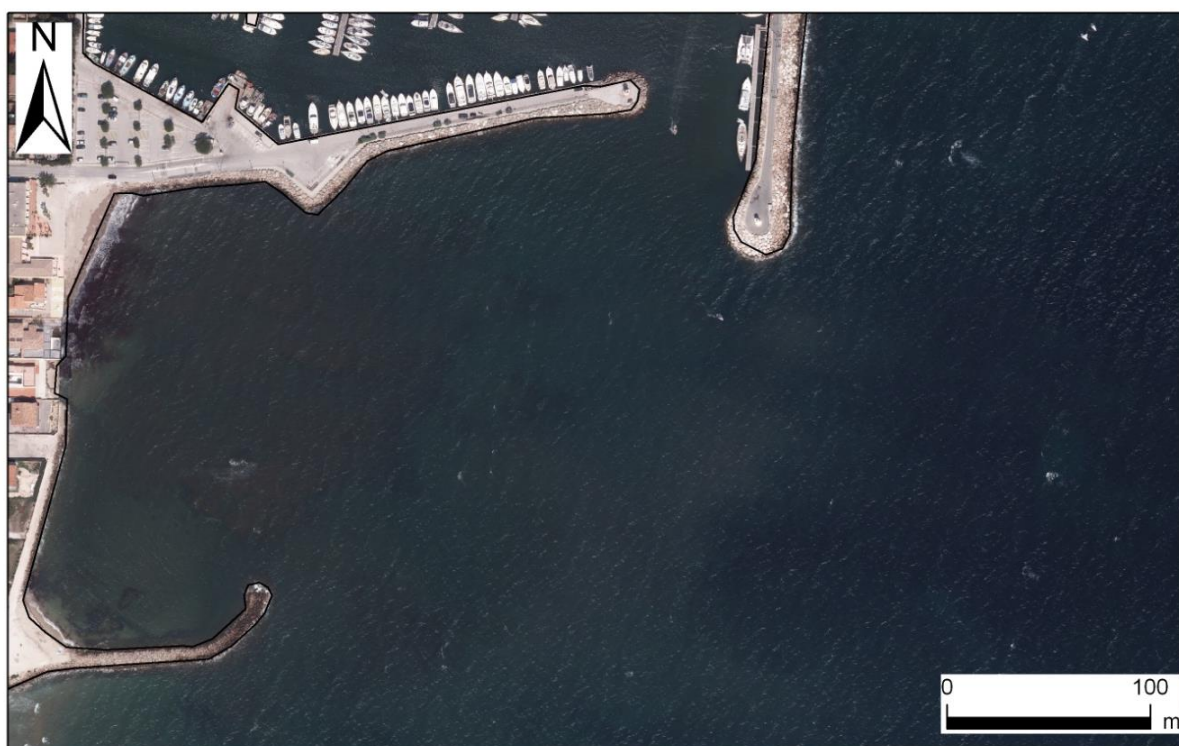


Figure 7. Orthophotographie de 2011 fournie par la ville d'Hyères utilisée pour la réalisation de la cartographie.

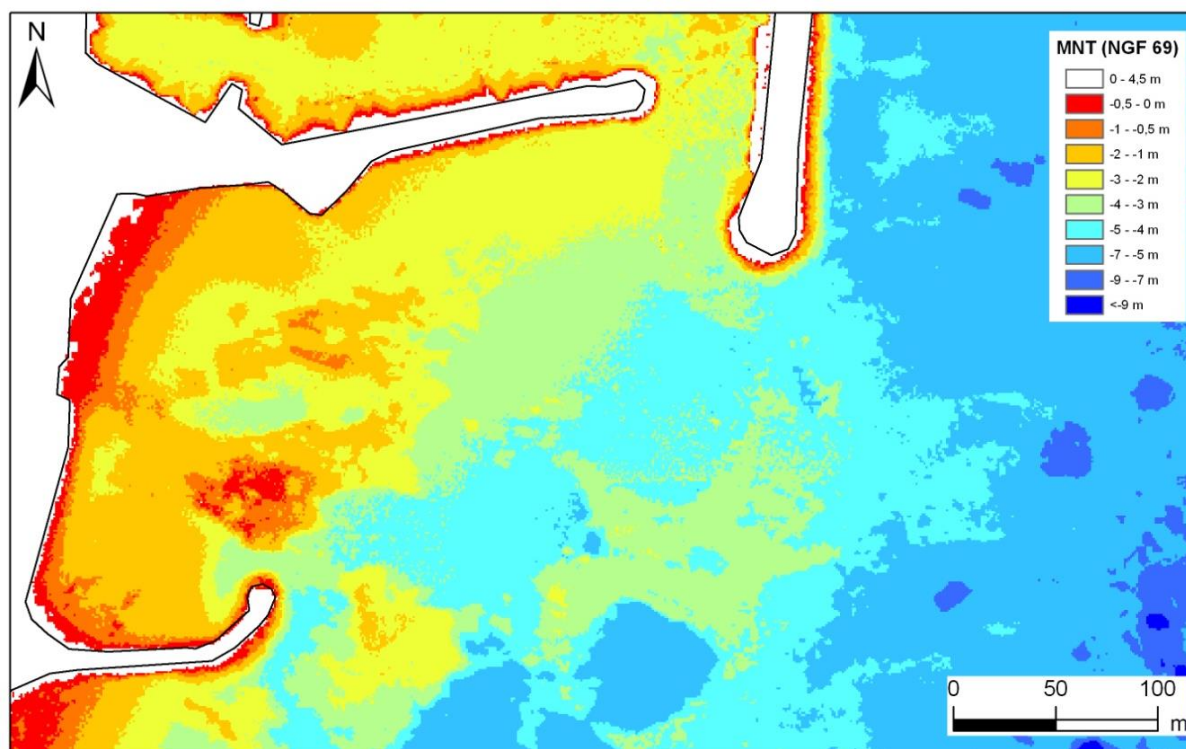


Figure 8. Modèle Numérique Litto3D® (SHOM, IGN)

Mission de vérité terrain

Deux plongeurs simultanés en plongée libre et/ou scaphandre (si les conditions de visibilité ne permettaient pas de voir le fond), muni chacun d'un GPS Mobile Mapper Pro dans une boîte étanche flottant en surface, ont évolué sur les différents secteurs. Les positions de leurs évolutions étaient enregistrées toutes les secondes. Une montre synchronisée avec l'horloge du GPS leur permettait de noter à la seconde près les différentes observations :

- limites entre deux habitats : herbier/sable, herbier/matte morte
- zones d'habitats homogènes
- taches isolées d'herbier de posidonie en notant leur caractéristique de taille
- espèces protégées : *Pinna nobilis*, *Zostera noltei*, *Cymodocea nodosa*.

Le travail d'observations sur le terrain a été réalisé lors de deux journées d'observations (05/09/2014 et 15/10/2014) sur un parcours total de 4.4 km, soit 1.7 km le 05/09/2014 dont 1.2 km de parcours vidéo et 2.7 km le 15/10/2014 (Figure 9). Malgré la visibilité très réduite (moins de 2 m lors de la journée du 05/09/2014 et de moins de 1 m lors de la journée du 15/10/2014), l'effort très important d'investigation a permis de couvrir la

totalité de la zone sous l'emprise du futur ouvrage et de la zone située à moins de 30 m du futur ouvrage. Entre le rivage et le parcours d'observation le plus au large de l'anse, 50 % des fonds ont été observés *in situ* (Figure 9).

Lors des parcours réalisés en surface le 05/09/2014, une caméra «gopro » installée sous le GPS a permis d'enregistrer des vidéos du fond sur un linéaire beaucoup plus long que ce qu'aurait pu réaliser un opérateur devant noter l'ensemble des observations effectuées. Le post traitement de ces vidéos avec la trace GPS a permis d'obtenir des séquences vidéos parfaitement géoréférencées qui ont servi à l'interprétation de la nature des fonds. De plus ces vidéos géoréférencées garderont la mémoire de la nature et de l'état des fonds avant travaux. La Figure 9 (ligne noire) présente l'ensemble des parcours ayant une vidéo géoréférencées.

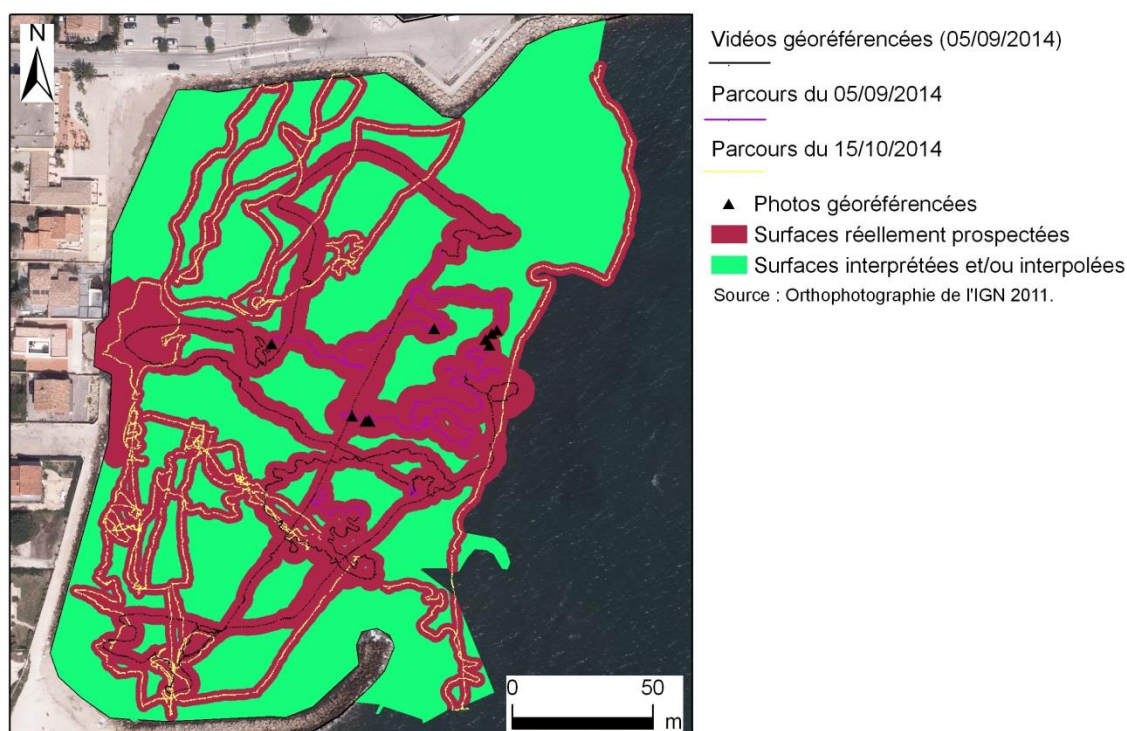


Figure 9. Parcours d'observations des plongeurs et des vidéos géoréférencées lors des missions du 05/09/2014 et du 15/10/2014 et surfaces réellement prospectées en fonction de la visibilité.

Traitement des données issues des vérités terrain

L'ensemble des observations et/ou vidéo sont post traités afin d'obtenir des données sur la nature du fond géoréférencées superposables, à l'aide d'un SIG, à l'orthophotographie. La cartographie dans les 49% non prospectée *in situ* est complétée par interprétation de l'orthophotographie et par interpolation des zones cartographiées adjacentes.

La Figure 10 présente un indice de confiance donné pour chaque polygone dessiné :

- 1 : nature du type de fond certaine et contour certain ;
- 2 : nature du type de fond certaine et contour incertain ;
- 3 : nature du type de fond incertain et contour incertain.

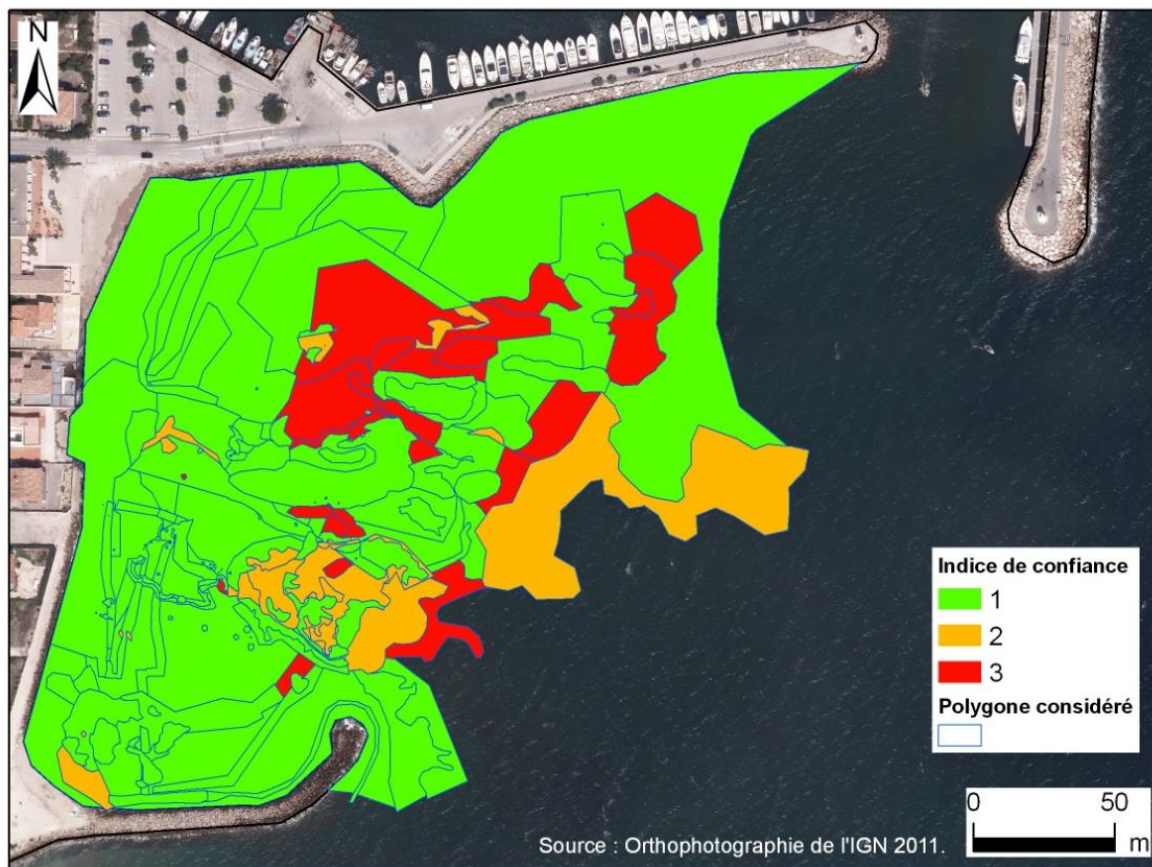


Figure 10. Indice de confiance de l'interprétation du type de fond.

La précision du positionnement des entités cartographiées sont optimales lorsque : (i) les conditions de houles et de vent sont faibles afin de travailler confortablement dans une faible tranche d'eau, (ii) la visibilité est optimale afin d'avoir une vision plus étendue des entités pour mieux les détourer, (iii) la constellation des satellites est optimale pour assurer une bonne précision des relevés GPS. L'excellence de ces conditions a été difficile à rassembler dans le délai très court imposé par le rendu de l'étude. La Figure 11 mentionne la source des principales données utilisées pour l'interprétation de la nature du type de fond du polygone considéré. La précision du positionnement de la source d'information donne la précision du positionnement du polygone cartographié. Etant donné les conditions de travail précitées, la précision du positionnement des polygones ayant une source d'interprétation « Litto3D » ou « Orthophotographie » peut être considérée

submétrique et celle des polygones ayant une source d'interprétation « GPS » de l'ordre de 1 à 3 m.

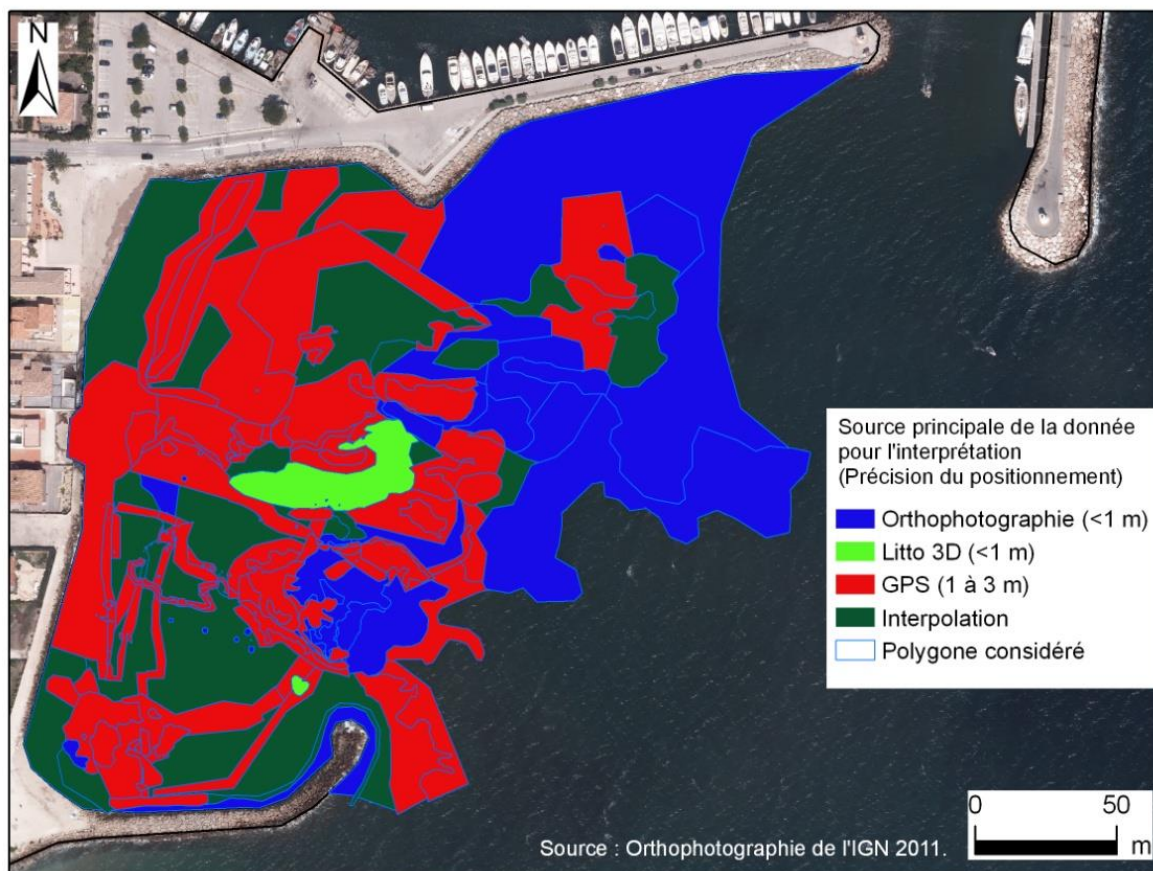


Figure 11. Origine de la source principale d'information qui a permis d'interpréter le type de fond et donne la précision du positionnement des polygones considérés.

2.2. Paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie

2.2.1. Localisation des stations de mesures des paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie

Des mesures de paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie ont été réalisées sur 3 stations (Figure 12). Une station est localisée dans une petite tache d'herbier proche du futur ouvrage (station 5), une station au niveau de l'herbier au pied du récif barrière fossile (station 4) et une station plus éloignée vers le large où l'herbier devient continu.

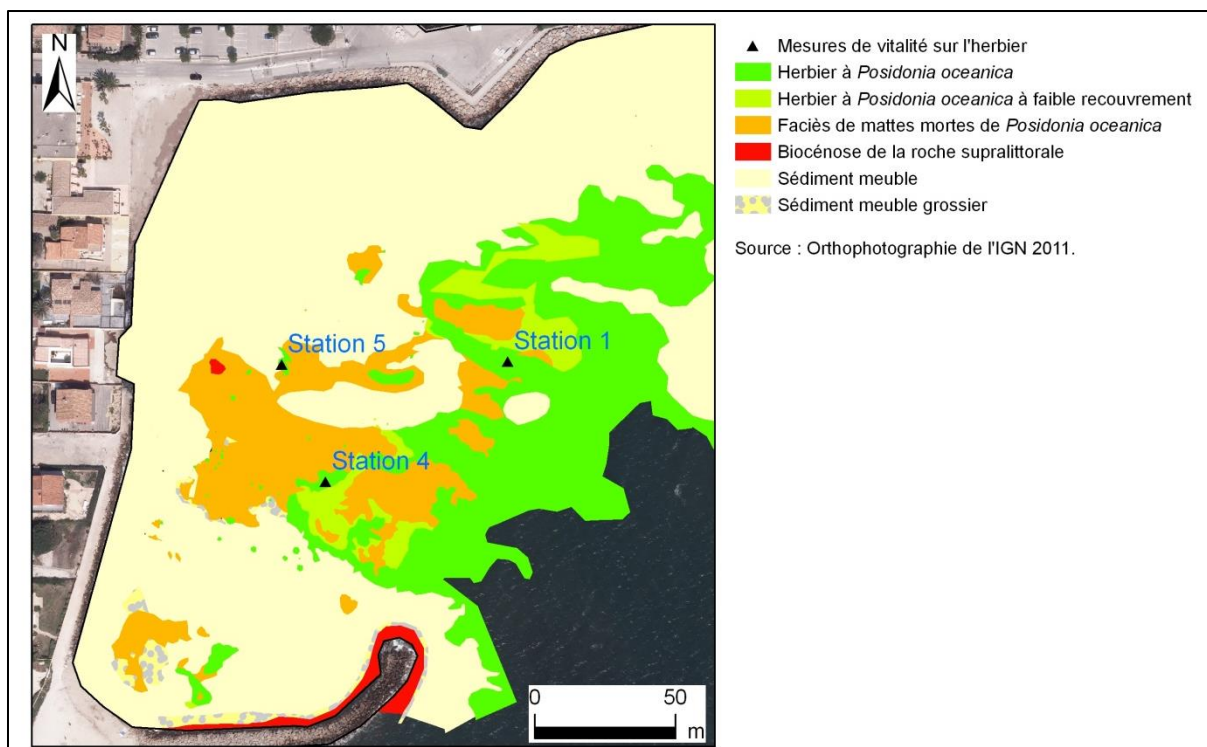


Figure 12. Localisation des stations de mesures des paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie.

2.2.2. Densité de faisceaux

La densité de l'herbier de posidonie correspond au nombre de faisceaux de posidonie présents par unité de surface, généralement le mètre carré (en dehors des intermattes). Celle-ci varie en fonction de la profondeur et des conditions du milieu (lumière, type de substrat où l'herbier est implanté). Du fait de l'intensité lumineuse élevée près de la surface, un herbier présentera des valeurs de densité très élevées dans des secteurs superficiels, alors qu'elles seront beaucoup plus faibles en profondeur (limite inférieure) ou dans des zones présentant une turbidité élevée (Pergent *et al.*, 1995 actualisé dans Pergent, 2007).

La densité a été mesurée à l'aide de quadrats de 20 cm x 20 cm (un quadrat de 20 cm de côté est la surface minimale garantissant la représentativité de la mesure d'après Panayotidis *et al.*, 1981). Cinq mesures ont ainsi été réalisées pour chaque station de façon aléatoire (autour du point de balisage de la station, hors intermattes).

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 (Pergent, 2007). En effet, la variabilité du facteur densité est expliquée à 54% par la profondeur (qui intègre également la pénétration de la

lumière). Les 46% de variabilité restant sont liés à d'autres paramètres comme la turbidité moyenne, la pollution, l'hydrodynamisme ou la nature du substrat (Pergent-Martini, 1994).

Tableau 1. Classification des densités au m² de l'herbier de posidonie en fonction de la profondeur (profondeur en mètres). La densité d'un herbier est classée en « très bonne », « bonne », « moyenne », « médiocre » ou « mauvaise » (Pergent, 2007).

Profondeur (m)	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
1	>1195	1195-964	964-732	732-501	<501
2	>1126	1126-903	903-679	679-456	<456
3	>1061	1061-846	846-630	630-415	<415
4	>1000	1000-792	792-585	585-377	<377
5	>942	942-742	742-543	543-343	<343
6	>887	887-696	696-504	504-312	<312
7	>836	836-652	652-468	468-284	<284
8	>788	788-611	611-435	435-259	<259
9	>742	742-573	573-404	404-235	<235
10	>699	699-538	538-376	376-214	<214
11	>659	659-504	504-350	350-195	<195
12	>621	621-473	473-325	325-177	<177
13	>585	585-444	444-303	303-161	<161
14	>551	551-416	416-282	282-147	<147
15	>519	519-391	391-262	262-134	<134
16	>489	489-367	367-244	244-122	<122
17	>461	461-344	344-227	227-111	<111
18	>434	434-323	323-212	212-101	<101
19	>409	409-303	303-197	197-92	<92
20	>385	385-285	285-184	184-83	<83
21	>363	363-267	267-172	172-76	<76
22	>342	342-251	251-160	160-69	<69
23	>322	322-236	236-149	149-63	<63
24	>304	304-221	221-139	139-57	<57
25	>286	286-208	208-130	130-52	<52
26	>269	269-195	195-121	121-47	<47
27	>254	254-184	184-113	113-43	<43
28	>239	239-173	173-106	106-39	<39
29	>225	225-162	162-99	99-36	<36
30	>212	212-152	152-92	92-32	<32
31	>200	200-143	143-86	86-30	<30
32	>188	188-135	135-81	81-27	<27
33	>178	178-127	127-76	76-24	<24
34	>167	167-119	119-71	71-22	<22
35	>158	158-112	112-66	66-20	<20
36	>148	148-105	105-62	62-18	<18
37	>140	140-99	99-58	58-17	<17
38	>132	132-93	93-54	54-15	<15
39	>124	124-87	87-51	51-14	<14
40	>117	117-82	82-47	47-13	<13

2.2.3. Déchaussement

Le lacis des rhizomes et les feuilles de la posidonie constituent un piège à sédiment (Molinier et Picard, 1952). Les espaces entre les rhizomes vont, en se comblant de sédiments, constituer la matte. Les rhizomes de posidonie sont caractérisés par une croissance horizontale (rhizomes plagiotropes) et/ou verticale (rhizomes orthotropes). 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 et permet à la plante de lutter contre l'enfouissement lié à la sédimentation. Si l'accumulation des sédiments est insuffisante pour compenser l'allongement des rhizomes orthotropes (et *a fortiori* si les courants lessivent la matte et provoquent le départ du sédiment), il y a déchaussement des rhizomes. Ces rhizomes déchaussés deviennent fragiles, ils s'écroulent, se brisent et l'herbier est alors détruit (Boudouresque et Meinesz, 1982). Les rhizomes déchaussés sont particulièrement vulnérables aux ancrages et au chalutage.

L'observation du déchaussement permet donc d'apprécier rapidement et assez précisément l'hydrodynamisme d'une zone et les déplacements sédimentaires qui y ont lieu. La mesure du déchaussement des rhizomes est réalisée selon les conventions définies par Boudouresque *et al.* (1980 ; Figure 13) :

- pour les rhizomes plagiotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la partie inférieure des rhizomes ;
- pour les rhizomes orthotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la base des feuilles, distance à laquelle on soustrait 2 cm.

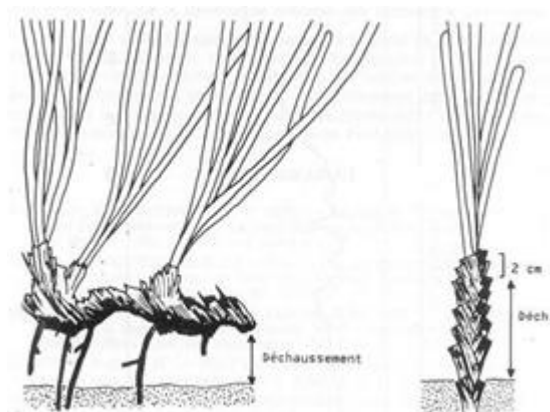


Figure 13. Définition de la hauteur de déchaussement des rhizomes de posidonie. A gauche, rhizome plagiotope ; à droite, rhizome orthotope (d'après Boudouresque *et al.*, 1980).

Une échelle d'évaluation du déchaussement (faible, moyen, important) est proposée dans le Tableau 2 (Charbonnel *et al.*, 2000). Dans le cadre de la présente étude, 10 mesures de déchaussement (1 mesure = 1 rhizome) ont été réalisées dans chaque station.

Tableau 2. Echelle d'évaluation du déchaussement (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

2.2.4. Orientation des rhizomes

En limite d'herbier ou en bordure des taches de posidonie, la présence de nombreux rhizomes plagiotropes traçants est un indice de bonne vitalité de l'herbier, car elle traduit une tendance à la progression. 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 une pression d'ancrage répété, qu'elle soit passée ou présente (Poulain, 1996). Cette réponse peut passer inaperçue si l'on se contente uniquement d'étudier la macrostructure de l'herbier.

Cinq mesures de pourcentage de rhizomes plagiotropes ont été réalisées dans chaque station. Une mesure correspond au comptage sur 10 rhizomes, du nombre de plagiotropes et d'orthotropes, permettant de calculer un pourcentage de rhizomes plagiotropes. Un pourcentage de rhizomes plagiotropes compris entre 0 et 10 est considéré comme faible, entre 11 et 29 comme moyen, et entre 30 et 100 comme fort.

3. Cartographies et observations

3.1. Cartographie générale des habitats et des espèces

La cartographie réalisée (Figure 14) a permis d'appréhender le patrimoine naturel marin de l'anse de la Potinière. Nous avons distingué 4 secteurs : ① la zone inscrite sous l'emprise directe du futur ouvrage, ② une zone de 10 m autour de l'emprise du futur ouvrage, ③ une zone de 30 m autour de l'emprise du futur ouvrage et ④ l'anse de la Potinière au-delà des 30 m autour de la zone d'emprise.

Les zones de 10 m et 30 m correspondent à des recommandations d'éloignement minimal de la posidonie par rapport à l'emprise d'un futur ouvrage en mer. Ceci afin de limiter les risques de destruction de l'herbier par impact direct lors des travaux (recouvrement, destruction par les engins travaillant dans la zone) ou indirect (turbidité générée par les travaux, rupture de l'équilibre sédimentation/accrétion de la posidonie générée par les éventuelles modifications de courant engendré par l'ouvrage). La recommandation de 10 m est préconisée par Boudouresque *et al.* (2006) ; cette valeur est revue à la hausse (25 à 30 m) fort de l'expérience acquise dans l'étude sur le suivi de l'herbier de posidonie suite aux travaux du prolongement de la digue du port de Sausset les Pins (Bonhomme *et al.*, 2010).

① Sous l'emprise directe du futur ouvrage, il n'a pas été observé de taches d'herbier de posidonie, ni d'espèces protégées, ni d'espèces invasives lors des missions du 05/09/2014 et 15/10/2014.

② Dans la zone située à moins de 10 m autour de l'emprise du futur ouvrage, nous avons observé une tache d'herbier de posidonie d'environ 20 cm de diamètre. Elle est située dans une zone de sable. Les feuilles très courtes et l'enfouissement sous le sable de la base de ses rhizomes traduisent une sédimentation récente autour de cette tache. La vitalité de cette zone d'herbier est réduite et sa pérennité dépendra de sa capacité à croître verticalement plus rapidement que la sédimentation actuelle. Par conséquent, toute sédimentation supplémentaire dans cette zone peu gravement nuire à la pérennité de cette petite tache d'herbier. Il est probable que la sédimentation observée provienne des rechargements de plage effectués depuis 2009 et notamment des importants volumes déposés en 2014. Comme le montre le profil topographique de la Figure 17, cette tache est située topographiquement entre le rivage et la remontée correspondant au récif barrière fossile de posidonie. Par conséquent elle est située dans une zone basse, de dépression très favorable à une sédimentation. On considère qu'une sédimentation de plus de 5-

7cm/an détruira l'herbier le plus vigoureux. En deçà, l'herbier peut se maintenir si sa vitalité est bonne. Ce qui n'est pas le cas de cette tache d'herbier déjà en partie ensablée.

③ Dans la zone située entre 10 et 30 m de distance autour de l'emprise du futur ouvrage nous avons observé :

- 4 à 5 taches d'herbier de posidonie ayant entre 30 cm et 1,5 m de diamètre. Ces taches sont également situées en position topographique basse. Elles sont donc potentiellement très sujettes à être impactées par de nouvelles sédimentations. La tache la plus proche de la zone 10 m présente les mêmes caractéristiques de faible vitalité et de pérennité que la tache décrite dans le point ②. Les taches d'herbier les plus éloignées présentent globalement une bonne vitalité ;
- 2 grandes nacres (*Pinna nobilis*) de 16 cm de haut et 17 cm de large pour la première et 15 cm de haut et 15 cm de large pour la seconde ;
- 2 petites taches de *Zostera noltei* et de *Cymodocea nodosa*. La tache située dans le sable est potentiellement plus menacée par des éventuels remaniements sédimentaires de par sa situation topographique basse. La tache la plus au Nord, implantée sur de la matre morte qui forme un léger relief au-dessus du sable, sera moins rapidement sujette à des ensablements.
- 1 zone de matre morte de plus de 450 m² qui abrite *Caulerpa taxifolia*, très développée, et *Caulerpa cylindracea*.

④ Dans la zone au-delà des 30 m autour de l'emprise de l'ouvrage :

- nous avons observé de nombreuses taches d'herbier de posidonie de moins de 5 m². Et c'est à plus de 30 m, soit plus de 60 m de l'emprise du futur ouvrage, que nous rencontrons un herbier continu (Figure 14) ;
- au Sud-Est de la zone, à environ 70 m du futur ouvrage, un récif barrière déjà décrit par Nieri *et al.* (1992) est observé. La Figure 17 démontre qu'il s'agit en 2014 d'un récif barrière dont la partie topographiquement la plus haute est quasiment dépourvu d'herbier vivant. Il s'agit alors d'un récif barrière fossile ou en cours de le devenir ;
- plusieurs autres grandes nacres *P. nobilis* sont rencontrées ;
- une autre petite tache de *Zostera noltei* est présente ;
- de grandes surfaces de matre morte couverte plus ou moins abondamment par *Caulerpa taxifolia* et *C. cylindracea* sont également présentes.

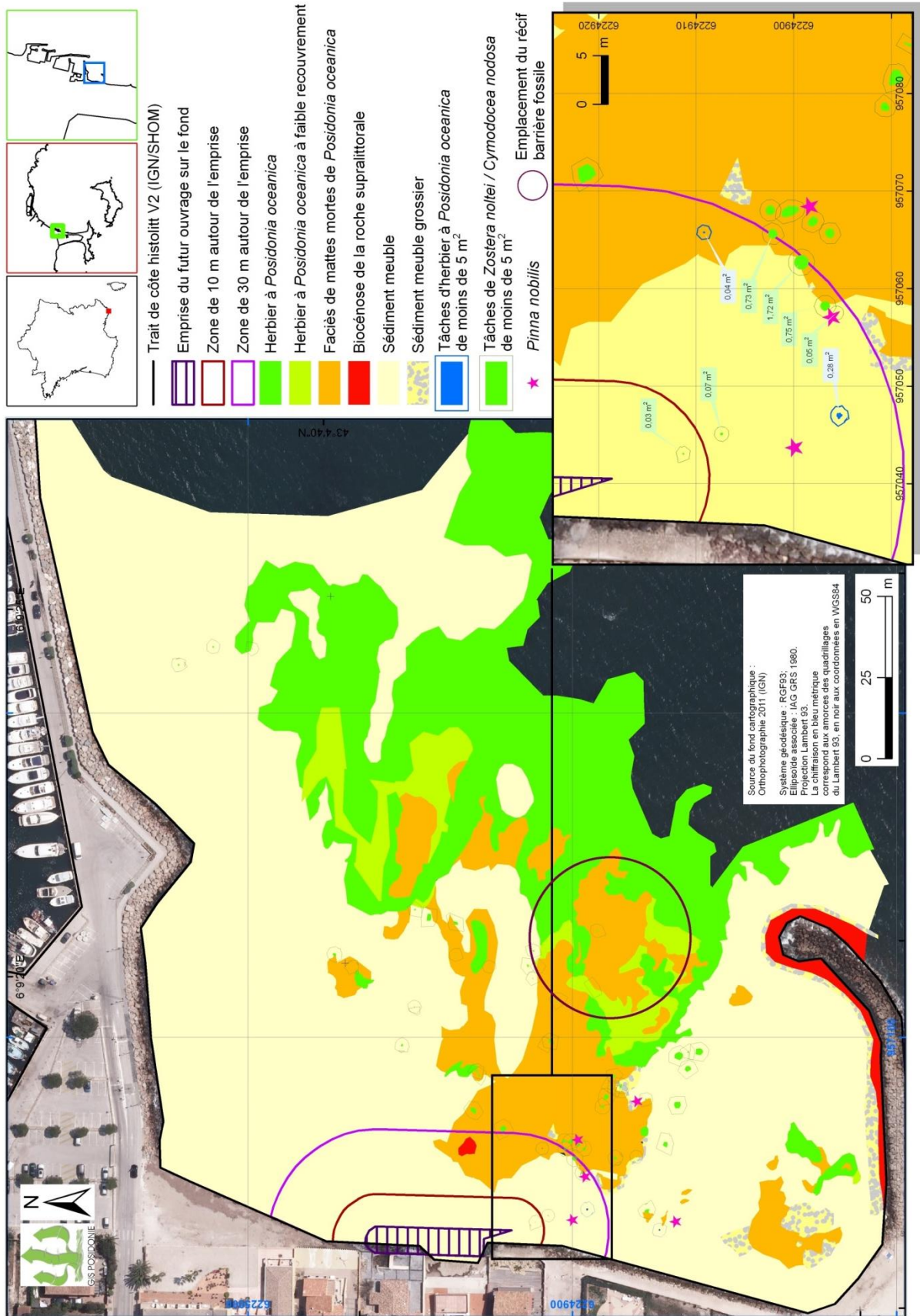


Figure 14. Cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica* et des espèces protégées de l'anse de la Potinière.

3.2. Espèces protégées rencontrées

3.2.1. L'herbier de posidonie *Posidonia oceanica*

Paramètre de vitalité

Les observations réalisées dans l'anse de la Potinière indiquent que l'herbier de posidonie est très épiphyté et fortement envasé comme en témoigne la présence de sédiments fins et vaseux sur les feuilles (Figure 15).



Figure 15. L'herbier de Posidonie dans l'anse de la Potinière est envasé et les feuilles sont épiphytées.

La densité moyenne des faisceaux de posidonie a été calculée sur 3 stations situées dans l'anse de la Potinière (Tableau 3). Les valeurs obtenues ont été interprétées selon la classification de Pergent (2007) qui prend en compte la profondeur des mesures.

Les stations 1 et 5 ont des densités de faisceaux classifiées de médiocre. La station 1 est située dans la zone de mouillage forain ; la station 5 correspond à une tache d'herbier isolée sur un substrat de matre morte. La station 4, située en arrière du récif barrière fossile, présente quant à elle des densités de faisceaux plus élevées, classifiées comme bon.

Tableau 3. Densité moyenne de faisceaux de posidonie par mètre carré et classification selon Pergent (2007) mesurée sur 3 stations.

Station	Profondeur (m)	Densité moyenne (nb fais/m ²)	Ecart type	Classification (Pergent, 2007)
Station 1	-2.9	455.0	60.0	Médiocre
Station 4	-2	941.7	103.7	Bon
Station 5	-2.5	605.0	55.7	Médiocre

Les mesures de déchaussement des faisceaux de posidonie sur les 3 stations indiquent que le déchaussement est faible selon Charbonnel *et al.* (2000) (Tableau 4). Les très faibles valeurs obtenues à partir des mesures indiquent que l'herbier a tendance à être enfoui. En effet pour 51% des mesures réalisées, les faisceaux étaient totalement recouverts de sédiment. Les importants volumes de sédiment déposés pour le rechargement des plages et dans la zone des futurs travaux expliquent en grande partie ces résultats. En effet, lors des tempêtes, ces sédiments sont emportés par les vagues et se déposent sur l'herbier de posidonie situé dans l'anse.

Tableau 4. Déchaussement moyen (en cm) des faisceaux de posidonie et interprétation selon Charbonnel *et al.* (2000) mesurée sur 3 stations.

Station	Déchaussement (cm)	Interprétation (Charbonnel <i>et al.</i> , 2000)
Station 1	0.4	Déchaussement faible
Station 4	1.0	
Station 5	0.8	

Les mesures du pourcentage de rhizomes plagiotropes au niveau des 3 stations sont présentées dans le Tableau 5. Le pourcentage de rhizomes plagiotropes est faible à la station 1 (10%), moyen à la station 5 (13.3%) et fort à la station 4 (51.7%).

Tableau 5. Pourcentage de rhizomes plagiotropes dans les 3 stations.

Station	Pourcentage de rhizomes plagiotropes	Interprétation
Station 1	10.0	Faible
Station 4	51.7	Fort
Station 5	13.3	Moyen

Les plongées de vérité terrain ont permis de constater la présence de la caulerpe invasive *Caulerpa taxifolia* qui colonise les zones de matte morte de posidonie de l'anse de la Potinière (Figure 16). Comme le montre la Figure 16, *C. taxifolia* est par endroit très recouvrant. Bien que moins visible, *C. cylindracea* est également présente sur ces zones de matte mortes.



Figure 16. Présence de la caulerpe *Caulerpa taxifolia* sur les zones de matte morte de posidonie de l'anse de la Potinière.

Récif barrière fossile

L'observation de la morphologie, de la topographie des fonds (Figure 8) et de la nature des fonds (Figure 14) permet de démontrer la présence d'un récif barrière fossile ou en passe de le devenir (Figure 17) au Sud-Est du futur ouvrage. En effet, parallèlement au rivage, une remontée des fonds constituée de matte morte plus ou moins recouverte d'herbier vivant est observée. Dans les parties les plus hautes, la matte morte est quasi totalement dépourvue d'herbier vivant. Il s'agit d'une configuration type d'un récif barrière fossile ou en passe de le devenir. De l'herbier auparavant présent sur les points les plus haut de la matte morte (dont le plafond est située entre -0,5m (NGF69) et 0 m (NGF69)) devait émerger. Aujourd'hui cette herbier, topographiquement le plus haut, a quasiment totalement disparu. Il est à noter que lors des observations, les feuilles étaient particulièrement courtes et donc les îlots d'herbier restant n'émergeaient pas à la surface.

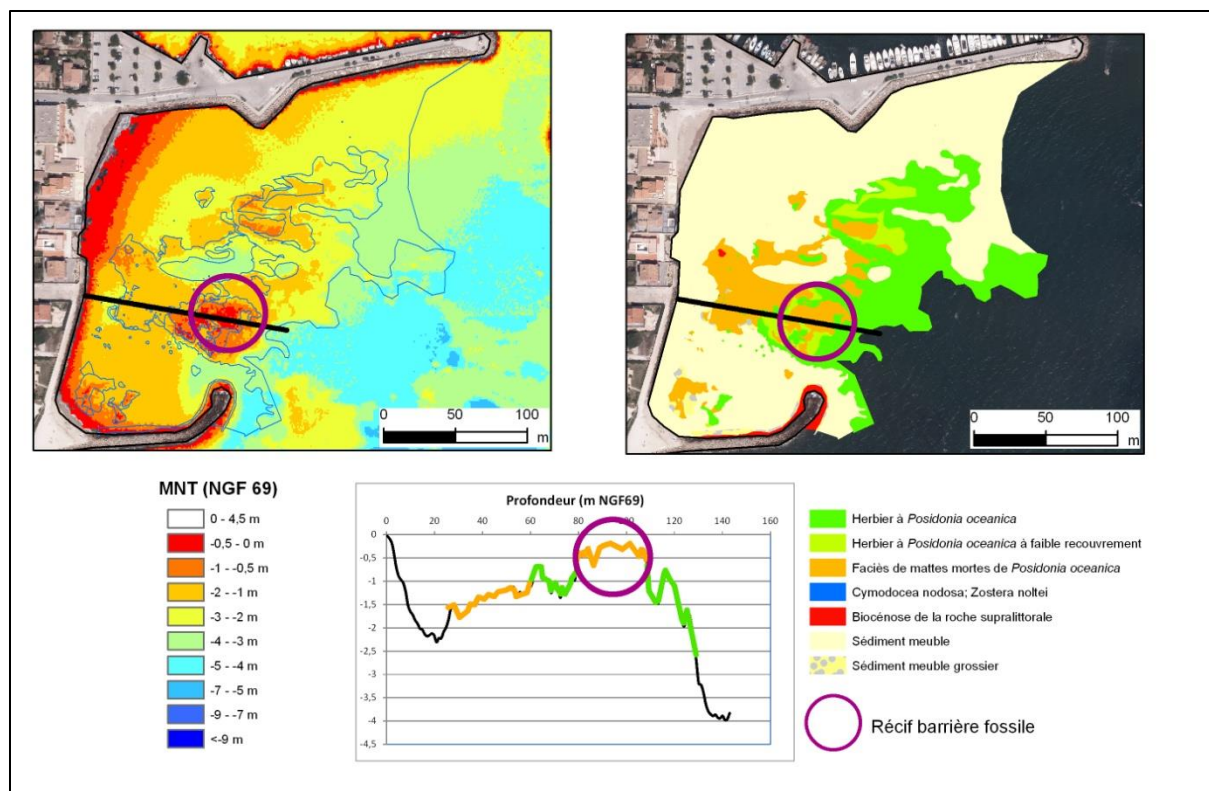


Figure 17. Identification d'un récif barrière fossile dans l'anse de la Potinière (source bathymétrie : litto3D, IGN SHOM).

3.2.2. Les prairies de zostère *Zostera noltei* et de cymodocée *Cymodocea nodosa*

Zostera noltei est une magnoliophyte marine. Cette espèce euryhaline et eurytherme peut aussi subir d'importantes variations d'intensité lumineuse (Bernard, 2007). Elle est donc considérée comme une espèce adaptée aux conditions difficiles. L'espèce est présente dans les biocénoses de type Lagunaire Euryhaline et Eurytherme (LEE) ou dans les Sables Vaseux de Mode Calme (SVMC) (Pérès et Picard, 1964 ; Bernard, 2007). L'espèce vit dans les petits fonds infralittoraux et dans la zone intertidale (Curiel *et al.*, 1996).

Ses rhizomes sont minces et rampants, ils portent des faisceaux de 3 à 5 feuilles rubanées étroites d'environ 2 mm de large et mesurant 10 à 30 cm de long. A la base, une gaine foliaire plus épaisse, de couleur verte sur sa face dorsale et incolore sur sa face ventrale, et fendue sur toute sa longueur, enveloppe les feuilles (Bernard, 2007). Les rhizomes croissent horizontalement d'environ 35 à 70 cm par an, ce qui est deux fois plus rapide que la croissance verticale. *Z. noltei* est une espèce dite pseudopérennante selon la définition de Meinesz (1979) : elle peut être présente toute l'année grâce à la croissance apicale de ses rhizomes. Cependant, aucune partie de l'appareil végétatif ne persiste toute l'année.

Son aire de répartition est relativement large, puisqu'on la retrouve en Atlantique Nord, de la Suède à la Mauritanie. L'espèce est également présente en Méditerranée et en Mer Noire, mais de façon plus rare, où elle est restreinte aux lagunes littorales et à certaines baies abritées (Plus *et al.*, 2001 ; Bernard, 2007). Dans le Var, cette espèce a été recensée sur 3 sites : la lagune du Brusç, la baie du Lazaret et le golfe de Saint Tropez (Bernard *et al.*, 2001 ; Bernard *et al.*, 2004a ; Bernard *et al.*, 2004b ; Ruitton *et al.*, 2007 ; Rouanet, 2010 ; Andromède Océanologie, 2011 ; obs. pers., 2014).

Zostera noltei est une espèce qui figure sur la liste rouge IUCN (International Union for Conservation of Nature), en tant que LC (= Least Concern : préoccupation mineure ; Short *et al.*, 2014). Elle est également protégée en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) par l'arrêté du 9 mai 1994 relatif à la liste des espèces végétales protégées en région PACA. Elle est aussi protégée dans les Pays-de-la-Loire par l'arrêté du 25 janvier 1993 et en Basse-Normandie par l'arrêté du 27 avril 1995.

Cymodocea nodosa est une magnoliophyte marine. Elle forme de vastes prairies dans l'étage infralittoral. Ses peuplements sont généralement localisés à faible profondeur, dans des sites abrités, en particulier dans les fonds de baie. On la rencontre dans les biocénoses des Sables Vaseux de Mode Calme (SVMC), des Sables Fins Bien Calibrés (SFBC) (Pérès et Picard, 1964). Cependant, des prairies profondes peuvent exister.

L'appareil végétatif de la cymodocée comporte un rhizome enfoui dans le sédiment, portant des racines et des feuilles étroites rassemblées en faisceaux. Ses feuilles rubanées vert clair sont étroites (3 à 4 mm de largeur, 7 à 9 nervures longitudinales parallèles), allongées (jusqu'à 40 cm), avec une base dépourvue d'écaille. L'extrémité présente des bords dentelés, visibles à la loupe. Cette espèce a un cycle saisonnier marqué, puisque les feuilles tombent en hiver et repoussent au printemps, et les rhizomes persistent plusieurs années. Sa multiplication se fait, soit de manière asexuée, par l'intermédiaire de fragments de rhizome, soit par reproduction sexuée, grâce à des fleurs mâles et femelles se trouvant sur des individus différents (plante dioïque).

Cymodocea nodosa bénéficie d'une protection internationale dans la Convention de Berne (annexe I : Espèces végétales strictement protégées) relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel en Europe, depuis 1996. Elle est protégée en France par l'arrêté du 19 juillet 1988 relatif à la liste des espèces végétales marines protégées.

A l'instar de l'herbier de posidonie, les herbiers de zostère et de cymodocée sont vulnérables face aux travaux d'aménagement. Les impacts peuvent être direct par

recouvrement ou indirect par augmentation de la turbidité générée lors des travaux et par modification de l'hydrodynamisme.

3.2.3. Grande nacre *Pinna nobilis*

La grande nacre *Pinna nobilis* est le plus grand bivalve de Méditerranée, sa taille peut atteindre 120 cm (Vicente et Moreteau, 1991 ; Vicente et De Gaulejac, 1993). Cette espèce est endémique de Méditerranée. Elle vit préférentiellement dans l'herbier à *Posidonia oceanica*, mais elle peut également vivre dans les prairies à *Cymodocea nodosa*, sur la matte morte ou sur les sédiments meubles (Garcia-March et Vicente, 2006), à des profondeurs allant de -0,5 m à -60 m (Butler *et al.*, 1993 ; Templado *et al.*, 2004). Elle vit enfoncée dans l'herbier ou le sédiment sur environ le tiers de sa longueur, tenue par son byssus (sécrétion filamenteuse).

Les populations de grande nacre sont particulièrement vulnérables aux ancrages des bateaux : coquilles brisées ou arrachées, altération de l'habitat (herbier de posidonie). En outre, la grande nacre fut longtemps pêchée, à des fins d'ornementation notamment. Les populations ont fortement régressé le long des côtes méditerranéennes et aujourd'hui cette espèce figure dans l'annexe IV de la Directive Habitats 92/43/CEE et est protégée par l'arrêté du 26 novembre 1992 fixant la liste des animaux de la faune marine protégés sur l'ensemble du territoire.

Les risques d'impacts de travaux d'aménagement sur la grande nacre sont avant tout directs par destruction mécanique lors de l'immersion des matériaux ou par la manipulation d'engins de travaux en mer. L'augmentation de la turbidité est également un stress pouvant impacter cette espèce.

3.3. Espèces invasive rencontrées

Caulerpa taxifolia est originaire d'Australie et a été accidentellement introduite en Méditerranée Nord-Occidentale en 1984 (Meinesz et Hesse, 1991), et son expansion géographique a été relativement rapide.

Caulerpa taxifolia est une macrophyte chlorobionte de couleur vert fluorescent, constituée d'un stolon rampant de 1 à 2 mm de diamètre et pouvant atteindre jusqu'à 3 m de longueur, fixé au substrat par de longs crampons en forme de piliers terminés par des rhizoïdes. De ce stolon, partent des frondes dressées, simples ou ramifiées dans un plan,

de 5 à 15 cm de longueur dans les zones tropicales mais qui peuvent atteindre jusqu'à 80 cm de longueur en Méditerranée, même si généralement elles n'excèdent pas 20 à 30 cm. Ces frondes sont pennées, avec de nombreuses pinnules aplaties de 1 mm de large et 10 mm de long, légèrement recourbées vers le haut, et disposées de façon opposée le long de l'axe des frondes. La population méditerranéenne se reproduit uniquement par voie végétative (reproduction asexuée).

Caulerpa taxifolia est en mesure de coloniser presque tous les types de substrats, en particulier la "matte morte" et les herbiers à *Posidonia oceanica* (Boudouresque *et al.*, 1995). Même si la capacité de *C. taxifolia* à éliminer un herbier à *P. oceanica* à bonne vitalité n'a pas été démontrée sur le court terme, les herbiers stressés et dégradés constituent un milieu très favorable pour cette espèce, et elle peut accentuer leur recul (Villèle et Verlaque, 1995). La présence de *C. taxifolia* dans un herbier à *P. oceanica* modifie profondément le fonctionnement de l'écosystème (Ruitton et Boudouresque, 1994 ; Gélin *et al.*, 1998 ; Harmelin-Vivien *et al.*, 1999).

Caulerpa cylindracea est également une macrophyte chlorobionte, introduite en Méditerranée vers 1990, en provenance du Sud-Ouest de l'Australie (Verlaque *et al.*, 2000 ; Durand *et al.*, 2002 ; Verlaque *et al.*, 2003). Son expansion a été extraordinairement rapide, puisqu'elle est aujourd'hui présente dans la plus grande partie de la Méditerranée et même aux îles Canaries (Verlaque *et al.*, 2004, Piazzini *et al.*, 2005).

C. cylindracea est de couleur verte. La fronde est élancée et fixée au substrat par de fins rhizoïdes répartis sur le stolon. Les rhizoïdes mesurent de 1 à 10 mm de longueur et de 0,3 à 0,8 mm de diamètre. Le diamètre du stolon varie de 0,7 à 2 mm. Il porte des axes dressés cylindriques, de 2 à 19 cm de hauteur (11 cm en moyenne), couverts de ramules latéraux courts, simples et orientés vers le haut. La largeur totale de la fronde varie de 3 à 10 mm. Les ramules, jusqu'à 7 mm de longueur et 3 mm de diamètre, varient de sphériques plus ou moins comprimés latéralement à cylindriques en forme de massue. Cette espèce se reproduit à la fois par voie végétative mais aussi par voie sexuée permettant ainsi un brassage et une diversité génétique.

Elle est présente depuis l'infralittoral au circalittoral et colonise aussi bien des substrats meubles (détritique côtier, etc.) que durs (roches infralittorales à algues photophiles, coralligène). Elle est également observée sur la matte morte de posidonie et en limite d'herbier de posidonie.

Le principal impact que peut causer des travaux d'aménagement est la propagation de ces deux espèces invasives. *Caulerpa cylindracea* a aujourd'hui colonisé le littoral

méditerranéen français, et donc la rade d'Hyères, sur une large tranche bathymétrique. Son confinement apparaît inutile. Par contre *Caulerpa taxifolia* n'est plus présente que dans certaines zones du littoral provençal, et une régression de son expansion avait été observée ces dernières années. Son confinement et la limitation de sa propagation apparaissent indispensables.

4. Discussion et recommandations

4.1. Evaluation sectorisée des risques

Au regard des résultats de la cartographie de la nature des fonds, de la présence d'espèces protégées et invasives dans l'anse de la Potinière, et des impacts que peuvent causer des travaux d'aménagement sur ces espèces, une évaluation sectorisée des risques peut être déterminée.

Zone d'emprise du futur ouvrage :

En l'absence de magnoliophytes et de grande nacre sous l'emprise du futur ouvrage, il n'existe aucun risque d'impact direct par recouvrement et indirect par augmentation de la turbidité et par modification de la courantologie.

Zone de 10 m autour de l'emprise du futur ouvrage :

La présence d'une tache d'herbier de posidonie de 20 cm de diamètre dans cette zone indique qu'un risque d'impact direct existe par destruction physique si les engins de chantier évoluent en mer dans le secteur de la tache durant les travaux.

Des risques d'impacts indirects existent sur cette tache d'herbier de posidonie, par augmentation de la turbidité pendant les travaux et par modification de la courantologie à l'issu des travaux pouvant entraîner de nouveaux remaniements sédimentaires. Ceci d'autant plus vrai que la vitalité de cette tache d'herbier est faible et qu'elle était à la date de nos observations déjà très ensablée.

Zone de 30 m autour de l'emprise du futur ouvrage :

La présence de plusieurs taches d'herbier de posidonie, de deux taches d'herbiers de cymodocée/zostère et de deux individus de grande nacre dans cette zone indique qu'un risque d'impact direct existe par destruction physique si les engins de chantier évoluent en mer durant les travaux dans la zone de présence de ces espèces. La présence, dans cette zone, de matte morte de posidonie colonisée par les deux espèces de caulerpes invasives et notamment par *Caulerpa taxifolia*, indique la présence d'un risque direct de dissémination si les engins de chantier opèrent depuis la mer avec un contact direct sur les zones de matte morte.

Des risques d'impacts indirects existent sur les magnoliophytes situées dans la zone, par augmentation de la turbidité pendant les travaux et par modification de la courantologie à l'issu des travaux pouvant entraîner de nouveaux remaniements sédimentaires.

Au-delà de la zone de 30 m autour de l'emprise du futur ouvrage :

L'impact direct des engins de chantier est *a priori* absent dans cette zone à plus de 30 m de l'ouvrage.

Des risques d'impacts indirects existent sur les magnoliophytes situées dans l'anse, par augmentation de la turbidité pendant les travaux et par modification de la courantologie à l'issu des travaux pouvant entraîner de nouveaux remaniements sédimentaires. Une attention particulière devra être portée du fait de la présence d'un récif-barrière fossile dans l'anse de la Potinière.

4.2. Recommandations

Les recommandations formulées dans ce rapport sont présentées selon la nature des risques (directs/indirects).

4.2.1. Impacts directs

➤ Impact direct de l'ouvrage

Destruction par recouvrement des herbiers de posidonie, de cymodocée/zostère et de grande nacre sous l'emprise du futur ouvrage

Secteur concerné	➔ zone d'emprise du futur ouvrage. En l'absence d'herbiers, de grande nacre et de caulerpes invasives, il n'y a pas d'impact direct de l'ouvrage par recouvrement
Recommandation	➔ il conviendra de s'assurer que la mise en place des matériaux constituant la digue soit correctement réalisée sans dépasser l'emprise théorique de l'ouvrage
Mesure	➔ indication dans le cahier des charges précisant les conditions d'exécution des travaux, la mise en place d'une surveillance sur le chantier afin de s'assurer de la parfaite exécution d'immersion des matériaux

➤ Impact direct des travaux

Destruction physique d'herbiers de posidonie, de cymodocée/zostère et de grande nacre dû à l'évolution des engins de chantier pendant les travaux (si le chantier s'opère depuis la mer)

- Secteur concerné → zones de 10 m et 30 m autour de l'emprise du futur ouvrage
- Recommandation → lors de l'exécution des travaux, il conviendra d'éviter tout contact physique des engins avec le fonds dans les zones à risques (taches d'herbiers, grande nacre)
- Mesures → la mise en œuvre du chantier et le déploiement des engins de chantier seront préférés depuis la terre. La digue piétonnière au Sud peut servir de point d'accès à la zone de chantier
- si cela est techniquement impossible et si les engins doivent opérer depuis la mer, la zone d'évolution des engins devra être réduite à la partie Nord des zones 10 et 30 m (Figure 18)
- une signalisation en surface avec des bouées permettra d'indiquer à l'opérateur des travaux les limites de la zone interdite d'accès

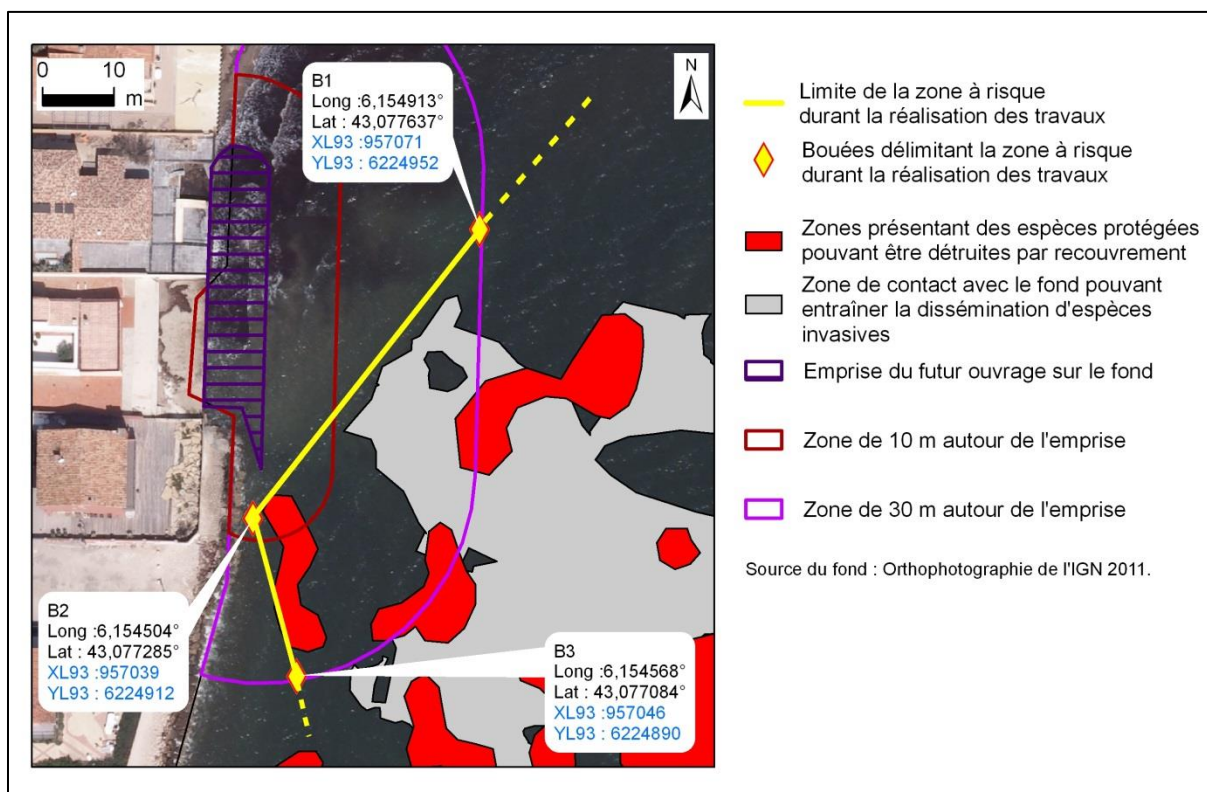


Figure 18. Délimitation et balisage de la zone à risque due à la présence d'espèces protégées et invasives dans les 30 m autour de l'emprise l'ouvrage.

Dissémination de caulerpes invasives

- Secteur concerné → zone de matte morte de posidonie
- Recommandation → éviter tout contact des engins de chantier dans les zones de présence de *Caulerpa taxifolia*, c'est-à-dire sur les zones de matte morte
- Mesures → indication dans le cahier des charges précisant les conditions d'exécution des travaux, les zones en mer proscrites à l'évolution des engins de chantier (Figure 18)
- une signalisation en surface avec des bouées permettra d'indiquer à l'opérateur des travaux les limites de la zone interdite d'accès

4.2.2. Impacts indirects

- Impact indirect de l'ouvrage

Modification des courants dans l'anse de la Potinière

La présence d'un aménagement côtier, même parallèle au littoral, peut modifier localement les houles et les courants, les processus de transports sédimentaires littoraux et les stocks locaux de sédiments mobilisables. Ces éventuels remaniements sédimentaires auront des impacts non négligeables sur les espèces précitées soit par enfouissement, soit par érosion (Boudouresque *et al.*, 2006).

- Secteur concerné → l'ensemble de l'anse de la Potinière
- Recommandation → optimiser la nature et la forme de l'ouvrage pour minimiser les modifications de la courantologie
- Mesures → il paraît important d'anticiper les modifications de courants par l'utilisation de modèles physiques et mathématiques qui intégreront outre les paramètres de houles : (i) la topographie locale de la zone, (ii) la localisation des stocks de sédiments mobilisables et susceptibles d'être remaniés dans le pourtour de l'ouvrage
- indiquer les modalités de nature et forme de l'ouvrage dans le cahier des charges précisant les conditions d'exécution des travaux

Déstabilisation de l'ouvrage dans le temps

Si l'ouvrage ne se maintient pas dans le temps, les blocs constituant l'enveloppe de l'ouvrage seront amenés à être déplacés autour de la zone d'emprise lors de grosses tempêtes, et peuvent potentiellement recouvrir les espèces protégées et générer de la turbidité par remaniement des matériaux du corps de l'ouvrage.

Secteur concerné → zone de l'emprise et zones proches

Recommandation → garantir la stabilité de l'ouvrage par l'utilisation de matériaux de nature et de taille adéquats

Mesures → préciser dans le cahier des charges de l'exécution des travaux que les matériaux employés doivent être de nature et de taille adéquats pour garantir le maintien de l'ouvrage dans le temps

→ s'assurer du respect de la précédente mesure lors de l'exécution des travaux

→ contrôler la résistance de l'ouvrage dans le temps et intervenir le cas échéant.

➤ Impact indirect des travaux

Augmentation de la turbidité

Les travaux vont avoir des impacts indirects sur les herbiers de magnoliophytes car ils peuvent générer des nuages turbides. Ce nuage agit de 3 façons : i) il diminue la transparence de l'eau (et donc la photosynthèse), ii) il se dépose dans les herbiers (hypersédimentation), iii) les sédiments les plus fins sont remis en suspension lors des tempêtes, ce qui diminue la transparence de l'eau sur le long terme (Boudouresque *et al.*, 2006). Ce nuage peut être causé par le choix de la nature des matériaux qui seront immergés, par l'immersion elle-même et par la mise en œuvre depuis la mer des engins réalisant les travaux.

Secteur concerné → l'ensemble de l'anse de la Potinière qui sera plus ou moins impacté en fonction de son éloignement à la zone de travaux

Recommandations → limiter les intrants de particules fines

→ limiter la remise en suspension des particules fines

Mesures → la lumière permet à la posidonie de réaliser la photosynthèse afin d'assurer sa croissance et de constituer pendant la période la plus lumineuse (l'été) des réserves stockées dans les rhizomes pour l'année suivante (Alcoverro *et al.*, 2001). Toute augmentation de la turbidité des eaux durant la période estivale limitera cette

constitution de réserve et mettra en péril la posidonie. Il est donc préférable de réaliser les travaux pendant la période hivernale (entre novembre et mars) sur une durée la plus courte possible

→ afin de limiter les intrants de particules fines, il est souhaitable de laver les blocs de carrière constituant l'enveloppe de la digue. Ce lavage devra être réalisé en s'assurant que les eaux de lavage ne ruissellent pas en mer

→ il est fortement recommandé de ne pas utiliser des matériaux pouvant être remis en suspension dans le corps de l'ouvrage

→ une jupe de confinement¹ devra être mise en place autour de l'ouvrage pour protéger les herbiers de la remise en suspension de sédiments fins sous-jacents à la digue et des éventuels sédiments fins constituant le corps de l'ouvrage.

¹ Une jupe de confinement est constituée d'un filet ancré sur le fond et qui remonte jusqu'à la surface. La maille est suffisamment petite pour contenir les particules les plus fines.

5. Références bibliographiques

- Alcoverro T., Manzanera M., Romero J., 2001. Annual metabolic carbon balance of the seagrass *Posidonia oceanica*: the importance of carbohydrate reserves. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 211: 105-116.
- Alexandre A., Cabaço S., Santos R., Serrao E-A., 2006. Timing and success of reproductive stages in the seagrass *Zostera noltii*. *Aquatic Botany*, 85 : 219-223.
- Andromède Océanologie, 2011. Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA sur la période 1922-2011, Région Provence-Alpes-Côtes d'Azur, France, NPAGE p.
- Astier J.M., 1984. Impact des aménagements littoraux de la rade de Toulon, liés aux techniques d'endigage, sur les herbiers à *Posidonia oceanica*. In : Boudouresque C.V., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 255-259.
- Astruch P., Bonhomme D., Antonioli A., Rogeau E., Goujard A., Di Meglio T., Francour P., Thibaut T., Verlaque M., Ruitton S., 2010. Inventaire et Cartographie des Habitats naturels, des espèces végétales et animales du site Natura 2000 « L'Estérel et les abords de Fréjus » (FR9301628) - Tranches conditionnelles - lot 2 : Milieu marin. Contrat Ville de Saint Raphaël-GIS Posidonie, publ : 105 p.
- Bay D., 1978. Etude *in situ* de la production primaire d'un herbier de posidonie, *Posidonia oceanica* (L.) Delile, dans la baie de Calvi, Corse. Thèse de la Faculté des Sciences de Liège : 1-251.
- Bell J.D. et Harmelin-Vivien M.L., 1983. Fish fauna of french Mediterranean *Posidonia oceanica* seagrass meadows feeding habits. *Tethys*, 11: 1-14.
- Bernard G., Denis J., Deneux F., Belsher T., Sauzade D., Boudouresque C-F., Charbonnel E., Emery E., Hervé G., Bonhomme P., 2001. Etude et cartographie des biocénoses de la rade de Toulon - Rapport de synthèse final. Contrat d'étude pour le Syndicat Intercommunal de l'Aire Toulonnaise, IFREMER et GIS Posidonie. IFREMER publ., La Seyne, Fr. : 1-150.
- Bernard G., Bonhomme P., Boudouresque C-F., 2004a. Relevé des herbiers de magnoliophytes marines dans la lagune du Brusuc (commune de Six-Fours-les-Plages, Var). Dans le cadre du projet de réorganisation des mouillages forains dans la lagune. GIS Posidonie - Ville de Six-Fours-les-Plages. GIS Posidonie publ., fr. : 1-24 + annexes.
- Bernard G., Bonhomme P., Ganteaume A., 2004b. Projet de création d'une hélisation sur le littoral de Saint-Tropez. Evaluation de l'extension et de l'état de vitalité de l'herbier à *P. oceanica* du Pilon. Contrat GIS Posidonie-BCEOM-SEMAGEST. GIS Posidonie publ., Fr. : 1-19.
- Bernard G., 2007. Changements à long terme des peuplements de magnoliophytes d'un étang sous forte influence anthropique : l'étang de Berre. Thèse de Doctorat. Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), 154 p.
- Blanc J.J., Jeudy de Grissac A., 1984. Erosions sous-marines des herbiers à *Posidonia oceanica* (Méditerranée). International Workshop on *Posidonia oceanica* beds,

Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 23-28.

BONHOMME D., ASTRUCH P., BRICOUT R., CHARBONNEL E., BRETTON O. et 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 Marseille publ., Fr. : 1-198.

Bonhomme D., Boudouresque C.-F., Bonhomme J., Bonhomme P., 2014. Reconnaissance de formations d'herbier de posidonie en Rade d'Hyères : herbiers frangeants et/ou récifs-barrières. Contrat Parc national de Port-Cros & GIS Posidonie publ., Fr. : 1-51.

Boudouresque C.F., 1996. - Impact de l'homme et conservation du milieu marin en Méditerranée. 2^{ème} édition. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1-243.

Boudouresque C.F. et Jeudy de Grissac A., 1983. L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée, les interactions entre la plante et le sédiment. J. Rech. océanogr., 8 (2-3) : 99-122.

Boudouresque C.F. et Meinesz A., 1982. Découvertes de l'herbier de Posidonie. Cahier Parc national Port-Cros. Fr. 4 : 1-79 +1-3.

Boudouresque C.F., Giraud G., Panayotidis P., 1980. Végétation marine de l'île de Port-Cros. XIX. Mise en place d'un transect permanent. Travaux Scientifiques Parc national Port-Cros, 6 : 207-221.

Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Meinesz A., 1984. Relations entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse). In : Boudouresque C.V., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 185-191.

Boudouresque C.F., Meinesz A., Ledoyer M., Vitiello P., 1994. Les herbiers à Phanérogames marines. In : Bellan-Santini D., Lacaze J.C., Poizat C. (edits), « Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives », Secrétariat de la Faune et de la Flore, Muséum National d'Histoire Naturelle (Coll. Patrimoines naturels, vol. 19), Paris : 98-118.

Boudouresque C.F., Meinesz A., Ribera M.A., Ballesteros E., 1995. Spread of the green alga *Caulerpa taxifolia* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean: possible consequences of a major ecological event. *Scientia marina*, 59(suppl. 1): 21-29.

Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2006. Préservation et conservation de l'herbier à *Posidonia oceanica*. Accord RAMOGE, Monaco et GIS Posidonie publ., 1-202.

Butler A., Vicente N., De Gaulejac B., 1993. Ecology of the pteriod bivalves *Pinna nobilis bicolor* Gmelin and *P. nobilis* Linnaeus. *Marine Life*, 3(1-2) : 37-45.

Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Pergent-Martini C., San-Martin G., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi M., Leccia G., 2000. Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence Alpes Côte d'Azur. Première partie : Présentation et Guide Méthodologique 1999. Seconde partie : résultats du suivi 1999. Région PACA/GIS

Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil Général 06/CQEL 06. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1-60 + 1-116.

Curiel D., Bellato A. Rismono A, Marzocchi M., 1996. Sexual reproduction of *Zostera noltii* Hornemann in the lagoon of Venice (Italy, north Adriatic). Aquatic Botany, 52 : 313-318.

Durand C., Manuel M., Boudouresque C.F., Meinesz A., Verlaque M., Le Parco Y., 2002. Molecular data suggest a hybrid origin for the invasive *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea. J. evol. Biol. 15: 122-133.

Francour P., 1990. Dynamique de l'écosystème à *Posidonia oceanica* dans le Parc national de Port-Cros. Analyse des compartiments matte, litière, faune vagile, échinodermes et poissons. Thèse de Doctorat Université Pierre et Marie Curie : 1-373.

Francour P., Schopps S., Sorais P., Thibaut T., Chiaverini D., Meinesz A., 2000. Aménagement de la zone de mouillage forain de la rade d'Agay (Var) : état actuel des fonds et impacts probables sur le milieu marin. Contrat Ville de Saint-Raphaël et Laboratoire Environnement Marin Littoral. LEML publ., Nice : 1-48.

Fourt M., Goujard A., 2011. Rapport scientifique de campagne MEDSEACAN (Têtes des canyons méditerranéens continentaux) novembre 2008 - avril 2010. Partenariat Agence des aires marines protégées - GIS Posidonie, GIS Posidonie publ. 60 p.

Garcia March J.R., Vicente N., 2006. Protocole d'étude et de surveillance des populations de *Pinna nobilis* dans les aires marines protégées. Rapport MEDPAN/Autorité Maltaise pour l'environnement et la planification - Université de Valence/Université Paul Cézanne Marseille, 81 pp.

Gelin A., Arigoni S., Francour P., Harmelin J.G., Harmelin - Vivien M., 1998. Réponse des populations de certains poissons Serranidae et Labridae à la colonisation des fonds par *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. In: Boudouresque C.F., Gravez V., Meinesz A., Palluy F. edits. Third international workshop on *Caulerpa taxifolia*. GIS Posidonie publ., Fr.: 197-208

Harmelin-Vivien M.L., 1983. Etude comparative de l'ichtyofaune des herbiers de phanérogames marines en milieu tropical et tempéré. Rev. Ecol. (Terre Vie), 38 : 179-210.

Harmelin-Vivien M., Harmelin J.G., Leboulleux V., 1995. Microhabitat recruitment for settlement of juveniles Sparid fishes on Mediterranean rocky shores. Hydrobiologia, 300/301: 309-320.

Harmelin-Vivien M., Francour P., Harmelin J.G., 1999. Impact of *Caulerpa taxifolia* on Mediterranean fish assemblages: a six year study. In: Proceedings of the workshop on invasive *Caulerpa* in the Mediterranean. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece: 127-138

Jedy de Grissac A., 1984. Effets des herbiers à *Posidonia oceanica* sur la dynamique marine et la sédimentologie littorale. First International Workshop *Posidonia oceanica*, Boudouresque C.F., Jedy de Grissac A. et OLIVIER J., édits., GIS Posidonie publ., Marseille : 437-443.

Jeudy de Grissac A., Boudouresque C.F, 1985. Rôle des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers : les herbiers à *Posidonia oceanica*. Colloq. Fr-jap. Océanogr., Marseille 16-21 sept., 1: 143-151.

Kikuchi T., 1980. Faunal relationships in the temperate seagrass beds in: Handbook of seagrass biology. Phillips R.C., McRoy C.P., éd., Garland publ., New-York : 153-172.

Kikuchi T., Peres J.M., 1973. Animal communities in the seagrass bed: a review. International Seagrass Workshop, Leiden : 27 p.

Ledoyer M., 1968. - Ecologie de la faune vagile des biotopes méditerranéens accessibles en scaphandre autonome (Région de Marseille principalement) IV. Synthèse de l'étude écologique. Rec. Trav. St. mar. Endoume, 44(60) : 125-295.

Libes M., 1984. Production primaire d'un herbier à *Posidonia oceanica* mesurée *in situ* par la méthode du carbone 14. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Aix-Marseille II : 1-199.

Meinesz A., 1979. Contribution à l'étude de *Caulerpa prolifera* (Forsskål) Lamouroux (Clorophycée, Caulerpale). Botanica Marina, 22 : 27-39.

Meinesz A, Laurent R., 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-Maritimes (France). Campagne Poseidon 1976. Bot. mar., Germ., 21 : 513-526.

Meinesz A., Hesse B., 1991. Introduction et invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée Nord-Occidentale. Oceanologica Acta 14 (4): 415-426.

Meinesz A., Blanfuné A., Chancollon O., Javel F., Longepierre S., Markovic L., Vaugelas de J. et Garcia D. 2013. Côtes méditerranéennes françaises : inventaire et impacts des aménagements gagnés sur la mer. Ed. Lab. ECOMERS, Université Nice Sophia Antipolis, 156 pp.et publication électronique : www.medam.org.

Molinier R., Picard J., 1952. Recherches sur les herbiers de phanérogames marines du littoral méditerranéen français. Ann. Inst. Océanogr., 27 (3) : 157-234.

Nieri M., Fancour P., Sartoretto S., Sloeck O., Urscheler F., 1992. Cartographie des peuplements benthiques, des types de fonds et de l'herbier de posidonie autour du port Saint-Pierre d'Hyères (Var). Rapport final. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1-61.

Océanide, 2010. Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre - Phase 1 : Synthèse des connaissances. Contrat Ville d'Hyères les Palmiers et Océanide, FR. : 1-159 + annexes.

Océanide, 2011a. Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre - Phase 2 : Analyse du fonctionnement hydrosédimentaire. Contrat Ville d'Hyères les Palmiers et Océanide, FR. : 1-230.

Océanide, 2011b. Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre - Phase 3 : Définition des scénarios de protection, analyse préliminaire. Contrat Ville d'Hyères les Palmiers et Océanide, FR. : 1-114.

Ourgaud M., Ruitton S., Bell J.D., Letourneur Y., Harmelin J.G. et Harmelin-Vivien M.L., 2014. Response of a seagrass fish assemblage to improved wastewater treatment. Accepted

Panayotidis P., Boudouresque C.F., Marcot-Coquegniot J., 1981. Microstructure de l'herbier de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Botanica Marina*, 24 : 115-124.

Pérès J-M., Picard J., 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. Recueil des Travaux de la Station marine d'Endoume, 31 (47) : 5-137.

Pergent G., 2007. Protocole pour la mise en place d'une surveillance des herbiers de posidonies. Programme « MedPosidonia » / CAR/ASP - Fondation d'entreprise TOTAL pour la Biodiversité et la Mer ; Mémoire d'Accord N°21/2007/RAC/SPA/ MedPosidonia Nautilus-Okianos : 24 pp + Annexes.

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 de Méditerranée : Etat des connaissances. *Mésogée*, 54 :3-27.

Pergent-Martini C., 1994. Impact d'un rejet d'eaux usées urbaines sur l'herbier à *Posidonia oceanica*, avant et après la mise en service d'une station d'épuration. Thèse Doctorat Ecologie Marine, Université de Corse : 1- 208.

Piazzi L., Ceccherelli G., Meinesz A., Verlaque V., Akçali B., Argyrou M., Balata D., Ballesteros E., Cinelli F., D'Archino R., Javel J., Mifsud C., Pala D., Panayotidis P., Peirano A., Pergent G., Petrocelli A., Ruitton S., Zuljevic A., 2005. Invasion of *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea: the balance of thirteen years of spread. *Cryptogamie, Agologie* 26: 189-202

Plus M., Deslous-Paoli J-M., Auby I., Dagault F. 2001. Factors influencing primary production of seagrass beds (*Zostera noltii* Hornem.) in the Thau lagoon. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 259 : 63-84.

Poulain M., 1996. Le mouillage forain dans le Parc National de Port-Cros. Impacts sur les herbiers à *Posidonia oceanica*. Mémoire DESS Ecosystèmes Méditerranéens, Université de Corse : 1-62.

Rico-Raimondino V., 1995. Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbiers à *Posidonia oceanica*. Thèse Doctorat « Ecologie », Université Aix-Marseille II : 1-248.

Rouanet E. 2010 - Site Natura 2000 FR 9302001 "Lagune du Brusç" - Document d'Objectifs - Note de synthèse. Convention cadre Etat/Communauté d'agglomération Toulon Provence Méditerranée - Institut Océanographique Paul Ricard : 48 p.

Ruitton S., Boudouresque C.F., 1994. Impact de *Caulerpa taxifolia* sur une population de l'oursin *Paracentrotus lividus* à Roquebrune-Cap Martin (Alpes-Maritimes, France). In: Boudouresque C.F., Meinesz A., Gravez V. edits. First international workshop on *Caulerpa taxifolia*, GIS Posidonie publ., Fr.: 371-378.

Ruitton S., Astruch P., Donato M., Boudouresque C-F., 2007. Analyse environnementale du projet d'extension portuaire de la ville de Saint-Tropez sur le milieu marin (Var, France) et cartographie de l'herbier de posidonie. Contrat Ville de Saint-Tropez & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr. : 1-51.

Ruiz J.M., Romero J., 2001. Effects of *in situ* experimental shading on the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. Progr. Ser. 215: 107-120.

Short F.T., Carruthers T.J.R., Waycott M., Kendrick G.A., Fourqurean J.W., Callabine A., Kenworthy W.J., Dennison, W.C. 2010. *Zostera noltii*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.2. <www.iucnredlist.org>. Consulté le 27/10/2014.

Templado J., Calvo M., Garvia A., Luque A.A., Maldonado M., Moro L., 2004. Guía de invertebrados y peces Marinos protegidos por la legislación nacional e internacional. MMA-CSIC. Madrid, 214 pp.

Verlaque M., Boudouresque C.F., Meinesz A., Gravez V., 2000. The *Caulerpa racemosa* complex (Caulerpales, Ulvophyceae) in the Mediterranean Sea. Botanica marina 43: 49-68.

Verlaque M., Durand C., Huisman J.M., Boudouresque C.F., Le Parco Y., 2003. On the identity and origin of the Mediterranean invasive *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta). Eur. J. Phycol. 38: 325-339.

Verlaque M., Afonso-Carrillo J., Gil-Rodriguez M.C., Durand C., Boudouresque C.F., Le Parco Y., 2004. Blitzkrieg in a marine invasion: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Bryopsidales, Chlorophyta) reaches the Canary Islands (NE Atlantic). Biol. Inv. 6: 269-281

Vicente N., Moreteau J.C., 1991. Statut de *Pinna nobilis* L. en Méditerranée (Mollusque Eulamellibranche) in "Les espèces marines à protéger en Méditerranée". BOUDOURESQUE C.F., AVON M. et GRAVEZ V. edit., GIS Posidonie publ., Fr : 159-168.

Vicente N., De Gaulejac B., 1993. *Pinna nobilis* L (Mollusque bivalve), indicateur biologique du littoral méditerranéen dans "Qualité du milieu marin - Indicateurs biologiques et physico-chimiques". BOUDOURESQUE C.F., AVON M. et PERGENT-MARTINI C. édit., GIS Posidonie publ., Marseille : 141-150.

Villele X. de, Verlaque M., 1995. Changes and degradation in a *Posidonia oceanica* bed invaded by the introduced tropical alga *Caulerpa taxifolia* in the Northwestern Mediterranean. Botanica marina 38: 79-87.