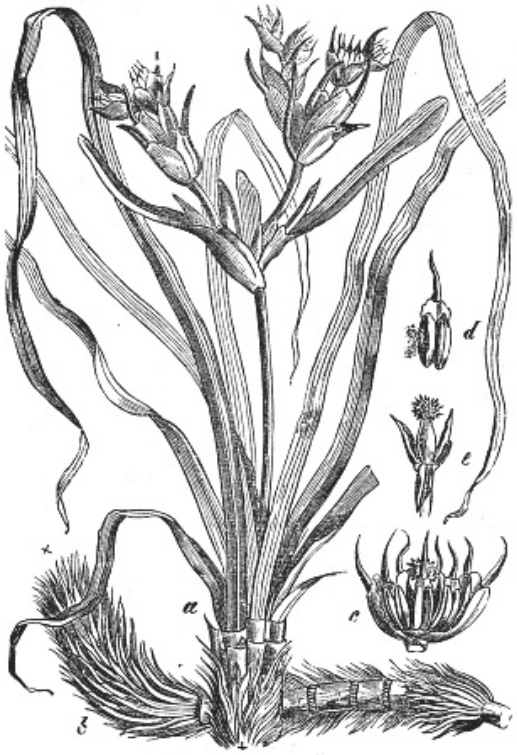
Annexe 1

Synthèse européenne des techniques de restauration des herbiers de posidonie

Par Eirini APAZOGLOU



POSIDONIA OCEANICA

Restauration, considérations et cadre législatif

Eirini Apazoglou

Tutrice: Gwenaelle Delaruelle

Mai 2022

Résumé

Ce mémoire a pour objectif principal de faire une synthèse des techniques de restauration de l'espèce Posidonia oceanica au sein du bassin méditerranéen et de discuter les considérations à prendre en compte avant de s'engager dans de tels projets. Posidonia oceanica joue un rôle écologique et économique majeur. On a identifié vingt-cinq services ecosytèmiques offerts par cette espèce pour le bien être humain. De par son importance, posidonia oceanica est une espèce beaucoup étudiée et, depuis les années 50, les scientifiques essaient de planter des graines ou des bouturages pour répondre aux nombreuses menaces de cet habitat. Plusieurs techniques expérimentales ont vu le jour, certaines plus invasives que d'autres. Puisque la replantation des herbiers est une opération coûteuse avec un faible taux de réussite, il y a certaines considérations à prendre en compte en amont d'un projet de restauration. Notamment, le rapport coût - bénéfice en tCO2e mériterait le développement d'une méthode de calcul spécifique. En ce qui concerne le cadre réglementaire, on constate une forte protection chez les états nord du bassin, protection beaucoup moins évidente au sud. Jusqu'à présent, le cadre réglementaire et les directives internationales se focalisent sur la protection et la conservation de l'espèce. Un cadre réglementaire concernant la restauration des herbiers qui assure la bonne conduite de projets de restauration semble aujourd'hui nécessaire.

INTRODUCTION 1
OBJECTIFS 6
MÉTHODOLOGIE 6
RÉSULTATS 7
A. TECHNIQUES DE REPLANTATION DE POSIDONIE 7
PAR GERMINATION 7
PAR TRANSPLANTATION DES PLANTES ADULTES 8
EXEMPLES - PROJETS 9
B. CONSIDERATIONS AVANT LA REPLANTATION 10
C. CADRE REGLEMENTAIRE 14
DISCUSSION 21

TABLE DES IMAGES

Image 1. Banquettes de posidonie, la complexité de rhizomes et la fonction nurserie d'un herbier 1
Image 2. Distribution de *posidonia oceanica* selon IUCN. 2
Image 3. Ancre de bateau de plaisance dans le port du Parc national marin de Sporades du Nord, Grèce 3
Image 4. *Caulerpa taxifolia* dans un herbier à *Posidonia oceanica*. 4
Image 5: Aperçu par des opérations de transplantation avec la technique de piques 8
Image 6. Périmètre opérationnel du bilan GES 13

TABLE DE TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse des techniques de replantation en Italie. 8
Tableau 2. Etapes clés à prendre en compte pour le calcul de $tCO2_e$ d'un projet de génie écologique de fonds marins et leur répartition en SCOPE 1, 2 et 3. 14
Tableau 3. Synthèse des cadres directives de protection de *posidonia oceanica* aux 22 pays de Mediterannée. 19

INTRODUCTION

Les Posidonies sont des phanérogames marines (= Magnoliophytes) qui appartiennent au sous-règne des Trachéophytes, appelées plantes vasculaires, dont les caractéristiques principales sont les feuilles ligulées avec présence de cellules à tanin, un rhizome monopodial, épais, avec bases des feuilles persistantes et des fleurs bisexuées. L'espèce ***Posidonia oceanica*** (Delile) est endémique de la Méditerranée et la seule espèce du genre ***Posidonia*** qui comprend neuf espèces à affinité tempérée (Boudouresque, 2021) dont huit sont présentes en Australie.

Posidonia oceanica constitue la biocénose la plus complexe de Méditerranée et joue un rôle écologique majeur puisque les herbiers qu'elle forme sont des lieux de frayère et de nurserie pour de nombreuses espèces animales. Ils constituent également une source de nourriture pour certaines espèces herbivores.

Image 1: De gauche à droite, banquettes de posidonie, la complexité de rhizomes et la fonction nurserie d'un herbier.

Elle permet de fixer les fonds marins grâce à ses rhizomes qui s'empilent d'une année sur l'autre, contribuant à augmenter progressivement le niveau du fond. Elle « piège » des particules en suspension et du sédiment, contribuant ainsi au maintien de la clarté des eaux et est également un puissant intégrateur de la qualité des eaux (bioindicateur). Les herbiers à Posidonia oceanica sont considérés comme des formations essentielles dans le stockage du carbone atmosphérique et l'oxygénation du milieu.

Les feuilles mortes d'un herbier vont se retrouver exportées, sous forme de litière, vers d'autres écosystèmes éloignés (plage, canyon sous-marin, etc.) où elles constitueront une source de carbone importante pour le fonctionnement de ces écosystèmes. Cette litière joue un rôle fondamental dans la protection hydrodynamique de la frange côtière et des plages, par atténuation de la puissance des vagues et des courants et stabilisation des fonds sableux. Sans cette protection contre l'érosion, le trait de côte actuel serait probablement fortement modifié. L'importance de ***Posidonia oceanica*** est majeure par ses

rôles écologiques connus qui sont multiples mais également économiques par les nombreux services rendus à l'Homme : nurserie naturelle, source de fourrage, stockage de carbone, fixation de sédiments, bioindicateur de la qualité des eaux etc.

Dans une revue de Campagne et al., 2022, 25 services écosystémiques ont été identifiés : services d'approvisionnement, de régulation, de soutien et socioculturels. Ils estiment que la valeur économique pour la contribution de *P. oceanica* au bien être humain est entre 284 et 541euros/ha/an. Parmi le grand nombre de services écosytémiques, pour le seul service de séquestration du carbone, les herbiers à *P. oceanica* séquestrent sur le long terme une quantité supérieure à deux fois la moyenne mondiale de séquestration des herbiers et jusqu'à 70 fois le taux de séquestration de forêts tropicales. (Campagne et al., 2022). On peut par conséquent comprendre son importance socio-économique liée aux activités humaines mais également l'importance patrimoniale -déjà de par son nom- de cet espèce emblématique de ***Marre Nostrum***.

Image 2: Distribution de *posidonia oceanica* selon IUCN.

Posidonia oceanica est présente dans tout le bassin méditerranéen à l'exception des grands estuaires et des parties plus froides de la Méditerranée comme la majeure partie du golfe du Lion, le nord de l'Adriatique et la partie la plus occidentale de la mer d'Alboran près du détroit de Gibraltar. Son absence dans la partie extrême sud-est du bassin semble être directement liée aux conditions environnementales avec une température de l'eau très élevée pendant l'été (IUCN, 2013). On retrouve en revanche de vastes population en Grèce, possiblement grâce à sa grande densité en zones côtières.

Les préférences écologiques (eaux peu profondes et claires, courant faible, ne supporte pas l'eau douce ou saumâtre), sa distribution et les caractéristiques biologiques (croissance très lente) de ***P. oceanica*** rendent cette espèce très vulnérable aux pressions. En effet, les herbiers à ***P. oceanica*** sont victimes des multiples pressions liées aux activités humaines puisqu'ils partagent le même espace le long du littoral. Ils ont connu un déclin généralisé au cours des années 70-80 (de los Santos et al., 2019), caractérisé par un recul des herbiers peu profonds et/ou par une remontée des limites plus profondes, et donc une perte de l'étendue spatiale. Parmi les principales

menaces qui peuvent détruire, fragmenter ou impacter les herbiers à moyen et long terme on peut citer des activités humaines comme l'artificialisation des côtes, les ancrages, la pollution de l'eau. Une régression des herbiers de Posidonie a été observée dans de nombreux secteurs de Méditerranée, principalement au voisinage des grands centres industrialo-portuaires (Athènes, Napoli, Genova, Nice, Toulon, Marseille, Barcelona, etc), mais aussi dans des secteurs relativement éloignés de ces centres urbains, par exemple les baies de Port-Man et de Port-Cros, Var, France, explique Gravez, 2018.

Artificialisation des côtes. Le développement côtier, y compris le durcissement du littoral, les infrastructures urbaines et portuaires et l'extraction de sable, affecte la limite supérieure des herbiers de Posidonie (IUCN, 2016). Les aménagements des ports, des digues et des plages gagnés sur la mer sont aussi à l'origine de modifications des courants et des bilans sédimentaires aux abords des côtes qui peuvent influencer la croissance de cette espèce.

Les ancrages. ***Posidonia oceanica*** est menacée en profondeur par les dommages mécaniques causés par le chalutage, l'ancrage des bateaux et la turbidité. Les mouillages forains liées à la navigation de plaisance constituent une vraie menace pour les herbiers.

Image 3: Ancre de bateau de plaisance dans le port du Parc national marin de Alonissos et Sporades du Nord, Grèce (source: auteur)

Pollution et augmentation de la turbidité. L'augmentation de la turbidité des eaux par les rejets en mer peut entrainer, d'une part, une diminution de la photosynthèse en profondeur en perturbant la pénétration de la lumière dans l'eau et favorise, d'autre part, une eutrophisation des eaux responsable de floraisons phytoplanctoniques. Cette eutrophisation (provenant des rejets de nutriments agricoles, de matières organiques, de l'aquaculture et des déchets urbains) associée à la pollution, en particulier dans les régions côtières fortement peuplées, sont un problème dans de nombreuses zones côtières. A Alicante par exemple, le couvert et la densité des populations des herbiers ont subi une diminution significative au cours des 20 dernières années, principalement dans la limite supérieure de

l'herbier à cause de plusieurs impacts côtiers (élargissement du port, rejets de saumure et d'eaux usées, activité industrielle) (Blanco-Murillo et al., 2022). D'un point de vue écotoxicologique, Lafabrie et al. (2008) montrent que des métaux lourds comme Cd, Co, Hg, Ni et Pb, s'accumulent dans la partie verte de la plante. De plus, Agawin et al., (2022) rapportent que les rhizomes de P. oceanica ont accumulé en interne des composants UVF, substances présentes dans les crèmes solaires. Une telle accumulation de métaux et de substances organiques peuvent potentiellement interférer avec les fonctionnement physiologique du métabolisme de l'individu. Plus de résultats sont nécessaires pour éclairer la situation.

Espèces invasives. Des macroalgues envahissantes telles que ***Caulerpa taxifolia*** et ***Caulerpa cylindracea*** peuvent se développer sur les rhizomes et le sable de Posidonie et leur prolifération pourrait dégrader la qualité des sédiments et accélérer le déclin de l'herbier (IUCN, 2016). La prolifération d'autres espèces envahissantes épiphytes, telles que ***Lophocladia lamellandii*** en Méditerranée occidentale, peut également menacer la survie et affecter la densité et la complexité des communautés dans l'herbier. (IUCN, 2016).

Image 4: *Caulerpa taxifolia* dans un herbier à *Posidonia oceanica*. (Source IUCN, 2016)

Changement climatique. Le changement climatique constitue une menace supplémentaire à travers le réchauffement des eaux, l'élévation du niveau de la mer et les phénomènes météorologiques extrêmes. Les communautés d'herbiers marins peuvent également être affectées par le remplacement d'espèces d'herbiers marins à haute complexité structurelle par des espèces de moindre complexité et même par des espèces introduites opportunistes (Pergent et al. 2012). Dans leur article, Pergent et al. proposent deux principales tendances potentiellement contradictoires dans le fonctionnement des écosystèmes d'herbiers : l'accélération de la voie herbivore ou de la voie détritivore. Ils en concluent qu'il est actuellement très difficile de prédire les conséquences de ces altérations et leurs effets en cascade liés au changement climatique.

Ici, il est important de souligner que la littérature est divisée en ce qui concerne la tendance générale du déclin ou de la progression des herbiers. Gonzales-Goréa et al. (2007), après avoir étudié six sites d'herbiers en bonnes conditions (Carry-le-Rouet France, Cape Blance

Espagne, Alicante Espagne, Cape Gata, Espagne, Zembra Island Tunisia et Agia Napa Cyprus), ont démontré que, globalement, on n'observe pas un déclin des herbiers de *P. oceanica* autour de la mer Méditerranée mais que, au contraire, une dynamique de population positive de *P. oceanica* est observée dans toutes les localités ou les pressions anthropiques sont éliminées et pour tous les paramètres étudiés (localisation, site, profondeur). De même, de los Santos et al., 2019 concluent que le déclin n'est pas un état généralisé dans les herbiers en Europe actuellement. Boudouresque dans son article quelques années plus tard (2021) explique que l'addition de tous les épisodes de déclin, sans tenir compte des recolonisations ultérieures ainsi que de la progression des autres espèces, peut conduire à une vision biaisée de la situation générale.

Même si la régression des herbiers de ***Posidonia oceanica*** est souvent liée à l'impact des activités humaines, les herbiers semblent également décliner dans des zones où les pressions anthropiques sont très faibles, indiquant que d'autres facteurs climatiques ou biologiques interviennent (Boudouresque et al. 2009).

La regression de ***Posidonia oceanica*** peut être liée à divers processus naturels qui génèrent de la matte morte de ***P. oceanica.*** Cette matte, constituée de rhizomes et de racines dont les interstices sont remplis de sédiments, peut atteindre plusieurs mètres de hauteur, et le carbone organique et inorganique qu'elle contient peut persister pendant des millénaires.

Parmi les processus naturels on distingue : i) l'augmentation de l'épaisseur de la matte qui, dans les zones peu profondes, peut amener l'herbier trop près de la surface de la mer, ii) de petites zones de matte morte dans une prairie saine de ***P. oceanica*** qui peuvent résulter simplement de la mort de pousses vulnérables, iii) des zones d'intermattes de matte morte et de sable pouvant se produire dans la partie centrale.

Le constat de la dégradation et de la vulnérabilité de *Posidonia oceanica* nécessite des actions concrètes et coordonnées entre les gestionnaires et les décideurs visant à atténuer la détérioration du littoral en combinant des actions locales et globales. Mais avant d' adopter quelconques mesures, il est important de savoir distinguer les causes de régression des herbiers afin de pouvoir identifier les pressions à éliminer et les types de restauration nécessaires.

OBJECTIFS

Ce rapport est produit dans le cadre du D.U. Restauration de petits fonds marins de Méditerranée proposé par l'Université de Montpellier. Le but principal est de faire une **synthèse des techniques de restauration de *Posidonia oceanica.*** L'acquisition de connaissances et de retour d'expériences sur la question de replantation de cette espèce (= renforcement de populations) sont considérés comme nécessaires afin d'être en mesure de proposer et mettre en place un projet de restauration du milieu marin.

Plus précisément, trois problématiques ont été identifiées pour ce présent projet :

1. Quelles sont les techniques de restauration de *Posidonia oceanica* qui ont vu le jour dans le bassin méditerranéen ces dernières années et quelles conclusions en retirons-nous?

2. Quelles sont les considérations à prendre en compte pour chaque projet de restauration? Existe-t-il un cadre ou une stratégie homogène dans le bassin?

3. Est-ce que le cadre législatif garantit et assure la bonne conduite écologique des projets de restauration dans le bassin ?

MÉTHODOLOGIE

Une recherche bibliographique a été conduite pour répondre aux trois principaux questionnements de ce rapport. Plusieurs sources ont été explorées : revues et articles scientifiques, littérature grise, sites internet présentant des projets de restauration sur les herbiers ainsi que des fiches et arrêtés législatifs. En manque de traduction en anglais ou français, les textes revus ont été traduits par l'auteur ou par un logiciel de traduction spécialisé. Les résultats de cette étude bibliographique (loin d'être exhaustive) sont organisés en trois parties portant sur les techniques de replantation de posidonie (A) , les considérations à prendre en compte pour un projet de restauration (B) et le cadre législatif qui protège cette espèce (C), suivis d'une discussion.

RÉSULTATS

Les principaux résultats présentés ci-après portent sur une recherche autour de 37 publications scientifiques, articles et sites internet sur le sujet de la restauration de posidonie et le cadre réglementaire le concernant.

A. TECHNIQUES DE REPLANTATION DE POSIDONIE

On distingue plusieurs techniques de restauration et replantation de ***posidonia oceanica*** qui se regroupent dans deux méthodes bien distinctes : i) la germination de graines collectées soit en plages, soit en mer pour la plantation de jeunes pousses ii) la replantation de plantes adultes avec plusieurs alternatives.

PAR GERMINATION

Depuis quelques années, cette méthode attire l'attention des chercheurs, du fait de la réduction des coûts économiques et logistiques qu'elle entraîne, ainsi que de la pertinence de la reproduction par graines par rapport à la reproduction clonale dans l'extension et la récupération naturelle d'herbiers marins. Il s'agit de la collecte de graines qui sont soit germées dans des conditions controlées en laboratoire avant d'être plantées, soit directement plantées.

L'ensemble du processus de collecte, d'entretien, de transport et de plantation ou de semis est très simple et peu onéreux. Les graines doivent être récoltées directement dans l'herbier naturel, une fois qu'elles ont mûri. Des quantités considérables de graines peuvent également arriver sur la plage où elles sont collectées, mais cette forme de collecte reste imprévisible.

Une fois les graines récoltées, elles peuvent être semées directement dans la zone à restaurer, ou elles peuvent être conservées et traitées en laboratoire avant d'être acheminées vers la mer. En outre, ces dernières années, des méthodes d'ensemencement mécanique sont développées : elles rationalisent l'ensemble du processus et réduisent les coûts. Selon RED et CSIC, cette méthode est nettement plus avantageuse que la transplantation de plants adultes, ils en proposent d'ailleurs un guide technique.

Des semis de ***Posidonia oceanica*** cultivés en aquarium pendant six mois ont été transplantés avec succès à l'île de Port-Cros sur de la matte morte et ils ont prospéré pendant au moins deux ans (Meinez, 1993). Terrados et al., (2013) après avoir utilisé cette technique à Hornillo Espagne, concluent que la plantation de semis dans la matte morte sans ancrage n'affecte pas la survie et le développement des feuilles et pourrait être une

technique réalisable pour la restauration des herbiers de P. oceanica. Les travaux de Piazzi et al., (1999) montrent l'efficacité de cette méthode si le substrat et la profondeur sont bien choisis.

PAR TRANSPLANTATION DES PLANTES ADULTES

Il s'agit de la méthode la plus traditionnellement utilisée, probablement en raison de l'impression de création immédiate d'un habitat. Cette technique se concentre sur la collecte d'individus adultes dans un herbier sain, en ramassant soit des mottes avec des racines, c'est-à-dire des plantes matures avec des rhizomes et un substrat environnant collés, soit des mottes nues, sans substrat collé, qui sont ensuite transplantés ultérieurement dans des zones dégradées. La replantation de mottes peut se faire via des moyens mécaniques comme dans les projets à Monaco et à Costa Concordia en Italie. La motte sera plantée directement dans le substrat ou à travers des «pots» biodégradables tandis que les faisceaux pourront être positionnés sur des grilles de matériau, de préférence biodégradables, ou ancrés directement dans le substrat. Les fragments flottants arrachés par les tempêtes ou par les ancrages de bateaux, peuvent aussi être ramassés à la dérive ou directement sur les plages, où ils peuvent arriver en grande quantité. Le *tableau 1* présente une synthèse des techniques appliquées en Italie.

Ce type de plantation se caractérise par un taux de mortalité élevé, souvent à cause du mauvaise choix de site de transplantation ou de forage intense par les herbivores, et implique des coûts économiques et logistiques importants, tant pour les transplantations

Image 6: Aperçu par des opérations de transplantation avec la technique de piques (source: SEPOSSO, 2018)

manuelles que mécanisées. Le prélèvement des boutures peut potentiellement causer de graves dommages à l'herbier donneur, entraînant sa dégradation.

Tableau 1. Synthèse des techniques de replantation en Italie.

	Date d' apparition	Site	Materiel	Substrate	Profondeur	Periode	Densité	Suivi 10 ans
La technique des charpentes en béton armé avec grillage	90s Augier et al., 1996; Cooper 1982	Sardegna, la rada di Porto Conte	Béton armé et métal	Sable	7-15m	Automne - hiver	30-35 faisceaux/m2	Oui
La technique des grilles métalliques	80s	Golfo di Palermo	Métal	Matte morte	5-15m	Automne	~60 fasci/m2	Oui
La technique du piquet	Fonseca et al. (1982)	isola del Giglio	Fer	Matte morte ou sable	8-23m	Mai-Octobre	23-28 fasci/ m2	Oui
La technique des géomats et des biomats	2007	Capo Carbonara, Sardegna	Fibre de coco et ou métal	Matte morte	12-20m	Mai-Octobre	Noyaux de 20 faisceaux	No
La technique des supports modulaires biodégradables	2011- 2012	Capo Gallo - Isola delle Femmine	Bioplastic Mater-Bi	Matte morte	6-13m	Automne - hiver	30-60 faisceaux	No
La technique des structures radiales en béton armé		Sicily	Béton armé	Tout types	6-11m	Automne	30 faisceaux/ m2	No
La technique des gabions remplis de pierres	1993	Capo Feto	Inox, pierre	-	12m	Mai	24-32 faisceaux/m2	No
La technique des mottes de Posidonia oceanica	2009	Golfo di Follo- nica	-	Sable	11-13m	Juin	2,5 mottes/m2	No

EXEMPLES - PROJETS

France. Le projet REPAIRE Corse - Calvi (Corse) a débuté en octobre 2021 et est le fruit d'une collaboration entre l'Université de Liège et STARESO de Calvi en Corse. Son objectif est de stabiliser et restaurer les sillons sableux créés par l'action des ancres dans l'herbier de posidonie. Sur 4 jours de mission, 900 rhizomes vont être replantés à 15 mètres dans la baie de Calvi en Corse.

Le projet Graines de mer est un pilote de restauration écologique faisant appel au génie biologique, et visant à mettre au point des méthodes de transplantation de graines de

plantes à fleurs (Magnoliophytes) marines telles que la Posidonie en mer et la Zostère en lagune. Ce projet controversé a été réalisé par SM2 Solutions Marines entre 2011 à 2014. Le ramassage de graines a été effectué sur les plages et la culture dans une pépinière marine unique. La transplantation des plantules et le suivi ont ensuite été effectués au sein d'un site Natura 2000 languedocien (Lenfant et al., 2015). Ce projet a reçu 490 000 € d'une agence étatique française ; il a même reçu un prix décerné par le ministère français de l'environnement "Prix entreprise et environnement". Boudouresque (2019) explique que ***P. oceanica*** est naturellement très rare en Occitanie et n'y fleurit pas, sans doute à cause des températures de l'eau trop basses et de l'influence des débits du Rhône : elle est à la limite de son aire de répartition. Ce projet n'a pas abouti à une replantation réussie.

Le programme REPIC est mené par Andromède Océanologie en région Sud depuis 2019. Près de 15 000 fragments de posidonie ont été repiqués pour restaurer 340 m² de cet habitat sous-marin protégé. Les transplants proviennent d'arrachages par les ancres de navires ; ils sont collectés en plongée à proximité de la zone de replantation. Les trois premières années de ce projet ont compté 51 jours de mission et 430 heures de plongées.

Grèce. Des fragments de posidonie arrachés naturellement par les tempêtes ont été collectés sur le rivage et les eaux peu profondes. Les boutures plagiotropes et orthotropes (respectivement horizontales et verticales) ont ensuite été replantées à l'aide de l'un des deux matériaux biodégradables suivants : des pots en fibre de coco ou des piquets en bambou, pour les fixer au fond marin. Ces travaux ont été réalisé par Archipelago NGO.

Turquie. Pour sa thèse, Çelebi (2007) parle de la première expérience de transplantation de ***Posidonia oceanica*** le long des côtes turques qui a été menée dans deux régions où il n'existe actuellement aucun herbier. La survie des boutures dans une station a indiqué le succès de la méthodologie, tandis que l'échec dans d'autres stations a fourni des informations sur les raisons possibles de l'absence/dégradation des prairies naturelles dans la zone.

B. CONSIDERATIONS AVANT LA REPLANTATION

Quelle est la meilleure stratégie à adopter devant un herbier dégradé ? Pour rappel, un herbier de Posidonie dégradé (touffes isolées sur matte morte) n'est pas un herbier condamné : en cas d'arrêt de la source de dégradation, sa régénération peut se faire à

partir des touffes isolées. La question se pose naturellement; pourquoi restaurer si la recolonisation naturelle peut se faire?

L'intérêt scientifique pour la replantation des herbiers date des années 30 et les premières expérimentations avec la posidonie dans les années 50, mais le premier atelier européen sur le thème de la restauration des herbiers de posidonie qui regroupe plusieurs acteurs de la filière se déroule en 2010 au Portugal (First European Seagrass Restauration Workshop). Les résultats de cet atelier pointent vers un nouveau paradigme dans la restauration des herbiers marins où les efforts devraient se déplacer pour donner la priorité au potentiel de restauration naturelle, en mettant l'accent sur le fait que la restauration ne devrait jamais être considérée comme la première alternative lors de la planification de l'atténuation des projets de développement côtier ou pour justifier l'atténuation en tant que mesure de compensation pour les activités économiques (Cunha et al., 2012). Les participants ont aussi montré qu'aucun des programmes de restauration des herbiers marins qui ont été développés en Europe au cours des 10 dernières années n'a été couronné de succès. Nombre de recommandations ont été élaborées pendant cet atelier et seront analysées dans la partie Discussion de ce rapport.

Boudouresque et al., (2019) font deux remarques intéressantes dans leur revue. D'abord que notre estimation de la surface totale couverte par les herbiers peut être biaisée en lien avec l'évolution des moyens techniques de cartographie. Mais ils considèrent également que l'idée d'une recolonisation naturelle très lente par ***P. oceanica*** repose principalement sur des observations datant du pic de pollution et d'aménagement côtier et qu'aujourd'hui, la perception serait sans doute différente. La croissance lente de ***Posidonia oceanica*** est de 1–7 cm par an pour les rhizomes orthotropes et moins de 14 cm par an pour les rhizomes plagiotropes. Dans quelle mesure peut-on initier un projet de restauration si on manque de certitudes concernant l'évolution de la population au cours des années?

De plus, des lacunes en termes de connaissances par rapport aux fonctionnements des écosystèmes marins existent toujours. En Méditerranée, on constate que la biologie de la restauration manque d'articles scientifiques étudiant un site avant et après 10 ou 15 ans de suivi écologique. Dans le cas de posidonie, une meilleure compréhension des facteurs contrôlant les processus précoces de la vie est une condition préalable nécessaire à la compréhension des schémas de distribution des espèces d'herbiers marins, des potentiels de colonisation et de rétablissement, qui, à leur tour, peuvent guider des stratégies judicieuses pour la gestion et la restauration des herbiers marins (Alagna et al., 2013).

Une stratégie de gestion des herbiers a été proposé par Boudouresque et al., 2021. Selon eux cette stratégie doit tenir compte des éléments suivants:

(i) la superficie totale des prairies existantes ;
(ii) la superficie perdue chaque année à cause du déclin et les causes de ce déclin ;
(iii) la superficie remise en état chaque année par régénération naturelle et la superficie que l'on peut espérer récupérer par la transplantation, dans un délai de 10, 20 ou 50 ans ;
(iv) le coût du repiquage, et une comparaison avec les effets d'un investissement alternatif identique dans la maîtrise de la cause du déclin (épuration, pose de récifs anti-chalut, amarrages écologiques pour les bateaux de plaisance, création d'Aires Marines Protégées, etc. .) : la transplantation d'herbes marines est la méthode de restauration la plus coûteuse au monde, avec une médiane de 106 782 US$/ha;
(v) enfin, dans tous les cas, il faut qu'un essai soit fait sur une petite parcelle témoin et suivi pendant au moins trois ans ; seul un résultat favorable peut justifier une opération de grande envergure.

En plus de cette stratégie, ils proposent, à la demande du ministère français de l'Environnement, un code de bonne conduite pour que les techniques de transplantation de *Posidonia oceanica* ne servent de prétexte pour procéder à la destruction des herbiers existants. Des guides de procédure similaires pour la prise de décision, adaptés aux préoccupations et aux espèces locales, ont été élaborés aux États-Unis et en Australie. Le texte du code de bonne conduite est présenté en ANNEXE.

La restauration des herbiers marins a été suggérée comme stratégie de carbone bleu pour l'atténuation du changement climatique. L'efficacité de cette stratégie reste à démontrer. Compte tenu du coût énorme des greffes, il faut également s'interroger sur le rapport coût-bénéfice par rapport à la stratégie de réduction des émissions de carbone.

À la suite de l'Accord de Paris sur le climat, la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte et le Code de l'Environnement ont introduit le principe d'une Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC). Concrètement, cette feuille de route précise les orientations que la France doit suivre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre avec deux objectifs : viser la neutralité carbone collective d'ici 2050 et réduire l'empreinte carbone de notre consommation. La transition vers un monde neutre en carbone constitue l'un des plus grands défis auxquels l'humanité a été confrontée. Il s'agit tout simplement d'une transformation complète de notre façon de produire, de consommer et de nous déplacer. (Site UN.org, 2022)

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui disponibles en France et à l'international pour calculer le bilan carbone d'une entreprise et des opérations. En 1998, le World Business

Council for Sustainable Development (WBCSD) et le World Resources Institutes (WRI) ont développé, en partenariat avec des entreprises, des ONG et des représentants d'états, une méthode de comptabilisation et de déclaration des émissions de GES pour les entreprises : le GHG Protocol « A Corporate Accounting and Reporting Standard ». La norme ISO 14064-1 : 2018, élaborée au sein du comité technique ISO/TC207 «management environnemental», spécifie, pour les organisations, les principes et les exigences pour la quantification et la rédaction de rapports sur les émissions et suppression de Gaz à Effet de Serre.

En France, l'ADEME a publié en 2004 une méthodologie de quantification des émissions de gaz à effet de serre pour les organisations appelée Bilan Carbone®. Cette méthode est aujourd'hui coordonnée et diffusée par l'Association Bilan Carbone. La méthode Bilan Carbone® prend en compte l'ensemble des gaz à effet de serre définis par le GIEC pour l'ensemble des flux physiques sans lesquels le fonctionnement de l'organisation ne serait pas possible. Cette méthode permet donc aux entreprises et collectivités territoriales de réaliser une évaluation globale des émissions GES, c'est-à-dire que celles-ci soient directes ou indirectes. (ADEME site, 2022)

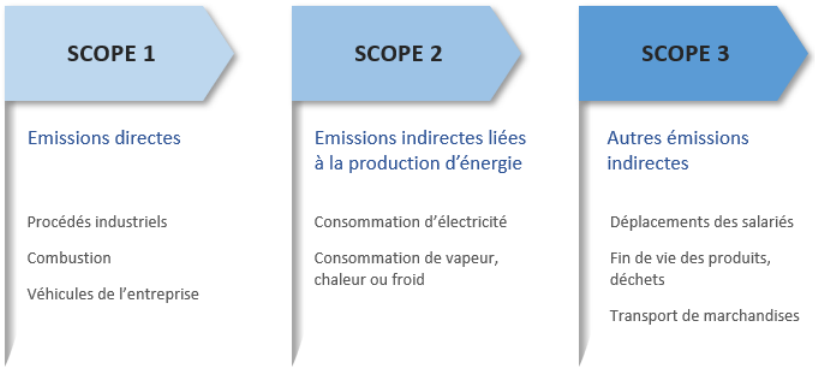


Image 6: Périmètre opérationnel du bilan GES. (Source: ISO 14069)

Face à une demande immédiate et urgente de la baisse des émissions GES afin de mitiger la crise climatique, on juge nécessaire que chaque opération, projet et institution fasse son bilan carbone. Ce sont surtout les acteurs de l'environnement qui devraient s'engager en montrant le bon exemple.

Afin de s'assurer que le coût - bénéfice au niveau carbone d'un projet de restauration de posidonie soit équilibré, plusieurs étapes et opérations devraient être considérées. Dans l'absence d'une méthode concise pour le calcul de tCO_{2e} d'un projet de génie écologique de fonds marins, certains paramètres à prendre en compte sont regroupés dans le tableau 2. Une fois qu'une méthode sera bien développée, elle pourra

servir de base commune pour tout les acteurs de la filière mais aussi pour le renforcement des directives et du cadre juridique.

Tableau 2: Etapes clés à prendre en compte pour le calcul de $tCO2_e$ d'un projet de génie écologique de fonds marins et leur répartition en SCOPE 1, 2 et 3.

SCOPE 1		
Divers	**Transport terrestre**	**Transport maritime**
Pompe	Distance km	Distance km
Excavateur	Nombre de trajets	Nombre de trajets
Voyage - vols	Nombre de voitures	Nombre de bateaux
SCOPE 2		
Plongée	**Fonctionnement boîte**	
Equipements	Bâtiment	
Nombre de plongées	Personnel	
Nombre d'heures	Electricité & Internet	
	Consommables	
SCOPE 3		
Traitement de données	**Autres**	
Heures de travail	Jack-up	
Taille de données	Entretien des équipements	
Stockage		
Nombre de réunions		

C. CADRE REGLEMENTAIRE

Grâce à son importance écologique et économique mais aussi à cause de sa vulnérabilité, ***Posidonia oceanica*** bénéficie d'une protection légale dans de nombreux pays méditerranéens, elle est également inscrite dans plusieurs conventions internationales.

International

La convention **RAMSAR** (1975) vise à conserver « les zones de marais, marais, tourbières ou eaux, naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, d'eau statique ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris les zones d'eau marine dont la profondeur dont à marée basse ne dépasse pas six mètres ». Les parties supérieures de P. Oceanica peuvent être concernées.

La Convention de **Berne** 82/72/CEE du Conseil, du 3 décembre 1981, se référant à la conclusion de la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et de l'environnement naturel de l'Europe, considère les espèces *Posidonia oceanica, Zostera marina* et *Cymodocea nodosa* comme des espèces d'une flore strictement protégée.

La Convention de **Barcelone** ou Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée de 1975, ainsi que ses protocoles ultérieurs, comprend diverses annexes pour la protection des habitats et des espèces. Dans son annexe II du Protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique en Méditerranée, il fait référence aux espèces en danger ou menacées, *Zostera marina, Zostera noltei, Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa* (Decision IG.20/5).

Européen

La Directive Habitats de l'Union Européenne (92/43/CEE du 21/05/1992), relative à la conservation des habitats naturels de la faune et de la flore sauvages, et sa déclinaison ultérieure par la directive 97/62/CE du 27 octobre,1997. Il inclut à l'annexe I comme habitats prioritaires les herbiers de Posidonia oceanica (habitat 1120) et les lagunes côtières (habitat 1150). En plus d'autres habitats naturels d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation (ZSC) comme les bancs de sable recouverts en permanence d'eau de mer peu profonde (habitat 1110), les plaines vaseuses ou sablonneuses qui ne sont pas recouvertes d'eau à marée basse (habitat 1140) et grandes criques et baies peu profondes (habitat 1160).

La directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000, qui établit un cadre communautaire d'action dans le domaine de la politique de l'eau, vise à atteindre un bon potentiel écologique et une bonne l'état des masses d'eau, pour cela il évalue la qualité écologique des masses d'eau côtières de la Méditerranée à travers des indicateurs basés sur l'état des angiospermes marins: législation et méthodologie santé des angiospermes marins ***Posidonia oceanica***, ***Cymodocea nodosa*** ou ***Zostera noltei***.

Plus récente, la directive-cadre sur la stratégie marine (2008/56/CE) du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établit un cadre d'action communautaire pour la politique du milieu marin, les États membres doivent adopter les mesures nécessaires pour atteindre ou maintenir le bon état écologique du milieu marin d'ici 2021. Cette directive européenne inclut également les angiospermes marins comme éléments d'évaluation du bon état écologique, complétant ainsi la directive-cadre sur l'eau sur divers aspects. Leur coordination peut permettre un meilleur contrôle des activités humaines qui menacent la conservation des herbiers marins.

National

France. La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), adoptée en octobre 2000 par le Parlement Européen et transposée en droit français le 21 avril 2004 fixe comme objectif l'atteinte d'un bon état écologique pour l'ensemble des masses d'eau du territoire européen. le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux et dans le Plan de Développement Durable du Littoral.

Du fait de la protection légale de ***Posidonia oceanica,*** les opérations de réimplantation, qui impliquent la récolte et le transport de boutures, nécessitent la demande d'une autorisation au Ministère de l'Environnement (CREBASSA, 1992). Jusqu'en 1992, ce dernier a délivré des autorisations permanentes (qui devaient toutefois être validées chaque année) ; ces autorisations ne précisaient pas les dates, quantités concernées et localités. Face à la dérive constatée en matière de réimplantations, le Ministère de l'Environnement (sur avis du Conseil National de Protection de la Nature) a décidé en 1993 de ne plus accorder d'autorisations permanentes.

Le 12 octobre, le Vice-Amiral d'Escadre Laurent Isnard, préfet maritime de la Méditerranée, a signé les premiers arrêtés règlementant le mouillage des navires de 20 ou 24 mètres et plus pour le département des Alpes-Maritimes. Ces arrêtés identifient des zones d'interdiction au mouillage, qui ont été définies selon un processus de concertation rassemblant l'ensemble des acteurs du monde de la mer (acteurs institutionnels, collectivités, ports, associations environnementales, pilotes, pêcheurs, plaisanciers et professionnels du yachting).

Italie. Le Ministère de l'Environnement et de la Transition écologique a mis en œuvre le décret ministériel 308/2015 1 et vise à fournir des suggestions utiles pour la formulation des cadres normatifs relatives aux projets et travaux dont la réalisation détermine

potentiellement les impacts sur les prairies de ***Posidonia oceanica***, habitat marin prioritaire 1120. sensu Directive Habitats 92/43 CEE. Au niveau régional, ils existent de measures de conservation spécifiques notamment en cote Ligurien.

Espagne. La loi 42/2007 sur le patrimoine naturel et la biodiversité, du 13 décembre, établit le régime juridique de base pour la conservation, l'utilisation durable, l'amélioration et la restauration du patrimoine naturel espagnol et de la biodiversité, dans laquelle, dans son annexe I, les herbiers de ***Posidonia oceanica*** sont un type d'habitat d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de Zones Spéciales de Conservation. Par conséquent, la présence de cette espèce est une raison suffisante pour la désignation d'espaces du réseau Natura 2000, qui contribuent au maintien ou à la restauration de l'état de conservation favorable des habitats naturels dans leur aire de répartition naturelle.

Le Décret royal 139/2011, du 4 février, pour l'élaboration de la liste des espèces sauvages sous régime de protection spéciale et du catalogue espagnol des espèces menacé indique que les populations de ***Posidonia oceanica*** figurent sur la Liste des espèces sauvages sous protection spéciale Régime.

Règlement (CE) n° 1967/2006 du Conseil du 21 décembre 2006 relatif à des mesures de gestion pour l'exploitation durable des ressources halieutiques en mer Méditerranée. Dans le chapitre II, l'article 2 définit le fond de végétation marine comme une zone dans laquelle le fond marin est caractérisé par la présence prédominante d'herbes marines, ou dans laquelle ladite végétation a existé et nécessite des mesures de restauration. Le terme collectif "lit de végétation marine" désigne les espèces ***Posidonia oceanica, Cymodocea nodosa, Zoostera marina*** et ***Zoostera noltei***. Dans le cadre de l'article 4, il est interdit de pêcher avec des chaluts, des dragues, des engins de piégeage, des sennes coulissantes, des filets à plomb, des sennes ou des filets similaires au-dessus des lits de végétation marine constitués, notamment, de Posidonia oceanica ou d'autres herbiers.

Décret 25/2018 du 27 juillet sur la conservation de ***Posidonia oceanica*** aux Baléares Îles, - Journal officiel des îles Baléares, du 28-07-2018 Ce décret vise à établir un cadre juridique homogène pour la protection et conservation de ***Posidonia oceanica***. Cependant, les zones incluses dans les espaces naturels protégés ou dans le Réseau Natura 2000 ont leur réglementation spécifique établie dans le plan instruments dérivés de la loi 5/2005,

Grèce. Environ 20% de la superficie totale des prairies de Posidonia est protégée car elle fait partie du réseau écologique européen Natura 2000. La directive 2000/60/CE établissant un cadre pour l'action communautaire dans le domaine de l'eau, ou directive-cadre sur l'eau, est entrée en vigueur le 22 décembre, à l'issue d'une longue période de discussions et de négociations entre les États membres de l'Union européenne de 2000. En droit grec le loi 3199/2003 transpose la directive européenne.

Le Cadre spécial pour l'aménagement du territoire et le développement durable de l'aquaculture (Journal officiel 2505/2011) interdisait l'installation d'unités aquacoles au-dessus ou à proximité des herbiers de ***Posidonia*** et d'autres herbiers marins de phanérogames.

Croatie. *Posidonia oceanica (L.) Delile* est une espèce strictement protégée en Croatie (Ordonnance sur les espèces strictement protégées (Journal officiel 144/2013)). De nombreuses mesures indirectes protègent également P. oceanica : création de réserves marines et de sites d'importance communautaire dans les zones d'herbiers de Posidonie bien développés, obligation de réaliser des études d'impact et de demander une autorisation pour les projets pouvant nuire à l'environnement, mesures de restriction émissions de polluants, restreindre certaines techniques de pêche telles que le chalutage de fond, éviter les installations aquacoles au-dessus des herbiers de posidonie, réglementer le mouillage des bateaux, renforcer la surveillance des constructions illégales et des enrochements à proximité et au-dessus des herbiers de posidonie, renforcer le service de surveillance des engins de pêche endommageant. La loi sur la pêche maritime (Journal officiel 81/2013, article 76, point 18) prévoit une amende de 40 000 à 75 000 kunas en cas de violation de l'interdiction de pêcher avec des chaluts, des dragues, des sennes tournantes, des sennes, des sennes de rivage ou des filets similaires au-dessus de les herbiers marins, en particulier Posidonia oceanica ou autres phanérogames marins, définis par l'article 4.1 du règlement (CE) n° 1967/2006 du Conseil.

Chypre. La directive-cadre sur la stratégie maritime (2008/56/CE) est entrée en vigueur en juillet 2008. Afin de garantir le maintien des pressions anthropiques à des niveaux compatibles avec l'atteinte du Bon Etat Environnemental (BEE), tout en permettant l'utilisation durable des biens et services marins des générations présentes aux générations futures, comme mentionné ci-dessus, elles ont été des normes méthodologiques, des critères et des indicateurs spécifiques pour chacun des 11 paramètres de description du BEE afin d'assurer la cohérence entre les États membres dans le respect de leurs obligations au titre de la directive. Parmi eux, la paramètre 6 parle de l' intégrité des fonds

marins. Le niveau d'intégrité des fonds marins garantit que la structure et le fonctionnement des écosystèmes sont protégés et qu'aucun effet néfaste n'est observé, en particulier sur les écosystèmes benthiques.

Malte. On y retrouve plusieurs directives comme le S.L. 10.30 qui désigne l'Autorité de Transport d'appliquer le loi et arrêter tout type d'activité nautiques sur des sites spécifiques. La GN 1377 en 2016 decide que Filfa bénéficiera de mesures de conservation supplémentaires et, en vertu de ses pouvoirs en vertu de la réglementation 17 Flora, Fauna and Natural Habitats Protection Regulations, 2006 (S.L.549.44) (Environment Protection Act, 2016), par laquelle elle peut prendre, pour tout site, à l'intérieur d'un site protégé, un arrêté de conservation pour contribuer à assurer la protection de la biodiversité par la conservation des habitats naturels et de la flore ou de la faune sauvages et pour maintenir et restaurer les habitats naturels et les espèces de la flore et de la faune sauvages. la faune ou les caractéristiques géologiques, géomorphologiques ou physiographique. Pareil en 2021 pour le site L-Għadira s-Safra et l-Iskoll tal-Għallis.

Monaco. A Monaco, l' Article 0 & o.244-14in du "Code de la mer" déclare: "La pêche aux chaluts de fond, sennes et filets similaires remorqués au-dessus des herbiers de Posidonia ou autres phanérogames marines est interdite."

Turquie. L'espèce est protégée sous loi.

Tableau 3: synthèse des cadres directives de protection de *posidonia oceanica* aux 22 pays de Mediterannée.

	International			European	National
	Berne	Barcelone	Ramsar		
Espagne	✓	✓	✓	✓	✓
France	✓	✓	✓	✓	✓
Italie	✓	✓	✓	✓	✓
Croatie	✓	✓	✓	✓	✓
Greece	✓	✓	✓	✓	✓
Chypre	✓	✓	✓	✓	✓
Monaco	✓	✓	✓	✓	✓
Malta	✓	✓	✓	✓	✓
Slovenia	✓	✓	✓	✓	NA

Bosnie-Hezergovine	✓	✓	✓	✘	NA
Montenegro	✓	✓	✓	✘	NA
Albanie	✓	✓	✓	✘	NA
Turquie	✓	✓	✓	✘	✓
Tunisie	✓	✓	✓	✘	NA
Algèrie	✓	✓	✓	✘	NA
Libye	✓	✓	✓	✘	NA
Egypte	✓	✓	✓	✘	NA
Morocco	✓	✓	✓	✘	NA
Liban	✓	✓	✓	✘	NA
Israel	✓	✓	✓	✘	NA
Syrie	✓	✓	✓	✘	NA
Palestine	-	-	-	-	-

DISCUSSION

Dans Résultats, nous avons distingué plusieurs techniques de restauration et replantation de ***posidonia oceanica*** regroupées dans deux méthodes bien distinctes : i) la germination de graines collectées soit en plages, soit en mer pour la plantation de jeunes pousses ii) la replantation de plantes adultes avec plusieurs alternatives. Parmi les méthodes revues, la méthode la moins invasive et qui permet de laisser intactes les populations naturelles semble être celle de la germination de graines. En revanche, la replantation des individus adultes arrachés du substrat par des dommages mécaniques dus aux activités humaines reste une mesure nécessaire de conservation de herbiers sains. Mais la question se pose : la reconquête naturelle de ses espaces ne se ferait-elle pas naturellement si les pressions étaient levées?

Des stratégies ont été proposée pour les projets de restauration écologique (Cunha et al 2012; Boudouresque et al; 2021). Ces stratégies mettent l'accent sur la prévention et la protection des herbiers. D'abord, faire tout son possible pour s'assurer que les menaces locales (par exemple, la bioturbation, l'herbivorie, l'hydrologie, les mouvements de sédiments, les impacts humains, etc.) sur les herbiers soient bien connues avant de lancer des projets de restauration. Ensuite, envisager tous les impacts possibles sur la base d'une revue de la littérature scientifique, des mesures des conditions physiques, de l'évaluation de l'état général de l'écosystème et ne commencer que lorsque toutes les menaces à l'origine de la régression ont été éliminées. Comme présenté dans le guide technique de restauration écologique (Lenfant et al., 2015) le moment d'agir dans un écosystème dégradé fait suite à une forte pression anthropique en continue. Le suivi dans le long terme (à l'échelle de la nature et pas à celle de l'homme) d'un tel écosystème est également nécessaire afin de s'assurer qu'une repopulation ne se mette naturellement en place. La valeur écologique d'un écosystème issu des processus naturels ne peut jamais se faire par l'homme tout simplement parce que nous ne connaissons pas suffisamment ces processus pour pouvoir les répliquer fidèlement.

Les opérations de restauration des herbiers sont considérées parmi le plus coûteuses avec un coût moyen estimé à106,782 US$/ha (Boudouresque, 2019). Si la valeur économique pour la contribution de P.oceanica au bien être humain est entre 284 et 541euros/ha/an (Campagne et al., 2022), il nous faut respectivement entre 375 et 197 ans pour amortir l'investissement d'une opération de restauration de posidonie par ha. Avec une croissance de 1–7 cm par an pour les rhizomes orthotrophiques et moins de 14 cm par ans pour les

rhizomes plagiotrophiques, combien de cm de feuillage et rhizomes aurons nous gagné dans 375-197 ans si on laissait une recolonisation naturelle se mettre en place une fois les pressions levées?
N'oublions pas l'objectif de la neutralité carbone fixé pour 2050. Cet objectif oblige à une étude bilan carbone afin d'optimiser les processus et juger la faisabilité d'un projet d'un point de vue coût-bénéfice. Il est impératif de calculer les tCO_2e/ha d'une opération de restauration et le temps nécessaire pour atteindre le rendement en carbone séquestré. Avec une crise climatique galopante, nous n'avons plus de temps à perdre.

Tandis que le cadre législatif pour les états européens est bien renforcé autour de la protection de Posidonia oceanica, l'efficacité de ce cadre n'est pas prouvée. Est-ce que les autorités maritimes sont en mesures de contrôler et pénaliser les mouillages forains de plaisanciers dans tous les états ou les activités de pêche autour de posidonie? Malgré le fait que la France ait signé les conventions internationales et adopté la directive européenne depuis 2004, ce n'est qu'en 2020 qu'a été publié un arrêté concernant l'interdiction du mouillage dans l'herbier par les navires de plus de 24m afin d'assurer la protection des herbiers des dommages causés par les ancres. On constate qu'en Grèce par exemple, un territoire avec une forte présence de populations de posidonie, les directives ne sont pas en mesures d'être appliquées sur le terrain. Il n'existe pas un mécanise de contrôle ou de prévention afin d'éviter le mouillages sur les herbiers. On retrouve un seul projet de site des eco-mouillages dans l'aire marine protégée de Gyaros qui n'a pas encore vu le jour. Quant aux pays du sud, il est très difficile de retrouver le cadre réglementaire et plus encore de juger de son efficacité. Sans une notion de la langue arabe qui représente la langue dominante du bassin sud de Méditerranée, la recherche de littérature provenant du Maroc, de l'Algérie, de la Tunisie, de la Libye ou de l'Egypte s'avère une tache compliquée.

Jusqu'à présent le cadre réglementaire et les directives internationales se focalisent sur la protection et la conservation de l'espèce. Un cadre réglementaire concernant la restauration des herbiers qui assure la bonne conduite de projets de restauration est jugé nécessaire afin de i) assurer la bonne sense écologique de ces projets et ii) simplifier l' acquisition des autorisations pour une intervention de restauration au niveau national.

Si la Méditerranée est considérée comme un Large Marine Ecosystem, une coordination au niveau international concernant les projets de restauration pourra garantir un cadre commun décidé par tout les acteurs du basin. La mise en place d'un tel cadre permettrait d'évaluer précisément la pertinence d'un projet de restauration avant sa réalisation et d' assurer la bonne gestion de ce projet. L'accord RAMOGE est un excellent exemple de collaboration transfrontalière entre la France - Monaco - l'Italie ayant comme

but de préserver les écosystèmes, sensibiliser les acteurs du milieu marin et optimiser la lutte contre des évènements de pollution. Dans ce contexte, il est plus que souhaitable d'arriver à signer des accords similaires intergouvernementaux entre les états de la mer Adriatique et de la mer Egée.

CONCLUSION

Le grand nombre des travaux effectués autour de *posidonia oceanica* nous permettent aujourd'hui d'avoir une connaissance globale de ces rôles et fonctions. Après avoir effectué cette synthèse bibliographique, plusieurs questionnement ont trouvé des réponses, en revanche des nouveaux questionnements se posent naturellement. La collaboration entre les scientifiques, les politiques et les acteurs du milieu marin au niveau méditerranéen reste la seule voie pour garantir la protection et la conservation de ce habitat précieux.

BIBLIOGRAPHIE

Alagna A., Vega Fernández T., Terlizzi A., Badalamenti F., I*nfluence of microhabitat on seedling survival and growth of the mediterranean seagrass posidonia oceanica (l.) Delile,* Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 119, **2013**, Pages 119-125, *https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.01.009*.

Bacci T., La Porta B. . *Manuale delle tecniche e delle procedure operative per il trapianto di Posidonia oceanica. LIFE SEPOSSO,* **2022** (LIFE 16 GIE/IT/000761), Roma.

Bengil, Kızılkaya E.&T., Inci & Alan, Vahit & Akcali, Baris & Bengil, Fethi.. P*osidonia oceanica (Linnaeus) Delile,, 1813 türünün restorasyonunda kafes sistemlerinin herbivor ve insan aktivitelerine karsı etkilerinin incelenmesi*, **2018.**

Blanco-Murillo F., Yolanda Fernández-Torquemada, Aurora Garrote-Moreno, Claudio A. Sáez, Jose Luis Sánchez-Lizaso, Posidonia oceanica L. (Delile) meadows regression: *Long-term affection may be induced by multiple impacts*, Marine Environmental Research, Volume 174, **2022**, https://doi.org/10.1016/*j.marenvres.2022.105557*.

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

Boudouresque C. F. , Gravez V., Meinesz A., Molenaar H., Pergent G., Vitiello P. *https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=136*

Castejón Silvo, Enríquez, Terrados Muñoz,*Technical guide: The planting of Posidonia oceanica, Departamento de Marca e Imagen Corporativa de RED ELÉCTRICA*, **2018**, M-35941-2018

Çelebi B., *A study on posidonia oceanica (l.) delile, 1813 seagrass meadows in the levant sea,* M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, **2007**.

Cunha,A.H., Marbá,N.N., vanKatwijk,M.M., Pickerell,C., Henriques,M., Bernard,G., Ferreira,M.A., Garcia,S., Garmendia, J.M., Manent, P. *Changing paradigms in seagrass restoration*. Restor. Ecol. **2012**, 20, 427–430.

de Los Santos, C. B., Krause-Jensen, D., Alcoverro, T., Marbà, N., Duarte, C. M., Van Katwijk, M. M., & Santos, R. (). *Recent trend reversal for declining European seagrass meadows.* **2019,** Nature communications, 10(1), 1-8.

García S., Aguilar R., de la Torriente A., Depósito legal: M-33.369-2009 ISBN: 978-84-92543-09-0

Gonzales-Correa J. M., Just T. Bayle Sempere*, P. Sánchez-Jerez, Carlos Valle, *Posidonia oceanica meadows are not declining globally. Analysis of population dynamics in marine protected areas of the Mediterranean Sea,* **2007,** Mar Ecol Prog Ser 336: 111–119.

IUCN Mediterranean Red List **2017**. Posidonia oceanica. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3

Lafabrie C., C. Pergent-Martini, G. Pergent, *Metal contamination of Posidonia oceanica meadows along the Corsican coastline (Mediterranean)*, Environmental Pollution, Volume 151, Issue 1, **2008**, Pages 262-268, ISSN 0269-7491, *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.047*.

Lenfant P., Gudefin A., Fonbonne S., Lecaillon G., Aronson J., Blin E., Lourie S.M., Boissery P., Loeuillard J.-L., Palmaro A., Herrouin G., Person J., **2015**. *Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes.*

Meinesz,A.; Caye,G.; Loquès,F.; Molenaar,H. *Polymorphism and development of Posidonia oceanica transplanted from different parts of the Mediterranean into the National Park of Port-Cro*s. Bot. Mar. **1993**, 36, 209–216

Nona S.R. Agawin, Adrià Sunyer-Caldú, M. Silvia Díaz-Cruz, Aida Frank-Comas, Manuela Gertrudis García-Márquez, Antonio Tovar-Sánchez, *Mediterranean seagrass Posidonia oceanica accumulates sunscreen UV filters*, Marine Pollution Bulletin, Volume 176, **2022**, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113417.

Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent- Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M. Les

herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques. **2012,** Gland, Suisse et Malaga, Espagne : IUCN. 80 pages.

Piazzi L., Acunto S., Cinelli F., *In situ survival and development of Posidonia oceanica (L.) Delile seedlings,* Aquatic Botany, **1999**, 63, 2, 103-112.

RAC/SPA - UNEP/MAP, *Monitoring protocol for Posidonia oceanica beds.* **2014**. Guala I, Nikolic V, Ivesa L, Di Carlo G, Rajkovic Z, Rodic P, Jelic K. Ed. RAC/SPA - MedMPAnet Project, Tunis. 37 pages + annexes.

Terrados,J., Marín,A., Celdrán, D. *Use of Posidonia oceanica seedlings from beach cast fruits for seagrass planting.* Bot.Mar. **2013**, 56, 185–195

Ward, E. A., Meek, S. K., Gordon, D. M., Cameron, T. C., Steer, M. D., Smith, D. J., & Tsimpidis, T. . *The use of storm fragments and biodegradable replanting methods allows for a low-impact habitat restoration method of seagrass meadows, in the eastern Aegean Sea*, **2020** Conserv. Evid, 17, 1-6.

WEBOGRAPHIE

- https://nanopdf.com/download/posidonies_pdf#
- https://bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/m%25C3%25A9thodes%2Bde%2Bcalcul/siGras/0
- https://www.dirm.mediterranee.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dirm_med_-_brochure_strategie_restauration.pdf
- https://www.frontiersin.org/research-topics/10620/marine-ecosystem-restoration-mer---challenges-and-new-horizons
- https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/39539/224215/file/02_Protocole_prelev-transplant_Posidonie_Frioul_BIAM_2021.pdf
- https://www.rac-spa.org/sites/default/files/doc_vegetation/ramoge_fr.pdf
- https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=981
- https://www.fundacionbancosantander.com/content/dam/fundacion-banco-santander/es/documentos-/medio-ambiente-e-investigacion/recuperacion-de-espacios-naturales/MANUAL-8-Restauracion-de-Praderas-Marinas.pdf
- https://fr.calameo.com/ofbiodiversite/read/0035029480e5c09cfbf14?authid=y0HVFvsxeEPw
- https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/Guia-plantado-posidonia-oceanica_nov_en.pdf
- https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/documents/page/annuaire_gecmedd_vff.pdf
- https://atlasposidonia.com/en/our-mission/
- https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=136
- https://www.un.org/fr/climatechange/net-zero-coalition
- https://medposidonianetwork.com

ANNEXE

I. Code de bonne conduite pour les projet de restauration de *posidonia oceanica.*

"*Le problème se pose très concrètement dans le cas de Posidonia oceanica, en France, où des collectivités locales pourraient être tentées de contourner la loi de protection de P. oceanica en proposant des réimplantations au succès hypothétique en compensation de destructions bien réelles. Quelques principes pouvant constituer les bases d'un code de bonne conduite sont préconisés ci-dessous :*

(1) le site **et le biotope** de réintroduction ont été autrefois occupés par l'espèce réintroduite;
(2) les **causes** de la disparition de l'espèce, que l'on voudrait réintroduire sur le site, ont cessé d'agir : pollution, surpêche, pression humaine, etc.;
(3) la réintroduction ne se fait pas **à proximité d'une population survivante** importante (éviter de "réintroduire pour réintroduire");
(4) les connaissances sur la **biologie** de l'espèce (dynamique des populations, biologie de la reproduction, etc.) permettent de penser que la réintroduction a des chances de succès;
(5) la réintroduction ne peut pas se faire **en compensation de la destruction** d'une population de la même espèce. Pour éviter une telle dérive, il est décidé que, dans un rayon de 10 km autour d'une destruction délibérée (dans le cadre d'un aménagement du littoral), aucune réintroduction ne peut être réalisée pendant une période de 10 ans;

(6) le prélèvement d'individus destinés à la réintroduction ne doit pas **mettre en péril** la population-source.
(7) les individus destinés à la réintroduction ou au renforcement doivent provenir d'une population **génétiquement identique** (ou proche) de celle qui a occupé la région où est projetée la réintroduction;
(8) les techniques de réintroduction (ou de renforcement des populations) ne doivent pas constituer une **nuisance** pour les espèces ou les écosystèmes indigènes.
Ces propositions ont été reprises dans un document du Parlement Européen (Union Européenne) préparé dans le cadre du programme STOA (présenté à Corfou, Grèce, en septembre 1993)."
Récitation de Boudouresque.

Annexe 2

Les défis liés à la restauration de l'huitre plate en France : aspect technique, changement d'échelle et gouvernance

Par Lorenzo ARDUINO

Les défis liés à la restauration de l'Huître Plate en France

Aspects écologiques et techniques, changement d'échelle et gouvernance

Arduino Lorenzo

Rapport présenté dans le cadre du diplôme universitaire de Restauration écologique des petits fonds marins et côtiers

Département Biologie-Écologie
Université de Montpellier
France
23/05/2022

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes de l'Université de Montpellier à l'origine de ce Diplôme Universitaire unique en France.

Un grand merci à Julie Déter, Philippe Lenfant, Pierre Boissery, Anaïs Gudefin, Gwennaëlle, Gilles Lecaillon, Olivier Bocquet, pour leurs interventions et leurs apprentissages que je garderai précieusement avec moi au cours de ma carrière.

Merci à vous pour cette dynamique inspirante et de nous permettre d'agrandir l'écosystème de la Restauration en France.

Un grand merci à Lucas Berenger pour sa bienveillance et ses conseils encourageants.

Enfin, un merci particulier à Stéphane Pouvreau et Hélène Cochet, sans qui je n'aurais jamais croisé le chemin de ces huîtres plates qui m'inspirent tant.

Résumé

À l'aune de la Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes et de la décennie pour les sciences océaniques, l'heure n'est plus seulement à la préservation de l'environnement mais à sa restauration. Pour ce faire, il est aussi grand temps d'augmenter les connaissances que nous avons de 70% de la surface de notre planète et de la biodiversité en son sein.
L'huître plate, l'Ostrea edulis, la seule espèce native des côtes européennes est un véritable 'colosse écologique'. Convoitée depuis l'Antiquité, surpêchée au 19ème siècle car les français et anglais lui prêtaient des vertus aphrodisiaques, elle est désormais menacée de disparition.
Cette espèce "ingénieure de l'écosystème" , forme de véritables récifs qui servent d'habitats à plus d'une centaine d'espèces : de nombreux invertébrés (gastéropodes, bivalves, petits crustacés, bryozoaires, échinodermes, tuniciers, éponges, annélides) y trouvent refuge, s'y reproduisent et s'y alimentent. Le substrat des coquilles sert aussi de fixation à de nombreuses macro-algues marines (algues brunes, algues vertes mais aussi algues rouges dont certaines corallines). Ces récifs servent aussi de nurseries à des petits pélagiques, comme les seiches.
Si des dynamiques européennes existent, nous nous concentrons dans cette étude sur les défis écologiques, techniques et sociaux que représente la restauration en France. Comme principal défi technique, nous avons identifié le manque de résultats sur les expérimentations en cours, si ce n'est quelques projets encourageants, utilisant des supports en béton rugueux. Nous tentons également d'identifier les principaux verrous qui font que la France comporte moins de projets que ses voisins. Ceux-là touchent particulièrement à la gouvernance et à l'amnésie collective dont a fait l'objet l'espèce au 20ème siècle, qui font que l'espèce est moins protégée.

Mots-Clés : Restauration écologique de l'huître plate, gouvernance de la restauration écologique, écologie de l'huître plate, maladies huitres plates,

Keywords : Native Oyster restoration, ecological restoration policy, substrates for ecological restoration, NORA

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures

Glossaire

I. INTRODUCTION 7

1.1 Contexte Général : 7

1.2 L'Ostrea Edulis, ingénieure des côtes européennes 8

1.3 Plan de l'étude 9

II. L'ÉCOLOGIE D'OSTREA EDULIS 9

2.1 Écologie de l'espèce à l'état Sauvage 9

2.1.1 Le cycle de vie de l'huître plate 10

2.1.2 La phase larvaire 10

2.1.3 Recrutement , phase benthique et croissance 11

2.2 Inventaire et caractérisation 13

2.2.1 En Europe 13

2.2.2 En France : Le cas de la Bretagne/ Focus sur la méthodologie du projet FOREVER 15

2.2.3 Éléments de discussion : il une restauration spontanée de l'Huître Plate en France ? 16

III. LE 21EME SIÈCLE, OU LES DÉBUTS DE LA RESTAURATION 17

3.1 Projets de restauration existants en Europe 18

3.2 Focus sur les projets français 18

3.2.1 Enrichissement coquillier 18

3.2.2 Restauration active par semis de naissains 19

3.2.3 Le projet REFONA 19

3.2.4 Le projet FOREVER 20

3.2.5 Comparaison des techniques de restauration 22

3.3 Éléments de discussion : Quelle est l'échelle de la restauration de l'huître plate en France au regard de la dynamique européenne ? 23

IV. CONCLUSION : FREINS ET MISE A ÉCHELLE 24

4.1 Amnésie collective, influence sur le cadre légal de protection et de restauration de l'HP en France 24

4.2 La gouvernance de l'Huître Plate en France, jonction d'intérêts humains et écologiques (Partie Confidentielle) 25

BIBLIOGRAPHIE 28z

ANNEXES 29

TABLE DES FIGURES

1. **Figure 1** - Schéma global du cycle de vie de l'Ostrea Edulis, Stéphane Pouvreau 2022 – **p 10**
2. **Figure 2 -** Schéma de croissance de l'Ostrea Edulis, Stéphane Pouvreau 2022 © S.Pouvreau **– p 12**
3. **Figure 3 -** Résultats du génotypage pour deux marques de la puce huitre plate - **p 14**
4. **Figure 4 -** Classification des états écologiques des bancs résiduels – projet FOREVER 2021 – **p 15**
5. **Figure 5 -** récifs en rade de Brest – rapport FOREVER, 2021 © S.Pouvreau – **p 20**
6. **Figure 6 -** récifs suspendus en rade de Brest – FOREVER, 2021 – **p 21**

GLOSSAIRE

OE Ostrea Edulis

HP Huître Plate

NORA : Alliance de restauration de l'huitre plate, *Native Oyster Restoration Alliance*

OSPAR Convention Oslo-Paris pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est

CRC Comité régional de conchyliculture

SOBAIE Syndicat des Ostréiculteurs de la Baie de Quiberon

OFB Office français de la biodiversité

I. INTRODUCTION

1.1 Contexte Général :

À l'aune de la Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes et de la décennie pour les sciences océaniques, l'heure n'est plus seulement à la préservation de l'environnement mais à sa restauration. Pour ce faire, il est aussi grand temps d'augmenter les connaissances que nous avons de 70% de la surface de notre planète et de la biodiversité en son sein.
Tout au long de l'étude, la définition de l'Union Internationale de Conservation de la Nature de la restauration écologique fera office de boussole : « *La restauration écologique est une action intentionnelle qui initie, accompagne, favorise le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit, en respectant sa santé, son intégrité et sa gestion durable* »[1]

Bien que les huîtres riment souvent avec nos fêtes de noël, dans leurs bacs traditionnels et joliment disposées sur un lit d'algues, nous parlerons ci-après d'une espèce qui existe autrement que pour nos papilles, aux qualités surprenantes. Nous ne parlerons pas ici de la fameuse *Crassostrea gigas*, ou l'huitre creuse familière, native du Pacifique. Mais d'une espèce indigène de nos côtes, qui effectue en silence, des miracles sous l'eau : l'*Ostrea Edulis*, l'huître plate européenne.

On considère que les récifs d'invertébrés étaient un jour les structures écologiques dominantes des estuaires du monde entier, mais que 85% des récifs historiques d'huîtres toutes espèces confondues ont disparu. Aujourd'hui, il existe plus de 120 projets de recherche et de restauration de l'huître dans le monde.

Il existe aujourd'hui plusieurs espèces majeures :

- Huîtres plates : O*strea edulis*, native de l'Europe et sa cousine *Angasi*, native de l'Océanie, *Ostrea lurida* de la côte ouest Nord-Américaine et *Ostrea puelchana*, native d'Argentine
- Huîtres creuses : *Magallana Angulata*, huître creuse portugaise, *Crassostrea Gigas* ,huître creuse japonaise, *Crassostrea virginica*, de la côte Est Nord-Américaine

Depuis 2009, *L'Oestra Edulis* figure dans la liste noire des espèces et habitats menacés de la convention Oslo-Paris pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est[2]. On sait aujourd'hui que les populations d'huîtres plates sont en très mauvais état, particulièrement en Europe (Beck et al., 2011).
Pour tenter de mieux la préserver, l'alliance pour la restauration de l'huître plate (NORA) fut créée en 2017 sous l'égide de l'Agence Allemande de Conservation de la Nature (BFN). L'Objectif de la NORA est de renforcer et de restaurer les populations d'huîtres plates européennes. Ses membres sont des représentants d'organisations gouvernementales, des professionnels de la conchyliculture, des entreprises, des experts, des associations, etc. La NORA est un réseau de

[1] UICN France (2018). Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. Paris, France.

[2] Site de l'OSPAR, évaluations des comités

porteurs de projets, de passionnés de l'espèce qui tente par tous les moyens de la mettre sur le devant de la scène.

1.2 *L'Ostrea Edulis*, ingénieure des côtes européennes

L'huître plate, l'Ostrea edulis, la seule espèce native des côtes européennes est un véritable 'colosse écologique'. Convoitée depuis l'Antiquité, surpêchée au 19ème siècle car les français et anglais lui prêtaient des vertus aphrodisiaques, elle est désormais menacée de disparition.

Cette espèce "ingénieure de l'écosystème" , forme de véritables récifs qui servent d'habitats à plus d'une centaine d'espèces : de nombreux invertébrés (gastéropodes, bivalves, petits crustacés, bryozoaires, échinodermes, tuniciers, éponges, annélides) y trouvent refuge, s'y reproduisent et s'y alimentent. Le substrat des coquilles sert aussi de fixation à de nombreuses macro-algues marines (algues brunes, algues vertes mais aussi algues rouges dont certaines corallines). Ces récifs servent aussi de nurseries à des petits pélagiques, comme les seiches.
Les huîtres filtrent également les nutriments quand les eaux douces plongent dans la mer : elles améliorent la qualité de l'eau (une huître plate filtre 5L d'eau par heure), en sauvegardant d'autres espèces. Certains experts les considèrent à ce titre comme l'équivalent des récifs coralliens dans nos mers tempérées (Beck et al., 2011).

Peu de bancs intacts existent aujourd'hui sur nos côtes, et l'espèce est toujours soumise à différentes pressions : dégradation de l'habitat, surexploitation des gisements, pêche abusive, souvent par simple méconnaissance.
Aujourd'hui, 100 000 tonnes d'huîtres creuses, espèce d'huître japonaise introduite dans les années 50, sont produites chaque année en France contre 2 000 tonnes d'huîtres plates.

Outre ses nombreux services à la biodiversité locale, l'huître est une espèce convoitée, source économique de nombreux territoires en France (Bretagne, Normandie, Vendée, la Charente-Maritime, l'Aquitaine). Clé de voûte d'écosystèmes marins, elle pourrait également avoir des externalités économiques importantes.

Tenter de restaurer l'huître plate, c'est également mettre le projecteur sur cette espèce si emblématique de nos côtes européennes trop longtemps oubliée. Cette mise en lumière permet également de parler de sa conservation mais aussi de la préservation de notre environnement marin.
De plus, l'huître plate est partie intégrante du patrimoine historique, culinaire et naturel français. Plus qu'un produit, elle constitue en elle-même un véhicule de sensibilisation qui représente l'espoir, qui doit tous nous inspirer à œuvrer pour le bien commun.

1.3 Plan de l'étude

Afin de comprendre les motivations derrière la restauration de l'espèce et de traiter à bras le corps les défis liés à son retour sur les côtes européennes, il convient de dresser son panorama écologique : menaces sur l'évolution des colonies, inventaire des bancs résiduels, conditions devant être réunies pour amorcer sa reconquête.

Dans un second temps, nous dresserons une synthèse des différents projets d'intérêt à travers l'Europe, car le renouveau de l'huître passe aussi par une dynamique collective à l'échelle continentale. Nous effectuerons ensuite un focus sur la France et sur les différentes techniques mises à l'œuvre. Cette partie nous permettra d'avoir un arrêt sur image sur les techniques actuelles en fonction de résultats écologiques encore incomplets, soulignant les chantiers existants en matière de restauration.

En guise de conclusion et d'ouverture, nous nous intéresserons aux facteurs sociaux et politiques qui entravent la mise en place de projets de restauration et de manière plus globale sa conservation.

II. L'ÉCOLOGIE D'OSTREA EDULIS

2.1 Écologie de l'espèce à l'état Sauvage

Avant de se lancer dans l'étude des différents projets de restauration existants, nous dresserons dans cette partie un tableau compréhensif de l'espèce et de ses différentes dynamiques écologiques. Son cycle de vie est ici décrit, les conditions nécessaires à son évolution, et les menaces qui pèsent sur elle à chaque phase du cycle.

Dans une deuxième sous-partie, nous nous intéresserons aux zones de répartition de l'espèce en Europe, des formes de bancs naturels des types génétiques différents en son sein.

L'expérimentation du projet FOREVER entre 2018 et 2021 en deux zones a permis d'en savoir plus sur les éléments essentiels impliqués dans la dynamique d'un banc sauvage d'huîtres plates. Cette expérimentation a été menée sur deux sites ateliers, sur une zone Natura 2000 en rade de Brest et sur une concession ostréicole collective en baie de Quiberon.
Afin d'assurer ce suivi, installation de deux laboratoires sous-marins de 250m2 pour suivre les facteurs suivants: Paramètres hydrologiques; concentrations larvaires; prédation, mortalité et croissance de naissains. Cette expérimentation permet de dresser un tableau écologique fondamental pour engager des projets de conservation ou de restauration de l'espèce. Leurs travaux seront relatés au fil de l'étude de cas, en plus des connaissances en matière d'écologie de l'OE.

2.1.1 Le cycle de vie de l'huître plate

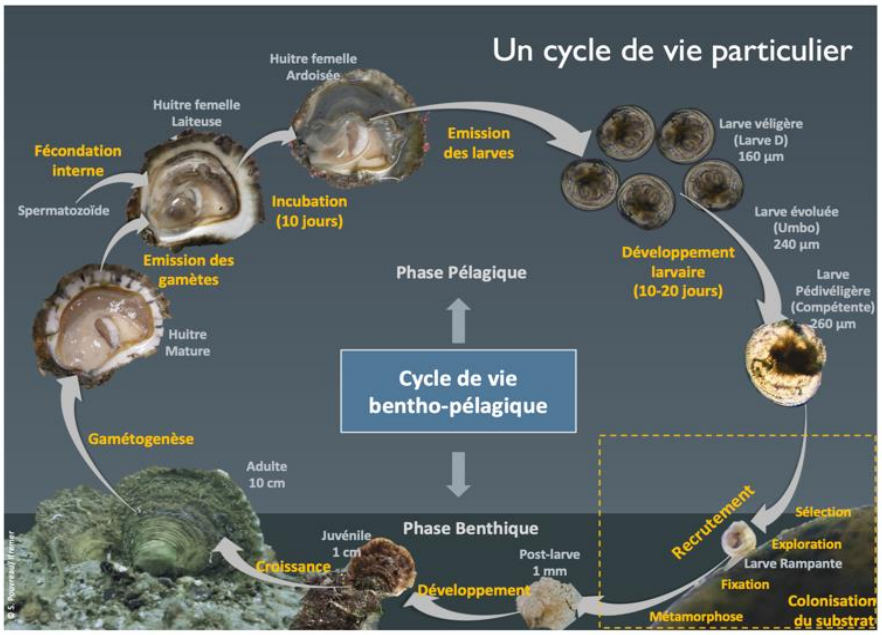


Figure 1 : Schéma global du cycle de vie de l'Ostrea Edulis, Stéphane Pouvreau 2022

L'huître plate est avant tout un mollusque bivalve de la famille des *Ostreïade*. Elle est une espèce protandrique, à la croissance lente. Celle-ci a une espérance avoisinant les 20 ans (Alice E.Lown et al., 2020). L'incubation chez l'huître plate adulte est d'une durée de 10 jours avant émission. La vie larvaire pélagique varie de 10 à 20 jours avant la phase de recrutement, qui elle dure une 20aine de jours(Helmer et al., 2019**).**
La phase Benthique, (Preston et al 2020) comprend :

- La phase de fixation et la formation post larvale – 1 an et une taille allant de 3 à 10 mm
- Le développement de naissains juvéniles pendant 2-3 ans, taille de 10 à 50mm
- Leur maturation en adultes – 4 ans au total, taille de 50-200+ mm

2.1.2 La phase larvaire

Si chaque étape est dépendante de la précédente, nous ne nous concentrons pas ici sur la gamétogénèse hormis pour évoquer les conditions de ponte des adultes. Cette sous-partie sera focalisée sur les conditions physiques et chimiques au développement de la larve ainsi que sur ses comportements pour atteindre la phase de recrutement.

2.1.2.1 Conditions physiques et chimiques

On considère que lors de la période de reproduction qui court de juin à septembre, les adultes requièrent une température minimale de 16℃ pour émettre leurs gamètes. Les huîtres mères incubent pendant dix jours ensuite, et relâchent leurs jeunes larves dans des eaux autour de 17℃ (Gourault 2018). Les températures idéales à leur développement se situent 18℃ et 20℃.
On sait aujourd'hui que les dessalures prolongées inférieures à 20 PSU sont préjudiciables aux huitres plates et influence l'installation de naissains, qui auront à leur tour un effet sur la phase de dispersion larvaire. Il apparaît que l'espèce se niche dans les secteurs où les dessalures sont modérées. Historiquement, une réduction de l'habitat de l'OE peut s'expliquer par l'augmentation

des apports d'eau douce entre le 19ème et le 20ème siècle, pour différentes raisons : déforestation, utilisation des terres, transformation typologique des bassins versants.
Outre la température et la salinité, la larve est influencée par d'autres facteurs abiotiques comme l'hydrodynamie et le régime des vents, la bathymétrie, la marée, mais aussi des facteurs biotiques comme la source de nutriments (Maathuis et al., 2019).
On constate effectivement que les bancs d'huitres plates sont localisés dans des secteurs où la circulation hydrodynamique permet une faible dispersion larvaire. Typiquement des baies enclavées ou anses de rivières sont des lieux privilégiés, pourvu que les autres facteurs soient réunis.
Il ressort donc que la température occupe un rôle prépondérant dans l'abondance larvaire, où on peut constater la forte variabilité interannuelle de l'espèce. (Cochet et al 2021) En conséquence, ce déterminant environnemental influence chaque phase cruciale de la vie de l'OE, de l'émission des larves, de leur développement et de leur recrutement. De réelles fenêtres temporelles et environnementales doivent être réunies pour que :

- L'abondance larvaire soit au rendez-vous
- Les larves se développent correctement
- Qu'elles se dispersent adéquatement afin d'assurer un recrutement optimal.

2.1.2.2 Comportement larvaire

Ici, il convient de s'intéresser à la dispersion de la larve et particulièrement à son comportement. Ces phénomènes précèdent et impactent le comportement de recherche d'un site de fixation (Rodriguez et al., 1993) .

On sait que la larve alterne entre deux mouvements, nage verticale et en spirale (Bayne,2017). On a de fait, une distribution au sein de la colonne d'eau qui varie fortement et dépend du stade de son développement larvaire (De l'état de la coquille dépend sa vitesse). Les larves ont également la capacité d'influencer leur position dans la colonne d'eau, bien qu'elles soient toujours à la merci de la circulation des masses d'eau dans une zone côtière précise. Il apparait nettement que plus les eaux sont agitées, plus il y a de dispersion et moins de concentrations de larves dans certaines zones.
L'état de la science aujourd'hui semble faire ressortir un comportement de nage en dent de scie vers la surface puis en chute (Brossin 2018). On suppose que l'OE, au dernier stade de son développement, reproduise un mouvement similaire à l'huitre creuse, où dans la phase de recherche de points de fixation, la larve semble se propulser vers le fond en effectuant ce qu'on appelle le « Dive bombing » (Finelli et al., 2003). Ces comportements répondent aussi à des facteurs chimiques, qui démontrent pourquoi on trouve une concentration plus grande de larves sur des bancs historiques avérés. (Koehl and cooper, 2015).
Dans les derniers jours de la vie larvaire, au moment de rechercher leur substrat de fixation, ces-dernières sont plus sensibles à différents stimulis environnementaux : luminosité, salinité et température, courants, turbulence, son pression, signaux chimiques des congénères, etc. Ces comportements très actifs semblent expliquer le caractère grégaire de l'espèce. Cela semble démontrer qu'une larve aura des difficultés à se fixer sans la présence de bancs 'fleuris'.

2.1.3 Recrutement , phase benthique et croissance

2.1.3.1 Colonisation du substrat - comportement

Pour rappel, le recrutement est une étape qui implique une série d'évènements et de changements morphologiques via la métamorphose, qui permettent à une larve fixée d'acquérir le nécessaire pour s'adapter à son nouveau mode de vie benthique. (Walker, 1981) Chez les huitres, le recrutement est le nombre d'individus ayant survécu jusqu'à un type spécifique dans une fenêtre temporelle donnée. Chez l'OE, une larve recrutée a une taille supérieure à 300 µm. L'OE peut d'ailleurs se fixer sur différents substrats : graviers, débris coquillers, bivalves installés, installations humaines. Elle préfèrera cependant les substrats faiblement sédimentés pour éviter l'envasement. Cette surface doit présenter des qualités rugueuses. Nous reviendrons sur cet aspect dans notre deuxième partie.
À ce titre, l'HP est plutôt répartie dans la zone intertidale jusqu'à la zone subtidale. L'espèce peut être présente à plus de 30 m de profondeur, même si les densités plus importantes se trouvent entre 0 et 5 mètres de profondeur.
Le recrutement dépend de chaque zone identifiée dans des projets de conservation ou de restauration, et doit faire l'objet d'une étude locale de captage des larves afin de rendre compte de la variabilité spatiale du recrutement.
Ces différents éléments auront une influence sur l'exploration de la larve et sa colonisation du substrat, pour passer à la prochaine étape de son développement suivant sa métamorphose post-larvaire.

2.1.3.2 Phase benthique et menaces

Les post-larves et les naissains feront face à de nombreuses menaces au cours de leur croissance : prédation, menaces anthropiques et maladies, particulièrement dans la phase du recrutement jusqu'à la phase juvénile (1 an d'existence). Quand les naissains atteignent 1cm, bigorneaux perceurs, étoiles de mer et crustacés sont leurs principales menaces. Des espèces de pélagiques comme les daurades et les raies s'ajoutent aussi à la liste des prédateurs. Ces menaces ont plus d'impact notamment à cause l'activité humaine : La surexploitation et les dégradations de l'habitat ont favorisé l'accessibilité des prédateurs de l'OE. Les résultats de FOREVER montrent que les huîtres étant moins cohésives, elles deviennent plus faciles à être ingérées par les prédateurs car plus accessibles. Cette fragmentation augmente aussi les points d'attaque de petits prédateurs comme les bigorneaux.

Depuis les années 1970, l'OE est victime de deux maladies : la marteiliose et la bonamiose, dues aux parasites protozoaires *Marteilia refringens*, qui touche plutôt les jeunes huitres de 2-3 ans et *Bonamia ostreae*, plutôt les huîtres adultes de 3-4 ans.

Plusieurs facteurs favorisent l'apparition de ces maladies:
1. Cycles saisonniers (hivernale pour *Bonamia*, estivale pour *Martelia*)
2 . Facteurs environnementaux
3. Caractère direct ou indirect de la transmission
4. Dragage régulier et destruction de l'habitat qui augmentent la prévalence de la maladie et la mortalité au sein des bancs sauvages (Cranfield et al., 2005).

Encore une fois, ces maladies ont des conséquences plus néfastes si elles touchent des individus isolés, en mauvais état (Holbrook et al, 2021) Cela souligne encore une fois l'effet de la pêche à la drague, qui a fragmenté les huitrières anciennes.

2.1.3.3 Formation biogénique et biocénose

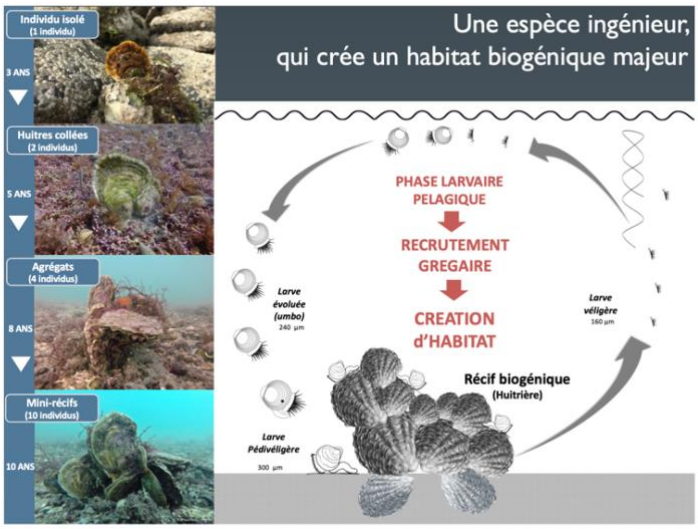


Figure 2 : Schéma de croissance de l'Ostrea Edulis, Stéphane Pouvreau 2022

Une fois la fixation établie et l'âge adulte atteint (autour des trois ans), l'habitat naturel de l'OE devient une colonie émergente. Après plusieurs années, plusieurs individus forment leurs propres habitats : des récifs biogéniques calcaires. C'est à ce stade qu'une huitrière naturelle peut remplir toutes les fonctionnalités écosystémiques inhérentes à ces formations. Elles offrent la fonction habitat à de nombreuses espèces, comme en témoigne l'Annexe 1 (*espèces constitutives des bancs d'huitres plates recensés dans le cadre des inventaires du projet* FOREVER), qui dresse une liste non exhaustive d'une centaine d'entre elles fixées sur les coquilles et vagiles qui y trouvent refuge et s'en servent comme des nurseries.

2.2 Inventaire et caractérisation

Dans cette partie, nous démontreront où se trouvent les « dernières » huîtres plates en Europe, mais aussi des différents types au sein de l'espèce. Des bancs existaient partout en Méditerranée, mais nous n'avons pas encore assez d'informations à ce sujet. Ils nous convient de dresser un contexte géographique et génotypique, afin de connaître le terrain précis avant de discuter des changements d'échelle de restauration. Nous nous intéresserons plus particulièrement à une méthodologie d'inventaire développée dans le cadre du projet FOREVER, cas d'école au niveau européen pour classifier écologiquement les bancs d'OE.

2.2.1 En Europe

Dans cette sous-partie, nous tentons de dresser un tableau des bancs restants en Europe, mais aussi des différents types génétiques de l'OE.

2.2.1.1 Bancs majeurs et bancs historiques

Bien que la prospection à l'échelle européenne ne soit pas encore exhaustive, le site de la NORA permet de recenser les pays où la recherche quant à l'OE est la plus développée. Le tableau suivant classifie trois types de présence de l'espèce :

- Pays qui avaient des bancs « historiques » avérés, mais un recrutement larvaire anecdotique
- Pays où on trouvent des huîtres à l'état sauvage, un recrutement faible, et où la production en aquaculture persiste
- Pays où on trouve des récifs résiduels et des géniteurs en plus grand nombre

Bancs historiques avérés	**Huître à l'état sauvage/ Aquaculture/ Bancs en déclin**	**Récifs résiduels à l'état sauvage**
Belgique Allemagne Espagne Hollande	Croatie Angleterre Pays de Galle Irlande Irlande du Nord Suède	France Écosse

Si des bancs récifaux existent encore dans deux pays, nous constatons qu'au niveau européen, l'état de l'espèce est critique. C'est un des constats du mouvement NORA.

2.2.1.2 État Génétique

Il est primordial de connaître les particularités génétiques de chaque espèce, sachant que cela iinfluence les processus d'adaptation locaux des individus à leurs environnements. Ces facteurs peuvent aider la prise de décision et de sélection dans le cadre de projets de de restauration (Bromley et al., 2016).

Un échantillonnage a donc été effectué dans le cadre du projet FOREVER, en comparant les données Française et européenne, pour déterminer les différences à l'échelle européenne. Le génotypage a pu être réalisé à k ;aide de la puce « Axiom Oyster Genotyping Array « comprenant 15 000 SNPs (Single Nucleotide Polymorphism) de l'OE.

Trois groupes de génotypes ont pu être séparés :

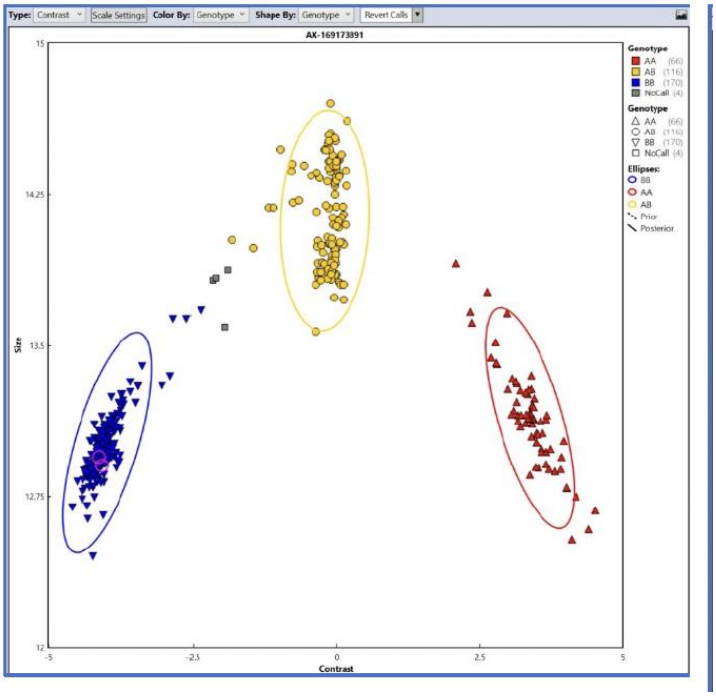


Figure 3: Résultats du génotypage pour deux marques de la puce huitre plate

Plusieurs groupes ont été identifiés dans une étude précédente (Harrang, 2012) : Mer du Nord et Atlantique, Méditerranée Ouest, Méditerranée Est et Mer Noire. L'étude FOREVER la complète et confirme une homogénéité des populations bretonnes et françaises.

Un point de vigilance : il convient de mener ce type d'étude en amont de chaqueaction de restauration, pour influencer le moins possible des mécanismes de connectivité encore peu connus et garantir la réussite de projets de restauration.

2.2.2 En France : Le cas de la Bretagne/ Focus sur la méthodologie du projet FOREVER

Une méthodologie a été créée dans le cadre du projet FOREVER pour faire l'inventaire de l'OE dans la région et de caractériser les bancs découverts ou redécouverts. Cette étude engagée au sein de la NORA, offre une version de standardisation de la première étape avant la mise en place d'un projet de restauration.

Cet inventaire a été récupéré à travers des études bibliographiques qui ont démontré plusieurs sites d'intérêt, avant de les confirmer/infirmer par une étude de terrain. Cette étude a permis de dresser une échelle pour caractériser l'état écologiques des bancs résiduels en Bretagne:

- **État critique :** pour lequel on observe de rares individus non fixés : <1 ind/m2
- **État résiduel:** huitres implantées à une densité de 1 à 5 ind/m2
- **État fragile :** Colonie émergente de 5 à 10 ind/m2

- **État favorable :** Récif biogénique en formation 10 à 20 ind/m2
- **État fonctionnel** : Récif biogénique établi ou huitrière: > 20 ind/m2

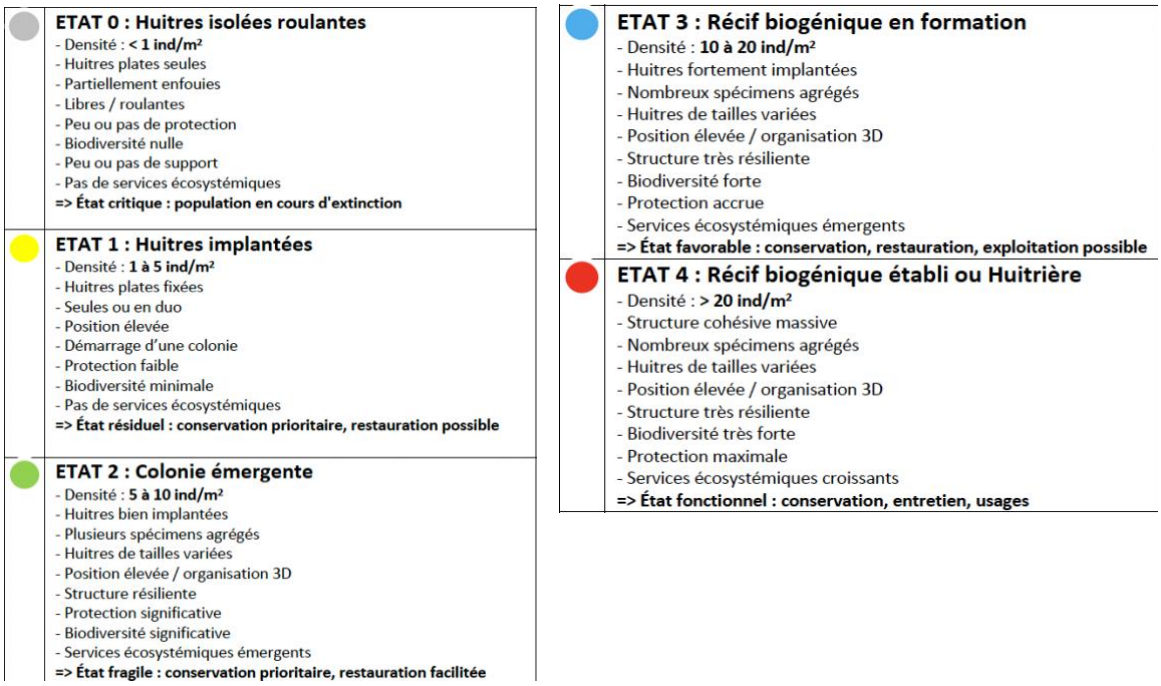


Figure 4: Classification des états écologiques des bancs résiduels – projet FOREVER 2021

De cet inventaire breton :

- 18 était en état critique
- 5 en état résiduel
- 3 En état fragile
- 2 En état favorable - soit les deux zones du pilote d'expérimentation FOREVER, Le Banc du Roz en rade de Brest et la Baie de Penthièvre dans le Morbihan

8 d'entre eux ont fait l'objet d'une expertise plus approfondie, qui pourraient en plus des bancs du Roz et de la baie Penthièvre, faire l'objet d'expérimentations futures.

Le rapport établit des fiches pour caractériser les zones d'habitat résiduels de l'huitre plate, comprenant (exemple en annexe 2) :

- Une description de l'habitat (température, salinité, sédiment profondeur, milieu)
- Des indicateurs patrimoniaux,
- La démographie *superficie, état écologique, densité, taille, recrutement, prédateurs, parasites)
- Des recommandations générales.

2.2.3 Éléments de discussion : il une restauration spontanée de l'Huître Plate en France ?

Cette première étape nous permet de faire un bilan sur les obstacles auxquels L'OE fait face pour recoloniser ses gisements d'autrefois en France :

- Des facteurs environnementaux fondamentaux doivent être réunis pour garantir la création et le maintien d'un banc (température et caractéristiques hydrodynamiques).
- À cela s'ajoute la prédation, qui jouit de l'affaiblissement général des gisements d'OE. On note particulièrement l'implication des bigorneaux perceurs, une espèce invasive non prédatée et de la daurade, qui causent à eux seuls 90% de la mortalité de populations sauvages dans une période de 3 mois après fixation des larves.
- Si l'OE a été décimée entre le 17ème et le 19ème siècle par une ostréiculture trop intensive en France, sa production s'élevait toujours à quelques 20 000 tonnes par an vers 1970 en Bretagne. Les deux maladies précitées ont amorcé un déclin qui n'a pas fait l'objet de tentatives salvatrices de la part de la profession et des scientifiques. On note cependant qu'aujourd'hui, les bancs résiduels cohésifs sont constitués d'individus adultes sains, bien qu'évoluant dans des zones parasitées, c'est le cas des trouvailles dans le cadre du projet FOREVER.
- En plus de cela, le lessivage des estuaires causé par les activités humaines, l'augmentation de la turbidité et de la dessalure de leurs habitats d'antan ont mené les derniers bancs dans leur retranchement en aval.

À ce titre, aux vues des dégradations et des pressions actuelles, il est futile d'espérer un retour spontané de l'espèce sans mise en place de plans de conservation et de projets de restauration.

Au cours d'une interview avec Stéphane Pouvreau ; chercheur à l'IFREMER, expert en écologie benthique, reproduction et recrutement des invertébrés marins ; à ce sujet, il nous explique qu'aujourd'hui
« *l'OE est une espèce en danger : elle n'aime pas la sédimentation ce qui actuellement complique son recrutement, la pêche à la drague impacte encore ses bancs résiduels par méconnaissance le plus souvent, elle est hautement prédatée et subit la pression de deux maladies.*
Malgré tout, nous observons qu'il est possible de réduire la prédation , et ce assez facilement pour ce qui est des bigorneaux perceurs et daurades dans le cadre de projets de restauration ou de conservation, que les maladies ont un impact moins gros sur l'animal en bonne santé et que les bancs gérés et restaurés par les humains permettent une recolonisation efficace*. »*

Si nous souhaitons un retour de l'OE sur les côtes françaises, il apparaît nécessaire que des mesures de conservation, de gestion et de restauration soient mises en place.

III. LE 21EME SIÈCLE, OU LES DÉBUTS DE LA RESTAURATION

Bien que l'étude porte sur la France, il est important de retranscrire la dynamique européenne portée par la NORA, exprimée notamment par une trentaine de projets à travers l'Europe de 2011 à 2021. Nous les décrirons succinctement afin d'avoir une idée des différents types de projets et techniques à l'œuvre. Dans une deuxième partie, nous nous concentrerons sur la France et 4 projets liés au retour de l'HP. Il sera ensuite intéressant de mettre en exergue les différences de dynamiques et d'échelles françaises et européennes.

3.1 Projets de restauration existants en Europe

Nous réunirons les projets de plus grande envergure dans le tableau en annexe , en résumant le type d'action et méthodologies. Voici quelques définitions pour rappeler et classifier les types de actions liées à la biodiversité[3] :

- **Conservation :** Entretien de la régénération assisté par les processus naturels
- **Restauration** : régénération de la structure, composition et fonctions de l'écosystème tel qu'il était avant la perturbation
- **Réhabilitation** : régénération de certaines fonctions de l'écosystème existantes avant la perturbation
- **Réaffectation** : reconversion de l'écosystème trop endommagé vers de nouveaux usages
- **Compensation** : action visant à restaurer ou recréer un milieu naturel en contrepartie d'un dommage provoqué par un projet

Les projets européens référencés par la NORA sont à plus de 70% des projets de réhabilitation avec de la réintroduction et de la compensation. Et ce à juste titre, car à part l'Écosse et la France, aucuns autres pays ont des bancs résiduels dans des états écologiques convenables.
Cependant, certains pays sont réellement moteurs :

- Le Royaume-Uni comptabilise depuis 2011 **18 projets** (que nous n'avons pu comptabiliser ici),
- La Hollande 3 projets, l'Irlande du Nord 2 projets,
- L'Allemagne avec 3 projets .

Voir le détail à l'annexe numéro 3 : tableau de recensement des projets européens les plus importants

3.2 Focus sur les projets français

En France, seuls deux projets portent officiellement sur la restauration de l'OE : Le projet FOREVER (2018-2020) et le projet REFONA (lancé fin 2021). Cependant, deux autres actions ont été menées, dans la dernière décennie qu'il est intéressant de mentionner. Nous nous concentrerons ici sur les méthodologies à l'œuvre dans chacun des projets, et les résultats éventuels.

3.2.1 Enrichissement coquillier

Méthodologie :

Dans le cadre d'un projet nommé DIRAPEN (Pouvreau et al, 2016) portant sur la restauration des bancs de pétoncles en rade de Brest, une opération d'enrichissement coquillier sur 1 ha a été mise en place au sud du banc du Roz en baie de Daoulas.
L'enrichissement coquillier consiste à tenter de former un substrat à base de coquilles. Dans notre cas ce sont des coquilles d'huitres creuses utilisées pour servir d'abris aux pétoncles, qui ont au final servi de support de fixation pour l'OE. La colonisation a démarré au cours du

[3] D.U. Restauration Écologique des petits fonds côtiers – Orientations et Principes, Pr. Philippe Lenfant, 05/04/2022

recrutement de l'été 2015 et 2016. Cette technique nommée, "Oyster cultch restoration" est couramment pratiquée à travers l'Europe et depuis quelques temps déjà. (Beck et al 2011,)

Le suivi a été effectué dans le cadre du projet FOREVER, car 5 années s'étaient écoulées depuis le début de DIRAPEN.

Voici les indicateurs utilisés pour évaluer l'efficacité de la technique :

1. Hauteur au-dessus du sédiment
2. Nombre moyen d'huitres plates par coquille
3. Biomasse des constructions
4. Gamme de taille des huitres plates
5. Poursuite des capacités de recrutement

Résultats :

En 2017, on pouvait trouver plus de 10 HP juvéniles sur certaines coquilles d'huîtres creuses. Avec des naissains fixés successivement en 2015 et en 2016.
L'étude n'a malheureusement pas été reconduite.

3.2.2 Restauration active par semis de naissains

Cette action a été mise en place en baie de Quiberon par le Syndicat Ostréicole (SOBAIE) depuis 2015 vu les recrutements pauvres des années précédentes. Les professionnels de la zone et les entreprises qui font du captage ont mené ce projet en toute indépendance et se sont engagées à semer 1% de leur récolte chaque année.

Méthodologie

Le principe de restauration est le suivant : chaque année, au cours de l'hiver, la zone à ensemencer est définie, nettoyée des prédateurs (bigorneaux perceurs, étoiles de mer) et des compétiteurs (crépidules) pour accueillir le futur semis de naissains au cours du printemps. Une estimation réalisée lors du détroquage (action de décollement du naissain de son support de captage) en fonction du nombre de naissains par coupelles et du nombre total de coupelles posées en baie de Quiberon conduit à plus de 6 millions de naissains semés depuis 2015 .

Résultats

De 2017 à 2019, les semis ont été protégés des daurades par un répulsif acoustique, par le CRC Bretagne et financements FEAMP. Les semis de 2018 et 2019 ont montré l'importante prédation par les bigorneaux perceurs dans les premiers mois qui suivent l'installation du semis puis celle provoquée en fin d'été par les dorades malgré les dispositifs acoustiques. Un taux de mortalité de 60% a été observé. Cette zone sera monitorée dans les prochaines années afin d'attester du succès ou non de l'opération.

3.2.3 Le projet REFONA

Le Projet REFONA (Restoration of Flat Oyster in Nouvelle-Aquitaine) a été lancé au printemps 2021 pour la conservation de l'HP de Nouvelle-Aquitaine. Le CAPENA – Centre pour

l'aquaculture, la pêche et l'environnement de Nouvelle-Aquitaine en est le porteur, soutenu par la région Nouvelle-Aquitaine et par l'Office français de la biodiversité. Ce projet courant de 2021 jusqu'à 2023, son objectif est de dresser un inventaire des gisements d'HP, afin de faire un diagnostic des populations présentes. Les résultats de cette première phase permettront ensuite de définir la stratégie de préservation de l'HP dans la région.

3.2.4 Le projet FOREVER

Le projet FOREVER a été lancé en 2018 sous l'impulsion de Stéphane Pouvreau et Hélène Cochet (du bureau d'étude Cochet environnement), par l'IFREMER en coopération avec le CRC Bretagne Sud, le CRC Bretagne Nord, Cochet Environnement, le pôle Bretagne Atlantique, le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ainsi qu'avec les professionnels du secteur (particulièrement la SOBAIE). Les Trois enjeux majeurs du projet FOREVER:
- La sécurisation de l'approvisionnement en naissains pour la profession ostréicole associée à une meilleure gestion des populations résiduelles naturelles constitue le point de départ du projet. À cela s'ajoutait également le développement d'une méthodologie pour dresser un inventaire précis des populations présentes en Bretagne. Également d'approfondir les connaissances des mécanismes écologiques dans la dynamique d'un banc sauvage d'HP.
- Contribuer à la conservation, à la restauration de l'espèce et par la même de la biodiversité marine associée est le deuxième enjeu majeur du projet FOREVER.
- Entreprendre une restauration écologique active de l'espèce, notamment à base d'éco-matériaux biodégradables.

Méthodologie

Déploiement de récifs

Le Projet PERLE (Hussenot et al 2014) a montré que les naissains d'huitres plates creuses, etc. sont surtout présents sur les surfaces ombragées et que les coquilles sont plus efficaces que les huitres vivantes. De leur côté, (Graham et al., 2016) ont évalué l'efficacité du recrutement de différents matériaux pour l'huitre *Crassostrea Virginica*. Cette étude montre que le béton est le plus efficace pour l'huître.
Ce développement a consisté dans un premier temps à tester différentes formulations de bétons coquilliers, afin de définir quelle formulation permettait le meilleur recrutement et la meilleure durabilité, pour ensuite l'utiliser comme matériau dans la construction des récifs. En parallèle, une concertation a été engagée avec les professionnels ostréicoles pour la définition du "design", jugé primordial dans la phase de recrutement. Si le résultat est éloigné du biomimétisme, l'inspiration première était de reproduire une base similaire à celle des récifs biogéniques.

Formulation des bétons:

Le Béton de référence utilisé était de 350 kg/m3 pour un rapport eau/ciment de 0,5.

Suite à cela, 16 formulations ont été classées selon différentes catégories (béton calcaire avec ajout de coquilles d'huitres en masse; béton de référence avec saupoudrage de coquilles d'huitres, béton calcaire avec ajout de 15% de silice, béton référence + saupoudrage; béton désactivé par aérogommage, sucre et superplastifiant).

Ces 16 formulations ont été testée et pendant 15 jours lors du pic larvaire de juillet 2019.

La formulation la plus efficace est celle pour laquelle un oubli de granulat a entrainé une variation des proportions ciment dans le béton, soit 392kg.m3. L'hypothèse émise est que le taux de ciment dans le béton joue un rôle sur le recrutement. Enfin, le recrutement semble plus important dans les zones rugueuses que lisses et confirme les trouvailles précédentes en la matière (Hanlon et al 2018).

Design

À la suite de consultations auprès de professionnels conchylicoles et des biologistes, un design général en forme de troncet a été retenu. Le support est fait d'une base cylindrique concave et de 3 anneaux s'imbriquant dans le module, inspiré des coupelles de captages des conchyliculteurs.

Figure 5: récifs en rade de Brest – rapport FOREVER, 2021

Les neuf récifs ont été immergés en juin 2019) dans trois zones d'essais différentes : 3 dans l'anse du Roz en rade de Brest, et 6 dans la baie de Quiberon, dont 3 sur le banc du milieu et 3 sur le banc de Penthièvre.

Résultats

Une première évaluation du recrutement a été réalisée en septembre 2019 à titre indicatif. Cette première évaluation qualitative a permis de s'assurer que le recrutement d'HP avait bien eu lieu sur chaque récif dans chaque secteur. Ensuite, une évaluation tous les 6 mois à partir de 2020 a permis d'évaluer le développement des naissains, l'impact de la prédation, la colonisation des récifs par d'autres espèces et la durabilité des supports.

On a pu observer des disparités entre les récifs, mais ils ont tous été colonisés. Il s'avère que la colonisation a été plus forte en rade de Brest (*figure 6 ci-dessus)* et à Penthièvre en baie de Quiberon. En septembre 2020, les huitres observées étaient âgées de 1 an et mesuraient à peu près 5 cm (soit des valeurs correspondantes au cycle de vie de l'OE).

Une étude approfondie de la surface des récifs a confirmé la corrélation entre le recrutement et la valeur de rugosité. Cela a permis aussi de tester d'autres dalles en augmentant la rugosité de et en modifiant les micro/macro-reliefs. La texture du substrat a donc un effet important sur la colonisation larvaire, et cela est confirmé en reproduisant les qualités d'une roche calcaire naturelle.

2ème test : structures récifales verticales

Les porteurs de projet ont constaté que les HP sur le fond, en contact avec le substrat ont une croissance beaucoup plus faible que sur des supports légèrement élevés. Pour cause, moins d'échanges hydrodynamiques et un contact trop rapproché avec le sédiment.

Existait aussi la volonté des gestionnaires de l'environnement de développer des structures non invasives qui disparaissent dans le temps ; pour faire de la restauration en aires protégées ou zones Natura 2000; comme un squelette initiale voué à s'effacer au profit du récif biogénique. Le postulat de départ est que les huîtres une fois agrégée peuvent constituer un noyau sur lequel se développer, remplaçant le squelette. Ainsi, des structures et tiges métalliques (très rugueuses, de type fer à béton) suspendues à 50cm du sol ont été testée en 2018 sur le site du Roz pendant trois ans.

Figure 6: récifs suspendus en rade de Brest – FOREVER, 2021

Les résultats sont extrêmement encourageants : en trois ans, la colonisation paraît impressionnante et on trouve sur ces structures des huitres de plus de 7cm de longueur, agrégées en cohésion, ressemblant à ce que devait être une huitrière naturelle.

Les observations de ces tests sont cruciales pour le futur de la restauration : l'élévation des structures récifales entrave la prédation des bigorneaux perceurs, espèce rampante ; la cohésion des huîtres empêche la prédation des daurades ; l'éloignement du sédiment permet une croissance beaucoup plus rapide ; les mortalités liées à Marteilia et Bonamia, tous deux présents sur ces zones, sont faibles.

Les prochains suivis sont en juin 2022, à voir si les résultats sont aussi enthousiasmants qu'en 2020

Quelques pistes seront expérimentées dans le cadre du projet REEFOREST (continuation de FOREVER jusqu'en 2026) : piquets-pieux à surface rugueuse, grilles benthiques partiellement couvrantes, structures arborescentes et récifs calcaires à dimension variable, recherche d'un « éco-nucleus » biodégradable.

3.2.5 Comparaison des techniques de restauration

Aujourd'hui, la restauration de l'HP en France est encore balbutiante, il est ainsi compliqué de comparer les 3 projets ci-dessus selon les mêmes standards (le 4ème étant à ses débuts).

Nous voyons cependant quelques tendances à souligner :

- Les deux techniques à plus grande échelle présentées ici ; enrichissement coquilliers et semis de naissains ; ont toutes deux étés menées dans une optique plutôt quantitative que qualitative, sur des plus grandes surfaces avec pour objectif de régénérer les fonctions pêcheries d'un écosystème.
- FOREVER se concentrait sur la qualité même des récifs, après une étude approfondie de l'écologie d'un banc sauvage, dans une démarche emprunte de biomimétisme. Les objectifs étaient également entremêlés : considérations pour la profession conchylicole, écologie, retour de l'OE et de la biodiversité attenante en prenant en compte le cycle de vie de l'espèce.

Le projet FOREVER a permis plusieurs avancées notoires :

- Tester les premières techniques de restauration de l'espèce dans ce but, avec des résultats encourageants
- Développer des clés d'orientations méthodologiques pour conserver, restaurer ou encore réintroduire l'OE. Ces outils posent les bases des perspectives françaises , mais permettent aussi d'enrichir la standardisation méthodologique de l'écologie de la restauration menée par la NORA.

Aujourd'hui, les techniques utilisées dans les projets de restauration de l'HP sont peu coûteuses et plutôt simples à mettre en place. Celle-ci sont encore peu développées et c'est là le défi du passage à l'échelle : avant de se lancer dans des projets d'autres envergures, il faut s'assurer du succès des dispositifs à l'œuvre, sous peine de perdre le contrôle et d'avoir un impact irréversible sur le milieu naturel.

Du fait du manque de connaissances que nous avons de l'écologie de l'espèce et son cycle de vie long, d'autres questions devront trouver des réponses rapidement:

- Quand considère-t-on une huitrière comme autosuffisante ?
- À partir de quel type de récif pouvons-nous lancer de la restauration à grande échelle ?

La continuité du projet FOREVER est censé répondre à ces questions, en testant un nouveau support innovant. Le réel défi, n'est pas en soi de développer un support ou d'inventer de nouveaux protocoles de restauration. L'enjeu majeur est bien de passer à l'échelle, de créer une méthodologie fondée sur la nature efficace, peu couteuse et généralisable pour faire revenir cette espèce si importante pour nos écosystèmes côtiers.

3.3 Éléments de discussion : Quelle est l'échelle de la restauration de l'huître plate en France au regard de la dynamique européenne ?

Ce qui ressort de notre étude est que la France est une terre d'opportunités. C'est l'un des seuls pays à avoir des bancs sauvages résiduels et un grand nombre de géniteurs. 10 sites sont prêts à accueillir des projets de restauration aujourd'hui. Deux sites ont des pilotes de restauration aux résultats extrêmement encourageants, et de nouveaux projets apparaissent.

Ce qu'il faut noter aussi est que des pays européens sans bancs sauvages, sans géniteurs, comme l'Allemagne, l'Angleterre, la Belgique ou encore la Hollande, se lancent dans des projets et ce

depuis une dizaine d'années. Ce qui semble étonnant, c'est que ces pays au trait de côte bien plus réduit que celui de la France, ont parfois trois fois plus de projet en cours. Il en est de même pour les financements : dans de nombreux pays européens, les pouvoirs publics se mobilisent massivement et de concert avec de nombreux autres acteurs pour lancer des projets et assurer leur évolution dans le temps.
Nous devons en grande partie à l'Allemagne la création de la NORA, sans qui les projets liés à l'HP seraient encore d'anecdotiques projets d'expérimentation localement isolés.

Ainsi, si nous devons parler d'échelle de restauration en France, en comparaison brute, elle est faible et peine à s'agrandir. Mais elle en a le potentiel. Bretagne, Normandie, Nouvelle-Aquitaine, Corse : autant d'inventaires à effectuer, autant de pilotes à lancer , mais surtout, autant d'acteurs à fédérer pour lancer des actions locales qui auront un retentissement global ou du moins européen. La France a pris un peu de retard au niveau quantitatif.

Cependant, elle contribue déjà aujourd'hui à faire avancer la science de la restauration de l'OE au sein de la NORA. Nous en avons eu la preuve avec le projet FOREVER, qui a développé des méthodologies clés en mains qui font cas d'école, pour lancer des projets de restauration et des standards concernant la conservation, la réhabilitation.
Plus encore, les prochains projets lancés bénéficieront du soutien de la NORA, qui fera briller encore plus les expérimentations, découvertes et résultats effectués en France.
Le changement d'échelle de la restauration en France ne pourra se faire que si de nombreux projets locaux et nationaux apparaissent, en s'inscrivant inévitablement dans le cadre de la NORA pour décupler leur impact en termes de visibilité et de symbolique.

Ce changement d'échelle, s'il doit se faire aussi au niveau local et national, passe avant tout par un changement des esprits, ou plutôt par un rappel de ce qui fut avant que l'amnésie de l'Huître Plate touche le monde.

IV. CONCLUSION : FREINS ET MISE A ÉCHELLE

Tout au long de l'étude, nous avons montré l'intérêt de la restauration de l'OE sur les côtes françaises, ainsi que les possibilités de le faire. En guise de conclusion, nous traiterons ici d'aspects fondamentaux liés à la restauration: la gouvernance et les freins légaux, sociaux et politiques à l'impulsion d'une dynamique forte de la restauration de l'HP en France.

4.1 Amnésie collective, influence sur le cadre légal de protection et de restauration de l'HP en France

Il convient tout d'abord ici de rappeler que l'huître plate est victime d'une amnésie collective et global, de l'Europe à l'Australie (Ford and Hamer, 2016). Pour reprendre les mots de Stéphane Pouvreau lors d'une interview « *Un jour, j'ai plongé. Et je me suis rendu compte que l'arbre cachait la forêt* ». Il expliquait ici que les biologistes, il y a une dizaine d'années, se concentraient plutôt sur l'individu isolé que sur l'huitrière elle-même. Il aura fallu réapprendre à observer et replonger dans les archives.
En France, les premiers documents attestant de larges bancs et du dragage massif partout en Bretagne nous proviennent de Louis Joubin, professeur au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, qui les a rédigés au début du 20ème siècle. Un siècle plus tard, les premiers efforts de conservation

et de restauration apparaissent petit à petit en Europe. Cette amnésie touche tout le monde : citoyens mangeurs d'huîtres, professionnels de la pêche, scientifiques et plus dramatiquement gestionnaires de l'environnement. Malheureusement, elle semble perdurer en France.

Bien qu'engagée pour la reconquête de la biodiversité à travers différents véhicules juridiques :

- La convention internationale pour la Diversité Biologique en 1992 qui considère les récifs comme un habitat d'intérêt communautaire,
- La directive européenne « Stratégie pour le milieu marin » en 2008
- La Stratégie nationale pour la création et la gestion des aires marines protégées en 2012,
- La loi sur la reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages en 2016 ;

La France semble avoir oublié l'OE et peu d'études ou de projets ont été lancés. Depuis 2019, les HP sont listées comme habitats côtiers à fort enjeu dans le document stratégique pour la façade Nord Atlantique-Manche, mais c'est encore insuffisant.

Nos voisins anglais eux, se sont dotés du UK Native Oyster Action Plan à l'échelle nationale, il en est de même pour les allemands avec le projet RESTORE I.
En guise de consolation, les récifs d'OE sont listés à l'Inventaire National du Patrimoine Nature lancé en 2002 par le Muséum d'Histoire Naturelle. Du côté de Natura 2000, les listes d 'espèces établies en 1992 n'ont pas évolué, et du fait de l'amnésie, l'HP n'a pas encore été intégrée. Un effort à l'échelle européenne est enclenché pour faire apparaître les sites sous la classification 1170 (récifs). Seule l'OSPAR considère donc cette espèce comme menacée. Aussi étrange soit-il, l'espèce n'est pas menacée aux yeux de l'état. De ce fait, peu de financements publics ou privés sont mobilisés et peu d'actions en général sont lancées.

L'OE est victime d'un passé oublié, ce qui freine l'élan de sa restauration car un cadre légal à sa protection se laisse encore désirer. C'est un des objectifs de la NORA, qui développe des groupes de travail notamment sur les meilleures pratiques en termes de politiques publiques (Zu Ermgassen, 2019).

4.2 La gouvernance de l'Huître Plate en France, jonction d'intérêts humains et écologiques (***Partie Confidentielle***)

À chaque site de restauration, on trouve une histoire humaine et écologique différente.

Les bancs d'HP en Bretagne sont toujours soumis à des pressions anthropiques: pêche à la drague, pêche illégale en plongée, pêche à pied, dégradation de l'habitat etc. Ces pratiques sont principalement le fruit de la méconnaissance de la fragilité de l'espèce. L'inventaire FOREVER a montré qu'il est rare de trouver des bancs qui font l'objet de mesures particulières aux niveaux nationaux et régionaux, mais on a des modes de gouvernances locaux intéressants qui ont des résultats direct sur la survie de certains bancs:
Exploitation raisonnée en plongée par 4 pêcheurs dans le banc de la Rance, interdiction de la pêche à la drague le banc de l'odet où l'on observe des densités intéressantes, ou encore la gestion par le CRC Bretagne Sud pour pérenniser l'activité de captage des naissains dans la baie de Quiberon.

Cependant, le manque de gestion à l'échelle régionale et nationale est l'une des causes ultimes empêchant le retour significatif de l'espèce. Il faut en effet faire comprendre à tous les acteurs locaux qu'il faut probablement quelques dizaines d'années sans perturbation de son habitat pour permettre à l'espèce de créer ou reconstituer des colonies récifales.

Chose intéressante est de constater que ce sont les professionnels de la conchyliculture qui ont gardé en vie les colonies d'HP des années 70 à aujourd'hui, car de nombreuses entreprises en dépendaient. En témoignent les projets de restauration engagés par les professionnels cités au 3.2.2.

Or, plus l'espèce attire l'intérêt des gestionnaires de l'environnement (Comme l'OFB qui a conventionné son engagement sur la restauration de l'HP de 2022 dans le cadre du projet REEFOREST avec l'IFREMER) plus les visions des parties prenantes se confrontent parfois:

- Utilitariste, pour une partie de la profession qui reste sur des fonctionnements et constats anciens. Celle-ci souhaite la restauration de l'espèce à des fins économiques, pour garantir aussi une activité conchylicole prospère en général, ce qui se justifie.
- Naturaliste et scientifique de la part des experts et des institutions, pour les qualités notoires de l'espèce.

En effet, Si les CRC se voient accorder des concessions conchylicoles par la DDTM, l'OFB peut en interdire leur mise en place s'il y a une demande et que l'intérêt pour la biodiversité y est vérifié. Or il semble que pour certains groupements de professionnels, les huitres sont leur propriété. Hors de toutes questions patrimoniales et de leurs justifications, il y a une logique dans la protection de son « terrain de travail ».

Ainsi de nombreux intérêts se croisent et ces enjeux peuvent et pourront mette en péril la mise à l'échelle de la restauration de l'huître plate en France. Ce, presque autant, voir plus que les freins techniques liés à la restauration.

En plus de développer des solutions techniques, il est primordial de développer des méthodologies de concertation innovantes pour créer une vision partagée par les professionnels et les gestionnaires de l'environnement. Cela a d'autant plus d'intérêt que ces dynamiques locales peuvent donner naissance à de nouveaux modèles de gestion fondés sur la protection de la biodiversité et l'utilisation raisonnée des ressources, en favorisant l'essor d'un circuit économique local autour de l'HP.

En guise de pistes de réflexions, voici quelques préconisations à différentes échelles pour amorcer la mise à échelle de la restauration de l'HP en France :

- Créer un collectif français de divers acteurs aux compétences multiples : scientifiques, associations, gestionnaires de l'environnement, professionnels de la conchyliculture. L'objectif est de créer une stratégie commune pour établir un plan d'action afin de débloquer les différents verrous (techniques, financements, sensibilisation, négociation et concertation, lobbying)
- Financer l'innovation des dispositifs de restauration de l'HP
- Intensifier le partage d'information et intensifier les actions conjointes au sein de la NORA
- Créer des contenus de vulgarisation accessibles au public et engager les individus dans des projets de sciences participatives
- Intensifier les efforts de communication et de sensibilisation chez les gestionnaires de l'environnement institutionnels (OFB, Agences de l'eau, Chargés de missions Natura 2000) mais aussi chez les professionnels
- Développer un arsenal juridique pour respecter les directives européennes et protéger l'espèce

- Développer des mesures fiscales pour flécher des fonds vers la restauration de l'HP, afin de soutenir les politiques environnementales liées à la transition écologique et sociale, à l'adaptation au changement climatique, etc.
- Au niveau national :
  - Dresser un inventaire poussé de l'espèce
  - Rédiger et inscrire dans la loi un plan d'action de restauration de l'espèce en se fondant sur l'existant
- Mettre en œuvre au niveau des régions, de manière standardisée:
  - Des mesures de réintroduction où les bancs se trouvent en états critiques
  - Des mesures de restauration où l'habitat est fortement dégradé
  - Des mesures de conservation sur les sites identifiés, de concert avec toutes les parties prenantes

Les défis à la restauration de l'espèce sont multiples, de nature différente et toutes les compétences possibles doivent être mobilisées. Il ne tient maintenant, qu'aux passionnés de l'*Ostrea Edulis*, aux défenseurs de la biodiversité, de s'organiser et de créer le chemin de son retour sur nos côtes, mais aussi un futur désirable pour les communautés humaines.
Il ne s'agit à mon sens pas que d'une espèce ici, mais bien d'un mouvement général de la restauration/conservation, profond, puissant, pour faire en sorte que les sociétés humaines renouent avec leur place dans une biodiversité mise à mal par leurs activités. Je crois que c'est le chaînon manquant qui fera qu'une minorité bien organisée, entraînera une majorité vers un respect véritable de l'environnement qui le fait vivre. Plus qu'une révolution, une évolution.

BIBLIOGRAPHIE

UICN France (2018). Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. Paris, France:

Beck, M. W.,Brumbaugh, R. D.Airoldi, L.Carranza, A.Coen, L. D., Crawford, Gao, X.(2011). Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. Bioscience61 107

Alice E.Lown, Leanne J. Hepburn, Rob Dyer, Tom C. Cameron, Aquatic conservation, Marine and freshwater ecosystems, volume 30, issue 11, 2020 Unlocking the blueprint for Native Oyster Restoration in Europe From individual vital rates to population dynamics: An integral projection model for European native oysters in a marine protected area,

Helmer, L.,Farrell, P., Hendy, I., Harding, S., Robertson, M., & Preston, J. (2019). Active management is required to turn the tide for depleted Ostrea edulis stocks from the effects of overfishing, disease and invasive species.

Philine zu Ermgassen, P.S.E., Bos, O., Debney, A., Gamble, C., Glover, A., Pogoda, B., Pouvreau, S., Sanderson, W., Smyth, D. and Preston, J). 2020 The Zoological Society of London, UK., London, UK. Monitoring European Native Oyster Restoration Projects: An introduction. In: *European Native Oyster Habitat Restoration Monitoring Handbook*

Mélaine Gourault, 2018 Etude des déterminants climatiques et environnementaux impliqués dans la variabilité de la reproduction et du recrutement des principales espèces de bivalves exploités en Bretagne,

Margot A.M. Maathuisa,1, Joop W.P. Coolenb,c, Tom van der Haved, Pauline Kamermansa,⁎, 2019 Factors determining the timing of swarming of European flat oyster (Ostrea
edulis L.) larvae in the Dutch Delta area: Implications for flat oyster restoration,

Marine Potet, Aurélie Fabien, Samue lChaudemanche,Nassim Sebaibi, ThéoGuillet, Sonia Gachelin, Hélène Cochet, Mohamed Boutouil Stéphane Pouvreau, 2021 Which concrete substrate suits you? *Ostrea edulis*larval preferences and implications for shellfish restoration in Europe, Ecological Engineering, 162.

Pouvreau S., Cochet H., Fabien A., Arzul I., Lapègue S., Gachelin S., Salaun B. (2021) Inventaire, diagnostic écologique et restauration des principaux bancs d'huitres plates en Bretagne: le projet FOREVER. Ifremer. Rapport Final. Contrat FEAMP 17/ 2215675. 122 p en Bretagne : le projet FOREVER Rapport final, S. Pouvreau1, H. Cochet2, A. Fabien3, I. Arzul1, S. Lapègue1, S. Gachelin4, B. Salaun5, 2021

Rodriguez S.R., Ojeda F.P., Inestrosa N. C. (1993) Settlement of benthic marine invertebrates. Marine ecology , progress series, 193-207.

Bayne B. (2017) Biology of oysters. Developments in Aquaculture and Fisheries Science. Volume 41.

Finelli C. M. & Wethey D.S. (2003) Behavior of oyster (Crassostrea virginica) larvae in flume boundary layer
flows. Marine Biology, 143, 703-711.

Brossin A. (2018) étude de la dispersion, du comportement larvaire et du recrutement de l'hu.tre plate en rade

Koehl M.A.R., Cooper T. (2015) Swimming in an unsteady world. Int. comp. biol., 55, 683-697. Brest. Rapport master II Agrocampus.

Waller T.R. (1981) Functional morphology and development of veliger larvae of the European oyster, Ostrea
edulis Linn..

Van Banning, P. (1991). *Observations on bonamiasis in the stock of the European flat oyster, Ostrea edulis, in the Netherlands,*

Zoë Hokbrook, Tim P. Bean, Saron A. Lynch, Chris Hauton (2021) What do the terms resistance, tolerance and resilience mean in the case of Ostrea edulis infected by the haplosporidian parasite Bonamia ostreae? Volume 182, Journal of Invertebrate Pathologym

Zu Ermgassen P. S. E., Bonačić K., Boudry P., Bromley C. A., Cameron T. C., Colsoul B., Coolen J. W. P., Frankić A., Hancock B., Have T. M., Holbrook Z., Kamermans P., Laugen A. T., Nevejan Na., Pogoda Be., Pouvreau S., Preston Jo., Ranger C. J., Sanderson W. G., Sas He., Strand .., Sutherland W. J. (2020) Forty questions of importance to the policy and practice of native oyster reef restoration in Europe . Aquatic Conservation-marine
And Freshwater Ecosystems , 30(11), 2038-2049 .

Harrang E. (2012). Apport des informations mol.culaires et cellulaires pour la caract.risation de la résistance de l'huître plate européenne vis-.-vis de la bonamiose, et pour la détection de signatures de la sélection naturelle. PhD Thesis, Université de La Rochelle.

Philine zu Ermgassen, Oscar Bos, Alison Debney, Celine Gamble, Azra Glover, Bernadette Pogoda, Stéphane Pouvreau, William Sanderson, David Smyth, Joanne Preston, 2021 European Native Oyster Habitat Restoration Monitoring Handbook

Pouvreau Stephane, Huber Matthias, Petton Sebastien,, Le Roy Valerian, Mingant Christian, Breton F, Sourget Q 2016
DIversification de la pêcherie de la RAde de Brest par l'étude de semis de PEtoncle Noir : le projet DIRAPEN

Hussenot M., Pouvreau S., Duchene J., Freulon H., Arzul I., Lapegue S. (2014) Synth.se PERLE. Programme d'Expérimentation et de recherche sur L'huitre plate Ostrea edulis.

Graham P.M., Palmer T.A., Pollack J.B. (2016) Oyster reef restoration: substrate suitability may depend on specific restoration goals. Restor. Ecol. 25, 459–470

Hanlon N., Firth L.B., Knights A.M. 2018 Time-dependent effects of orientation, heterogeneity and composition
determines benthic biological community recruitment patterns on subtidal artificial structures. Ecological
Engineering 122, 219–228

WÉBOGRAPHIE

Définition de la restauration écologique, site de l'OSPAR : https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/committee-assessments/biodiversity-committee/status-assesments/european-flat-oyster/

D.U. Restauration Écologique des petits fonds côtiers – Orientations et Principes, Pr. Philippe Lenfant, 05/04/2022

ANNEXES

1. BIOCÉNOSE d'un banc d'HP – liste non exhaustive des espèces liées à l'OE

ESPECES FIXEES	ESPECES VAGILES
Groupe des macro-algues : - Lithophyllum incrustans (Algue calcaire encroûtante) - Lithothamnion purpureum (Algue calcaire encroûtante) - Ceramium spp. (Céramium) - Solieria chordalis (Corde de Solier) - Enteromorpha spp. (Entéromorphe)	Groupe des échinodermes : - Ophiotrix fragilis (Ophiure singe) - Asteria rubens (Etoile de mer) - Marthasterias glacialis (Etoile épineuse)
Groupe des éponges (ou porifères) : - Pachymatisma johnstonia (Eponge fesse d'éléphant mauve) - Haliclona viscosa (Eponge à cheminée rose) - Haliclona sp. (Eponge grise à bleue) - Chelonaplysilla noevus (Eponge encroûtante tapissante violette) - Myxilla sp. (Myxille) - Cliona celata (Clione jaune) - Amphilectus fucorum (Eponge mousse de carotte) - Tethya aurantium (Orange de mer) - Sycon ciliatum (Eponge crème petit oeuf) - Ascandra falcata (Eponge pompon) - Hymeniacidon perlevis (Eponge commune) - Halichondria panicea (Eponge mie de pain)	Groupe des mollusques (Polyplacophores, Opisthobranches, Bivalves, Gastéropodes, Céphalopodes) - Lepidochitona cinerea (Chiton cendré) - Littorina littorina (Bigorneau) - Ocinebrellus inornatus (Bigorneau perceur japonais) - Gibbula umbilicalis (Gibbule) - Nassarius reticulatus (Nasse réticulée) - Haliotis tuberculata (Ormeau) - Crepidula fornicata (Crépidule) - Aplysia punctata (Aplysie) - Cadlina laevis (Cadeline) - Doris spp. (Doris) - Chlamys varia (Pétoncle noir) - Mytilus edulis (Moule atlantique) - Sepia officinalis (Seiche commune) - Crassostrea gigas (huitre creuse)
Groupe des ascidies : - Aplidium elegans (Fraise de mer) - Aplidium proliferum (Synascidie coussinet) - Aplidium ocellatum (Aplidium ocellé) - Botryllus schlosseri (Botrylle étoilé) - Ascidia mentula (Ascidie rose) - Ascidiella aspersa (Ascidie sale) - Stolonica socialis (Mirabelle de mer) - Pyura microcosmus (Petit microcosme) - Pyura squamulosa (Ascidie écailleuse) - Dendrodoa grossularia (Ascidie groseille) - Clavelina lepadiformis & C. nana (Claveline blanche) - Phallusia mammillata (Ascidie blanche) - Styela clava (Ascidie plissée) - Ciona intestinalis (Cione intestinale) - Cystodytes dellechiajei (Ascidie coloniale pourpre)	Groupe des crustacés (décapodes, amphipodes, cirripèdes) - Palaemon serratus (Crevette rose) - Galathea squamifera (Galathée noire) - Cancer pagurus (Tourteau) - Maja squinado (Araignée de mer) - Macropodia rostrata (Macropode) - Necora puber (Etrille) - Carcinus maenas (Crabe vert) - Pseudoprotella phasma (Phasme de mer) - Caprella spp. (Caprelle) - Phtisica marina (Phtisice marine) - Balanus balanoides (Balane)
Groupe des polychètes : - Spirorbis spp. (Spirorbe)	Groupe des poissons

- Serpula vermicularis (Serpule colorée) - Spirobranchus triqueter/lamarcki (Serpule triangulaire) - Bispira volutacornis (Bispire) - Branchiomma bombyx (Petite sabelle de roche) - Polydora hoplura ou ciliata (vers tubicoles) Phyllochaetopterus grube (Ver tubicole antenne)	Compte tenu des observations faites en plongée bouteille, peu de poissons ont été répertoriés. Celà dit, on peut noter la présence récurrente à proximité des populations d'huitres plates des espèces suivantes : - Scyliorhinus canicula (Petite roussette) - Pollachius pollachius (Lieu jaune) - Trisopterus minutus (Petit tacaud) - Hyppocampus guttulatus (Hippocampe moucheté) - Syngnathus rostellatus (Syngnathe mineur) - Dicentrarchus labrax (Bar commun) - Parablennius gattorugine (Blennie) - Gobius niger (Gobie) - Pomatoschistus minutus (Gobie de sable) - Spondyliosoma cantharus (Dorade grise) - Sparus aurata (Dorade royale)
Groupe des cnidaires (Hydraires, Hexacoralliaires, Octocoralliaires): - Kirchenpaueria pinnata (Hydraire ailé) - Plumularia setacea (Plumulaire gracile) - Aglaophenia harpago (Plumulaire) - Halopteris liechtensternii (Halopteris) - Actinia fragacea (Anémone fraise) - Alcyonium digitatum (Alcyon jaune)	
Groupe des bryozoaires : - Scrupocellaria scruposa (Scrupocellaire rugueux) - Bugula plumosa (Bryozoaire-plume) - Cryptosula pallasiana (Cryptosule cloche)	

2. Exemple de fiche de caractérisation d'un banc d'huitres plates – Projet FOREVER 2021

1. Banc de Penthièvre, baie de Quiberon, Morbihan

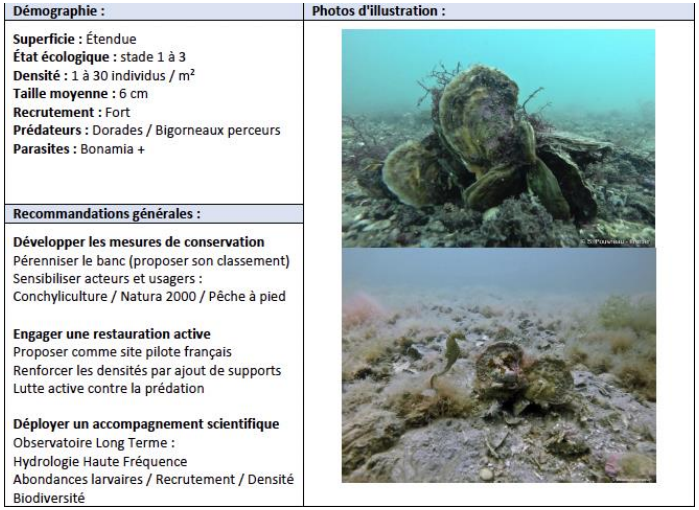
Coordonnées GPS : Lat : 47,5456 // Long : -3,1168
Localisation : Ouest de la baie de Quiberon
Modalités d'accès : estran et plongée
Coefficient d'accès : > 100

Habitat :

Milieu : Pourtour de baie
Profondeur : 0-4 mètres
Sédiment : sable, graviers, débris coquilliers
Support : cailloux, coquilles
Caractéristiques hydrologiques :
Température max : > 20 °C
Salinité min. : > 20 PSU, **site favorable**
Turbidité : faible à modérée

Indicateurs patrimoniaux :

Historique : Anciennement appelé banc de Men-er-Roué, il occupait une grande partie de la partie occidentale de la Baie
Statut actuel : Concession conchylicole CRC BS
Site Natura 2000 : Massif Dunaire Gâvres-Quiberon - ZSC - FR 5300027
Intérêts : Ostréiculture, pêche à pied, biodiversité, patrimoine
Remarques : Concessions conchylicoles à proximité



Démographie :

Superficie : Étendue
État écologique : stade 1 à 3
Densité : 1 à 30 individus / m²
Taille moyenne : 6 cm
Recrutement : Fort
Prédateurs : Dorades / Bigorneaux perceurs
Parasites : Bonamia +

Recommandations générales :

Développer les mesures de conservation
Pérenniser le banc (proposer son classement)
Sensibiliser acteurs et usagers :
Conchyliculture / Natura 2000 / Pêche à pied

Engager une restauration active
Proposer comme site pilote français
Renforcer les densités par ajout de supports
Lutte active contre la prédation

Déployer un accompagnement scientifique
Observatoire Long Terme :
Hydrologie Haute Fréquence
Abondances larvaires / Recrutement / Densité
Biodiversité

Photos d'illustration :

3. Tableau de recensement des plus importants projets liés à l'huitre plate en Europe

Pays	Nom	Type d'action	Résumé	Temporalité	Méthodologie/Actions
Allemagne	RESTORE II	Réhabilitation Conservation	L'espèce est éteinte en Allemagne, mais le pays mène depuis 2016 (avec son projet RESTORE I) des études approfondies pour attester de la faisabilité de la restauration écologique de l'espèce. L'objectif avec ces deux projets et de développer les bases d'une restauration à long terme de l'OE en Allemagne pour faire apparaître des récifs biogéniques.	2019-2023	• Mesures de gestion légales en ZEE: interdiction du chalutage ou d'extraction minière en zones de test, instauration d'un cadre légale de la restauration de l'huître plate • Construction d'un pilote sur un site Natura 2000 avec expérimentation de supports différents • Évaluation approfondie des structures récifales • Évaluation du design des supports et identification de technologies pour un restauration à grande échelle
Allemagne	PROCEED	Réhabilitation	BFN (Agence Fédérale pour la Conservation de la Nature) avec des financements du BMU (Ministère fédéral de l'environnement, de la conservation de la nature et de la sûreté nucléaire) au sein du programme fédérale pour la Diversité Biologique (Bundesprogramm Biologische Vielfalt). L'objectif de ce projet est d'expérimenter des processus sur la	2018-2024	Circuit d'introduction dans le milieu naturel : Isolation d'adultes, conditionnement en écloseries pour augmenter l'abondance larvaire, élevage de larves, nurseries pour les larves et naissains. Puis réintroduction dans le milieu naturel

			production larvaire des huîtres, et de faciliter le retour de l'OE en baie allemande.		
Angleterre	ENORI (Essex Native Oyster Restoration Initiative)	Conservation-restauration	Création d'une aire marine protégée de 282km2, en collaboration avec les conchyliculteurs de la région, les scientifiques, les gestionnaires de l'environnement et le gouvernement anglais	2013-2015	- Amélioration du substrat à l'aide d'enrichissement coquillier sur une zone sanctuarisée de 200ha - Mesure de gestion : réduction de la pêche à l'aide d'arrêtés préfectoraux
Angleterre	MARINEFF (MARine Infrastructure EFFEcts Initiative)	Éco-conception/réhabilitation	Récifs artificiels pour huîtres au sein du Programme INTERREG VA France – Angleterre, cofinancé par ERDF. Le projet souhaite démontrer le succès de structures biomimétiques	2018-2022	26 Supports artificiels d'1m de largeur dans le cadre du projet Solent Oyster Restoration project dans le Solent, un bras de mer qui sépare l'île de Wight et l'Angleterre
Angleterre	Solent Oyster Restoration Project	Restauration - réhabilitation	Projet collaboratif de scientifiques, pêcheurs, gestionnaires de l'environnement et le tissu industriel local pour revigorer les services écosystémiques des huitrières. C'était la plus grande huîtrière autosuffisante d'Europe qui a presque fermé en 2013.	Depuis 2015	- Écloseries en circuit contrôlé pour créer des huîtres plus résistantes - Introduction des adultes dans des nurseries dans les ports sous les pontons - Enrichissement coquillier sur 2000m2
Angleterre, Pays de Galles, Ecosse	The Wild Oysters Project	Réhabilitation	Projet initié par la Zoological Society of London, la Blue Marine Foundation, la Marine Britannique, L'objectif est de créer dans les eaux territoriales des récifs sains, qui contribuent à améliorer la qualité de l'eau, améliorent les pêcheries, font revenir la biodiversité, mais aussi de recréer l'engouement pour l'espèce sur terre.	2020-2023	- 46 Nurseries dans les ports de chaque « hubs » déterminés (développées dans le cas du projet Solent) - Sert aussi de programme éducatif pour 12,000 écoliers et participation de 38 000 personnes à des fins de sensibilisation
Belgique	UNITED	Compensation (élément de doute ici, dans le sens où la Belgique n'a plus de bancs résiduels, mais l'['existence de bancs antécédents est avérée)	Introduction de l'espèce sur les supports d'éoliennes en mer, dans le cadre du projet Horizon2020 « United » financé par l'Europe. L'objectif est de trouver les moyens techniques et managériaux pour changer d'échelles sur ces projets, afin d'amorcer le retour de l'huitre plate et de développer l'aquaculture.	2020-2023	Introduction de larves sur les supports des éoliennes
Croatie	Mali Ston Bay	Restauration	Restauration dans la baie de Mali Ston, plus grand lieu de production d'OE en aquaculture, dans une zone hydrique de qualité, sans le parasite Bonamia, ni la présence d'huîtres creuses et un taux élevé de	2016 - 2017	-

			recrutement. Le but est de devenir un hub de restauration pour la Méditerranée.		
Écosse	DEEP (Dornoch Environmental Ehancement Project)	Réhabilitation - Réaffectation	Collaboration entre la distillerie du whisky Glenmorangie, l'université Heriot-Watt, et la Marine Conservation Society dans l'aire protégée du Dornoch Firth. L'OE disparut de cette baie à cause de la surexploitation. L'objectif est de retrouver les récifs existants dans la zone au début du 20ème siècle et de recréer des récifs autosuffisants.	2014 – présent	- 1ère phase avec réintroduction en 2017 de 300 huitres plates provenant du Loch Ryan (unique banc sauvage au Royaume-Uni) , avec un taux de survie de 86% en 2017. - 2ème phase, enrichissement coquilliers pour créer un substrat viable, avant la réintroduction de 20 000 huitres (provenant de l'aquaculture) jusqu'en 2019, 200 000 jusqu'en 2022, puis 4 000 000 jusqu'en 2027
Écosse	Kilchoan Native oyster Restoration Project	Réhabilitation	Projet de restauration dans le domaine privé de Kilchoan (financeur privé ayant acquis ce bien dans le seul but d'en faire une réserve et un terrain de régénération de la nature, à but éducationnel) en coopération avec l'association Seawilding. Son but est d'amorcer le retour de l'OE dans le lac Melfort.	2021	Introduction de 12 000 huîtres d'écloserie, introduite dans des nurseries du ponton du Domaine. Le but est de les introduire en milieu naturel une fois les sites propices identifiés
Écosse	SEAWILDING – Loch Craignish Native Oyster Restoration Project	Réhabilitation	Projet mené par l'association Seawilding, finance par la Loterie Nationale, pour faire grandir avec les communautés locales 1 million d'huître plates dans une nurserie flottante sur le lac Craignish et les introduire dans des sites propices. L'objectif est de de créer une pêcherie autonome d'OE dont la communauté est propriétaire.	2020	- Huîtres juvéniles provenant d'une écloserie - Installation sur une nurserie flottante de 160 mètres de long pour élever des huître au-dessus de 12 mm afin de les relâcher sur les substrats préétablis. - Installation de 5 nurseries sous des pontons, afin de développer les sciences participatives - Développement d'un modèle de gestion avec les communautés locales
Espagne	Mar Menor Oyster Initiative - RemediOS	Réhabilitation	La Mer Menor est un lagon hypersalin protégé. Depuis les années 1970, 'écosystème a été transformé à cause de l'agriculture et du tourisme, qui ont eu pour conséquence eutrophication et bloom de phytoplanctons en 2015. Une population d'huître plate subsiste à l'état relictuel. L'objectif de ce projet et d'améliorer la qualité de l'eau à travers la restauration de récifs d'huîtres. Initiative coopérative de 17 scientifiques de 7 universités, des associations locales et des pêcheurs	2020	- Expérimentation de production de naissains à l'aide des géniteurs locaux, et tentative de restauration - Attribution de la personnalité juridique
France	FOREVER – Flat Oyster REcoVERy	Restauration	Dans le cadre du FEAMP, promotion de la restauration des HP en Bretagne. Coopération entre le CRC Bretagne, le CRC Bretagne Nord, l'IFREME, l'École Supérieure d'Ingénieurs des travaux de la construction de Caen. Objectifs : inventaire des populations sauvages d'HP en Bretagne et caractérisation ; étude des dynamiques écologiques de deux bancs sauvages ; deux actions de restauration sur ces mêmes bancs en coopération avec les professionnels de la Conchyliculture, les gestionnaires de l'environnement et les autorités locales.	2018-2020	- Installation de trois récifs artificiels ou supports pour évaluer leur colonisation - Mesure de conservation et de sensibilisation

Hollande	Voordelta	Restauration	La découverte d'un récif de 40 ha avec des individus pousse le WWF et un collectif (universités, consultants, etc.) à lancer un projet de restauration. L'objectif est l'étude de l'OE et l'Ostrea *Magellana* qui semblent cohabiter, mais aussi le comportement larval, le recrutement dans la zone, dans l'espoir d'augmenter les populations existantes.	2018 - présent	- Expérimentations avec des laboratoires sous-marins - Supports artificiels - Cage de captage

Annexe 3

Analyse de GIREL (Gestion des Infrastructures pour la Restauration Ecologique du Littoral) au Grand port de Marseille

Par Loïs BAROTIN

La Restauration Écologique en zone portuaire

Le cas du programme GIREL

Gestion des Infrastructures pour la Restauration Écologique du Littoral

Réalisé dans le cadre du Diplôme d'Université

« Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Année 2022

Loïs Barotin

Responsables de formation : Julie DETER et Valérie BORREL

Tutrice professionnelle : Amélie FONTCUBERTA

Remerciements

Je fais part de mes remerciements à toute l'équipe pédagogique du diplôme universitaire qui a compté des professionnels de la filière de la restauration écologique en Méditerranée.

Cette équipe s'est composée de

Philippe LENFANT, professeur à l'Université de Perpignan, membre du CEFREM, responsable du CREM, docteur en océanographie biologique, HDR, chef de plongée scientifique classe IB,
Pierre BOISSERY, chargé de l'expertise pour la mer et le littoral méditerranéen au sein de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse,
Gilles LECAILLON, président fondateur d'Ecocean et plongeur professionnel,
Gwenaëlle DELARUELLE, chargée de projets en milieu marin chez Andromède Océanologie,
Anaïs GUDEFIN, chargée de mission à Ecocean,
Olivier BOCQUET, directeur de Lab ROUGERIE + TANGRAM.

Je remercie aussi Julie DETER et Valérie BORREL pour avoir été à l'initiative de cette formation passionnante.

Et enfin, j'adresse mes remerciements à Amélie FONTCUBERTA pour m'avoir aiguillé quant à la conception de ce rapport.

Résumé

Ce rapport traite du programme GIREL (Gestion des Infrastructures pour la Restauration Écologique du Littoral) porté par le Grand Port Maritime de Marseille entre 2011 et 2016. Il s'agit d'un programme de R&D mêlant acteurs du génie côtier et du génie écologique pour répondre à un objectif commun, celui de valoriser les zones portuaires en termes d'écologie marine. C'est alors que différentes sociétés cherchant à développer des procédés de restauration écologique se sont mobilisées dans l'intention d'expérimenter leurs solution *in situ*. C'est le cas pour Ecocean avec les procédés Biohut® et BioRestore®, Egis avec les Ecorécifs et la SAFEGE avec la transplantation de Cystoseire. En parallèle, une nouvelle méthode de calcul de biocompatibilité des ouvrages à être équipés par des procédés de bioaccumulation a été développée par la Lyonnaise des Eaux.

Les résultats de chaque solution ont été encourageants et ont montré un beau potentiel de déploiement en termes de restauration écologique d'un point de vue opérationnel. L'enjeu de ce programme a été de permettre l'intégration de ce type de dispositifs comme solutions officielles de gestion de ports.

Aujourd'hui les solutions de restauration écologique se développent bien et font encore l'objet d'une recherche d'optimisation permanente menant à une multifonctionnalité des procédés et donc à la restauration de plus en plus de services écosystémiques.

Table des matières

Table des figures....4
Introduction....1
Objectifs....2
I- Contextualisation....3
A- Définition de la restauration écologique....3
B- Choix du sujet : le programme GIREL....3
a. Contexte du projet....3
b. Les partenaires....5
c. Phasage et déploiement....5
d. Liens entre le diplôme universitaire, le sujet et le projet professionnel....6
C- La restauration écologique en zone portuaire....6
II- Analyse comparative des fonctionnalités écologiques des solutions....7
A- Des habitats artificiels pour les quais et les digues....7
a. Description et objectifs....7
b. Suivis, résultats et perspectives....9
B- Une méthode de repeuplement....11
a. Description et objectifs....11
b. Suivis, résultats et perspectives....12
C- Une méthode de réhabilitation spécifique....13
a. Description et objectifs....13
b. Suivis, résultats et perspectives....14
D- Une méthode d'évaluation du potentiel des quais....15
III- Retombées du programme et discussion....16
A- La complémentarité des démarches pour l'optimisation des résultats....16
B- La place du programme dans l'essor de la restauration écologique....17
C- Quel avenir pour la restauration écologique dans la valorisation des zones portuaires ?....18
D- Les pistes d'amélioration....19
Conclusion....20
Bibliographie....21
Webographie....22
Table des annexes....22
Annexe 1....23
Annexe 2....24
Annexe 3....25
Annexe 4....26
Annexe 5....26

Table des figures

Numéro de la figure	Titre	Source	Page
1	Localisation du GPMM	Géoportail, 2022	4
2	Cycle de vie des poissons	ECOCEAN	6
3	Impacts de l'artificialisation des petits fonds côtiers	ECOCEAN	7
4	Biohut® ponton	Delta Fm, 2019	8
5	Biohut® digue	ECOCEAN	8
6	Module Oursin	SEABOOST	8
7	Module Roselière	SEABOOST	9
8	Densité moyenne par 10m linéaire des individus (mean) dans le port de Marseille en fonction de l'habitat	GIREL-3R, 2015	10
9	Schéma du prototype de support de transplant en phase 2	SAFEGE, 2013	13
10	Longueur moyenne des transplants entre 2014 et 2015	SUEZ, 2016	14
11	Cartographie du niveau de compatibilité des ouvrages portuaires étudiés au GPMM en réponse aux pressions naturelles et / anthropiques identifiées	Rapport final TypoDock	15

Introduction

La mer Méditerranée est l'une des mers les plus riches du monde. En effet, la région est dotée d'un vaste ensemble d'écosystèmes marins et côtiers tels que des lagunes, des estuaires, des plaines côtières, des zones humides, des côtes rocheuses, des herbiers, des communautés coralligènes, des systèmes frontaux, des monts sous-marins, des systèmes pélagiques etc (PNUE / PAM, 2012).

Depuis l'instauration des congés payés en 1936, l'augmentation du pouvoir d'achat et les Missions Interministérielles d'Aménagement du Territoire (MIAT) de 1963 qui ont développé l'aspect socio-économique de certains territoires, le littoral devient une destination très prisée pour le tourisme. En Méditerranée, les missions interviennent sur six villes entre le Languedoc Roussillon et les Pyrénées Orientales. Ces grands travaux ont nécessité des chantiers de grande ampleur, détruisant des espaces jouant un rôle majeur dans l'équilibre de la dynamique littorale, notamment des cordons dunaires. A cette époque, urbaniser le littoral n'était en aucun cas un problème, seulement une solution économique pour les collectivités. Idée qui se répand partout dans le monde. Cependant, ces aménagements ont gravement modifié la capacité de résilience du littoral.

C'est alors que depuis des décennies, les espaces côtiers et la mer Méditerranée sont soumis à des pressions anthropiques et autres menaces ne cessant de s'intensifier qui pèsent sur ses espèces marines. L'exploitation et l'artificialisation des espaces sont les premières causes de ce dérèglement. En effet, elles sont à l'origine de 93 % des épuisements et à 100 % des disparitions d'espèces localement (Coll et *al*, 2010). Par ailleurs, 64 % des épuisements et 88 % des extinctions locales sont causées par une combinaison de causes telles que la perte et / ou la destruction des habitats, la pollution, les espèces invasives ou encore le réchauffement climatique. Au delà de ce constat amer, nous entrons dans une décennie critique qui manque cruellement de mobilisation, notamment de la part des politiques, en faveur de l'environnement en général. D'après le GIEC en 2022, chaque dixième de degré supplémentaire fait reculer nos chances de nous adapter au dérèglement climatique, et dépasser un réchauffement planétaire de 1,5°C en moyenne (Accord de Paris, 2015) pourrait être irréversible.

Face à ce constat de perte d'habitats naturels et donc de biodiversité, des solutions sont possibles. En termes d'aménagement, il existe des méthodes plus douces et moins impactantes pour les milieux. Et en termes de restauration des espaces, c'est à dire, l'amélioration d'un espace qui aurait subit des pressions antérieures et donc qui ne délivre plus la totalité de ses services écosystémiques, il existe la restauration écologique. La restauration écologique intervient beaucoup au niveau des zones portuaires car il s'agit d'espaces d'importance capitale pour le développement des juvéniles de poissons. En effet, c'est dans ces petits fonds côtiers que se joue une partie de leur cycle de vie. C'est alors que l'artificialisation des ports empêche le recrutement de nombreux poissons et donc détériorent indirectement les stocks halieutiques.

Dans ce rapport, nous traiterons de **l'apport du génie écologique dans la valorisation des zones portuaires à partir d'une combinaison de différents procédés de restauration écologique dans le cadre du projet Pilote GIREL** (Gestion des Infrastructures pour la Restauration Écologique du Littoral).

Objectifs

Au vu de la problématique énoncée précédemment, il s'agirait, par ce rapport, de répondre à ces différents questionnements :

- Quelles sont les ambitions de la restauration écologique en zone portuaire ?
- Quel sont les objectifs du programme GIREL ?
- Comment est mise en œuvre la restauration écologique par le biais de plusieurs procédés ?
- Quelles sont les méthodes de restauration écologique mises en place au sein du Grand Port Maritime de Marseille ?
- A quoi ont abouti les résultats des expérimentations du programme ?
- Quels ont été ces résultats ?
- Existe-t-il une complémentarité entre les procédés ?
- Quelle place a eu le programme dans l'essor de la restauration écologique en Méditerranée ?
- Les sociétés ayant participé au programme ont-elles développé leurs activités suite au programme ?
- Quelles sont les pistes d'amélioration de la restauration écologique de manière générale ?

Pour ce faire, il conviendra dans un premier temps de contextualiser le sujet par le biais de la restauration écologique en zone portuaire et de son intégration sous forme d'expérimentations dans le programme GIREL. Ensuite, nous comparerons les méthodes de restauration qui ont été mises en avant dans ce programme ainsi que leurs résultats. Enfin, la dernière partie traitera d'une discussion autour des retombées de GIREL et de l'avenir de la restauration écologique en milieu marin.

I- Contextualisation

A- Définition de la restauration écologique

C'est seulement depuis une dizaine d'années que la restauration écologique a fait émergence. "La restauration écologique se définit comme une action sur l'habitat marin, la faune ou la flore, permettant d'améliorer le fonctionnement écologique, dans une zone côtière où la qualité de l'eau est bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation ont disparu ou sont maîtrisées. » (Lenfant et *al*, 2015). En ces termes, elle doit pouvoir participer à la reconquête de la biodiversité sur des zones dégradées, mais seulement une fois que la pression ait été maîtrisée afin d'avoir de meilleurs résultats. De plus, la zone restaurée doit être encadrée par des politiques d'action définissant une gestion adaptée, évaluable grâce à des indicateurs.

C'est à l'interface terre-mer que la restauration écologique côtière est effective, puisque c'est ici qu'ont lieu les plus fortes pressions en raison de l'artificialisation des sols, mais aussi la navigation de plaisance, les sports nautiques et autres activités nécessitant l'utilisation de la mer. C'est aussi dans ces petits fonds côtiers qu'une partie du cycle de vie des poissons s'exerce. En effet, en temps normal, les juvéniles y trouvent refuge et nourriture, de quoi se développer afin de poursuivre leur cycle et plus tard retrouver les plus hauts-fonds dans le but de se reproduire. C'est alors que dans un contexte d'artificialisation des zones côtières, la restauration écologique joue un rôle important dans le regain des services écosystémiques.

Un service écosystémique est « un service, gratuit, rendu par la nature, qui nous permet de vivre et de faire fonctionner notre société. Ce sont toutes les contributions de la nature qui nous affectent directement. » (Tela Botanica, 2020). Pour le milieu marin, ces services se distinguent en 3 ordres : les services d'approvisionnement, de régulation et socio-culturels. Par exemple, le support de culture alimentaire est un service d'approvisionnement, la protection de l'érosion du littoral est un service de régulation, et enfin, la production d'espèces patrimoniales est un service socio-culturel (Voir annexe 1).

La dégradation des écosystèmes conduit donc à une perte des services associés, nécessaires au bon fonctionnement des milieux, leur régulation et leur résilience et aussi importants pour les hommes que pour les espèces animales et végétales.

B- Choix du sujet : le programme GIREL

a. Contexte du projet

En 2009, les connaissances en matière de restauration des fonctionnalités écologiques étaient encore insuffisantes pour prétendre envisager des actions, notamment opérationnelles et de routine. Cependant, le développement d'infrastructures portuaires et donc du trafic maritime menace alors gravement les écosystèmes côtiers à la fois terrestres et marins, il faut donc agir. C'est face à ce constat qu'il a été nécessaire de lancer un programme de Recherche et Développement, pour vérifier concrètement le concept de restauration écologique et pousser l'émergence de solutions opérationnelles de valorisation écologique des milieux portuaires.

C’est alors que le programme de Gestion des Infrastructures pour la Restauration Écologique du Littoral (GIREL) a été lancé à partir de 2009. Celui-ci est porté et en partie autofinancé par le Grand Port Maritime de Marseille (GPMM), soutenu financièrement par l’Agence de l’Eau Rhône Méditerranée Corse et labellisé par le Pôle Mer Méditerranée. Il résulte de la réponse aux orientations prévues dans les deux Directives européennes (Directive Cadre sur l’Eau et Directive Cadre sur le Milieu Marin). Ce grand projet à 5 M€, regroupe nombreux partenaires privés et publics, des scientifiques, des industriels et des acteurs du génie écologique côtier dans le but d’expérimenter des solutions de restauration écologique et de démocratiser lé démarche. Pour ce faire, un appel à proposition a été mis en place, afin de trouver des sociétés porteuses de solutions innovantes dans l’ingénierie écologique côtière.

Le Grand Port Maritime de Marseille est défini comme un établissement public ayant un grand rôle dans l’économie du territoire. De même, il s’agit d’un acteur dans l’aménagement maritime dans une région où les enjeux marins sont importants (Présentation du GPMM, 2012). Au sein du GPMM, les perspectives de développement sont sont fortes, cependant, la mise en avant du développement durable au cœur de ses missions le pousse à s’ouvrir à une meilleure gestion des espaces naturels.

Le port est divisé en deux zones, séparées l’une de l’autre par la côte bleue comprenant Sausset-les-Pins et Carry-le-Rouet. Les deux parties présentent des « infrastructures aux dimensions exceptionnelles » s’étendant sur un total de 30 km linéaire. 30 km qui sont tout autant de substrat à valoriser (Présentation du GPMM, 2012).

Figure 1 : Localisation du GPMM
Source : Géoportail, 2022

b. Les partenaires

Trois entreprises ont répondu à l'appel en proposant d'évaluer l'efficacité de leur solution et d'évaluer l'intérêt de la restauration sur le site du GPMM. C'est le cas pour les sociétés Ecocean, Egis eau et la SAFEGE.

La société Ecocean a été créée en 2003 et œuvre pour la « réparation » des écosystèmes marins. En effet, le simple fait de conserver ne suffit plus en raison de la surexploitation des ressources halieutiques. C'est alors qu'on utilise le terme de réparation, équivalent à la restauration. Pour ce faire, la société a développé deux solutions complémentaires pour reconstituer les stocks halieutiques : Biohut® et BioRestore® (ce dernier en co-traitance avec Lyonnaise des Eaux).

Egis est un « groupe international de conseil, d'ingénierie de la construction et d'exploitation qui œuvre dans le monde entier pour des territoires plus équilibrés, plus durables et plus résilients ». Le groupe accueille des filiales qui partagent leurs valeurs, c'est le cas pour SEABOOST. Par le biais de deux solutions biomimétiques, le module Oursin et le module Roselière, SEABOOST a participé au programme GIREL.

Le dernier partenaire est la SAFEGE (Société Anonyme Française d'Études de Gestion et d'Entreprises), maintenant appelée SUEZ Consulting & Engineering . Il s'agit d'une filiale de SUEZ, qui est un groupe spécialisé dans la gestion de l'eau et le traitement des déchets. La SAFEGE a participé au programme avec le procédé de génie écologique CYSTORE, qui consiste en la transplantation de l'algue Cystoseira. Elle s'associe avec des chercheurs du MIO et l'ECTM spécialisé dans les interventions complexes en milieu marin (Les Échos, 2014). Par sa participation au programme, Fabrice Javel, chef de projet environnement de la SAFEGE souhaite «rapprocher bétonneurs et écologistes».

c. Phasage et déploiement

Le programme a compté trois phases. La première a eu lieu en 2012, il y a été question de vérifier la faisabilité des différentes solutions de restauration écologique : Ecorécifs, BioRestore® et Biohut® et enfin CYSTORE. La deuxième phase s'est poursuivie en 2013 et a permis le déploiement des prototypes à petite échelle en fonctions des résultats de la phase précédente. Enfin, entre 2014 et 2015 a eu lieu l'installation à plus grande échelle des ouvrages (Pôle Mer Méditerranée).

Le projet a ainsi combiné la recherche fondamentale et le développement expérimental, en vue d'acquérir de nouvelles connaissances auprès des partenaires et visant à mettre en place de nouveaux produits, procédés, systèmes et services à moyen et long termes.

Dans le projet GIREL du GPMM, l'idée est d'expérimenter différentes solutions, interdépendantes mais complémentaires entre elles, dans le cadre de l'optimisation des infrastructures portuaires. Les schémas de la répartition des aménagements du projet sont à retrouver en annexes 2 et 3.

d. Liens entre le diplôme universitaire, le sujet et le projet professionnel

Le programme GIREL se montre comme un excellent cas d'études, car c'est l'un des premiers traitant de restauration écologique dans l'ingénierie côtière et c'est lui qui a permis l'essor et la normalisation des procédés en tant que restauration pure des écosystèmes ou bien dans le cadre de mesures compensatoires. Ce sujet, qui est finalement une analyse comparative des différentes méthodes utilisées dans le Grand Port Maritime de Marseille, est suffisamment large et en même temps ciblé sur la restauration écologique pour avoir sa place en tant que cas d'études dans le cadre du diplôme universitaire de restauration écologique des petits fonds côtiers. En effet, le fait de pouvoir comparer et comprendre plusieurs solutions de génie écologique y est intéressant et permet de se faire une idée sur la complémentarité de celles-ci. De même, étant actuellement stagiaire chez LINEUP OCEAN qui est une start-up d'ingénierie écologique marine, il est intéressant de m'imprégner de ce programme phare et d'en comprendre les mécanismes. Cela peut aussi mener à s'interroger sur de nouvelles techniques de restauration, ou du moins le perfectionnement des techniques existantes.

C- La restauration écologique en zone portuaire

Comme dit précédemment, les petits fonds côtiers sont des zones propices au développement des juvéniles de poissons. Pour rappel, les poissons se reproduisent au large de la côte et produisent une grande quantité d'œufs par poissons (par exemple : un loup femelle pond 300 000 œufs par kilo de son poids). Il faut savoir que la mortalité des œufs est assez grande. Beaucoup sont éliminés à différents stades de leur développement : c'est la sélection naturelle. Pour un million d'œufs, on a en réalité un seul individu qui atteint l'âge adulte en moyenne (ECOCEAN). Ces œufs deviennent donc pour certains des larves, puis des post-larves qui vont migrer vers les petits fonds côtiers pour se développer. Enfin, après avoir atteint une taille suffisante, ces juvéniles vont à leur tour et petit à petit se diriger vers le large afin de poursuivre leur cycle.

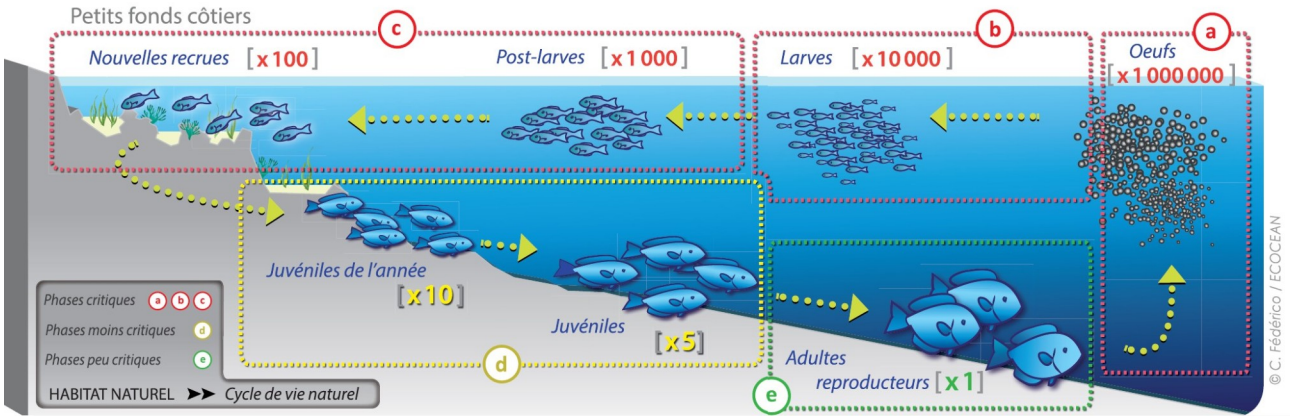


Figure 2 : Cycle de vie des poissons
Source : ECOCEAN

La création de ports, se trouvant forcément dans les petits fonds, va inévitablement détruire certains habitats accueillant auparavant ces nouvelles recrues. Ce phénomène est à l'origine d'une perturbation du cycle de vie des poissons.

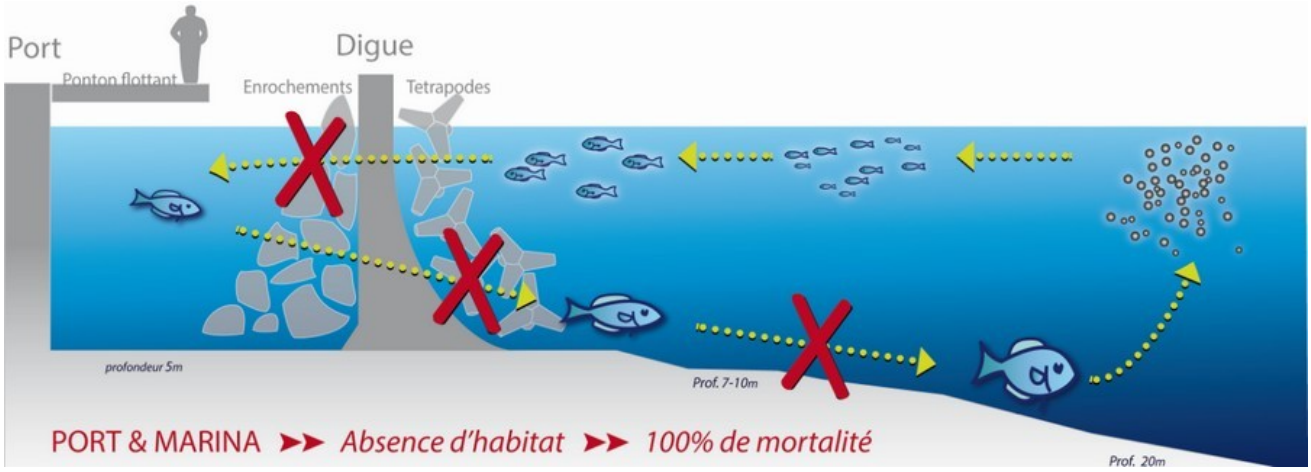


Figure 3 : Impacts de l'artificialisation des petits fonds côtiers
Source : ECOCEAN

C'est alors que l'utilisation de certaines solutions de restauration écologique, notamment connectées à des digues portuaires, va pouvoir jouer un rôle important à ce stade de croissance des poissons. En effet, l'une des fonctions de ces procédés est la fonction biologique qui passe par la création de nurseries. Pour rappel, une nurserie "est une zone où se rassemblent les très jeunes individus qui sont issus des pontes réalisées sur les frayères et qui ont dépassé le stade larvaire. Il s'agit donc d'une concentration de juvéniles dans les zones optimales pour la croissance" (Définition IFREMER). D'après le MIO et The Conversation France en 2017, "ces dispositifs s'auto-entretiennent grâce au cycle biologique des espèces et leur croissance. En revanche, les dispositifs artificiels testés ne sont efficaces qu'un temps et en se dégradant, ils perdent leur fonction biologique".

Ces nurseries vont alors aider à soutenir la croissance des juvéniles, en leur offrant refuge et nourriture, au stade où ils sont encore fragiles. C'est alors que ces habitats vont pouvoir répondre aux critères d'une nurserie à savoir : créer de l'abondance au niveau des espèces présentes, optimiser leur taux de survie, aider à leur croissance et ainsi leur permettre de migrer et de poursuivre leur cycle de vie (selon Beck et *al.*, 2001). On parle alors d'optimisation écologique des infrastructures portuaires.

II- Analyse comparative des fonctionnalités écologiques des solutions

A- Des habitats artificiels pour les quais et les digues

a. Description et objectifs

La société Ecocean, associée à la Lyonnaise des Eaux et le CEFREM (Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens), a répondu à l'appel à projet du programme GIREL avec ses deux solutions de repeuplement complémentaires à installer dans le Grand Port Maritime de Marseille : Biohut® et BioRestore®. Biohut® étant un habitat artificiel, il sera mis en évidence dans cette partie du rapport. Aussi, SEABOOST, filiale d'Egis, a proposé de développer la fonctionnalité de nurserie grâce à son pilote : Ecorécifs, correspondant à deux modules artificiels biomimétiques.

Biohut® :

Premièrement, Biohut® (ou « hutte de biodiversité ») se définit comme une nurserie artificielle. Il se présente comme une structure de type cage en acier doté de plusieurs compartiments. Un compartiment en particulier, au centre de la structure, est rempli d'un substrat naturel en coquilles d'huîtres, où les algues et les invertébrés peuvent se développer. Ces derniers offrent une source de nourriture pour les poissons. Le compartiment vide de la structure, lui, sert d'abri contre les prédateurs pour les juvéniles de poissons grâce à son maillage d'environ 5cm de hauteur et de largeur. Ces Biohut® peuvent servir à complexifier les quais lisses des ports ou encore les dessous de pontons et les digues, offrant refuge et nourriture aux nouvelles recrues en zone artificialisée. Nous verrons aussi l'utilisation des Biohut® Rivage dans le cas d'une association avec le procédé BioRestore®.

Figure 4 : Biohut® ponton
Source : Delta Fm, 2019

Figure 5 : Biohut® digue
Source : Ecocean

Ecorécifs :

Les autres dispositifs de restauration écologique en termes d'habitats artificiels sont développés par SEABOOST. Il s'agit de deux modules inspirés de la nature, mis en place pour restaurer les fonctions de nurseries dans les ports.

Le premier est le module Oursin, s'inspirant de l'Oursin diadème. Il représente, comme son nom l'indique, un oursin d'1m de diamètre fait de Polypropylène conchylicole. En s'installant sur les infrastructures déjà existantes telles que les digues et enrochements, il remplit les fonctions d'habitat et de nurserie. Le module a une durée de vie supérieure à 10 ans et ne nécessite pas d'entretien particulier durant cette période.

Figure 6 : Module Oursin
Source : SEABOOST

Le deuxième, la Roselière, est une solution biomimétique inspirée des écosystèmes d'herbiers et d'algues. Il peut se fixer sur des supports déjà existants, notamment des digues, par ligature. Ses filins en fibre de coco offrent la possibilité aux poissons d'y trouver un refuge, et de remplir également les fonctions d'habitat et de nurserie. Ce module a une durée de vie supérieur à 5 ans et, comme le module précédent, ne nécessite pas d'entretien.

Figure 7 : Module Roselière
Source : SEABOOST

Dans le Grand Port Maritime de Marseille, au total 120 m linéaires de modules Oursins sont déployés sur 4 digues, et 120 m linéaires de Roselières sur 4 quais.

b. Suivis, résultats et perspectives

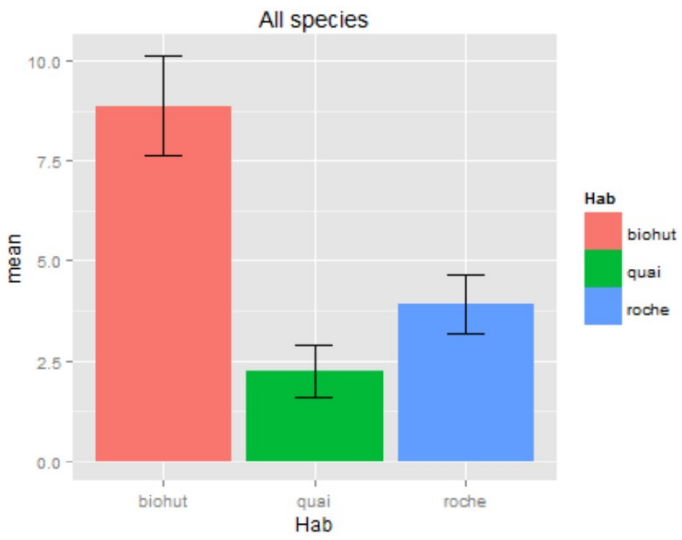
Biohut® :

Suivis :
Deux types de suivis sont réalisés dans le cadre du pilote Biohut®. Le premier est le suivi appelé 3F+Vag (Faune, Flore Fixée et Faune Vagile). Il a été réalisé par un prestataire consultant spécialisé en écologie marine sur 4 quais différents entre 2013 et 2014 disposant de Biohut®. Ce suivi a permis d'évaluer la diversité et le degré de colonisation des solutions. En termes de protocole, des photos de la flore et de la faune fixée sont prises sur l'ouvrage immergé. Puis, à l'aide d'un filet à fines mailles, le Biohut® est sorti de l'eau pour être pesé. Par la suite, il est secoué au-dessus d'un bac servant à récupérer la faune vagile présente dans le Biohut®. Chaque individu qui est collecté est identifié, mesuré puis comptabilisé (Lecaillon et *al,* 2015).

Le deuxième suivi est un suivi scientifique réalisé par le CEFREM. Il s'agit d'un comptage effectué en plongée grâce à un scaphandre autonome à l'air. Pour le comptage, la méthode des quadrats est utilisée. Le plongeur doit procéder à l'observation en point fixe pendant 3min. Le processus est reproduit sur un quai aménagé, un quai témoin et un enrochement (Lecaillon et *al,* 2015).

Résultats :
Le suivi 3F+Vag a montré des résultats satisfaisants. Au vu du nombre d'espèces de faune vagile prélevées entre 2013 et 2014, l'immersion prolongée du Biohut® semble favoriser la biodiversité car on recense 3 fois plus d'espèces en 2014. Cependant, les mollusques et les poissons ont tendance à régresser au profil de la population d'arthropodes, peut être en raison des précipitations importantes juste avant le retrait du Biohut® (cause : désalinisation). En 1 an, le nombre

d'invertébrés marins est passé de 357 à 995 au total (arthropodes, échinoderme, mollusques, ostéichtyens, vers).



En ce qui concerne le suivi scientifique qui a fait la comparaison entre l'abondance totale des individus dans le GPMM en fonction des différents habitats à savoir les Biohut®, les quais et les enrochements, a montré que l'habitat Biohut® était très efficace. En effet, on y retrouve en moyenne à 9 individus sur 10m linéaire contre 2,4 sur les quais témoin et 4 sur les enrochements (Lecaillon et *al,* 2015). En termes d'espèces présentes, le sparaillon est retrouvé sur chaque Biohut®, le sar commun y est retrouvé sur certains, le sar à museau pointu et le sar à tambour sont plus rares, mais confirment l'effet nurserie du port, et le sar à tête noire a rarement été comptabilisé mais est présent (Lecaillon et *al,* 2015).

Figure 8 : Densité moyenne par 10m linéaire des individus (mean) dans le port de Marseille en fonction de l'habitat
Source : GIREL-3R, 2015

Perspectives :
D'après les résultats, l'apport de la méthode TypoDock (voir II-D) pour localiser les zones les plus favorables à l'installation des Biohut® pourrait permettre d'optimiser les performances écologiques du port. De plus, ceux-ci pourraient être immergés plus profondément afin d'en limiter les dégradations par l'usage des quais (Lecaillon et *al,* 2015).

<u>Modules Oursins et Roselières :</u>

Suivis :
Les suivis des Ecorécifs ont reposé sur des observations sous-marines et de comptages semi-quantitatifs par l'utilisation de méthodes vidéos. Les suivis en plongée ont été pris en charge par le GIS Posidonie. Il s'agit donc de comptages sous-marins en scaphandre par répliquats de 10 m linéaire à profondeur fixe. Les poissons sont comptés par espèce et par taille. L'ensemble des stations de chaque site sont explorées le même jour si possible, afin de limiter la variabilité des paramètres (Perrot, 2013). Les paramètres Espèces et Abondance sont renseignés sur divers transects correspondant à un panel diversifié des habitats tels que les micro-récifs, les digues, les quais, les zones protégées etc (Perrot, 2013). Ainsi, 4 campagnes de suivis ont été menées afin de comparer les sections d'ouvrages éco-conçues aux sections standards (SEABOOST, 2015).

En complément du suivi de plongée, Egis a développé par la suite une méthode d'observation vidéo qui vise à augmenter le nombre d'observations. Celle-ci permet entre autres la réduction des biais spatio-temporels liés à la plongée seule. Le protocole qui a été envisagé en 2013 comporte la prise de deux vidéos (10 min chacune) par station, une en transect aménagé et une en transect non-

aménagé. Le nombre de campagnes est fixé à 8 par an. Les analyses des vidéos portent sur l'identification taxonomique et l'abondance relative (Perrot, 2013).
Résultats :
Les résultats sont similaires entre les deux modules. En termes de richesse des peuplements de juvéniles de poissons, 32 espèces ont été comptabilisées et on observe une moyenne statistiquement supérieure sur les ouvrages équipés d'Ecorécifs, sachant que les sections non-équipées ne sont pas différentes entre elles. En effet, en l'absence de solution de bioaccumulation, les quais verticaux ne présentent que très peu de vie. Les résultats sont très prometteurs car l'écoconception des modules apporte une densité 1,7 à 3,2 fois supérieure pour les Oursins et de 4,5 à 17 fois supérieure pour les Roselières. Cependant, les effets positifs restent très localisés (SEABOOST, 2015).

Perspectives :
D'après un retour d'expertise fait par l'IFREMER en 2015, il a été proposé à Egis de redéfinir le protocole d'échantillonnage et d'en élargir la période, en adéquation avec les objectifs des gestionnaires afin de conforter les résultats de 2014. Aussi, les deux modules ont prouvé leur intérêt pour deux taxons (*Diplodus annularis et Symphodus spp*.), il s'agirait par la suite d'étendre leur effet à d'autres espèces (IFREMER, 2015).

B- Une méthode de repeuplement

a. Description et objectifs

Le pilote BioRestore®, porté par Ecocean et la Lyonnaise des eaux, est une technique de repeuplement de poissons et de crustacés dans le milieu. Il s'agit d'une technique innovante qui consiste en la capture des post-larves au large, leur élevage en aquarium et leur lâcher en milieu naturel : la PCC (Post-larval Capture and Culture).

Les post-larves sont collectées au large de la côte à l'aide d'un filet. Elles sont attirées par une lumière émise, aidant à leur capture. Après leur marquage, ces post-larves poursuivent leur développement en nurserie jusqu'à leur stade juvénile. L'élevage en nurserie va permettre un meilleur taux de survie qu'en milieu naturel en raison de la prédation, de la sélection naturelle etc. Celui-ci est réalisé de manière que les poissons et crustacés gardent leur instinct naturel, et compte un stade de ré-ensauvagement à la fin du processus. Une fois la taille refuge atteinte les sars communs, les sparaillons, les pageots et les pagres communs sont tagués afin de faciliter leur suivi scientifique. Ensuite, la remise en milieu naturel s'effectue sur des habitats d'émancipation. L'objectif est d'améliorer la diversité et l'abondance des espèces subadultes et adultes vers les écosystèmes naturels alentours.

b. Suivis, résultats et perspectives

La méthode PCC comporte de nombreuses phases (collecte, élevage, expérience de non-domestication, tagging et relâchés) qui ne font pas pour autant l'objet de protocoles de suivis. Faire le détail de toutes ces étapes rendrait ce rapport trop conséquent, c'est alors que nous allons nous intéresser directement aux suivis des relâchés.

Suivis des relâchés :
Pour avoir matière à comparer les résultats obtenus, les relâchés s'effectuent sur 3 villages, dont chacun d'entre eux correspond à une composition d'habitats différente, mais toujours accompagnée d'un Biohut® rivage. Pour le premier village, le Biohut® est placé à 30 m d'un herbier de Posidonie. Le deuxième village est placé à moins de 2 m d'un herbier et enfin le 3ème est situé à moins de 10 m. Sur chaque village s'effectue deux relâchés différents composés de 42 sparaillons et 18 sars communs (Lecaillon et *al*, 2015).
Les relâchés des sparaillons et des sars ont fait l'objet de deux suivis. Le suivi du 1er jour correspond à l'observation de l'abondance des juvéniles sur chaque village et entre les deux relâchés. Le suivi sur 30 jours se base sur le même principe mais permet de déterminer l'abondance sur les 30 jours suivants le relâché, ce qui pousse à comprendre les comportements des poissons sur le long terme (Lecaillon et *al*, 2015).

Résultats :
En ce qui concerne le comportements des poissons du 1er relâché, les individus ont tendance à utiliser les habitats d'émancipation au début, puis à se déplacer vers les habitats naturels lorsque ceux-ci sont disponibles. Les poissons qui sont relâchés dans un deuxième temps, eux, se mettent directement à suivre le comportement que le groupe déjà en place.

Au bout de 30 jours, les populations de juvéniles autour des habitats sont beaucoup plus faibles en raison de leur migration vers les herbiers et autres habitats naturels disponibles autour.

D'après les calculs d'abondance réalisés lors de ces suivis, on estime que le taux de survie des juvéniles après relâché en milieu naturel est de 47 %. Il est cependant potentiellement plus élevé car tous les individus encore vivants ne sont pas forcément vus et donc comptés. Ce chiffre est de 5 à 10 fois plus élevé que sans l'intervention de l'homme (Lecaillon et *al*, 2015). Et après optimisation et perfectionnement des techniques, ce taux peut encore augmenter et là est bien l'objectif de ce programme.

Perspectives :
Les études sur la technique PCC ont permis de trouver quelques failles sur lesquelles il est encore possible de s'améliorer. Notamment, lors du relâché, il est désormais pourvu une phase de stabulation des individus avec un filet de protection, et ce, pendant une nuit. De même, les Biohut® rivage sont installés plus en amont que les relâchés pour garantir un meilleur fouling et donc une meilleure nourriture aux poissons. D'autres perspectives sont envisagées, c'est le cas pour le soutien aux peuplements menacés ou encore le repeuplement pour accélérer la recolonisation après un épisode de fortes pressions néfastes telles que des rejets, des travaux etc. (Lecaillon et *al*, 2015).

C- Une méthode de réhabilitation spécifique

a. Description et objectifs

La Cystoseire est une algue brune endémique de Méditerranée à très grand intérêt écologique. Malgré le fait qu'elle ne soit pas une espèce protégée, elle est utilisée comme un indicateur de la qualité des eaux. De plus, elle fournit aux espèces marines un habitat par lequel ils peuvent trouver nourriture et abri (SAFECE, 2013). Par la transplantation de cette espèce sur les digues portuaires du GPMM, la société SAFEGE espère en restaurer sa continuité écologique en développant sa méthode à grande échelle et ainsi offrir un outils opérationnel auprès des gestionnaires d'ouvrages ou de milieu lagunaire (Pôle Mer PACA, 2011). La méthode en question est l'expérimentation d'un support de transplantation en béton marinisé à forte rugosité et fixé par des tiges filetées scellée dans la roche présente. En effet, il a été démontré par l'Université de Nice-Sophia Antipolis que les conditions hydrodynamiques *in situ* peuvent provoquer l'arrachage des plans. Le programme GIREL a pu permettre l'amélioration du prototype par l'optimisant de la surface, la simplification de la fixation, l'ajout d'un dispositif anti-prédation et l'amélioration du positionnement altimétrique (SAFEGE, 2013). En effet, cette algue a une grande tendance à se faire brouter, notamment par la saupe.

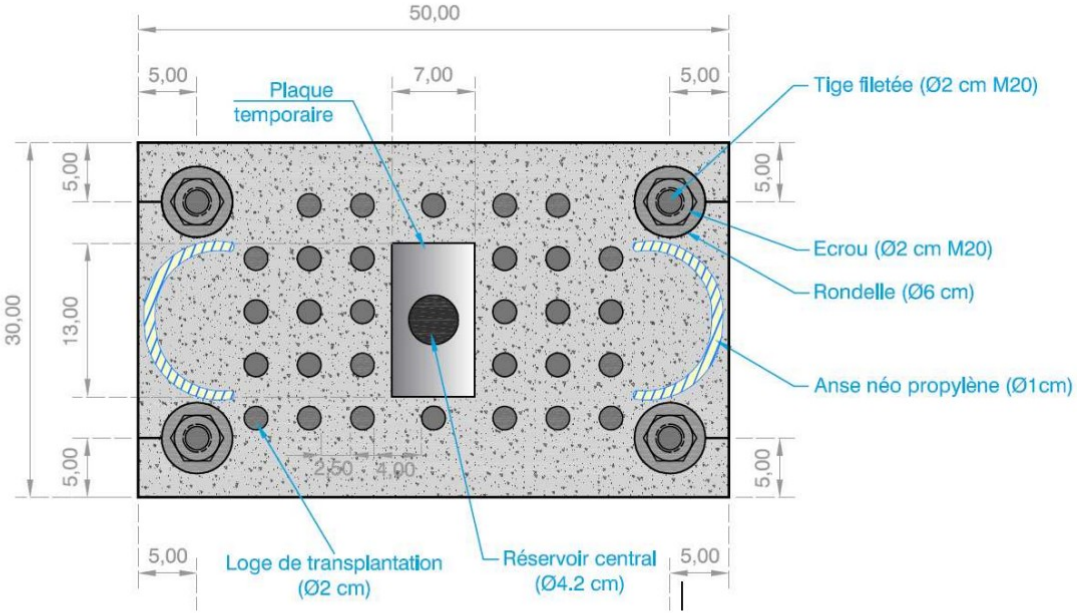


Figure 9 : Schéma du prototype de support de transplant en phase 2
Source : SAFEGE, 2013

Dans le GPMM, quatre sites ont été sélectionnés, c'est le cas pour le site témoin de Corbières, la digue de l'Estaque, la digue Sud-Ouest, la digue du large et enfin la digue des Catalans. Sur chacun d'entre d'eux, 300 algues ont été implantées courant avril et mars 2014 sur 10 plaques par site dans un objectif de dissémination afin de créer abri et nourriture pour le développement de la faune et de la flore localement (AFP News, 2014).

b. Suivis, résultats et perspectives

Suivis :

Les suivis ont été réalisés entre 2014 et 2015. Leur fréquence a été très élevée les premiers mois suivant la transplantation puis tous les deux mois environ . Les paramètres qui sont à mesurer sont :

- La longueur des transplants
- La survie par comptage
- Le recouvrement par les corallines et les moules par évaluation visuelle en %
- Le recouvrement par les algues par suivi photographique
- La densité des patelles par décompte sur chaque plaque par la méthode des quadrats
- L'abondance des épiphytes par indice entre 0 et 5
- Le recrutement et la dispersion

(SAFEGE, 2013).

Résultats :

Les résultats ont montré une bonne croissance des transplants ainsi que leur fertilité sur tous les sites. Cependant, même après avoir complexifié la plaque d'un dispositif anti-prédation, il existe une pression de broutage qui subsiste. L'étude a également permis de mieux comprendre les facteurs clefs de réussite à savoir : la technique de transplantation, le site, le substrat, le broutage, etc (SUEZ, 2016). Selon les dires de la SAFEGE en 2013 dans son « Bilan des actions et résultats », un taux de survie et de dissémination aurait été calculé, cependant les données restent visiblement confidentielles, de même pour les recommandations sur les techniques de transplantation.

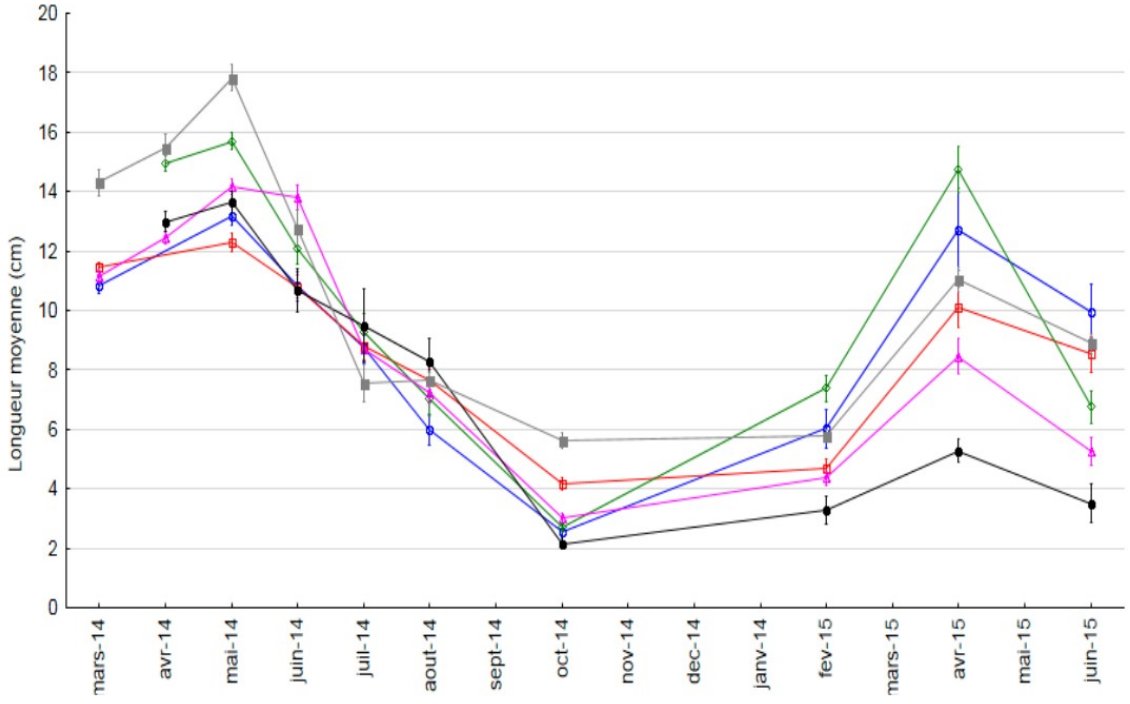


Figure 10 : Longueur moyenne des transplants entre 2014 et 2015

Source : SUEZ, 2016

Perspectives :

Selon sa présentation au forum des gestionnaires en 2016, SUEZ a évoqué certaines pistes de réflexion quant à la suite des études menées. En premier lieu, il s'agirait de savoir quels indicateurs permettraient d'évaluer l'efficacité du procédé, mais aussi quels critères permettraient de juger l'opportunité d'une action. Il serait aussi question de savoir comment faire contribuer les ouvrages portuaires à la restauration des continuités écologiques sans pour autant créer des contraintes pour les gestionnaires. Aussi, la société se demande comment prendre mieux en compte les incertitudes liées aux zones projets et en dernier lieu, quels leviers serviraient à intégrer les critères écologiques à la conception même d'un ouvrage (SUEZ, 2016).

D- Une méthode d'évaluation du potentiel des quais

Au cours du programme GIREL, une méthode d'évaluation du potentiel des quais a été développée par la Lyonnaise des Eaux. L'objet de cette démarche est la qualification du niveau de compatibilité biologique des ouvrages portuaires par l'identification des zones les plus aptes à être équipées par des dispositifs de bioaccumulation tels que les solutions de restauration écologique (Bourgogne et *al*, 2015).

Pour ce faire, il a fallu disposer de plusieurs paramètres concernant les ouvrages portuaires et ainsi comparer leur niveau biologique avec le niveau des pressions naturelles et anthropiques. Ces paramètres ont concerné la typologie des infrastructures, les propriétés physico-chimiques des eaux et leur qualité, la composition bactériologique du milieu marin, la météorologie, la variabilité environnementale et enfin l'état biologique du milieu. Chaque paramètre a été associé à des indicateurs faisant office de critère d'évaluation. Au total, l'étude a couvert un total de plus de 110 paramètres et 250 facteurs évalués. Toutes ces données ont été retranscrites dans deux bases de données en fonctions des données ponctuelles et continues (Bourgogne et *al*, 2015).

Cette étude a pu donc aboutir à la détermination du niveau d'influence des différentes pressions sur la biologie et de la correspondance à un score biologique et un score de biocompatibilité des ouvrages (Bourgogne et *al*, 2015). C'est alors que les ouvrages ont pu être classés de manière hiérarchique en fonction de leur biocompatibilité à recevoir des solutions de bioaccumulation. Ce classement a mené à la réalisation de la cartographie de l'ensemble des quais du port, adaptée à la compréhension de tout maître d'ouvrage.

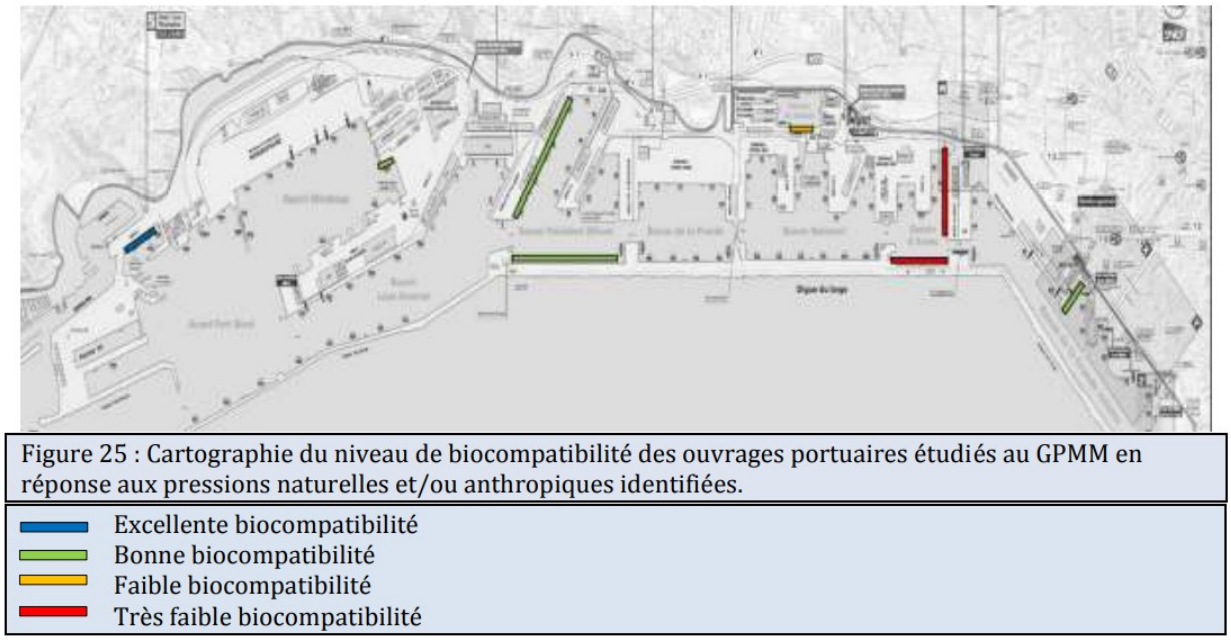


Figure 11 : Cartographie du niveau de compatibilité des ouvrages portuaires étudiés au GPMM en réponse aux pressions naturelles et / anthropiques identifiées
Source : Rapport final TypoDock

Finalement, chaque quai dispose d'une fiche synthétique (annexe 5) recensant les résultats de l'étude, à savoir :

- L'emplacement géographique du quai,
- Les niveaux de complexité structurelle et l'intensité des usages anthropiques,
- L'état biologique réalisé initialement sur le site, comportant des informations sur la biologie fixée et sur les populations de poissons présentes,
- Les résultats des analyses de la qualité environnementale du milieu,
- Un graphique final résumant les niveaux de biocompatibilité et les influences de l'ensemble des catégories de pression étudiées.

(Rapport final TypoDock, 2015)

III- Retombées du programme et discussion

A- La complémentarité des démarches pour l'optimisation des résultats

Rappelons-le, les techniques de restauration expérimentées dans le cadre de GIREL se sont basées sur trois procédés différents à savoir la création d'habitats artificiels, la transplantation d'algues Cystoseire et enfin la recolonisation directe du milieu par l'apport de la méthode PCC. Ces trois procédés, complétés par la démarche TypoDock, ont eu pour objectif de participer à l'optimisation des infrastructures du GPMM afin de pouvoir être développés et banalisés dans l'ingénierie écologique côtière. Elles ont toutes trois montré des résultats très encourageants et ont prouvé par

le biais de ce grand programme que l'apport de la restauration écologique avait sa place dans la filière du génie portuaire. Les trois méthodes ont aussi montré qu'elles pouvaient aussi être complémentaires. En effet, nous avons vu que les habitats artificiels (Biohut® et Ecorécifs) étaient des habitats privilégiés pour les nouvelles recrues de poissons qui viennent du large, leur offrant de la nourriture grâce au fouling et un abri contre les prédateurs. Ensuite, les herbiers de Cystoseire servent aussi d'habitats mais cette fois-ci de manière naturelle. Les deux types d'habitats servent à complexifier le milieu et créer des corridors écologiques entre eux. Il est vrai que la notion de corridor est à prendre en compte car c'est grâce à ce système que les espèces peuvent communiquer entre les différents habitats et entre elles, et leur permettre d'étendre leur territoire. Afin d'aider à la recolonisation de ces écosystèmes, la méthode PCC trouve sa place avec succès. La méthode qui consiste à capturer les post-larves, les élever en bassins et les relâcher à leur taille refuge, permet un taux de survie de 5 à 10 fois supérieur à celui trouvé dans la nature. De plus, le fait d'injecter ces juvéniles déjà bien plus nombreux qu'en milieu naturel grâce à l'élevage sur les habitats, qu'ils soient naturels ou pas, garantit une bonne recolonisation du milieu. Pour finir, la démarche TypoDock, qui n'est pas une méthode de restauration en soi mais une méthode permettant de connaître la biocompatibilité des ouvrages à recevoir des procédés de bioaccumulation, est un excellent moyen de connaître en amont tous les paramètres des infrastructures et de leur environnement. Son application paraît donc pertinente pour anticiper, cibler, calibrer et dimensionner des opérations de restauration de façon optimale.

B- La place du programme dans l'essor de la restauration écologique

Nous avons vu que le programme GIREL a été l'un des premiers programmes ayant associé l'ingénierie portuaire à la restauration écologique. Ce qui en ressort, c'est non seulement la volonté du GPMM de s'investir dans la gestion des espaces naturels et la prise en compte des enjeux de biodiversité sur les terrains aménagés en corrélation avec les nouvelles attentes sociétales et politiques mais aussi cette implication dans la recherche en vu de développer des solutions innovantes sur ces thématiques. Étant un port extrêmement central en termes d'ouverture commerciale et de développement, il est très satisfaisant de voir qu'une pareille entité puisse montrer un tel exemple.

Au vu des résultats plus qu'intéressants qui ont été rapportés à la suite du programme, la restauration écologique en zone portuaire est non seulement possible mais aussi nécessaire. Grâce aux procédés expérimentés qui participent à la complexification du milieu, le potentiel de nurserie du GPMM est amélioré. En effet, l'état initial du port (avant le programme) qui a été réalisé en 2012 avait déjà montré «la présence relativement durable de poissons au stade de juvénile sur les quais et les digues » révélant à ce stade une occupation des habitats artificiels (Perrot, 2015), ne pouvant qu'être optimisée. C'est alors que les suivis des pilotes Biohut® et Ecorécifs ont permis de valider la

théorie grâce à l'accroissement significatif de la richesse sur les zones équipées en les comparant avec les zones non-équipées.

Depuis la fin du programme, les procédés de restauration écologique se sont développés rapidement. Les sociétés comme Ecocean et Egis avec sa filiale SEABOOST ont pu rendre populaires leurs solutions en France et ailleurs. Aujourd'hui, les Biohut® d'Ecocean sont présents dans 45 ports en Méditerranée. Ils sont déployés dans les ports présentant une certification européenne « Ports Propres » et participent à l'activation de la nouvelle certification « Ports Propres Actifs en Biodiversité ». De plus, la société est dorénavant active en Espagne, aux Pays-Bas, au Danemark et les Caraïbes et travaille sur plus d'une trentaine d'autres projets en lien en lien avec la thématique. SEABOOST est aussi devenu un acteur important de l'ingénierie écologique. La filiale d'Egis ne compte pas moins de 15 projets français et internationaux qui lui ont permis de développer beaucoup d'autres solutions notamment des lestes écologiques, ou encore des dispositifs pour atténuer l'effet de la houle et de l'érosion côtière. Pour finir, SUEZ et son pilote CYSTORE qui favorise la réimplantation d'une espèce locale et endémique de Méditerranée, trouve moins d'opportunités d'actions. Toutefois, SUEZ a participé au projet RE-CYST dans le Parc National des Calanques en 2016 (dont l'initiative s'inscrit dans le prolongement de GIREL), et un autre pilote est en cours à Fort Vauban à Antibes.

C- Quel avenir pour la restauration écologique dans la valorisation des zones portuaires ?

Les ports correspondent à des zones extrêmement artificialisées qui ont un rôle important dans l'économie, le développement, le tourisme etc d'un pays. De ce fait, ils ne peuvent évidemment pas être supprimés (et ont même tendance à s'agrandir dans le temps), mais comme toute autre infrastructure, ils peuvent faire appel à l'innovation pour réduire les impacts néfastes à la vie marine. L'innovation est un produit de la Recherche et du Développement. Cette R&D est actuellement l'un des piliers sur lesquels reposent en partie l'avenir de la planète et de l'humanité en danger. Dans ce processus, la recherche est nécessaire pour comprendre les comportements des espèces marines, cependant elle a encore du chemin à faire car le milieu marin reste le milieu le moins connu avec l'espace. Le développement, lui, est le résultat de la mobilisation des connaissances dans des solutions concrètes. De nos jours, beaucoup de recherches sont en cours en lien avec la restauration écologique, c'est le cas pour l'écoconception et le biomimétisme, la durabilité des matériaux et leur composition, la multifonctionnalité et la complexité des habitats, la connectivité entre les habitats, le comportements des espèces etc. Ce sont tout autant de sujets aux nombreux paramètres et facteurs à appréhender et qui font leur complexité.

Or, il faut savoir que ce principe de R&D dans ce domaine mène à se poser la question de savoir comment réussir à reproduire la nature. Mais intrinsèquement, la nature n'a pas besoin d'être reproduite et ne le peut même pas. Car par définition, une création est un ouvrage contre-nature,

fait par l'homme et pour les hommes. Néanmoins, les nouvelles technologies visent à nous rapprocher de ce que l'on connaît des fonctions naturelles des habitats et des écosystèmes par le biais de l'écoconception et du biomimétisme par exemple.

L'écoconception "consiste à intégrer l'environnement dès la conception d'un produit ou service, et lors de toutes les étapes de son cycle de vie" (AFNOR, 2004). L'objectif est la recherche permanente du gagnant-gagnant socio-écologique et un double bénéfice, celui des hommes et celui de la nature (Pioch *et al*, 2019). En parallèle, le biomimétisme est une « démarche d'innovation durable qui consiste à transférer et à adapter à l'espèce humaine les solutions déjà élaborées par la nature (faune, flore, etc.).» (Définition du Larousse).

De nos jours, c'est avec ces nouvelles technologies que l'on assiste à l'essor de la multifonctionnalité des ouvrages et la diversification des procédés de restauration. Par exemple, l'entreprise SEABOOST développe des modules de récifs artificiels servant de nurserie, d'atténuateur de houle, de leste écologique et de support pour la plongée sous-marine. Le plus souvent, les différentes fonctions se regroupent en un seul module. De plus, la société travaille en partenariat avec un entreprise d'impression 3D. Cette technique permet de reproduire des formes complexes grâce à du béton biogène marinisé s'intégrant positivement dans mili2018eu marin. Une jeune entreprise innovante, LINEUP OCEAN fondée en 2021, développe également ce type de solutions biomimétiques avec une approche multifonctionnelle et multi-échelle et a clairement pour ambition d'aller plus loin dans l'écoconception des ouvrages maritimes.

En ce sens, les démarches de restauration écologique et de protection côtière ont tendance à se regrouper dans cette nouvelle multifonctionnalité des ouvrages, ce qui peut supposer un gain de temps et d'argent dans leur mise en place mais aussi et surtout l'abandon progressif de solutions de protection lourdes (telles que les digues, enrochements, épis, brise-lames…) avérées non durables qui contribuent à l'artificialisation du milieu et la perturbation et la dégradation des écosystèmes.

D- Les pistes d'amélioration

Nous avons donc vu que les solutions de restauration écologique reposaient essentiellement sur la R&D. Toutefois, un autre pilier peut être identifié au niveau des politiques publiques en matière de planification territoriale en faveur de la biodiversité. En effet, la planification ne peut pas se faire sans une forte volonté politique qui va dans ce sens et les financements attribués en conséquence.

En termes de financements, jusqu'ici, ils provenaient majoritairement d'aides publiques accordées sous forme de subventions et attribuées en général les recherches, les pilotes expérimentaux et les travaux de génie écologique des milieux naturels. Ces aides proviennent essentiellement des politiques en faveur de l'eau et des milieux aquatiques, représentée par l'Agence de l'eau, les régions et les départements. Toutefois, les financements pour les opérations expérimentales restent assez insignifiants comparé à ceux accordés pour les investissements de travaux et la démarche

peut s'avérer complexe et longue. Le recours aux financements privés est alors de mise pour faire avancer la recherche (Lenfant *et al*, 2018).

La politique peut être un grand frein dans la mise en place de ce type de projets, cependant, elle tend de plus en plus à s'impliquer dans la démarche. Cette évolution des politiques publiques se traduit par le développement d'un outil de programmation et de mise en œuvre des actions de restauration écologique et de non dégradation : le STERE (Schéma Territorial de Restauration Écologique). Cet outil vise à harmoniser les actions de restauration par le partage de leur programmation, afin de valoriser la démarche à grande échelle et non plus seulement localement comme jusqu'à présent. Il s'intègre directement dans un plan de gestion et consiste à prendre en compte les problématiques de restauration des fonctions écologiques et de maîtrise de l'impact des activités humaines. De même, il permet une planification des actions sur le moyen et long termes, il intègre un volet d'évaluation. Le STERE peut aussi s'inscrire dans des démarches de contrat de milieu ou de plan de gestion marin favorisant la coopération entre les différents maîtres d'ouvrages (Lenfant *et al*, 2018).

C'est alors que les pistes d'amélioration concernent bien entendu les prouesses de la R&D mais tout autant les instances décisionnelles qui accordent les financements en faveur des actions pour la biodiversité marine.

Conclusion

La restauration écologique est une démarche en plein essor qui mérite une attention particulière car c'est une démarche saine et pleine de sens. Le programme GIREL a grandement contribué à son enrichissement et a permis d'ouvrir la voie à de nombreuses entreprises soucieuses de la vie marine. Les résultats du programme ont montré qu'il était encore possible de se rattraper de l'artificialisation qui cause toujours plus de dérèglement sur les milieux à travers le monde en optimisant de manière innovante les ouvrages en place. Il est vrai que cette démarche paraît tardive car la logique serait de limiter l'atteinte aux milieux naturels à l'étape même de la construction de l'ouvrage, mais c'est maintenant que nous nous posons ces questions car les répercussions de l'inaction se font enfin ressentir gravement. Les sociétés porteuses de ces nouvelles solutions de restauration écologique sont courageuses et ne perdent pas espoir face à des constats de plus en plus inquiétants au fil du temps. Les recherches et résultats à venir seront sans doute encore plus fructueux mais ne remplaceront jamais les services écosystémiques que la nature a construit. La démarche se joue maintenant énormément auprès des politiques publiques qui ont le pouvoir de réellement faire bouger les lignes et encourager toute personne à la prise de conscience.

Au travers de ce nouveau diplôme universitaire « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers », l'apprentissage de nouvelles méthodes prouve la démocratisation de la démarche et la volonté d'agir. Ce diplôme passionnant est une des précieuses clés qui permettra de faire évoluer encore la société sur le sujet global de la préservation de la nature par la contribution à la soigner.

Bibliographie

Bouchoucha, M, Am Darnaude, A Gudefin, R Neveu, M Verdoit-Jarraya, P Boissery, et P Lenfant. « Potential Use of Marinas as Nursery Grounds by Rocky Fishes: Insights from Four Diplodus Species in the Mediterranean ». *Marine Ecology Progress Series* 547, 7 avril 2016

C. Tavernier, J. Jordi, G. Lecaillon, et P. Lenfant. « Girel- Pilote Biorestore- Synthèse de la phase 2 », octobre 2013.

Coll, Marta, Chiara Piroddi, Jeroen Steenbeek, Kristin Kaschner, Frida Ben Rais Lasram, Jacopo Aguzzi, Enric Ballesteros, et al. « The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats ». *PLOS ONE* 5, n^{o} 8, 2 août 2010

ECOCEAN. « Opération de restauration écologique des fonctions de nurserie dans le port Camille Rayon de Golfe Juan - Rapport d'activité intermédiaire », 2021.

Fabrice Javel, Jonathan Grondin, Thierry Thibaut, et Aurélie Blanfune. « CYSTORE. Valorisation écologique des ouvrages maritimes par la transplantation des algues du genre Cystoseira. », février 2012.

G. Lecaillon, P.Lenfant, S. Fonbonne, A. Mercière, et I. Simonnet. « GIREL- 3R », janvier 2015.

GPMM. « GIREL ». mai 2012.

Hugo BOURGOGNE et Eric BLIN. « TypoDock- Rapport final », janvier 2015.

IFREMER. « Expertise GIREL », mars 2015.

Jean-Michel Bocognano. « GIREL, Petit poisson deviendra grand ». *La revue Marseille*, n^{o} 256, octobre 2017

« L'éco-conception portuaire et le projet CYSTORE : Pour une valorisation écologique des ouvrages maritimes et la restauration des continuités écologiques », avril 2014.

M. Perrot. « Propositions pour la valorisation des résultats de GIREL par le GPMM », février 2015.

M. Perrot. « Rapport de synthèse de phase 2 – Année 2013 », octobre 2013.

Manon Mercader, Alexandre Mercière, Gilles Saragoni, Adrien Cheminée, Romain Crec'hriou, Jérémy Pastor, Mary Rider, et al. « Small artificial habitats to enhance the nursery function for juvenile fish in a large commercial port of the Mediterranean », 2017

Natura 2000. « DOCUMENT D'OBJECTIFS DU SITE NATURA 2000 FR9301999 « CÔTE BLEUE MARINE » Directive Habitats ANNEXE 2 « Inventaires des activités et usages maritimes. Diagnostic socio-économique » », avril 2012.

Philippe Lenfant, Anaïs Gudefin, Sébastien Fonbonne, Gilles Lecaillon, James Aronson, Eric Blin, Sven Michel Lourie, et al. « Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes. », 2015.

Philippe Lenfant, Pierre Boissery, Gilles Lecaillon, Anaïs Gudefin, Sébastien Fonbonne, et Philippe Thievent. « Organiser, planifier et coordonner- les opérations de restaurations écologiques et de non dégradation des habitats marins côtiers », 2018.

Pôle Mer Méditerranée. « Pôle Mer Méditerranée - Journée «Ecosystèmes marins : Observation, Gestion, Restauration, Services écosystémiques » », Marseille, 23 juin 2015.

Pôle Mer PACA. « Appel à projets Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse / Pôle Mer PACA », 2011.

SAFEGE. « Projet GIREL - Pilote CYSTORE Restauration et valorisation écologique par transplantation d'algues du genre Cystoseira - Bilan des actions et résultats 2013 », 2013.

SEABOOST. « L'éco-conception d'ouvrages techniques au service de la biodiversité marine ». 2015.

Souche, Jean-Claude, Sylvain Pioch, Marie Salgues, Klaartje De Weerdt, Alexandra Agostini, et Mahmoud Hayek. « De la conception à l'éco-conception des ouvrages maritimes : intégrer la nature au projet d'aménagement maritime ». *Revue Paralia* 12, 2019

SUEZ. « Restauration écologique des ceintures d'algues marines du genre Cystoseira Enjeux, moyens et perspectives ». 2016.

Webographie

Biohut & BioRestore Au Port de Marseille Fos- GIREL 3R- Vidéo Dailymotion
Compensation écologique- Présentation des actions du GPMM dans le cadre des mesures compensatoires de la biodiversité- Presses universitaires d'Aix-Marseille (openedition.org)
| écocéenne Projet GIREL 3R – Marseille (France) (ecocean.fr)
Egis- Concevoir un futur durable (egis-group.com)
Faune marine : le port veut limiter les dégâts- Marsactu
GIREL- Seaboost
Larves de poissons de Méditerranée : une année exceptionnelle ? (sauvonsleau.fr)
Les aménagements côtiers : de bons récifs artificiels ? Cas des zones portuaires de la région marseillaise – GIS Posidonie (osupytheas.fr)
Le génie écologique marin s'invite dans les chantiers côtiers méditerranéens | Les Echos
Les « services écosystémiques », définition, discussion, et limites dans la protection de l'environnement – Tela Botanica (tela-botanica.org)
ouvrage-benefices-de-lie.pdf (genieecologique.fr)
Safege restaure la mer grâce aux algues endémiques | Les Echos

Table des annexes

Numéro de l'annexe	Titre	Source	Page
1	Les services écosystémiques rendus par le milieu marin	Lenfant et al, 2015	23
2	Schéma d'implantation des expérimentations du projet GIREL coté Ouest	Présentation GPMM, 2012	24
3	Schéma d'implantation des expérimentations du projet GIREL coté Est	Présentation GPMM, 2012	25
4	La gamme Biohut®	ECOCEAN	26
5	Schéma bilan de la démarche TypoDock depuis l'acquisition de données à l'obtention de la fiche synthétique TypoDock.	Rapport final TypoDock, 2015	26

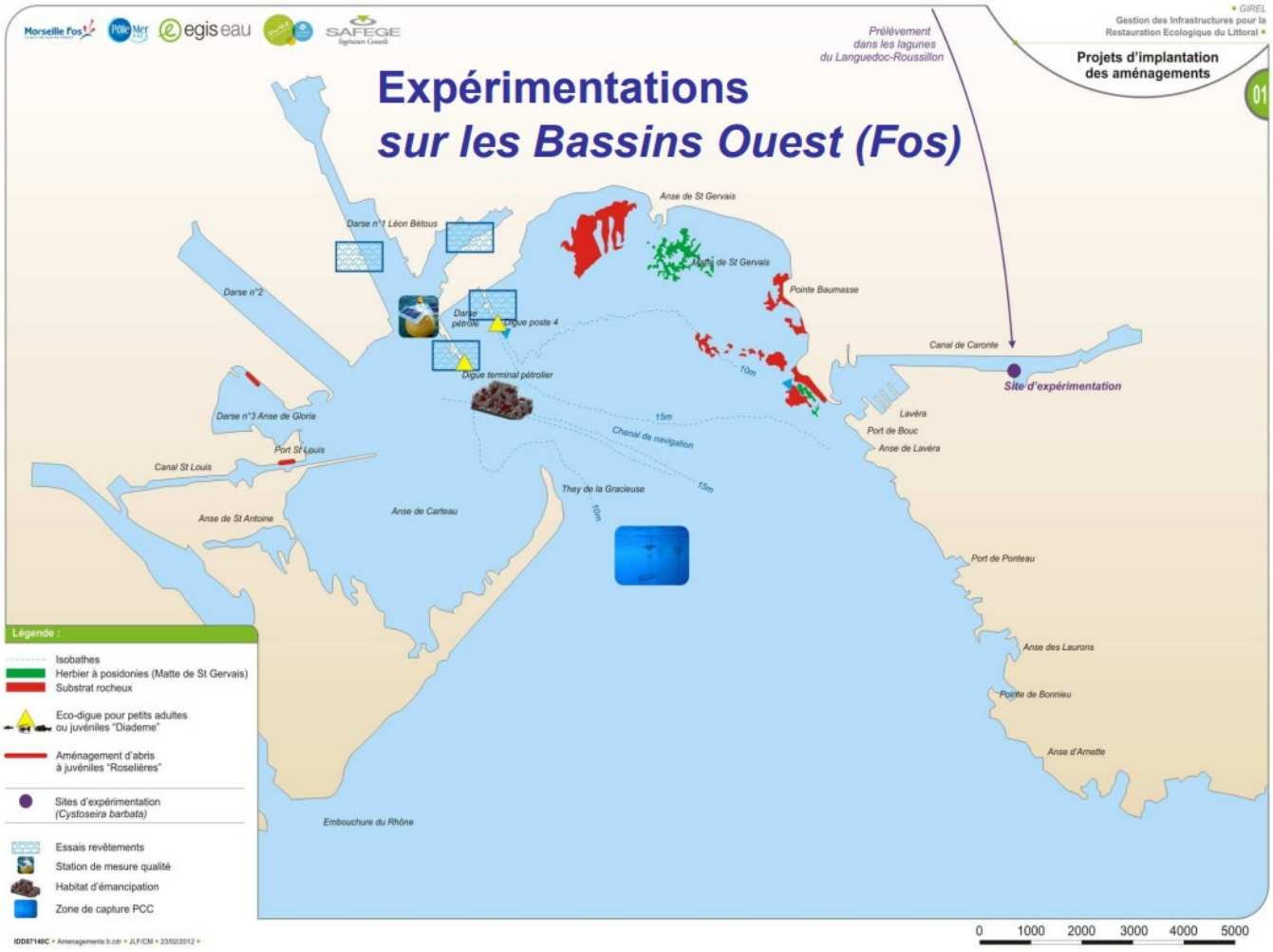
Annexe 1

		LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	CARACTÉRISATION
Services directs	Services d'approvisionnement	Production d'animaux pour la pêche professionelle	poissons, mollusques etc
		Production de gènes	
		Support de culture alimentaire	conchyliculture/aquaculture
		Production énergétique	éolien offshore/hydrolien/geothermie
		Production de végétaux pour l'alimentation, alicament	algues brunes bretonnes, omega 3
		Transport maritime	ferry et porte container
		Production d'élements minéraux pour extraction	matériaux bruts (sable, galet,sel)
		Production d'agrocarburant	micro algue
		Production d'eau à usage domestique et agricole	désalinisation eau de mer, source sous-marine
		Production de produits médicinaux et pharmaceutiques	biotechno, cosmétique
Services indirects	Services de régulation	Régulation de la qualité de l'eau	décontamination, dilution des rejets, dégradation, captation, O2
		Régulation de la qualité de l'air	solubilisation des polluants de l'air
		Régulation climat	séquestration CO2, T°
		Régulation de la diversité fonctionnelle	herbivores, carnivores...
		Régulation des interactions interspécifiques	proie/prédateur, symbiose, parasitisme
		Protection de l'érosion du littoral	préserve le trait de côte (foncier), fixation du sol/sédiment
		Protection contre les tempêtes	vague déferlante/risque humain/amortissement de houle
		Maintien du cycle de vie des espèces marines	étape cruciale du cycle
		Contrôle des espèces envahissantes	compétition habitat, bon état écosystème
		Recyclage nutriments (N, P..) et matière organique	sédimentation + détritivores
		Régulation du climat local	entrées maritimes/T° tempérée/humidité
	Services socio-culturels	Support pour le tourisme, loisirs de nature et sport	jetski, promenade en mer, plongée
		Support esthétique, paysager	paysage maritime apaisant
		Support d'inspiration artistique	fauvisme, peinture de Collioure
		Support des traditions locales	joute de Sète (valeur ancestrale)
		Support spirituel	
		Support pour soins de santé	thalasso (boue, eau de mer, algue)
		Support de recherche scientifique	SUBLIMO
		Support pour le développement des savoirs éducatifs	école de la mer
		Production d'animaux pour la pêche loisir	hobby
		Production d'espèces patrimoniales	mérou, corb, hippocampe

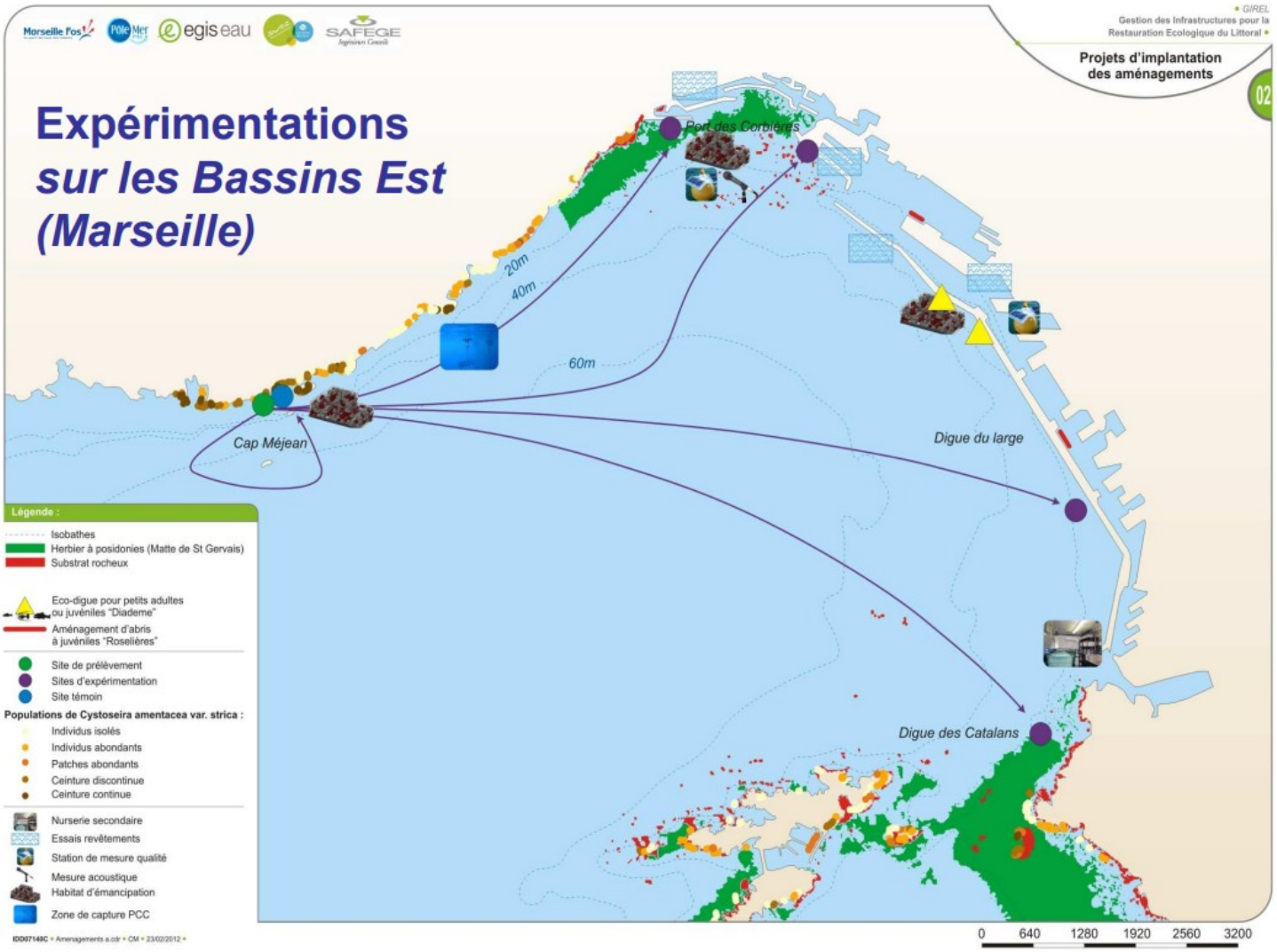
Annexe 2 - Les différents services écosystémiques rendus par le milieu marin.
Les couleurs représentent leur importance dans les petits fonds côtiers :

FORT
MOYEN
FAIBLE
NUL

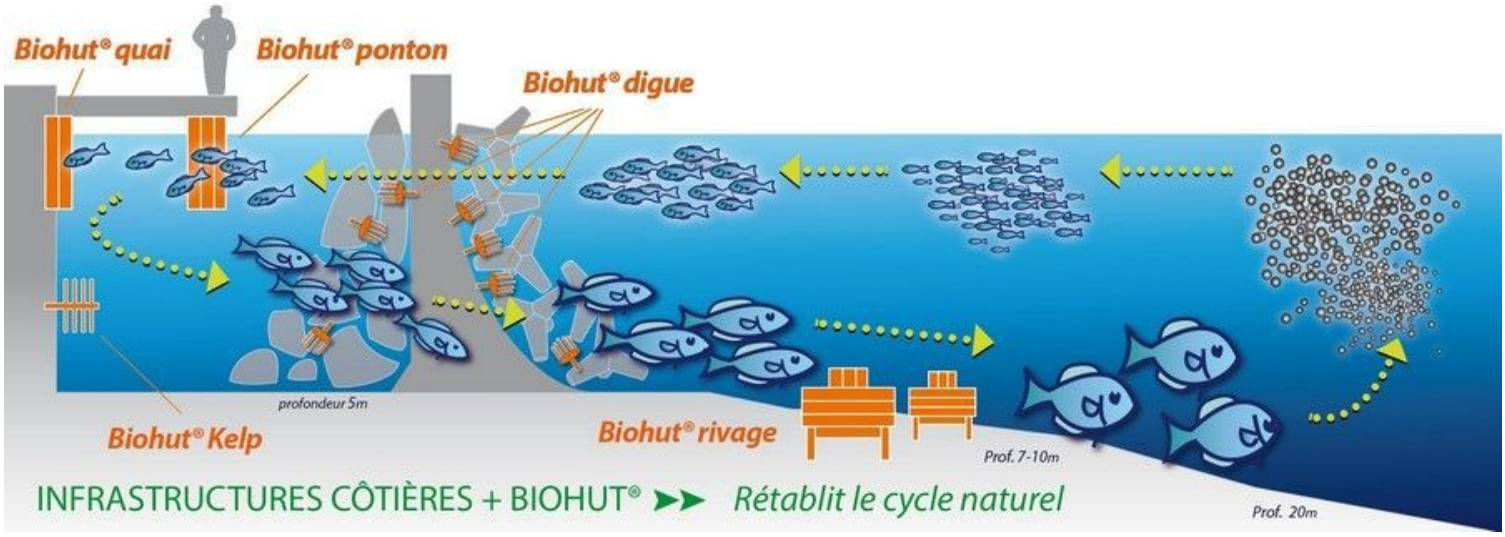
Annexe 2


Expérimentations
sur les Bassins Ouest (Fos)
Prélèvement dans les lagunes du Languedoc-Roussillon
GIREL
Gestion des Infrastructures pour la Restauration Ecologique du Littoral
Projets d'implantation des aménagements
01
Anse de St Gervais
Darse n°1 Léon Bétous
Darse n°2
Matte de St Gervais
Pointe Baumasse
Darse pétrole
Digue poste 4
Digue terminal pétrolier
Canal de Caronte
Site d'expérimentation
Darse n°3 Anse de Gloria
Port St Louis
Canal St Louis
15m
Chenal de navigation
Lavéra
Port de Bouc
Anse de Lavéra
They de la Gracieuse
Anse de St Antoine
Anse de Carteau
10m
Port de Ponteau
Anse des Laurons
Pointe de Bonnieu
Anse d'Arnette
Embouchure du Rhône
Légende :
Isobathes
Herbier à posidonies (Matte de St Gervais)
Substrat rocheux
Eco-digue pour petits adultes ou juvéniles "Diademe"
Aménagement d'abris à juvéniles "Roselières"
Sites d'expérimentation (Cystoseira barbata)
Essais revêtements
Station de mesure qualité
Habitat d'émancipation
Zone de capture PCC
0 1000 2000 3000 4000 5000

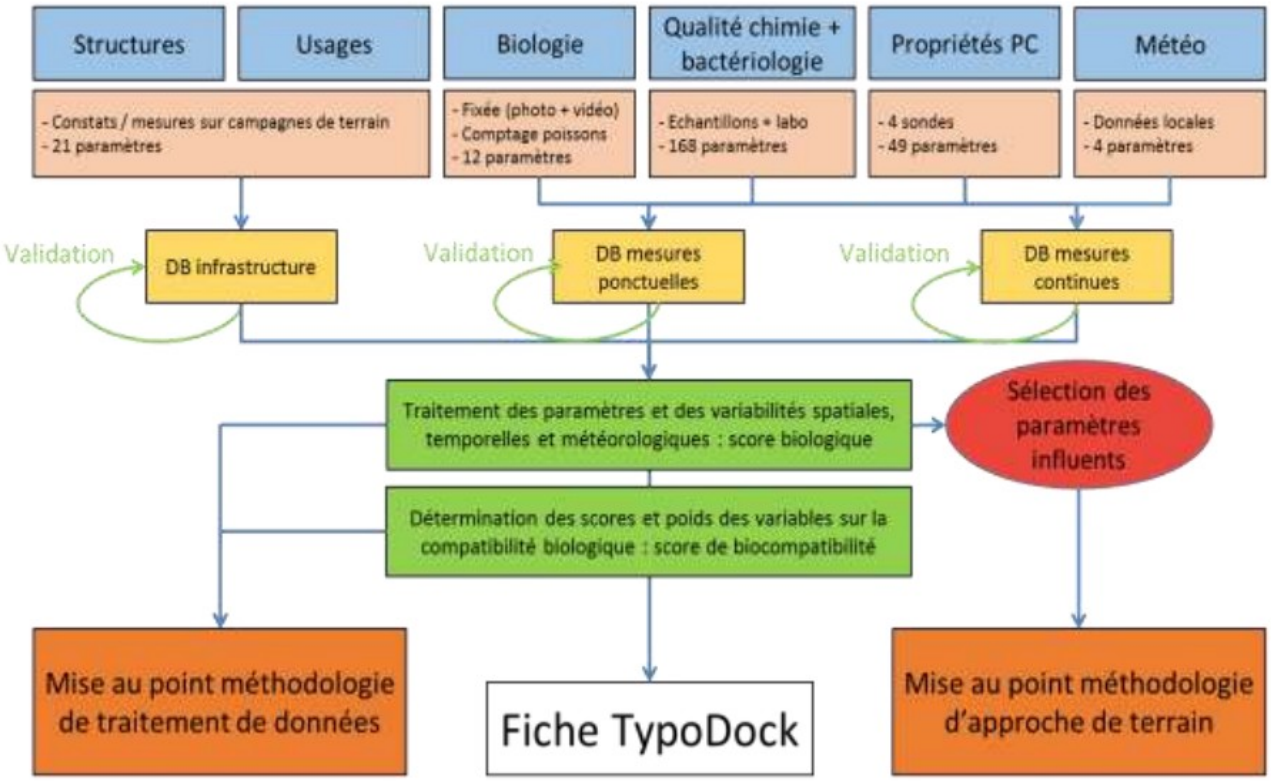
Annexe 3


Expérimentations
sur les Bassins Est
(Marseille)
GIREL
Gestion des Infrastructures pour la Restauration Ecologique du Littoral
Projets d'implantation des aménagements
02
Port des Corbières
20m
40m
60m
Cap Méjean
Digue du large
Digue des Catalans
Légende :
Isobathes
Herbier à posidonies (Matte de St Gervais)
Substrat rocheux
Eco-digue pour petits adultes ou juvéniles "Diademe"
Aménagement d'abris à juvéniles "Roselières"
Site de prélèvement
Sites d'expérimentation
Site témoin
Populations de Cystoseira amentacea var. strica :
Individus isolés
Individus abondants
Patches abondants
Ceinture discontinue
Ceinture continue
Nurserie secondaire
Essais revêtements
Station de mesure qualité
Mesure acoustique
Habitat d'émancipation
Zone de capture PCC
0 640 1280 1920 2560 3200

Annexe 4



Annexe 5



Annexe 4

Le cycle de vie des récifs en béton armé permet-il d'avoir un impact bénéfique sur l'environnement et les écosystèmes marins ?

Par Alexandre BELLY

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

CAMPUS TRIOLET – FACULTE DES SCIENCES
75 AV. AUGUSTIN FLICHE – 34090 MONTPELLIER

Diplôme d'Université

RESTAURATION ECOLOGIQUE DES PETITS FONDS MARINS COTIERS

MÉMOIRE ETUDE DE CAS

2022

ALEXANDRE **BELLY**

LE CYCLE DE VIE DES **RECIFS EN BETON ARME** PERMET-IL D'AVOIR UN **IMPACT** BENEFIQUE SUR L'**ENVIRONNEMENT** ET LES **ECOSYSTEMES MARINS** ?

TUTEUR:

THOMAS PAVY

Résumé

Les récifs artificiels ont un cycle de vie. Au moment de leur construction, les récifs artificiels en béton armé nécessitent des matières premières, de l'énergie, des transports etc. Un bilan carbone résulte de ce cycle. De plus, les récifs artificiels en béton armé ont une durée de vie. Quand ceux-ci se désagrègent, ils libèrent une quantité de polluants nocifs pour les écosystèmes marins.

La question à se poser est alors: Le cycle de vie des récifs en béton armé permet-il d'avoir un impact bénéfique sur l'environnement et les écosystèmes marins ?

Summary

The artificial reefs have a life cycle, at the time of their construction the artificial reefs in reinforced concrete require raw materials, energy, transport etc... A carbon balance results from this cycle. In addition, artificial reefs made of reinforced concrete have a lifespan, when they disintegrate they release a quantity of pollutants harmful to marine ecosystems.

The question to ask is then: Does the life cycle of reinforced concrete reefs make it possible to have a beneficial impact on the environment and marine ecosystems?

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite remercier Mme DETER, Responsable du diplôme d’université, de m’avoir fait confiance et de m’avoir accueilli au sein de la formation.

Un remerciement s’adresse également à l’équipe de professionnels intervenant à l’Université de Montpellier, pour leurs précieux conseils et pour leurs connaissances dans le secteur de la restauration écologique des petits fonds marins côtiers.

Enfin, je formule un grand merci à M. PAVY tuteur pédagogique pour sa disponibilité, ses conseils et ses éclaircissements.

Sommaire

1 INTRODUCTION 1

2 CONTEXTE ECOLOGIQUE 3

2.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL 3

2.1.1 CONSTAT ENVIRONNEMENTAL (GIEC) 4

2.1.2 SOLUTIONS ENVISEAGABLES 5

2.2 ETAT ENVIRONNEMENTAL DU MILIEU MARIN 5

2.2.1 DEGRADATION DES ECOSYSTEMES MARINS 5

2.2.2 DEGRADATION DES PETITS FONDS MARINS COTIERS 5

2.2.3 SOLUTIONS DE RESTAURATION 6

2.3 RECIFS ARTIFICIELS EN BETON 7

3 DOSSIER EMPREINTE CARBONE 7

3.1 CONTEXTE HYPOTHETIQUE 7

3.1.1 CONTEXTE HYPOTHETIQUE BETON IMPRIME 8

3.1.2 CONTEXTE HYPOTHETIQUE BETON ARME 14

3.2 COMPARAISON DOSSIERS EMPREINTE CARBONE 17

4 POSSIBLES IMPACTS 18

4.1 DEGRADATION DU BETON 18

4.2 DEGRADATION DE L'ACIER 19

1 INTRODUCTION

Après un BTS BTP, j'ai poursuivi mon cursus par une Licence Qualité, Sécurité, Santé et Environnement. J'ai effectué mes trois années d'alternance au sein de la Direction Régionale Travaux publics-Génie Civil Nouvelle Aquitaine de VINCI CONSTRUCTION FRANCE. Après mes études, j'ai décidé de voyager avec la volonté de parfaire mes connaissances dans l'étude de la biodiversité. J'ai eu l'occasion de travailler dans plusieurs projets humanitaires dont certains incluaient la préservation de la biodiversité. En tant que passionné de la préservation de la faune et de la flore, je suis également parti cinq semaines sur une île située dans l'archipel des Fidji avec pour objectif d'analyser les parties de l'île les plus exploitables (dû à la salinité des sols après un ouragan) et de réintroduire les espèces végétales représentatives de la région (taro, piments etc.). Je suis également bénévole de l'association « Nature en Occitanie » où des actions d'analyse, de recensement de la biodiversité, et de sensibilisation sont organisées régulièrement. Dans la même mesure, je suis ambassadeur de la charte « longitude 181 Nature » en tant que plongeur de niveau 1 via l'école de plongée toulousaine qui atteste d'une plongée responsable avec de multiples cours de biologie marine dispensés. Toutes ces expériences viennent compléter ma profession. Effectivement dans le milieu professionnel depuis sept ans, j'ai réalisé de nombreux projets.

Mes différentes expériences confirment aujourd'hui ma passion pour la restauration marine. Depuis toujours l'idée de travailler tout en réalisant ma passion dans le milieu marin m'attire. C'est pourquoi aujourd'hui j'ai eu la volonté de réaliser ce diplôme d'université dans le but de parfaire mes connaissances et reprendre mes études afin de me réorienter dans un milieu professionnel en totale adéquation avec mes envies et mes principes.

Le sujet de la restauration écologique des petits fonds marins côtiers fait partie intégrante de la restauration écologique à plus grande échelle. En effet, le changement climatique en cours entraine une diminution des ressources marines, pourtant essentielles pour tous les écosystèmes et le maintien de la vie sur terre. L'acidification des océans en partie dû à l'augmentation de la production de gaz à effet de serre liée à l'activité humaine sur Terre perturbe les organismes marins et les rend plus vulnérables aux maladies en entrainant leur disparition progressive.

Mon thème de projet de fin d'études est d'analyser **les conséquences de production et de détérioration des récifs artificiels en béton armé afin de s'interroger sur l'impact qu'a le cycle de vie de ces récifs sur l'environnement.**

Le besoin aujourd'hui est de réhabiliter les petits fonds marins côtiers en créant **des habitats artificiels aux organismes marins afin de reproduire les conditions idéales à leur développement et d'éviter la disparition de certaines espèces**.

Comment créer un habitat artificiel limitant les impacts environnementaux ?

Après avoir présenté les éléments du contexte dans une première partie, nous étudierons la **construction des récifs artificiels en béton armé au travers d'un bilan carbone**. Nous analyserons également les différents matériaux qui les composent, ainsi que les ressources énergétiques nécessaires à leur réalisation. Un chapitre sera également dédié à l'analyse chimique de la dégradation de ce type de récif dans le milieu marin. Un chapitre sera enfin dédié aux solutions alternatives ainsi qu'aux ajustements réalisables. Tout au long de l'étude, nous présenterons les outils utilisés et transposables à d'autres disciplines.

2 CONTEXTE ECOLOGIQUE

2.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Existe-t-il un déficit de gouvernance internationale?

L'acidification des océans n'est pas spécifiquement mentionnée dans l'Accord de Paris sur le changement climatique (CCNUCC, 2015) et n'a reçu qu'une attention limitée à ce jour dans d'autres discussions de la CCNUCC. Néanmoins, l'acidification des océans est largement considérée comme faisant partie du système climatique : c'est l'un des sept indicateurs de l'état du climat utilisés par l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2019) ; et des préoccupations concernant l'acidification des océans ont été soulevées par le biais de nombreuses structures de gouvernance internationale. Toutefois, la réglementation reste floue. Comme le montre le schéma ci-après, aucune politique est établie clairement sur la conservation, la réhabilitation et la restauration des écosystèmes marins.

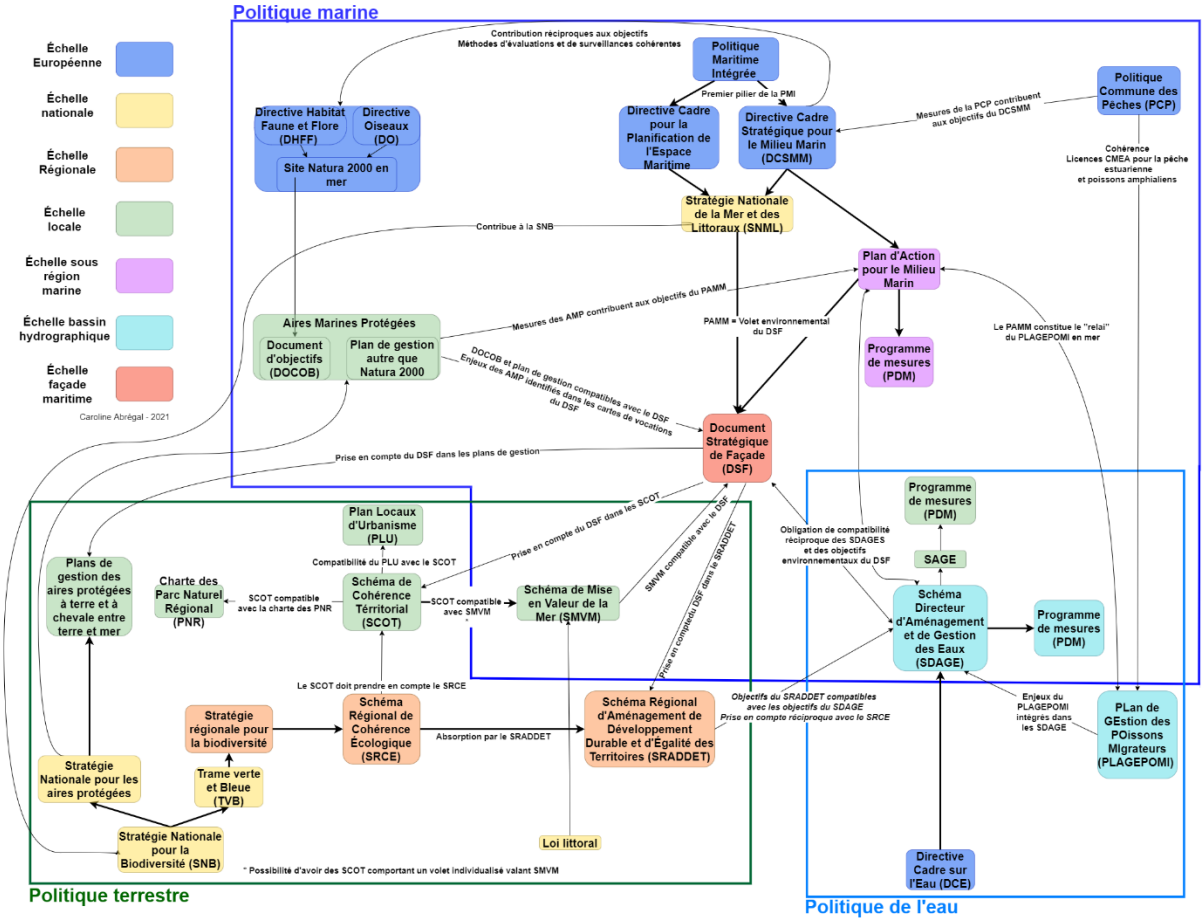


Figure 1 Présentation des différentes politiques

En effet, ce schéma démontre une déstructuration des organismes décideurs, cette ossature complexifie les prises de décisions et ralentit la création ainsi que la mise en place d'une réglementation limitant la dégradation des écosystèmes marins.

2.1.1 CONSTAT ENVIRONNEMENTAL (GIEC)

Le Groupe d'Experts Intergouvernementales sur l'Evolution du Climat vient de publier sa troisième partie du sixième rapport d'évaluation, Climate change 2022 en avril 2022. Ce rapport met en avant le fait que les émissions annuelles moyennes de GES au cours de la période 2010-2019 étaient plus élevées qu'au cours de toutes les décennies précédentes.

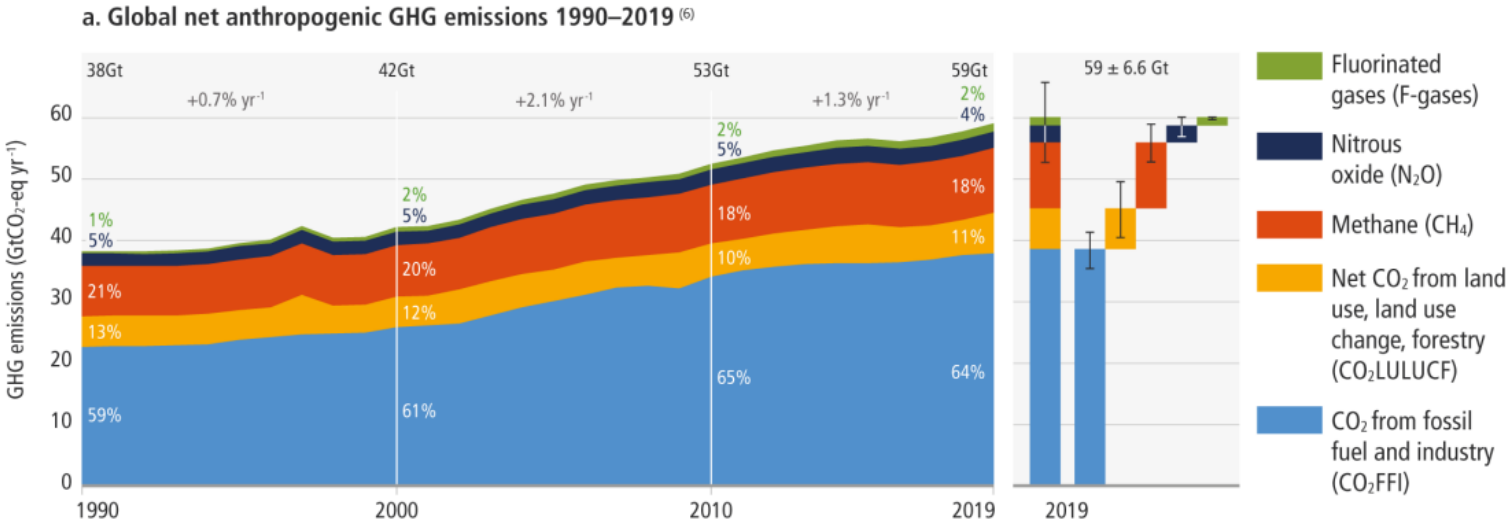


Figure 2 Evolution des pourcentages de gaz à effet de serre

Le rapport souligne également le fait que les émissions anthropiques nettes de GES ont augmenté depuis 2010 dans tous les principaux secteurs à l'échelle mondiale. Une part croissante des émissions peut être attribuée aux zones urbaines. Les réductions d'émissions de CO2 provenant des combustibles fossiles et des processus industriels, dues à l'amélioration de l'intensité énergétique du PIB et de l'intensité carbone de l'énergie, ont été inférieures aux augmentations d'émissions dues à la hausse des niveaux d'activité mondiaux dans l'industrie, l'approvisionnement énergétique, les transports, l'agriculture et les bâtiments.
Le schéma ci-après montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre depuis 1990.
Le conseil scientifique alerte sur l'urgence de maintenir et ne pas dépasser une trajectoire de + 1,5 C° jusqu'en 2030. Le dépassement de cette trajectoire aurait des conséquences irréversibles sur les aspects sociétaux et environnementaux. Toutes les trajectoires mondiales modélisées qui limitent le réchauffement à 1,5 °C (> 50 %) sans dépassement ou avec un dépassement limité, et celles qui limitent le réchauffement à 2 °C (> 67 %) impliquent des réductions rapides et profondes et, dans la plupart des cas, immédiates des émissions de GES dans tous les pays.

2.1.2 SOLUTIONS ENVISEAGABLES

Les stratégies d'atténuation modélisées pour atteindre ces réductions comprennent la transition des combustibles fossiles sans captage et stockage des CO_2 vers des sources d'énergie à très faible ou zéro carbone, telles que les énergies renouvelables ou les combustibles fossiles avec captage et stockage des CO_2. Ces mesures sont axées sur la demande et l'amélioration de l'efficacité. La réduction des émissions de l'industrie nécessitera une action coordonnée tout au long des chaînes de valeur pour promouvoir toutes les options d'atténuation, y compris la gestion de la demande, l'efficacité énergétique et des matériaux, les flux circulaires de matériaux, ainsi que les technologies de réduction et les changements transformationnels dans les processus de production. La progression vers des émissions nettes nulles de GES de l'industrie sera rendue possible par l'adoption de nouveaux processus de production utilisant de l'électricité, de l'hydrogène, des carburants et une gestion du carbone à faible et à zéro GES.

2.2 ETAT ENVIRONNEMENTAL DU MILIEU MARIN

2.2.1 DEGRADATION DES ECOSYSTEMES MARINS

L'océan est essentiel pour tous les aspects du bien-être humain et des moyens de subsistance. Il fournit des services clés tels que la régulation du climat, à travers le budget énergétique, le cycle du carbone et le cycle des nutriments. L'océan abrite une biodiversité allant des microbes aux mammifères marins qui forment une grande variété d'écosystèmes dans les océans pélagiques et côtiers ouverts.

Les émissions de carbone provenant des activités humaines provoquent le réchauffement des océans, l'acidification et la perte d'oxygène, avec certaines preuves de changements dans le cycle des nutriments et la production primaire. Le réchauffement de l'océan affecte les organismes marins à plusieurs niveaux trophiques, ce qui a un impact sur les pêches avec des implications pour la production alimentaire et les communautés humaines. Des préoccupations concernant l'efficacité de la gouvernance existante des océans et des pêches ont déjà été signalées, soulignant la nécessité de prendre des mesures d'atténuation et d'adaptation en temps opportun.

2.2.2 DEGRADATION DES PETITS FONDS MARINS COTIERS

Les réactions attendues des écosystèmes côtiers au cours du 21e siècle sont la contraction de l'habitat, la migration et la perte de biodiversité et de fonctionnalité. Les perturbations

côtières humaines omniprésentes limiteront l'adaptation des écosystèmes naturels aux risques climatiques. Les zones humides côtières mondiales perdront entre 20 et 90 % de leur superficie selon le scénario d'émissions, ce qui aura des répercussions sur leur contribution à la séquestration du carbone et à la protection des côtes. Les forêts de varech situées aux basses latitudes et les herbiers marins tempérés continueront de reculer en raison de l'intensification des températures extrêmes, et leur faible capacité de dispersion augmentera le risque d'extinction locale. Les côtes rocheuses intertidales continueront d'être touchées par l'acidification des océans, le réchauffement et l'exposition à la chaleur extrême pendant l'émersion à marée basse, ce qui entraînera une réduction des espèces calcaires et une perte de biodiversité écosystémique et un déplacement de la complexité vers des habitats dominés par les algues. La salinisation et l'expansion des conditions hypoxiques s'intensifieront dans les estuaires eutrophes, en particulier aux latitudes moyennes et élevées avec des régimes macrotidaux. Les écosystèmes des plages de sable seront de plus en plus menacés d'érosion, ce qui réduira la surface habitable des organismes dépendants.

2.2.3 SOLUTIONS DE RESTAURATION

Les Etats ne statuent pas sur une réglementation stricte permettant de limiter les impacts sur le milieu marin. Les actions sont alors déployées au niveau des collectivités et par des organismes indépendants. Plusieurs solutions permettant de réhabiliter le milieu marin existe, parmi ces solutions les récifs artificiels.

Les récifs artificiels sont des structures benthiques placées intentionnellement et construites à partir de matériaux naturels ou artificiels, qui sont conçues pour protéger, compenser ou restaurer des composants des écosystèmes marins. Leur structure et leur fonction écologiques, leur relief vertical et leurs surfaces irrégulières varient en fonction de l'emplacement, de la construction et de la mesure dans laquelle ils imitent les habitats naturels, tels que les récifs coralliens.

Les récifs artificiels sont d'abord colonisés par des espèces pionnières, puis ils offrent un milieu de substitution à une biodiversité plus importante. Ce sont des lieux où les larves, post-larves et jeunes organismes peuvent mieux se protéger de la prédation.1

La rugosité et la porosité doivent être prises en compte lors du choix des matériaux ou lors de leur fabrication. En effet, le biofilm, qui servira de nourriture au macrofouling (différents organismes multicellulaires visibles à l'œil nu comme des bernacles, des vers tubicoles ou des frondes d'algues), doit pouvoir se développer sur ces structures.2 Un biofilm est une

communauté multicellulaire plus ou moins complexe, souvent symbiotique, de micro-organismes, adhérant entre eux et à une surface, et marquée par la sécrétion d'une matrice adhésive et protectrice. Il se forme généralement dans l'eau ou en milieu aqueux.3 Les interactions entre le substrat et le biofilm sont déterminantes : certains éléments les favorisent tandis que d'autres les inhibent. Il est nécessaire de choisir un matériau adapté pour favoriser la colonisation. Ainsi, il faut privilégier des substrats dénués d'action antifouling. Des bétons dit « biogène » à base de sable de coquilles de crustacés pourraient quant à eux favoriser les interactions. 4

D'autres types de matériaux peuvent être utilisés dans la fabrication de récifs artificiels comme le bois ou le plastique. Dans le cas du bois, la durée de vie des ouvrages est beaucoup plus courte. Pour le plastique, la durée de vie peut aller jusqu'à une centaine d'année mais la dégradation implique le relargage d'additifs et des monomères ainsi que des micro puis nanoparticules de plastiques, impossible ensuite à récupérer et contaminant la chaîne alimentaire marine. Enfin, certaines parties des récifs sont remplies de garnissage qui peuvent être de différentes natures comme des pochons d'huîtres (souvent en matière plastique), des parpaings, des briques et autres. Le garnissage permet d'augmenter le rendement des récifs en augmentant le nombre d'habitats disponibles.

2.3 RECIFS ARTIFICIELS EN BETON

Le béton à forte rugosité est de loin le matériau le plus utilisé et semble être l'un des plus performants. La rugosité du substrat augmenterait la surface disponible pour le tassement et peut par conséquent augmenter la biomasse, le pourcentage de couverture et la production primaire de la structure. 5

Cette méthode offre une solution de restauration. Toutefois, à l'heure où le réchauffement climatique s'accélère et entraine l'acidification des océans, quel est l'impact carbone des récifs artificiels en béton / béton armé ?

3 DOSSIER EMPREINTE CARBONE

3.1 CONTEXTE HYPOTHETIQUE

Le dossier empreinte carbone suit la méthodologie de l'ADEME, comme est charté le bilan carbone®. Le périmètre de ce dossier empreinte carbone est défini suivant une cartographie des flux.

Afin de pouvoir réaliser une étude bilan carbone nous allons partir sur 2 contextes hypothétiques afin d'en extraire une comparaison.

3.1.1 CONTEXTE HYPOTHETIQUE BETON IMPRIME

Le premier contexte hypothétique résulte d'une statistique. En effet, 60 % des récifs artificiels dans le monde sont réalisés en béton. 6

Nous décidons alors du premier contexte :

- Récif artificiel en béton de 1,4 tonne.
- Réalisation du récif artificiel en béton via une imprimante 3D (société Xtree spécialisée en impression 3D de récif artificiel basée à Rungis)
- Immersion à environ 5 kms au large du port de Marseille

L'étude d'impact réalisée par *Kateryna Kuzmenko* sur son mémoire « *Performance environnementale dans la construction : étude de cas de l' impression 3D béton . Modélisation et caractérisation des impacts.* » détermine que sur un mètre cube de béton imprimable haute performance, l'impact volumique du changement climatique du béton imprimable est supérieur d'environ 60% à celui du béton C25/30 utilisé pour le coulage et représente **466 kg CO2 Eq / m3**. En prenant en compte ces paramètres et de la masse volumique du béton qui est de 2400 kg/m3 nous déterminons alors l'équation suivante : (1400*466)/2400 = **271,83 kg CO2/récif imprimé.**

Détail des émissions :

- consommation de carburant des engins
- consommations électriques des installations
- usage de matériaux
-les émissions amont liées à l'apport des matériaux et fournitures sur site
- les émissions aval liées au traitement déchets et résidus du projet.

Certains postes n'ont en revanche pas été pris en compte. Il s'agit en particulier : des émissions liées à la présence des salariés dans l'entreprise d'impression 3D et l'entreprise pilotant le projet, qui sont peu nombreux et représentent donc des émissions négligeables au regard de l'activité du projet; des émissions liées à l'amortissement du matériel, jugées peu significatives au regard de la durée du projet.

Les facteurs d'émissions sont issus des bases ADEME, INIES et sont appliqués, pour ce qui concerne les engins, aux données de puissance des constructeurs.

Les principaux postes d'émissions liés au projet sont illustrés par la cartographie des flux présentée page suivante.

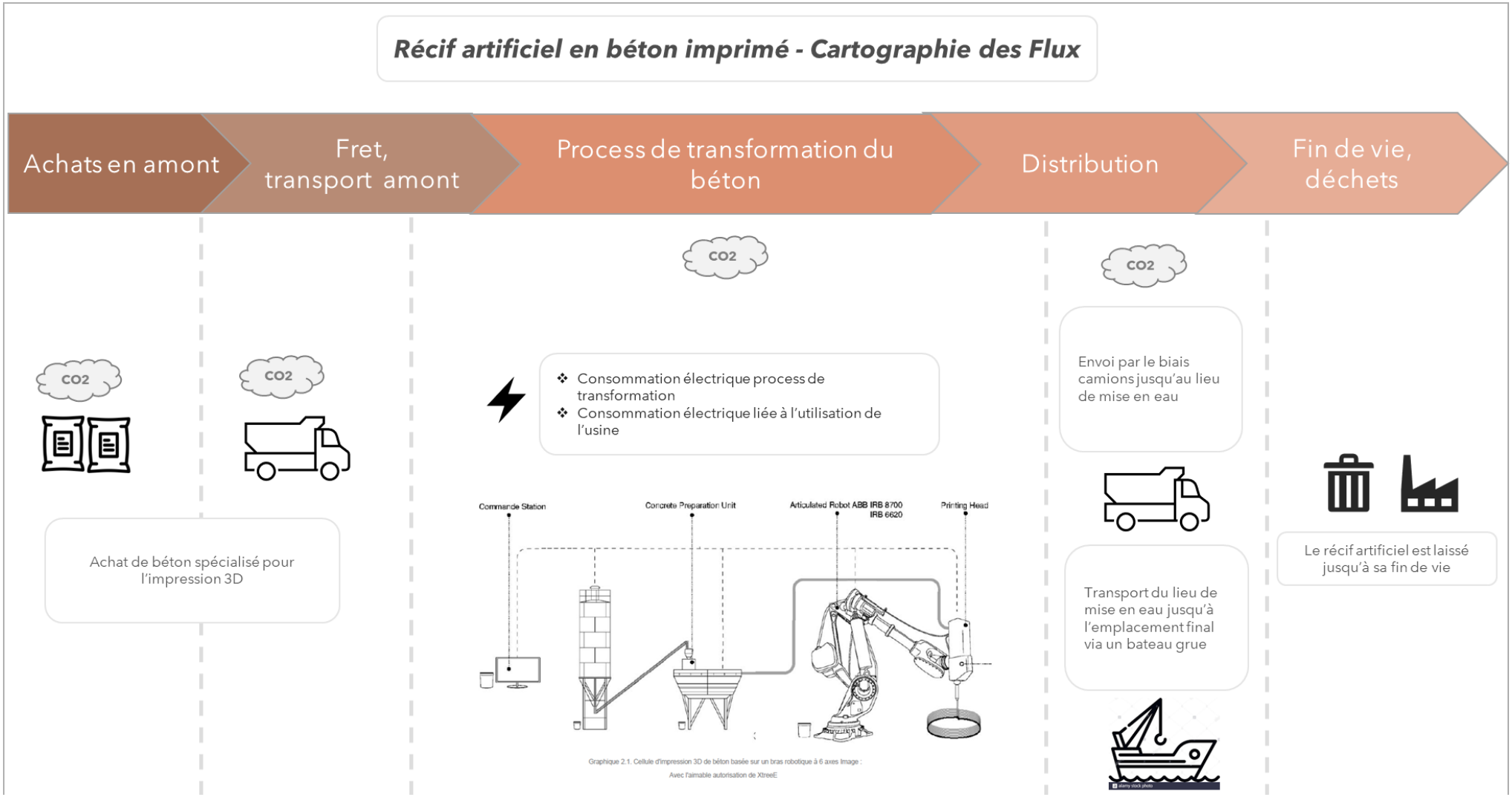


Figure 3 Cartographie des flux récifs en béton imprimé

Comme l'a démontré *Kateryna Kuzmenko* sur son mémoire « *Performance environnementale dans la construction : étude de cas de l' impression 3D béton . Modélisation et caractérisation des impacts.* » nous connaissons déjà l'empreinte carbone résultant de l'achat en amont au process de transformation du béton. 7

Figure 4 Flux achat, fret, transformation béton imprimé

EQUIVALENT CARBONE :

271,83 kg CO2eq

Nous n'avons plus qu'à déterminer la consommation carbone du flux de distribution. Le flux de distribution est scindé en deux flux distincts.

Le premier flux de distribution est le flux d'envoi du récif artificiel de l'usine de production jusqu'au lieu de mise en eau. Si nous reprenons les données initiales la distance entre l'usine de production située à Rungis et le port de Marseille est équivalente à 759km (source https://www.google.fr/maps).

Les données fournit par l'ADEME nous indique que pour le choix d'un camion Routier rigide - 7,5 à 12 tonnes – GNC la production est de 0,19 kgCO2e/tonne.km (incertitude de 70%). Nous prenons en considération que le camion réalise un aller-retour depuis l'usine de production. Nous établissons alors le calcul suivant : 0,19*759*2= 288,42 kg CO2eq

Figure 5 Flux distribution camion béton imprimé

EQUIVALENT CARBONE :

288,42 kg CO2eq

Le deuxième flux de distribution est le flux d'acheminement du récif artificiel du lieu de mise en eau jusqu'au lieu d'implantation. Si nous reprenons les données initiales la distance entre le port de Marseille et son lieu d'implantation est de 5 km. Afin d'acheminer le récif artificiel jusqu'à son lieu d'implantation nous prenons comme exemple l'utilisation d'un bateau grue le « Castor II » du groupe Foselev (fréquemment utilisé pour les opérations de mise à l'eau des récifs artificiels). Le navire effectue un aller-retour depuis le port jusqu'au lieu d'insertion, nous

considérons alors 1km = 0,54nm, la distance étant de 5km le calcul pour l'aller-retour est alors le suivant : 5*0,54*2= 5,4nm. Le navire « Castor II » du groupe Foselev à une consommation d'essence de 160L/heure de carburant et sa vitesse moyenne est de 7 nœuds.8 Nous réalisons alors le calcul suivant 5,4/7 = 0,71 heure ce qui équivaut à approximativement 1 heure d'opération en comptant le temps de mise à l'eau du récif à l'aide de la grue. Le bateau met alors 1 heure pour l'opération complète de récupération du récif artificiel jusqu'à sa mise en eau. Nous pouvons alors en déduire sa consommation : 160 litres de gazole. Le facteur d'émission du gazole à la pompe est de 3,25 kg CO2/Litre (donnée fournit par l'Ademe). Nous déduisons alors la production de l'acheminement du récif artificiel du lieu de mise en eau jusqu'au lieu d'implantation : 3,25*160 = **520 kg CO2eq**

Ce résultat est exprimé selon la méthodologie de l'ADEME, le but étant de prendre uniquement les données relatives au projet. Pour aller plus loin nous décidons de créer un scénario réaliste en prenant en compte une donnée qui ne se situe pas dans le périmètre de réalisation de l'empreinte carbone selon l'ADEME.

Le navire se situe sur le port de Brégaillon, La Seyne-sur Mer (source AIS ShipXplorer). Nous prenons en compte dans ce cas-là son déplacement depuis son port de rattachement jusqu'au port de Marseille, lieu de prise en charge du récif artificiel. La distance entre les deux est d'approximativement 50nm. Le navire « Castor II » du groupe Foselev à une consommation d'essence de 160L/heure de carburant et sa vitesse moyenne est de 7 nœuds. Nous réalisons alors le calcul suivant 50/7 = 7,14 heures. Le bateau met alors 7,14 heures pour rejoindre le port de Marseille afin de récupérer le récif artificiel. Nous considérons alors que le bateau fait un aller-retour depuis son port de rattachement soit un total de : 7,14*2= 14,28 heures. Nous pouvons alors en déduire sa consommation totale de carburant pour l'opération. 14,28*160 = 2 284,8 litres de gazole. Le facteur d'émission du gazole à la pompe est de 3,25 kg CO2/Litre (donnée fournit par l'ADEME). Nous en déduisons alors la production totale de l'acheminement du récif artificiel du lieu de mise en eau jusqu'au lieu d'implantation : 3,25*2 284,8 = **7 425,6 kg CO2eq**

Dans ce focus nous voyons nettement la différence de résultat, dans le scénario le calcul conforme à la méthodologie de l'ADEME nous trouvons **520 kg CO2eq.** Dans un scénario réaliste où nous prenons en compte des données supplémentaires relatives au projet, le résultat est de **7 425,6 kg CO2eq.** Afin de poursuivre notre étude nous utiliserons le résultat issu du calcul de l'ADEME soit **520 kg CO2eq.**

Figure 6 Flux distribution bateau béton imprimé

EQUIVALENT CARBONE :

520kg CO2eq

Le récif étant laissé jusqu'à sa fin de vie dans l'eau, aucune donnée carbone peut-être comptabilisée. Toutefois, nous le verrons plus tard la donnée toxicologique de la dégradation de ce type de récif sera à prendre en compte dans son cycle de vie.

Nous avons détaillé tous les résultats émanant des flux dans le processus d'utilisation de récif artificiel en béton imprimé. Le calcul de l'équivalent carbone total se traduit par :

Figure 7 Bilan des émissions par flux béton imprimé

271,83 kg CO2eq **288,42 kg CO2eq** **520 kg CO2eq**

TOTAL : 271,83 + 288,42 + 520 = **1080,25 kg CO2eq**

Le bilan carbone estimé pour le projet hypothétique de mise en place de récif artificiel en béton imprimé au large du port de Marseille est de l'ordre de **1080,25 kg CO2eq** équivalent émis. Le poste majeur étant la distribution des récifs artificiels par bateau grue.

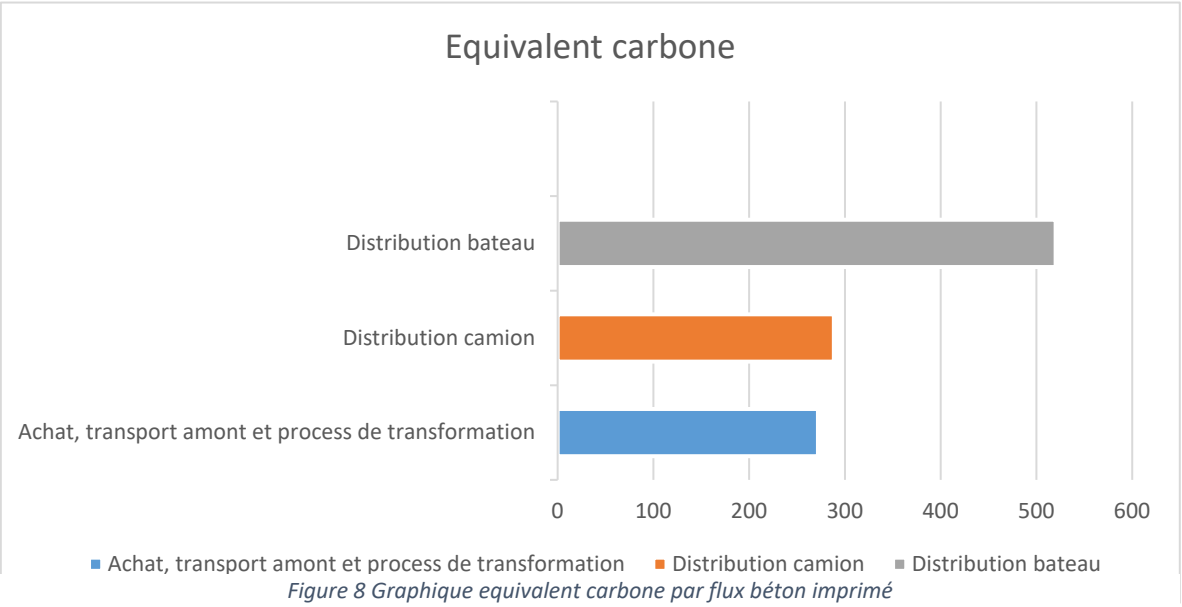


Figure 8 Graphique equivalent carbone par flux béton imprimé

A titre de comparaison en moyenne un français produit 6,9 TCO2/an, le projet est également équivalent à 1 aller-retour Paris-New York en avion (consommation de 1 TCO2eq l'aller-retour source ADEME).

Pistes de réduction des émissions envisagées :

Les principaux postes d'émissions sont liés aux transports des récifs, les émissions liées aux transports peuvent être regroupées dans le cas d'une mise en place de plusieurs récifs. En effet, selon les études vues précédemment le béton imprimé est 60% plus émissif que le béton classique. Toutefois, ce n'est pas sur ce poste que les consommations sont les plus importantes. Un mode de gestion local permettrait de diminuer fortement l'empreinte carbone de ce type de récif. La proximité avec une usine de production locale ainsi que l'utilisation d'un bateau moins émissif et déjà présent sur le site permettrait de réduire considérablement les émissions de CO2. La centralisation de plusieurs récifs sur le bateau limiterait les émissions de CO2.

3.1.2 CONTEXTE HYPOTHETIQUE BETON ARME

Le second contexte hypothétique nous servira de comparaison.

Nous décidons alors du second contexte :

- Récif artificiel en béton armé type buses cylindriques.
- Matériaux initialement construit pour l'industrie des travaux publics avec caractéristiques suivantes :
    - Tuyaux d'assainissement en béton de diamètre nominal intérieur 400 mm, de classe de résistance 135A et de longueur utile 2,36 m.
    - 220,4 kg de tuyaux en béton armé
- Immersion à environ 5 km au large du Grau d'Agde
- Utilisation d'une barge et d'une pelle mécanique pour la mise en place

Nous déterminons alors la cartographie des flux en page suivante.

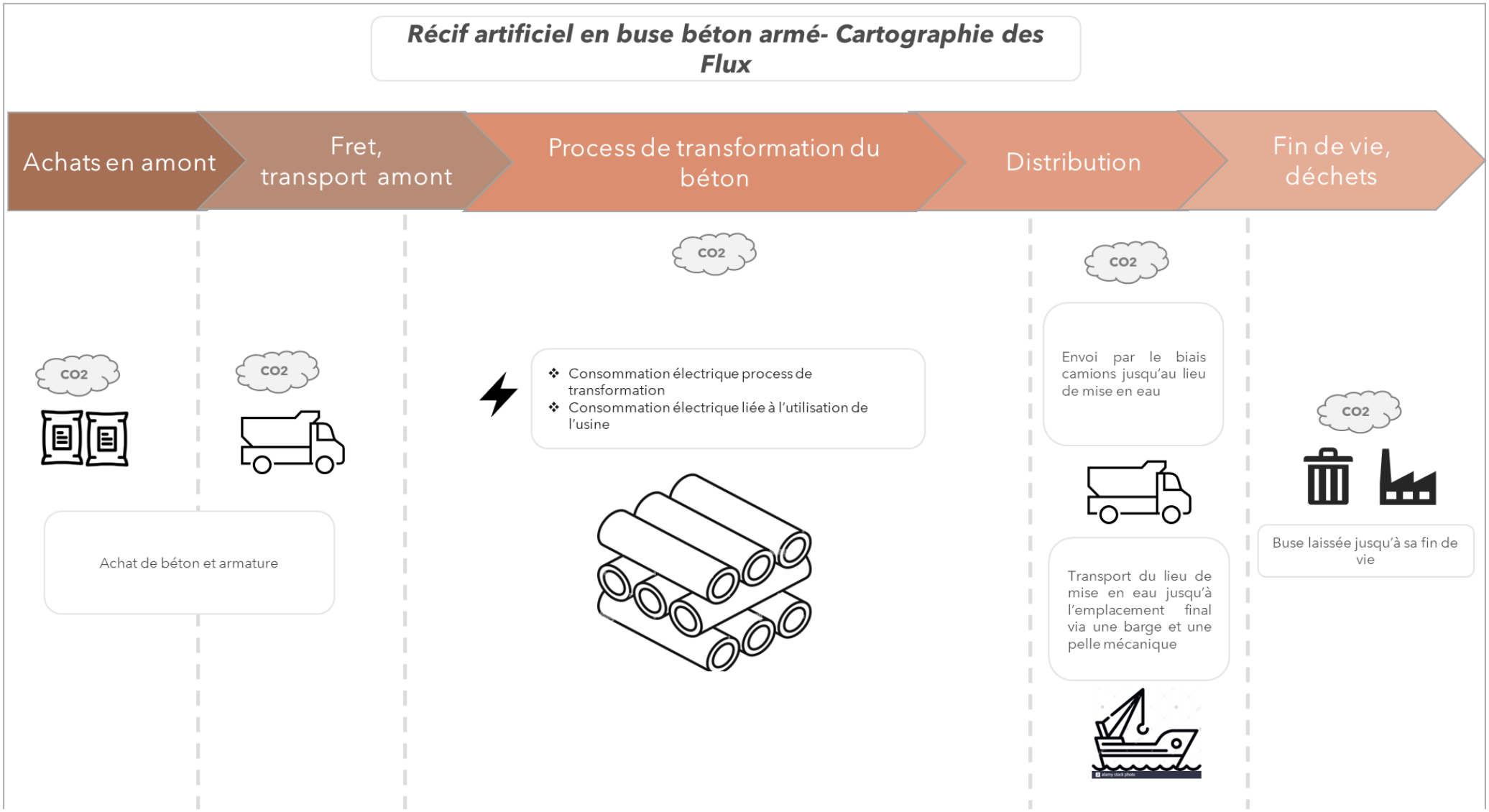


Figure 9 Cartographie des flux buse béton armé

L'émission carbone d'un béton armé type C25/30 est de 155 kgCO2eq/tonne (source : ADEME). Nous réalisons le calcul suivant afin de déterminer l'empreinte carbone d'une buse béton : 155*0,22 = **34,1 kgCO2eq/buse béton.**

Figure 10 Flux achat, fret, transformation buse béton armé

EQUIVALENT CARBONE :

34,1 kg CO2eq

Nous n'avons plus qu'à déterminer la consommation carbone du flux de distribution. Le flux de distribution est comme dans le premier cas scindé en deux flux distincts.

Le premier flux de distribution est le flux d'envoi du récif artificiel de l'usine de production jusqu'au lieu de mise en eau. Les données nous montrent que toutes les usines de béton et de revente de matériaux de travaux publics se situent dans un rayon inférieur à 30km du Grau d'Agde. (source https://www.google.fr/maps).

Nous reprenons alors les données fournies par l'ADEME nous indiquant que pour le choix d'un camion routier rigide - 7,5 à 12 tonnes – GNC la consommation est de 0,19 kgCO2e/tonne.km (incertitude de 70%). Nous prenons en considération que le camion réalise un aller-retour depuis l'usine de production. Nous établissons alors le calcul suivant : 0,19*30*2= **11,40 kg CO2eq**

Figure 11 Flux distribution camion buse béton armé

EQUIVALENT CARBONE :

11,40 kg CO2eq

Le deuxième flux de distribution est le flux d'acheminement du récif artificiel du lieu de mise en eau jusqu'au lieu d'implantation. Si nous reprenons les données initiales, la distance entre le Grau d'Agde et son lieu d'implantation est de 5 km. Afin d'acheminer le récif artificiel jusqu'à son lieu d'implantation nous prenons comme exemple l'utilisation d'une barge de travail de 8m de long équipée d'un moteur 4 temps 50CV. Sa vitesse moyenne est de 20 nœuds et sa consommation de 10 litres/heure.9 Le bateau effectue un aller-retour depuis le port jusqu'au lieu d'insertion, nous considérons alors 1km = 0,54nm, la distance étant de 5km, le calcul pour l'aller-retour est alors le suivant : 5*0,54*2= 5,4nm. Le bateau ayant une vitesse de moyenne de 20 nœuds nous considérons alors le temps total de trajet : 5,4/20= 0,27 heure. Afin de

calculer sa consommation de carburant sur la période, nous réalisons le calcul ci-après : 0,27*10= 2,7 litres de gazole consommés. Le facteur d'émission du gazole à la pompe est de 3,25 kg CO2/Litre (donnée fournit par l'ADEME). Nous déduisons alors la production de l'acheminement du récif artificiel du lieu de mise en eau jusqu'au lieu d'implantation : 3,25*2,7 = **8,78 kg CO2eq**

Figure 12 Flux distribution bateau buse béton armé

EQUIVALENT CARBONE :

8,78kg CO2eq

Le récif étant laissé jusqu'à sa fin de vie dans l'eau, aucune donnée carbone peut-être comptabilisée.

Nous avons détaillé tous les résultats émanant des flux dans le processus d'utilisation de récif artificiel en béton imprimé. Le calcul de l'équivalent carbone total se traduit par :

Figure 13 Bilan des émissions par flux buse béton armé

34,10 kg CO2eq **11,40 kg CO2eq** **8,78 kg CO2eq**

TOTAL : 34,10 + 11,40 + 8,78 = **45,50 kg CO2eq**

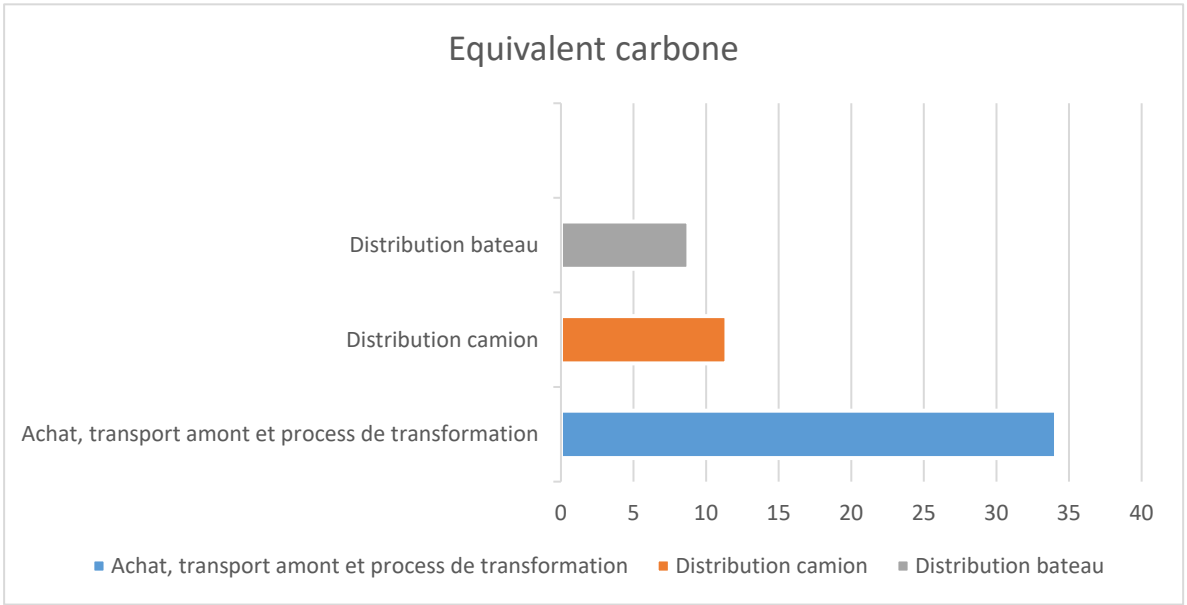


Figure 14 Graphique équivalent carbone par buse béton armé

Le bilan carbone estimé pour le projet hypothétique de mise en place de récif artificiel en buse béton au large du Grau d'Agde est de l'ordre de **45,50 kg CO2eq** équivalent émis.

Le poste majeur étant, dans ce cas de figure, les achats en amont, le transport en amont et le processus de transformation.

Pistes de réduction des émissions envisagées :

Pour ce projet hypothétique essentiellement réalisé de manière locale, les principaux postes d'émissions sont liés aux achats en amont, transport en amont et processus de transformation. Tous les flux ont été optimisés de manière à avoir le moins d'impact carbone possible. Une solution de réduction des émissions à envisager serait l'utilisation d'un béton ayant une empreinte carbone réduite.

3.2 COMPARAISON DOSSIERS EMPREINTE CARBONE

Les deux dossiers sont différents, tant par leur conception que par leur mise en œuvre. Il est également important de prendre en compte que la quantité de matière première diffère selon les projets. L'objectif de ces projets reste toutefois la même, la restauration écologique des petits fonds marins côtiers. Dans le premier projet nous utilisons des concepts innovants tel que l'impression en 3D, nous utilisons également des moyens de transport impactant et le projet n'est pas optimisé à l'échelle locale. Le premier projet nous conduit alors à un bilan carbone de 1080,25 kg CO2eq. Le bilan carbone issu de ce projet correspond à une unité de récif artificiel, les impacts carbones concernant les transports peuvent être regroupés dans le cas d'une mise en place de plusieurs récifs.

Le deuxième projet est également conçu en béton mais cette fois-ci le béton est armé avec une quantité d'acier qui augmente la production de carbone lors de sa conception. Sur ce deuxième projet, le choix est porté sur une optimisation locale avec des moyens à proximité du lieu d'implantation. Le bilan carbone issu de ce choix est de 45,50 kg CO2eq. La taille du bateau choisi ne permet pas de regrouper plusieurs buses béton, il faudra alors multiplier le flux de distribution par bateau.

Comme cité précédemment les projets sont différents et il est compliqué de réellement comparer les valeurs issues des deux dossiers d'empreinte carbone. L'objectif réel étant d'apporter une échelle de valeur et d'attirer la réflexion, en mettant en avant deux méthodes de restauration par récifs artificiels en béton.

4 POSSIBLES IMPACTS

L'introduction de matériaux dans le milieu marin entraîne de grands risques de contamination et de pollution. Même des matériaux dit « inertes » peuvent diminuer la qualité de l'eau et introduire des effets toxiques sur l'environnement adjacent. Les impacts sur le long terme de la corrosion, du lessivage et de la dégradation chimique doivent être pris en compte.

4.1 DEGRADATION DU BETON

Au contact du sel marin, le béton va se dégrader en différents composants tels que l'ettringite, la brucite, la gypse ou encore la thaumasite. Certains de ces composés vont entraîner l'expansion du béton et donc vont accélérer sa dégradation. Dans les zones d'aspersion et de marnage, le chlorure de sodium subit des cycles de cristallisation-dissolution, accentuant l'écaillage de surface. Le béton peut aussi subir la lixiviation qui consiste en la mise en solution de ces constituants, ce qui conduit à une augmentation de la porosité et à une dégradation plus rapide. Il peut aussi se produire des substitutions du calcium par du magnésium dans la matrice du béton. Cette matrice est alors moins compacte et donc moins résistante.10 Le béton marin possède certaines particularités pour réduire ces phénomènes de dégradation comme une compacité qui réduit la perméabilité et la diffusivité (qualité de ce qui peut diffuser de l'énergie), une teneur en aluminate réduite ou une augmentation d'additions minérales permettant de réduire la teneur en hydroxyde de calcium : cendres volantes (déchet de la combustion du charbon), pouzzolanes, laitier de haut fourneau (sous-produit de l'élaboration de la fonte)… Certains de ces additifs contiennent des produits cancérigènes et toxiques. On peut en effet y retrouver des métaux lourds comme dans les cendres volantes qui contiennent du mercure.11

Lorsque le béton va se dégrader, les matériaux inertes qui le composent vont être relargués dans le milieu et il en va de même avec les adjuvants rajoutés à ces composants inertes lors de sa fabrication pour lui conférer ses propriétés. Ces adjuvants sont souvent des molécules organiques pouvant être toxiques. Ces molécules pourraient donc contaminer le milieu environnant. Le coefficient de dilution étant infini, l'impact semble limité, cependant, toutes ces molécules toxiques pourraient être assimilées par les organismes marins et être bioaccumulées tout au long de la chaîne alimentaire.

En effet, le biofilm qui va coloniser les récifs et qui donc est en contact avec ces molécules, sert de nourriture au macrofouling qui se fixera ensuite. De plus, même si le coefficient de dilution est infini, la présence de certaines de ces molécules pourrait perturber l'écosystème.12 La colonisation peut aussi avoir un impact sur la durabilité de ce matériau. Les algues utilisent

des éléments tels que le calcium, la silice, le magnésium, l'aluminium, le fer et le potassium, présents dans le béton.13

4.2 DEGRADATION DE L'ACIER

Lorsque le béton est dégradé en raison des différentes réactions vues précédemment, les éléments agressifs, principalement les ions chlorure et le dioxyde de carbone, rentrent en contact avec l'acier des armatures. Le contact des chlorures, du dioxyde de carbone, de l'eau et de l'oxygène avec l'acier marque le début de la corrosion. Cette corrosion va entraîner la formation de rouille qui va induire un endommagement du béton. Quand l'acier s'oxyde sous l'effet de l'oxygène dissous dans le milieu marin, il libère ses éléments sous la forme oxydée la plus haute : du carbonate (CO_3^{2-}) et du fer (III). Ce fer (III) se complexe ensuite sous forme d'oxyde ferreux ($Fe(OH)_3$) autrement dit de la rouille. L'oxyde ferreux étant un sel, il peut se dissoudre dans le milieu et donc libérer du Fe (III) qui va se complexer avec des molécules d'eau pour former du $Fe(H_2O)_6^{3+}$ et avec des ions chlorures pour former du chlorure de fer ($FeCl_3$). Le fer est un nutriment limitant en milieu marin et son addition lors de la dégradation de l'acier peut avoir des conséquences à long terme sur les niveaux de phytoplancton. 14

CONCLUSION

Le béton reste le matériau majoritairement utilisé dans la création de récif artificiel. La production de béton représente aujourd'hui entre 7 et 8% des émissions mondiales de CO2. 15 A l'heure où le réchauffement climatique s'accélère, il est important de s'interroger sur l'impact environnemental des solutions de restauration que nous proposons tout au long de leur cycle de vie.

Les dossiers d'empreinte carbone réalisés dans cette étude démontrent que certains projets peuvent être générateurs d'une certaine quantité de gaz à effet de serre. Nous avons également vu que les coûts carbone produits par ces solutions peuvent être réduits avec une analyse prédéfinie en amont. Afin de rendre la démarche exhaustive il serait intéressant de calculer l'absorption carbone générée par les écosystèmes produits par les récifs. Cette analyse permettrait de définir un ratio production/absorption carbone. Ce ratio offrirait une information pertinente dans le choix de réalisation des projets.

La dégradation des récifs artificiels en béton armé fait partie de leur cycle de vie, les polluants relargués lors de cette phase viennent perturber le milieu marin ainsi que leurs écosystèmes. Pour atténuer l'impact que peuvent avoir les récifs artificiels lors de leurs dégradations, l'utilisation de matériaux naturels et peu transformés tels que le bois et les enrochements serait une solution pour limiter les impacts sur la biodiversité. Des études complémentaires sur la bioaccumulation des polluants issus de l'altération de ces récifs permettraient de s'assurer du non impact sur les écosystème et la consommation humaine.

Références bibliographiques

1. Line Van Bever, Analyse comparative des différentes méthodologies de restauration des récifs coralliens dégradés, MASTER I, Environnement Méditerranéen & Développement Durable - "Environnement et Développement Durable" ; Option Géosciences marines appliquées, 45 p

2. International Maritime Organization. Guidelines for the control and management of ships' biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species. Mar. Environ. Prot. Comm. (2011).

3. Costerton, J. et al. Minireview: biofilms, the customized microniche. J. Bacteriol. 176, 2137–2142 (1994).

4. Souche, J.-C., Le Saout, G., Salgues, M. & Pioch, S. Effect of concrete with bio-active admixture on marine colonisation in mediterranean environment. Matér. Tech. 104, 504 (2016).

5. Les récifs artificiels marins, une méta-analyse de leur conception, de leurs objectifs et de leur efficacité. Baptiste Vivier, Jean-Claude Dauvin, Maxime Navon, Anne-Marie Rusig,

6. Shen, W. et al. Quantifying CO2 emissions from China's cement industry. Renew. Sustain. Energy Rev. 50, 1004–1012 (2015)

7.https://www.researchgate.net/publication/354570542_Environmental_performance_in_construction_casestudy_of_3D_concrete_printing_Modelling_and_characterization_of_impacts_Application_to_engineered_structures

8. Données caractéristique du bateau : CASTOR 02 - IMO 7024524 - ShipSpotting.com - Photos des navires et suivi des navires ; https://www.vesselfinder.com/fr/vessels/CASTOR-02-IMO-7024524-MMSI-227011100. Données de calcul : https://www.filovent.com/magazine/consommation-carburant. Données également confirmées par entretien téléphonique avec Mme ROBIN responsable FOSELEV Navigation.

9. https://www.voileetmoteur.com/essai/bateaux/essai-moteur-mercury-f-50/1842

10. Buenfeld, N. R. & Newman, J. B. The development and stability of surface layers on concrete exposed to sea-water. Cem. Concr. Res. 16, 721–732 (1986).

11. Research Triangle Institute. Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes. (2007).

12. Francour, P. Échange téléphonique avec Patrice Francour et Camille Kuntz, Professeur des Université et directeur du laboratoire ECOMERS. (2019)

13. Javaherdashti, R., Nikraz, H., Borowitzka, M., Moheimani, N. & Olivia, M. On the impact of Alga3 on accelerating the biodeterioration/biocorrosion of reinforced concrete: A mechanistic review. Eur J Sci Res 3, 394–406 (2009)

14. Martin, J. & Fitwater, S. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. Nature 331, 341–343 (1998).

15. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete | Chatham House – International Affairs Think Tank

Table des illustrations

Figure 1 Présentation des différentes politiques 3
Figure 2 Evolution des pourcentages de gaz à effet de serre 4
Figure 3 Cartographie des flux récifs en béton imprimé 9
Figure 4 Flux achat, fret, transformation béton imprimé 9
Figure 5 Flux distribution camion béton imprimé 9
Figure 6 Flux distribution bateau béton imprimé 13
Figure 7 Bilan des émissions par flux béton imprimé 13
Figure 8 Graphique equivalent carbone par flux béton imprimé 13
Figure 9 Cartographie des flux buse béton armé 15
Figure 10 Flux achat, fret, transformation buse béton armé 15
Figure 11 Flux distribution camion buse béton armé 15
Figure 12 Flux distribution bateau buse béton armé 16
Figure 13 Bilan des émissions par flux buse béton armé 16
Figure 14 Graphique equivalent carbone par buse béton armé 16

Annexe 5

Restaurer les herbiers de Cymodocée

Par Felix BESSE

Faculté des sciences de l'université de Montpellier

Diplôme d'Université (DU)

« Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Année 2022

Restaurer les herbiers de cymodocée

Auteur : Félix BESSE

Tuteur : Lucas BERENGER

felix.besse@hotmail.fr
0642218170

Remerciements

Je tiens à remercier Lucas Bérenger, mon tuteur pour la rédaction de ce rapport. Merci à lui pour ses conseils, et ses corrections.

Je tiens également à remercier Sylvain Couvray pour avoir eu la gentillesse d'échanger avec moi par téléphone sur la restauration de la cymodocée dans la lagune du Brusc.

Une mention particulière aux différents scientifiques avec qui j'ai pu échanger par mail et qui m'ont communiqué des documents : Adriano Sfriso, Maite Zarranz, Alexandre Meinesz.

Également un merci général à toute l'équipe du DU.

Enfin, je tiens à remercier particulièrement mes parents qui m'ont relu et donné de précieux conseils.

Résumé

Les herbiers de cymodocée constituent un écosystème clé de la méditerranée et en Atlantique dans son aire de répartition. De mauvaises conditions environnementales liées en particulier aux activités anthropiques ont considérablement fait chuter la surface qu'ils couvraient dans certaines zones du littoral. Malgré une amélioration récente des conditions, leur repeuplement naturel n'a pas augmenté dans certaines localités. Depuis la fin du siècle dernier des projets expérimentaux et des programmes de restauration et de transplantation ont été réalisés en différents endroits. Ces actions ont également été menées avec d'autres herbiers marins méditerranéens.

Dans ce rapport, différentes approches de restauration et des techniques de transplantation sont exposées : transplantation manuelle, mécanique, de motte ou de rhizome ainsi qu'une méthode de germination *in vitro* pour ensuite les repiquer *in situ.* Ces méthodes ont été utilisées pour la restauration de *Cymodocea nodosa* dans différents projets menées en méditerranée dans la lagune de Venise (Italie) et celle du Brusc (Provence) ainsi qu'en atlantique sur le littoral de la Grande Canarie (Espagne).

Sur chaque site les résultats sont globalement encourageants. À Venise les transplantations manuelles et mécaniques ont bien fonctionné grâce notamment à un plan général de gestion de la lagune. Au Brusc l'amélioration et le maintien de la bonne qualité du milieu au cours du temps ont permis aux herbiers (de cymodocée et zostère) de commencer une lente recolonisation : les herbiers de cymodocée transplantés ont survécu et commencent à se densifier. Aux Canaries les expérimentations de germination *in vitro* ont donné de bons résultats. Pour les transplantations *in situ* seules celle de rhizomes sans accroche ont donné des résultats prometteurs. Toutes les techniques ne sont pas pour autant adaptées à tous les environnements (milieu ouvert ou fermé, profondeur etc) et le coût des opérations peut également être limitant. Bien que l'évaluation à long terme ne soit pas toujours réalisée, il apparaît que des résultats intéressants peuvent être obtenus par l'emploi des principales techniques analysées dans ce rapport. En effet la transplantation est un outil de restauration efficace, à condition qu'un processus décisionnel cohérent soit mis en œuvre, dans un contexte de gestion globale des milieux littoraux à l'échelle régionale.

Sommaire

I. Introduction....1
II. Objectifs....2
III. Prérequis et Méthodologie....3
III.1. Cycle de vie de la cymodocée....3
III.2. La restauration....4
III.3. Techniques de transplantation....5
III.3.1. Transplantation manuelle de faisceaux....5
III.3.2. Transplantation manuelle de mottes....6
III.3.3. Transplantation mécanique de mottes....6
III.3.4. Germination in vitro et transplantation....7
IV. Résultats : Cas d'études....8
IV.1. La lagune de Venise....8
IV.1.1. Contexte et localité....8
IV.1.2. Problématique....8
IV.1.3. Plan de restauration....9
IV.1.4. Transplantations 1994 – 1995....10
IV.1.5. Transplantations 2010 et 2016....12
IV.2. La lagune du Brusc....14
IV.2.1. Contexte et localité....14
IV.2.2. Problématique....14
IV.2.3. Plan de restauration....15
IV.2.4. Transplantations....16
IV.3. La Grande Canarie....18
IV.3.1. Contexte et localité....18
IV.3.2. Problématique....18
IV.3.3. Plan d'expérimentation....19
IV.3.4. Transplantations....20
V. Discussion....21
VI. Conclusion....24
Références bibliographiques....25

Table des figures

Figure 1: Zone de répartition de *Cymodocea nodosa*.....1
Figure 2: Services écosystémiques fournit par les herbiers marins.....1
Figure 3: Parties anatomiques de *Cymodocea nodosa*.....3
Figure 4: Cycle de vie de *Cymodocea nodosa*.....3
Figure 5: Transplantation manuelle de rhizome dans la Lagune du Brusc.....6
Figure 6: Carottier manuel pour le prélèvement de mottes d'herbiers.....6
Figure 7: Godet hydraulique pour le prélèvement et la transplantation de mottes d'herbier.....7
Figure 8: Germination et développement de la plantule de *Cymodocea nodosa*.....7
Figure 9: Schéma des stations de transplantation avec les cellules (A) et (B). 10
Figure 10: (A) Rhizomes transplantés ; (B) Mottes transplantées ; (C) Suivi de croissance de l'herbier.....11
Figure 11: Récapitulatif des principaux résultats obtenus après deux saisons de croissances.....11
Figure 12: Schéma représentatif de la transplantation de mottes par moyens mécanisés.....12
Figure 13: Cartographies représentant l'évolution des herbiers de la lagune de Venise entre 1990 et 2017.....13
Figure 14: Évolution du recouvrement en herbiers de cymodocée et zostère dans la lagune du Brusc entre 2004 et 2018.....15
Figure 15: Localisation du corridor de transplants de *Cymodocea nodosa* dans la lagune du Brusc et schéma des modules de transplantation.....16
Figure 16: Évolution des densités de faisceaux des herbiers transplantés au cours des 3 années de suivis.....17
Figure 17: Exemple de densification des parcelles d'herbiers transplantés.....17
Figure 18: (A–C) Trois stades de développement différents : (A) Stade I, graines en germination ; (B) Stade II, allongement du cotylédon ; (C) Stade III, développement des premières nouvelles feuilles.....19
Figure 19: Acclimatation des plantules en réservoirs.....19
Figure 20: Taux de survie des trois différentes méthodologies de transplantation.....20

I. Introduction

La cymodocée est une plante à fleurs marine subtidale. Elle est classée dans l'embranchement des phanérogames et appartient au sous-embranchement des magnioliophytes marines. Elle est de la famille des *Cymodoceaceae*, qui est représentée sur nos côtes par *Cymodocea nodosa* et forme ce qu'on appelle des herbiers ou prairies marines. Dans la suite du document il sera uniquement question de *Cymodocea nodosa*.

Figure 1: Zone de répartition de *Cymodocea nodosa*. Source : IUCN Red List of Threatened Species 2010

Ces herbiers se trouvent dans les parties peu profondes sur l'ensemble de la mer Méditerranée et les parties adjacentes de l'océan Atlantique, les côtes du Portugal, de la Mauritanie et du Sénégal et autour des îles Canaries, de Madère et de l'île du Cap-Vert. On la retrouve aussi bien dans des lagunes littorales qu'en mer ouverte. En milieu ouvert la cymodocée se développe généralement dans des zones abritées entre la côte et les herbiers de posidonies. On la trouve principalement entre la surface et 20 m de profondeur, mais également au-delà de la limite inférieure des herbiers de posidonie, jusqu'à 50 m de profondeur. Aujourd'hui aucune estimation des surfaces couvertes par Cymodocea nodosa n'a été réalisée (Pergent et al., 2012).

La cymodocée comme l'ensemble des phanérogames marines, constituent des peuplements clés dans le fonctionnement général des écosystèmes méditerranéens. Elles sont qualifiées d'espèces « ingénieures » à haute valeur écologique (Meinesz., 2021). En effet, elles créent des habitats riches en biodiversité qui seront utilisés comme des zones de frayères, de nurseries et d'abri pour de nombreuses espèces. Elles contribuent à l'oxygénation des eaux, à la captation du CO_2, à la fixation du sédiment qui permet de stabiliser les fonds meubles et prévient l'érosion (Terrados et al., 2004).

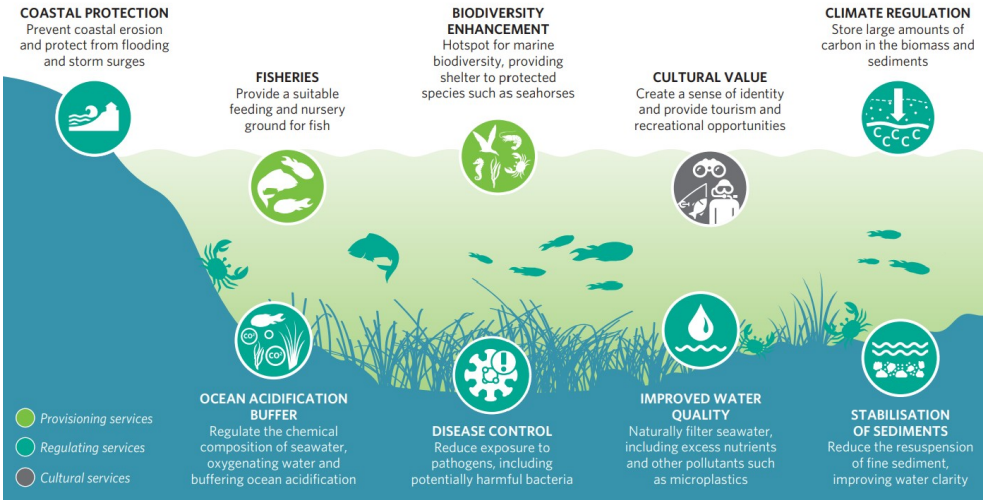


Figure 2: Services écosystémiques fournit par les herbiers marins. Source : Gamble et al., 2021. *Seagrass Restoration Handbook*. Zoological Society of London, UK.

Les herbiers méditerranéens ont subi par le passé, d'importantes dégradations (OSPAR Commission., 2010). Bien que l'espèce soit aujourd'hui protégée, elle continue de subir différentes pressions, à la fois sur sa limite supérieure (aménagements littoraux, pollutions, etc.) et sur sa limite inférieure (dégradation de la qualité des eaux, altérations physiques par la pêche aux arts traînants, ancrages des navires, poses de canalisations et de câbles, etc.). Ces pressions qui nuisent au développement des herbiers nuisent donc aussi aux fonctions écologiques, aux services écosystémiques et à la survie des espèces associées à cet écosystème. Ces espèces, pourtant fréquentes, ont été, à juste titre, protégées. La cymodocée bénéficie avec la posidonie d'une protection nationale (arrêté du 19 juillet 1988) ; à l'international c'est la convention de Barcelone (1995) qui protège ces espèces ainsi que la convention de Berne relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel en Europe, depuis 1996.

Pour retrouver l'état initial et le fonctionnement écologique d'un herbier marin ayant été dégradé ou subissant encore des pressions en partie maîtrisées, l'intervention de l'Homme peut être nécessaire. Dans certains cas, l'amélioration des conditions du milieu a permis la reprise d'herbiers ayant disparu (Pergent et al., 2012), mais dans d'autres cas la restauration d'herbiers de phanérogames marines, notamment grâce à des techniques de transplantations, semble être nécessaire.

Aujourd'hui différentes techniques de restauration et de transplantation ont été testées pour la sauvegarde et le maintien de cette espèce et de l'habitat qui en découle. Plusieurs protocoles ont été établis par différents acteurs, organismes de recherches et gestionnaires d'espaces naturels. Nous exposerons dans ce document les principales techniques utilisées ainsi que quelques exemples de cas concrets qui divergent d'un point de vue méthodologique mais aussi par leurs localités géographiques et leurs différences morphologiques et hydrologiques.

II. Objectifs

L'intérêt de préserver le bon état écologique des herbiers marins de cymodocée étant posé, il convient de s'interroger sur la question de l'utilité de le restaurer.

L'objectif de ce rapport de synthèse est de comprendre en quoi consiste la restauration écologique d'une espèce protégée. Bien qu'elle ne soit pas en danger à l'échelle de sa répartition géographique (elle n'est pas considérée comme menacée par l'UICN) (Short et al., 2010), il existe des zones dans lesquelles l'espèce a subi de fortes dégradations entraînant une diminution de sa superficie mais aussi une diminution de la biodiversité ainsi qu'une dégradation des services écosystémiques qui lui sont associés. Pour remplir cet objectif, il parait intéressant tout d'abord de présenter l'espèce, sa répartition et son cycle de vie. Ensuite d'exposer les principales techniques répertoriées pour restaurer et transplanter la cymodocée, d'après ce qui a déjà été réalisé en expérimentation et en projet de restauration. Et enfin, de parler de différents projets réalisés, en détaillant les problématiques spécifiques à chaque zone, le plan général de restauration établi et les différentes techniques de transplantation appliquées à chaque projet. À travers cette approche le but est de faire une synthèse non exhaustive de ce qui a déjà été fait avec les résultats obtenus, en fonction des techniques choisies pour répondre aux différentes problématiques.

Des questions se posent alors sur la faisabilité des différentes approches de restauration : sont-elles applicables à tous les environnements ? Une fois mis en place, ces projets de restauration ont-ils été efficaces sur le court/moyen/long terme ? Le rapport coût/réalisation/bénéfice est-il pertinent partout et à quelle échelle? L'impact sur les zones prélevées est-il négligeable au vu des résultats sur les sites receveurs ?

Une fois la faisabilité démontrée il convient aussi de s'interroger sur le but des projets de restauration. En effet la délocalisation d'un herbier en vue d'aménagement du littoral par exemple, doit être étudiée et justifiée. De façon générale, le développement de différentes techniques pour transplanter les herbiers de façon générale ne doit pas servir à justifier leur destruction dans le cadre d'aménagements du littoral par exemple.

Au vu des évolutions climatiques et des aléas naturels de plus en plus fréquents, la question relative au maintien des paramètres environnementaux pour le développement de l'herbier dans des zones autrefois pourvues de cette espèce, se pose également.

III. Prérequis et Méthodologie

Dans cette partie sera exposé le cycle de vie de la cymodocée pour bien comprendre quels sont les paramètres à prendre en compte pour le développement de cette plante. Puis le concept de la restauration et ses différentes étapes. Pour ensuite parler des différentes techniques de transplantation, qui représentent la principale méthode de restauration. Et nous finirons par l'étude de différents cas concrets.

III.1. Cycle de vie de la cymodocée

La cymodocée possède un cycle de croissance bien défini. Elle peut vivre plusieurs années (plante vivace) et est qualifiée de rustique, car elle peut s'adapter à différentes conditions environnementales. C'est une plante autotrophe, qui se nourrit par photosynthèse (feuilles) et par absorption d'eau et de sels minéraux (racines).

La reproduction est aussi bien asexuée, par l'intermédiaire de fragments de rhizomes, que sexuée par l'intermédiaire de fleurs vertes non apparentes. Les fleurs mâles et femelles sont portées par des individus différents (on parle de plante dioïque). La dispersion du pollen et des graines se fait par les mouvements de l'eau (Feugas et al., 2021). La floraison (non annuelle pour tous les faisceaux) a lieu au printemps, produisant des fruits, qui restent unis à la plante jusqu'à l'automne. Les graines se forment à la base des pistils et finissent enfouies dans le sol marin. Puis la germination a lieu plusieurs mois après la formation des fruits, lorsque les conditions sont réunies. Les mouvements sédimentaires stimulent également la germination et les graines dormantes, ce qui peut permettre leur développement lorsque les conditions sont réunies.

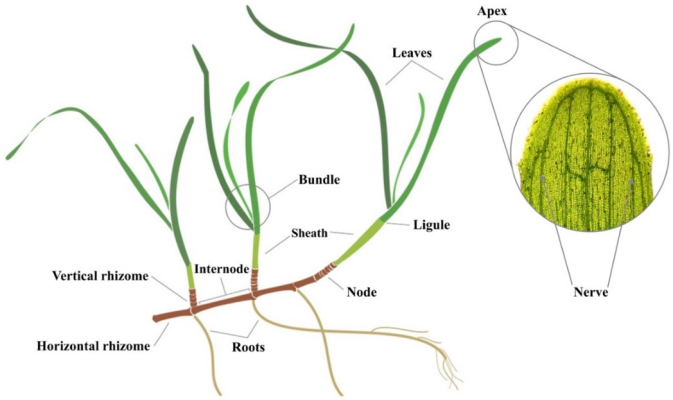


Figure 3: Parties anatomiques de *Cymodocea nodosa*. Source : Garcia Gutiérrez., 2019. *Spatial and temporal variability of Cymodocea nodosa meadows in Gran Canaria island* . Facultad de ciencias del mar.

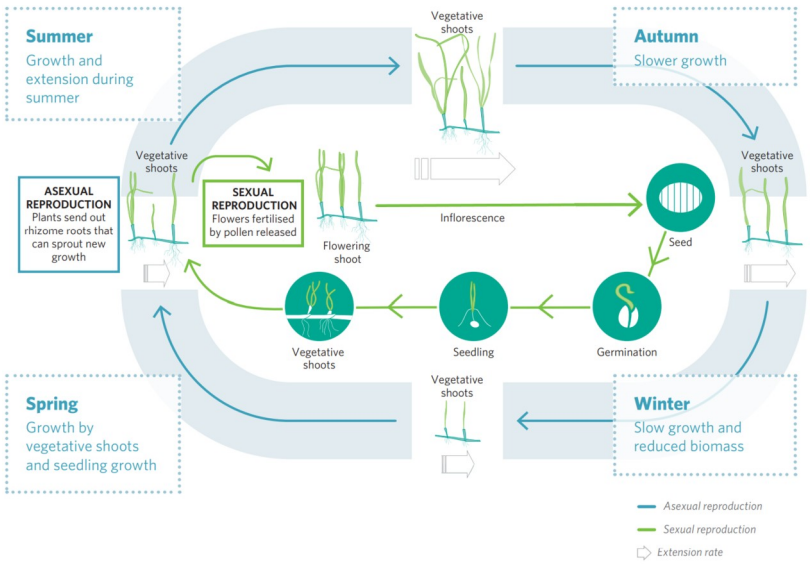


Figure 4: Cycle de vie de *Cymodocea nodosa*. Modifié à partir de : Gamble et al., 2021. *Seagrass Restoration Handbook*. Zoological Society of London.

À partir du printemps et jusqu'au début de l'automne le taux de croissance de la plante augmente, avec un développement de racines et rhizomes et une importante pousse de feuilles. Les tiges formées par 4-7 feuilles, atteignent leurs dimensions maximales en longueur (40 cm) et en largeur (3 à 4 mm) durant cette période. Puis d'octobre à mars, la plante entre dans une période de pousse lente, au cours de laquelle les rhizomes poussent peu et seulement à l'horizontale. Elle ne produit pas de racines et les feuilles poussent peu et sont moins nombreuses (2-3 feuilles). Lors de la période

hivernale les feuilles peuvent partiellement voire totalement disparaître suite à différents aléas climatiques comme les tempêtes, mais la plante persiste par son rhizome (Garcia Gutiérrez., 2019).

III.2. La restauration

La restauration écologique est définie comme toute action intentionnelle qui initie ou accélère l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit, en respectant sa santé, son intégrité et sa gestion durable (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group., 2004) ; (Nunes et al., 2016).

Le retour vers l'état originel (récupération) peut se faire lorsque les forces de dégradation sont réduites ou arrêtées. Soit par restauration passive qui correspond au processus naturel de récupération, soit par l'intervention directe de l'Homme (restauration active) en faisant généralement appel aux concepts de l'ingénierie écologique, ici nous parlerons des différents moyens de transplantation.

On peut distinguer deux concepts qui permettent de tenter de retrouver un état originel : le premier correspond au rétablissement c'est-à-dire à la réimplantation. On réintroduit une espèce dans une région où elle a existé dans le passé, et où elle a disparu suite à des dégradations anthropiques. Le deuxième concept est le renforcement des populations. On replante des individus d'une espèce menacée dans une région d'où elle n'a pas disparu, mais où ses effectifs sont considérés comme trop bas.

Même sur le temps très long, la récupération totale d'un écosystème dégradé, est le plus souvent impossible.

Pour envisager un programme de restauration, l'approche la plus efficace, la plus significative et la plus rentable doit être abordée par ordre de priorité comme décrit ci-dessous (Katwijk et al., 2008) ; (UNEP-Nairobi Convention/WIOMSA., 2020).

- **Identifier maîtriser et éliminer les causes de dégradation :**

  Il faut dans un premier temps avant toute chose maîtriser ou arrêter les différentes pressions qui s'exercent sur le milieu. Cela peut inclure une variété d'approche, telles que : la création d'aires marines protégées, l'instauration de restrictions d'accès à la navigation de plaisance ou l'interdiction d'ancrage, l'interdiction de l'utilisation du chalutage et d'autres engins de pêche destructeurs des herbiers marins, l'installation de dispositifs anti-chalutiers, une bonne gestion de l'aménagement du littoral (pas de rechargement de plage ou d'endiguement), l'amélioration de la gestion des bassins versants. Investir dans des systèmes de traitement des eaux usées pour réduire l'eutrophisation et éviter les zones d'herbiers marins dans la sélection des sites pour les ports, l'industrie, l'aquaculture, les pipelines et autres infrastructures.

- **Aide au rétablissement naturel :**

  Approches actives pour créer/restaurer des conditions propices qui faciliteront, et soutiendront ou accéléreront le rétablissement naturel de la végétation des herbiers marins, de ses fonctions écosystémiques et de la biodiversité associée. Cela peut inclure des applications géotextiles (pour stabiliser le substrat, piéger les recrues et faciliter leur installation), dans le cas de lagon ou lagune la restauration de l'échange avec la mer ouverte (lorsqu'il est restreint ou bloqué), la gestion de l'afflux d'eau douce (par exemple dans les estuaires hypersalins), des mesures d'ingénierie hybrides tels que des digues, des bancs de sable, pour créer des conditions plus calmes par exemple.

- **Restauration active par plantation :**

  Lorsque les approches 1 et 2 ont été mises en œuvre et que la récupération naturelle est encore lente ou infructueuse, la transplantation manuelle de pousses/fragments ou de mottes d'herbiers peut être envisagée. La plantation manuelle est également souvent effectuée en compensation des dommages causés à des herbiers dans le cadre d'approbations de permis pour l'aménagement du littoral ou pour des extensions portuaires.

III.3. Techniques de transplantation

Une quantité de méthodes de restauration des herbiers marins ont été développées et testées sur les dernières décennies. De nombreuses méthodes ont été expérimentées puis utilisées pour restaurer les herbiers avec succès. Aujourd'hui on peut répertorier les techniques en fonction de grands groupes. On parle de transplantations manuelles ou mécaniques et de transplantations avec ou sans sédiment. Soit on prélève, des mottes d'herbes marines avec leur substrat, soit on récupère uniquement un fragment de la plante comprenant rhizomes, systèmes racinaires intacts et feuilles. Une méthode plus récente, et en cours d'expérimentation dans différents endroits, consiste à récupérer des graines et les faire germer *in vitro* pour ensuite réintroduire des semis dans le milieu (Zarranz et al., 2010).

Le site mère d'où sont prélevées les cymodocées doit être en bonne santé et pouvoir « récupérer » suite au prélèvement. La proximité et la similarité des conditions environnementales (profondeur, luminosité, substrat, salinité, température) avec le site de l'herbier donneur sont aussi des paramètres à prendre en compte.

Les méthodes de plantation dans les eaux dites profondes nécessiteront l'utilisation d'équipements de plongée sous-marine, de navires et d'autres équipements spécifiques. En eaux peu profondes, les travaux de restauration peuvent être réalisés en palmes masque tuba (PMT).

L'obtention de permis et autorisation de prélèvement et de transplantations auprès des autorités de l'État (exemple en France la DDTM ou DREAL) sont nécessaires avant tout effort de transplantation.

Les facteurs environnementaux du site de transplantation sont des paramètres importants à prendre en compte. En effet, on retrouve la cymodocée sur les fonds sableux et vaseux comportant une certaine proportion de matières organiques. Elle a cependant besoin d'eaux claires pour réaliser la photosynthèse. L'apport d'eau douce par percolation au niveau du sol ou par l'arrivée de cours d'eau semble également être un paramètre important pour la germination des graines et le développement des semis (Meinesz., 2021) ; (Fernândez Torquemada., 2006).

Les mouvements sédimentaires de la zone de plantation sont tout aussi importants pour le bon développement de la plante. Bien que la cymodocée affectionne les substrats sableux instables, l'accrétion de dépôts sédimentaires peut représenter une menace. Si ces mouvements ne sont pas trop rapides, les herbiers peuvent s'y adapter. Néanmoins les herbiers peuvent être submergés par une accrétion rapide et mourir.

Au-delà des paramètres physico-chimiques du milieu à prendre en compte lors d'un projet de plantation, le choix de la période de l'année est aussi important. En fonction des différentes zones géographiques, des aléas climatiques cycliques peuvent être connus et évités. Pour exemple les tempêtes d'hiver. Il convient de transplanter dans les moments les plus calmes de l'année autant que possible pour laisser à la plante le temps de s'implanter et de développer notamment son système racinaire pour faire face à un fort hydrodynamisme.

III.3.1. Transplantation manuelle de faisceaux

Dans la plupart des méthodes sans sédiments, des fragments de cymodocée sont déterrés, le sédiment est enlevé des racines des rhizomes et les plantes sont placées dans un réservoir d'eau de mer à des paramètres de salinité et température similaire au site d'extraction, pour les conserver jusqu'à leur transplantation. Les plants doivent être récoltés et plantés le même jour. Il est important de s'assurer de la présence de feuilles, de rhizomes et racines qui seront nécessaires au développement horizontal de nouvelles pousses.

Les individus doivent être plantés directement dans le substrat ou ancrés à l'aide d'un dispositif comme des agrafes en forme de U, des crochets métalliques ou des clous/piquets. Les plantes sont attachées aux agrafes avec un lien torsadé en métal ou avec une ficelle.

Figure 5: Transplantation manuelle de rhizome dans la Lagune du Brusc. Source : Couvray et al., 2020. Projet SAR-LAB. *Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc*. Rapport intermédiaire. Phase 1 : 2017–2018. IOPR (Institut Océanographique Paul Ricard).

L'installation des boutures sur une surface plate, grillagée, disposée à même le sol et fixée dans le sédiment peut aussi être envisagée. Des toiles de jute percées ont également été utilisées pour stabiliser le substrat autour de la bouture.

Dans quelques cas, des imitations d'herbes marines artificielles ont été utilisées dans le but de créer temporairement des conditions plus stables pour permettre le développement des plantes et éviter leur prédation.

Les méthodes de transplantation d'individus sans sédiments ont l'avantage de réduire la charge de transport de plants lors des opérations.

Le principal inconvénient de cette approche est la nécessité d'une main-d'œuvre importante, qui limite ainsi l'échelle spatiale de la restauration. D'autre part l'utilisation d'agrafes en métal est sujette à controverse, mais celles-ci peuvent être retirées par la suite ou remplacées par une alternative biodégradable (U en bois, bambou etc).

III.3.2. Transplantation manuelle de mottes

La méthode de transplantation de mottes consiste à prélever une portion d'herbiers (rhizomes, racines et feuilles intacts) avec son substrat. Dans la plupart des cas un carottier manuel est utilisé. Il faut savoir que l'utilisation de cette méthode nécessite que le sédiment soit mou mais cohésif pour rester dans le tube du carottier. La motte est ensuite disposée dans un trou fait dans le substrat du site de transplantation. Comme pour la technique précédente, l'ensemble des opérations de prélèvement et de transplantation doivent être effectuées dans la même journée. La motte peut être disposée à même le substrat ou bien dans un pot, sac biodégradable ce qui permet de rajouter des fixations dans le substrat.

Un des avantages de cette technique est une mise en œuvre relativement facile. Elle est généralement moins exigeante en main-d'œuvre (par surface) et le taux de survie est souvent plus élevé qu'avec les méthodes sans sédiments.

Le principal inconvénient de cette méthode est le défi logistique et le coût du transport lié au poids et à l'encombrement des mottes, lorsque le site donneur est éloigné du site de plantation. De plus, la récolte de mottes peut constituer une perturbation importante dans l'herbier donneur, ce qui peut retarder sa reconstruction.

Figure 6: Carottier manuel pour le prélèvement de mottes d'herbiers. Source : Erftemeijer., 2020. *Seagrass Ecosystem Restoration Guidelines*.

III.3.3. Transplantation mécanique de mottes

De nouvelles techniques de transplantation sont apparues avec l'avènement des techniques mécanisées qui entraînent un changement majeur dans la méthode de transplantation de phanérogames marines. Cependant, ces techniques restent encore dans une phase de développement et sont coûteuses.

Il existe différents prototypes spécifiques et adaptés à différents projets et sites. Ici nous exposerons celui qui a été utilisé dans la lagune de Venise pour la transplantation de cymodocées notamment.

Un godet hydraulique spécifique a été conçu pour ce projet. Monté sur un bras capable de ramasser des mottes d'environ 2 m² et de 40 à 60 cm d'épaisseur, le godet est divisé en deux zones, une face avant en

forme de lame carrée pour la collecte des mottes du site donneur et un arrière pour les positionner dans site de transplantation. Les mottes sont chargées dans le godet et transférées dans la partie arrière du godet qui, lors du dépôt sur le fond marin, au moyen de mâchoires poussées hydrauliquement, crée une tranchée et garantit un bon nivellement au fond.

Figure 7: Godet hydraulique pour le prélèvement et la transplantation de mottes d'herbier. Source : Curiel et al,. 2021. *Marine Seagrasses Transplantationin Confined and Coastal Adriatic Environments : Methods and Results*. Review Water 2021.

Ces techniques ont permis aux greffes d'être plus résistantes en raison de la surface plus importante d'herbier plantée par rapport aux transplantations manuelles. Cependant elles sont principalement adaptées à une application à grande échelle et nécessitent des sites ayant des configurations particulières (dans cet exemple une faible profondeur est nécessaire).

III.3.4. Germination *in vitro* et transplantation

Les graines de cymodocée sont abondantes tout au long de l'année dans plusieurs gisements autour des côtes de la Méditerranée occidentale, mais il est rare de trouver des semis *in situ*. Des expériences menées en aquarium ont montré que plus la température est élevée et plus la salinité est faible, plus la germination est rapide et plus le taux de germination est élevé. Ces restrictions semblent limiter dans le temps la germination de cymodocée en Méditerranée occidentale, à la période d'avril à octobre, et dans l'espace avec la proximité de sources d'eau douce (Caye et al., 1986).

Au vu des conditions particulières de germination et de croissance des semis, la plantation de graines non germées ne semble donc pas être appropriée pour l'espèce.

Cependant des expérimentations de germination et de croissance de semis in vitro en vue de transplantation ont été réalisés aux îles Canaries (Zarranz et al., 2010). Les résultats semblent encourageants avec un taux de survie autour de 70 % après 9 mois d'observation.

L'utilisation de semences et de plants développés *in vitro*, dans les programmes de restauration a été considérée comme une technique intéressante qui pourrait introduire une variabilité génétique dans les herbiers en mauvaise santé mais également dans des zones spécifiques manquant de diversité (prévention des épidémies, meilleur adaptabilité aux changements de conditions environnementales par exemple) (Manez-Crespo., 2020) ; (Zarranz et al., 2010) ; (Alberto et al., 2008).

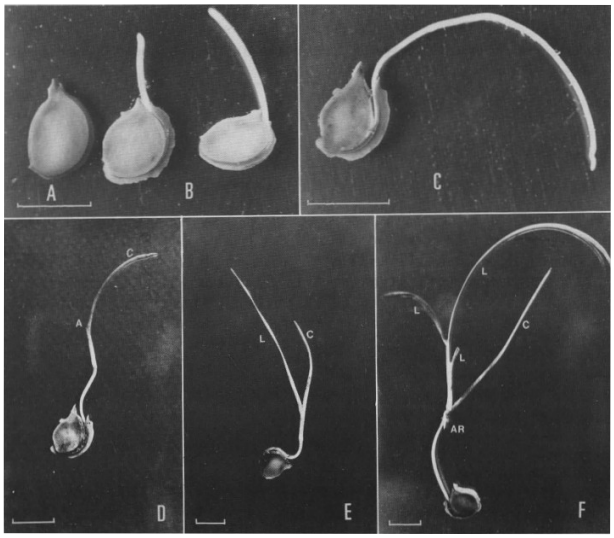


Figure 8: Germination et développement de la plantule de *Cymodocea nodosa*. (A) la graine ; (B) et (C) extension du cotyledon ; (D) plantule avec apparition de l'apex ; (E) plantule avec 3 feuilles et apparition de racine. Source : Caye et al., 1986. *Experimental study of seed germination in the seagrass Cymodocea nodosa.*

IV. Résultats : Cas d'études

Cette partie présente plusieurs projets de transplantation de cymodocée. Certains sont expérimentaux et d'autres ont pour objectif de restaurer un site dégradé. Le but étant de parler de projets différents, d'un point de vue des problématiques, des méthodes employées, de la localité des sites, ainsi que de l'échelle spatiale.

Les différents projets présentés ici ont été réalisés en Italie et en France en ce qui concerne le bassin méditerranéen et en Espagne et au Portugal pour la façade Atlantique.

IV.1. La lagune de Venise

Pour ce premier cas seront exposés plusieurs projets distincts. Une première expérimentation de transplantation manuelle réalisée en 1994-1995, puis deux projets de transplantation mécaniques en 2010 et en 2016 en vue de restaurer les herbiers de cymodocée de la lagune.

IV.1.1. Contexte et localité

La lagune de Venise est l'un des plus grands écosystèmes côtiers intertidaux de la mer Méditerranée. Trois entrées relient la lagune à la mer, interrompant une longue et mince barrière en trois points. La lagune mesure environ 50 km de long et 10 km de large, ce qui représente une surface d'environ 550 km², dont 36km^2 de marais salants. La lagune est subdivisée en trois bassins (bassin nord, bassin centrale et bassin sud). Les trois passes permettent un échange quotidien d'environ 400 millions de m³ d'eau avec la mer Adriatique grâce au phénomène de marées deux fois par jour (semi-diurne), tandis que l'afflux quotidien du continent à travers les rivières et le sous-sol est d'environ 3,7 millions de m³ d'eau douce. Dans la lagune de Venise, les apports d'eau douce et les marées produisent un gradient de salinité, allant de 37 PSU à de l'eau presque douce. La classification climatique de la lagune est subtropicale humide avec des étés chauds. En raison de la profondeur limitée, la tendance de la température de l'eau est strictement saisonnière, allant de 0°c à plus de 30–35◦ C à la surface.

Dans la lagune de Venise, la présence de phanérogames marines a été signalée dans la littérature depuis le début du XXe siècle, dont les genres *Zostera, Cymodocea* et *Ruppia*. Les indications historiques mais approximatives datant du début des années 1900 rapportent une très large couverture des fonds de lagon, confirmée à partir de photographies aériennes prises pendant la Seconde Guerre mondiale.

IV.1.2. Problématique

De nombreuses lagunes côtières méditerranéennes sont dégradées en raison des transformations de l'utilisation des sols autour des lagunes et par l'urbanisation des sols et des rejets continus de polluants provenant des activités humaines continentales. Les changements côtiers mondiaux ont été principalement causés par les impacts directs et indirects des populations humaines. Par conséquent, la plupart des causes de la dégradation des lagunes côtières sont étrangères aux lagunes, leur restauration devrait donc cibler principalement des actions en dehors des lagunes côtières.

La lagune de Venise en est un bon exemple. Depuis les dernières décennies du XX siècle, une détérioration progressive des masses d'eaux de transitions ainsi que du substrat ont été signalées en raison de l'augmentation des activités industrielles, des monocultures agricoles, de l'urbanisation, des activités de pêche et de la circulation maritime croissante. Les conséquences sont un apport élevé en éléments nutritifs, l'érosion et la remise en suspension des particules.

Les herbiers marins sont très sensibles à une série de facteurs de perturbation, tels que la turbidité de l'eau causée par des matières en suspension, l'excès de phytoplancton, les efflorescences de macroalgues prolongées et persistantes, qui réduisent l'apport de lumière dont ils ont besoin pour la photosynthèse. Les particules solides en suspension peuvent également se déposer sur les feuilles, étouffant les herbiers.

Les apports importants du bassin versant et les déchets industriels ont provoqué une augmentation des nutriments à partir des années 1960 et 1970 entraînant des efflorescences macroalgales (*Ulvaceae* et *Cladophoraceae* par exemple) de façon plus ou moins régulière. D'où une disparition progressive des angiospermes aquatiques en particulier dans les zones étouffées, où le renouvellement de l'eau varie de 12 à 40 jours et où les polluants et nutriments stagnent. Au début des années 2000, les angiospermes aquatiques submergées ont presque complètement disparu et ont été remplacées par ces macroalgues dans une grande partie du bassin nord.

En plus du remplacement par les macroalgues les herbiers ont été confrontés au développement et à l'exploitation d'une autre espèce. La palourde japonaise non indigène (*Ruditapes philippinarum*), introduite dans le lagon en 1983 à des fins économiques (Tagliapietra et al., 2018), a proliféré, bénéficiant d'une eau riche en matière organique et en phytoplancton et de l'absence quasi totale de concurrents et prédateurs. La récolte de cette nouvelle ressource halieutique à l'aide de machines hydrauliques et mécaniques a engendré un remaniement permanent des fonds de la lagune, provoquant la remise en suspension des sédiments, donc l'augmentation de la turbidité et la perte de sédiments fins vers la mer. Les herbiers ont été fortement impactés (voir figure 13) par la turbidité de l'eau et le taux de sédimentation jusqu'au début de ce siècle, lorsque la récolte des palourdes a été réglementée.

IV.1.3. Plan de restauration

Au vu des différentes analyses et alertes sur la détérioration de la lagune l'Autorité de l'Eau de Venise a accordé une concession au Consorzio Veneria Nuova pour mettre en œuvre des mesures visant à restaurer la lagune de Venise (Curiel et al., 2021).

Pour mener à bien les mesures de sauvegarde, le Consorzio Venezia Nuova a établi et mis en œuvre un Plan Général d'Interventions. Le volet d'interventions environnementales se divise en mesures pour l'amélioration de la qualité de l'eau et des sédiments et pour la restauration morphologique afin de lutter contre l'érosion.

L'amélioration de la qualité de l'eau et des sédiments :

- Le traitement des eaux polluées provenant du bassin versant (pollution domestique et industrielle). Construction de bassins d'expansion pour faire face aux crues et aux pics de pollution.
- L'interdiction du phosphate dans des détergents, et l'amélioration des pratiques agricoles sur le continent.
- La lutte contre les fuites provenant de décharges abandonnées.
- La dépollution du lit de la lagune dans certaines zones. Par exemple en 2008 un travail d'élimination des résidus industriels accumulés dans les canaux de Porto Marghera a été réalisé.
- Depuis 1989, le ramassage régulier des macroalgues. Cette biomasse est principalement réutilisée comme engrais dans l'agriculture.

La lutte contre l'érosion et la dispersion des sédiments :

- Des travaux de dragage des canaux de la lagune.
- L'utilisation des sédiments dragués pour reconstruire des vasières et des marais salants.

L'amélioration de la plupart de ces facteurs perturbateurs a permis au fur et à mesure de retrouver les conditions écologiques propices au développement des herbiers marins.

Au cours des 30 dernières années, diverses autorités de la lagune de Venise ont soutenu des programmes de transplantations d'herbiers. Le but étant d'adapter les méthodes de la littérature aux différentes conditions environnementales et morphologiques qui caractérisent la lagune de Venise.

IV.1.4. Transplantations 1994 – 1995

En 1994-1995 un projet expérimental de transplantation de *Cymodocea nodosa* et *Zostera marina* a été lancé (Curiel et al., 2003). Le premier objectif était de tester la possibilité de transplanter des herbiers en suivant 2 méthodes différentes en vue d'un programme de restauration plus large dans la lagune. Le second objectif était de contrôler la bonne « récupération » de l'herbier du site donneur. Le troisième objectif était d'évaluer le coût d'une telle opération. La zone sud du bassin moins exposée aux perturbations anthropiques, a été choisie pour réaliser cette expérience.

Les sites de réimplantation choisis présentaient des profondeurs comprises entre −0,2 et −3,0 m. La salinité variait entre 30 et 38 PSU (sur une base annuelle). Deux sites donneurs et deux sites témoins ont été définis dans le lagon sud à des distances comprises entre 0,5 et 5 km des zones de transplantation. Les sites de transplantation étaient exempts de couverture algale et le sont restés pendant toute la période d'étude (à l'exception d'une cellule).

Dans la suite nous parlerons uniquement des méthodes et résultats obtenus avec la cymodocée en laissant de côté la partie de l'expérimentation concernant la zostère.

Matériels et méthodes

En avril 1994 , 5 stations de transplantation de cymodocée ont été mises en place. À chaque station, deux cellules (A et B) de 5 m x 5 m ont été établies (voir figure 9). Dans la cellule A, des transplantations de mottes (avec substrat) ont été effectuées. Dans la cellule B des transplantations de plants (rhizome, racine, pousses) sans sédiments, maintenus par des tiges en plastiques ont été réalisées. Dans chaque cellule, 25 unités de plantation (UP) ont été transplantées. Dans la cellule A cela correspond à 25 mottes et dans la cellule B à 25 bottes de 7 à 9 rhizomes. Les mottes ont été récoltées à l'aide d'un carottier métallique de 30 cm de haut sur 23 cm de diamètre. Les rhizomes d'une longueur moyenne de 30 à 50 cm ont été collectés à l'aide d'un jet d'eau pour minimiser les dommages causés aux plantes. Les phases de prélèvements et de transplantations ont été effectuées par des plongeurs en bouteille et en palmes masque tuba (PMT).

A partir de mai 1994 et jusqu'à septembre 1995 le taux de survie, la couverture, la densité des pousses et la biomasse (feuilles, rhizomes et racines) ont été mesurés sur les 5 sites pour les deux méthodes.

La méthode de prélèvement par motte a un impact plus important sur le site donneur, car les trous qui en résultent pourrait entraîner une fragilisation de l'intégrité de la matte, des rhizomes entremêlés, qui font la force de l'herbier et assurent son maintien. Pour éviter ce problème, les mottes ont été prélevées à au moins deux mètres les unes des autres.

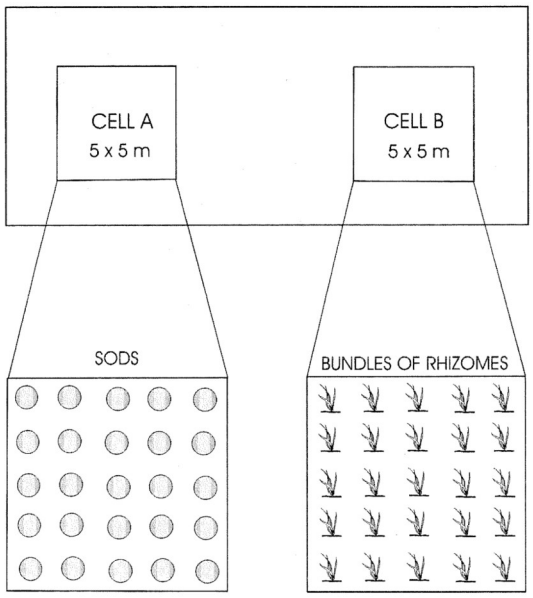


Figure 9: Schéma des stations de transplantation avec les cellules (A) et (B). Dans la cellule (A) les transplantations sont réalisées à partir de mottes. Dans la cellule (B) les transplantations sont réalisées à partir de rhizomes. Source : Curiel et al., 2003. *Transplanting Seagrasses in the Lagoon of Venice: Results and Perspectives.*

Résultats

Le taux de survie des UP a diminué régulièrement au cours des premiers mois et s'est stabilisé à environ 73 % pour chaque méthode. Il n'y a pas eu de différence significative entre les deux techniques.

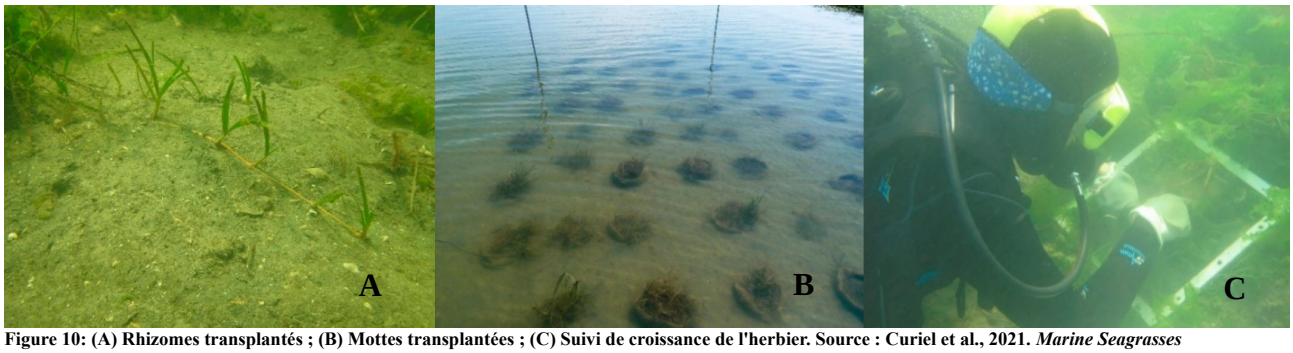


Figure 10: (A) Rhizomes transplantés ; (B) Mottes transplantées ; (C) Suivi de croissance de l'herbier. Source : Curiel et al., 2021. *Marine Seagrasses Transplantationin Confined and Coastal Adriatic Environments : Methods and Results*. Review Water 2021.

A la fin de l'étude (après 15 mois) la couverture présentait peu de différence entre les 2 méthodes : avec la technique des mottes 86 % de la surface cellulaire totale avait été colonisée alors qu'avec la technique des rhizomes la couverture représentait 76 %. Les valeurs de couverture variaient largement entre les stations de 40 % à 100 % ; la valeur la plus faible résultant de causes naturelles de perturbations (telles que la prolifération de macroalgues).

La densité des pousses a fortement augmenté au cours de l'étude, avec des valeurs finales de 681 ± 391 pousses par m² pour la méthode par mottes et 563 ± 463 pousses par m² pour la méthode par rhizomes. Aucune différence significative n'a donc été détectée entre les deux méthodes. Cependant les deux valeurs sont encore inférieures à celles observées dans la zone de contrôle 1250 pousses par m².

A la fin de l'étude, la biomasse (gramme de matière sèche par m²) dans les cellules transplantées était plus élevée pour la méthode par motte (402,9 ± 369,9 g ms/m²) par rapport à la méthode par rhizomes (177 ± 164,1 g ms/m²). Par rapport au site témoin la valeur de la biomasse était plus faible dans les deux cas.

Après deux saisons de croissance, les deux méthodes de transplantations ont donné de bons résultats. Statistiquement des différences significatives entre les deux méthodes de transplantation ont été observées uniquement sur la biomasse de cymodocée. Les meilleurs résultats étant obtenus avec la technique par mottes.

Cymodocea nodosa	Beginning		After Two Growing Seasons	
	Sod	Rhizome	Sod	Rhizome
Survival (%)	100	100	74	73
Coverage (%)	4.1	1.2	86	76
Density (shoots/m^2)	45	13.4	681	563
Biomass transplantation (g.d.w./m^2)	-	-	402.9	177
Biomass control (g.d.w./m^2)	-	-	1116.9	

Figure 11: Récapitulatif des principaux résultats obtenus après deux saisons de croissances. Source : Curiel et al., 2003. *Transplanting Seagrasses in the Lagoon of Venice: Results and Perspectives*.

Concernant les sites donneurs, après deux-trois mois, les trous causés par les prélèvements des mottes se sont remplis de sédiments et à la saison suivante, ils ont été colonisés par les herbiers.

IV.1.5. Transplantations 2010 et 2016

Du printemps à l'été 2010 une campagne de transplantation mécanisée d'herbiers de cymodocée a été réalisée pour la première fois par le Consorzio Veneria Nuova avec le soutien de l'Autorité de l'Eau de Venise, après quelques essais concluants (Curiel et al., 2021) ; (Tagliapietra et al., 2018).

En mai 2016 une deuxième campagne de transplantation avec la même méthodologie a été réalisée dans le bassin central de la lagune afin de restaurer une superficie d'environ 0,6 ha de cymodocée.

Les nombreuses cartographies réalisées ces 30 dernières années dans la lagune ont permis de sélectionner des sites de transplantation où les différentes espèces d'herbiers étaient présentes dans le passé.

Matériels et méthodes

Le matériel utilisé pour ces 2 programmes de transplantations est celui décrit dans la partie transplantation mécanique (III.3.c).

Cette technique permet de récupérer des surfaces d'herbier, avec leurs sédiments, d'environ 2 m². Une fois prélevées les mottes sont disposées sur la barge transportant le prototype de prélèvement et de transplantation, pour être acheminées jusqu'aux différents sites. Puis les mottes sont déposées dans le substrat sablo-vaseux des sites définis pour la transplantation, dans une profondeur moyenne de 2–3 m.

Le procédé développé a permis d'avoir une capacité opérationnelle d'environ 60 mottes/jour (environ 120 m² d'herbier) en fonction de la typologie de la zone.

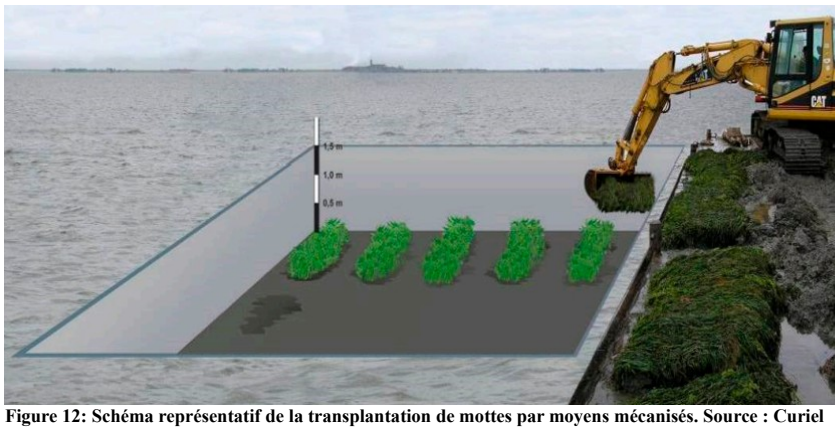


Figure 12: Schéma représentatif de la transplantation de mottes par moyens mécanisés. Source : Curiel et al., 2021. *Marine Seagrasses Transplantationin Confined and Coastal Adriatic Environments : Methods and Results*. Review Water 2021.

En 2010, 2 250 m² de mottes de Cymodocea nodosa ont été extraites de différents sites donneurs ayant une couverture d'herbiers importante. Les herbiers marins ont été réimplantés dans le bassin lagunaire sud, dans des parcelles d'environ 350 m² chacune. Les mottes ont été disposées à environ 1,30 m les unes des autres.

En 2016, pour la deuxième intervention un total de 450 mottes a été prélevé à partir de deux sites donneurs. La transplantation a été effectuée sur un substrat sablo-vaseux à une profondeur de 1,5 à 3,0 m du bassin central.

Résultats

En 2013 à la fin de la troisième saison de croissance des transplantations réalisées dans le programme de 2010, les suivis ont montré que la couverture de la zone transplantée atteignait 80 à 100 % des parcelles prédéfinies. L'augmentation de la superficie végétalisée était alors de 3,2 à 3,8 fois celle transplantée. Le taux de mortalité des mottes transplantées était relativement faible de 6 % à 13 %. Après trois ans les sites donneurs sont revenus à une couverture d'environ 100 % par rapport à leur état initial.

En 2017, à la fin de la première saison de croissance des transplantations réalisées dans le programme de 2016, le taux de mortalité des mottes a été estimé à 4–5 %. Après la fin de la troisième saison de croissance en 2019, la couverture des zones transplantées atteignaient 75 à 100 % des parcelles prédéfinies. La densité moyenne des pousses a progressivement augmenté au cours des ans, variant d'une moyenne de 739 pousses/m² la deuxième année à une moyenne de 1 034 pousses/m² en troisième année. Cette dernière valeur est très proche des valeurs du site donneur (environ 1200–1600 pousses/m²).

Concernant la récupération des sites donneurs, d'excellents résultats ont déjà été observés à la fin de la deuxième saison de croissance, pour atteindre une récupération totale lors de la troisième saison. Le résultat positif des transplantations et des récupérations des sites donneurs, est principalement dû à la grande capacité de croissance végétative des rhizomes de *Cymodocea nodosa*. La moyenne de croissance annuelle des rhizomes étaient de 60 à 70 cm, avec des minimums de 20 à 45 cm et des maximums de 120 cm.

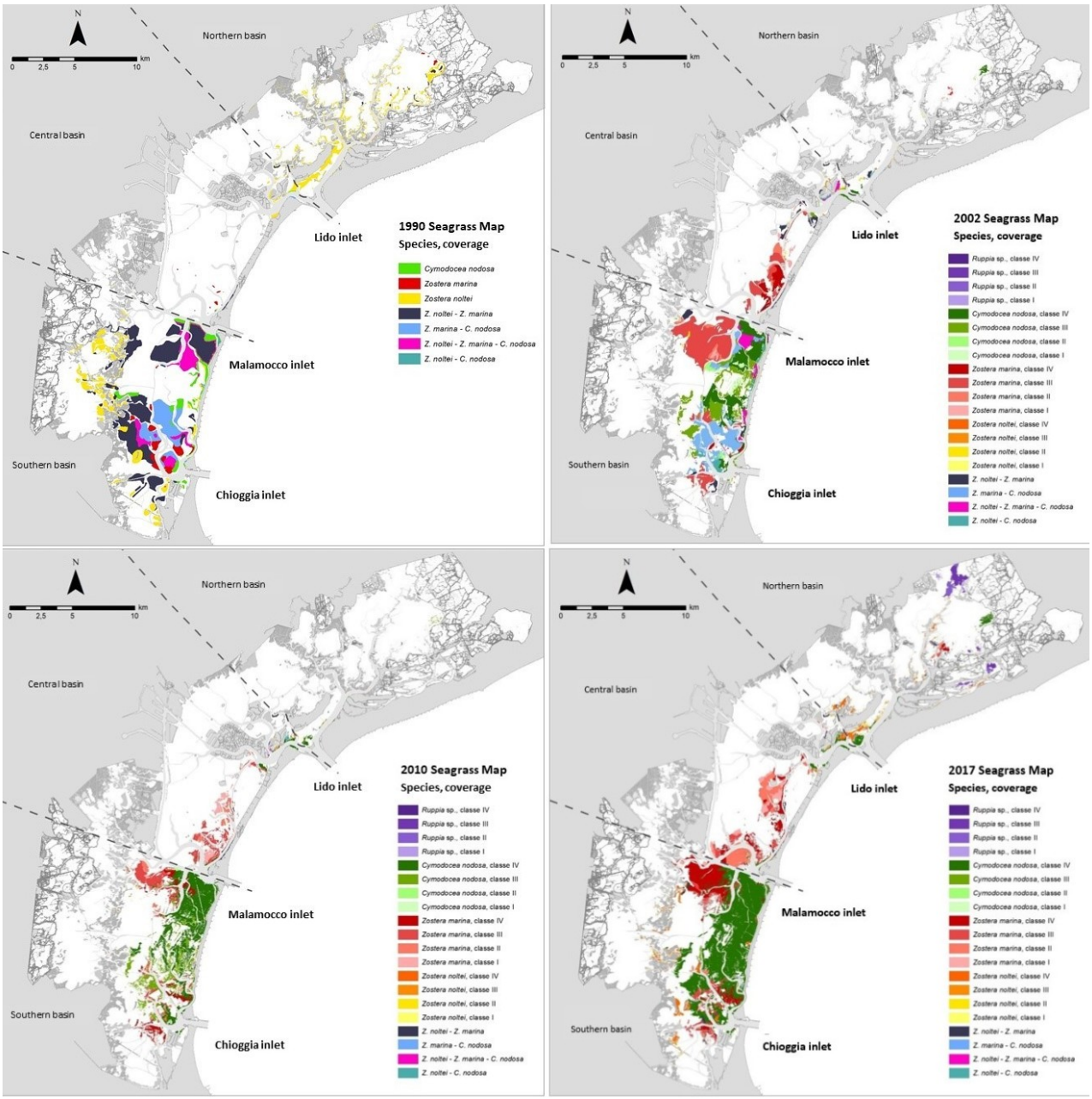


Figure 13: Cartographies représentant l'évolution des herbiers de la lagune de Venise entre 1990 et 2017. Pour chaque parcelle d'herbier cartographiée, des données sur la végétation (espèces et densité de recouvrement) ont été collectées. La densité est représentée sous forme de classe (Classe I = 0 %, Classe II = 1–5%, Classe III = 6–50%, Classe IV = 51–75 %, Classe V = 76–100 %). Les parcelles caractérisées par un mélange de 2 ou 3 espèces ont été classées comme population mixte sans spécification des différentes valeurs de densité de recouvrement.Source : Curiel et al., 2021. Marine Seagrasses Transplantationin Confined and Coastal Adriatic Environments : Methods and Results. Review Water 2021.

IV.2. La lagune du Brusc

Ce cas d'étude est particulier car bien qu'il soit défini comme un plan de restauration, il peut aussi bien être considéré comme une expérimentation étant donné la particularité du site d'étude et l'échelle du projet.

IV.2.1. Contexte et localité

La lagune du Brusc est un milieu unique en son genre sur le littoral méditerranéen français. Elle se situe entre l'archipel des Embiez, l'île du Gaou et le Brusc sur la commune de Six-Fours-Les-Plages sur le continent. Appelée communément lagune il s'agit en fait d'un lagon. En effet la zone du lagon est délimitée par la présence d'un grand récif barrière de posidonie au nord et de trois passes au sud dont l'une présente également un petit récif barrière. La masse d'eau comprise entre ces différentes structures présente des particularités physico-chimiques différentes de la mer, notamment du fait de sa communication et ses échanges limités avec le milieu marin mais aussi par sa morphologie interne. L'atténuation de la houle et des courants par les récifs barrière crée un habitat calme et peu profond agissant comme un piège à sédiments. La salinité et la température sont très variables au sein du lagon. Du fait de son faible hydrodynamisme et de sa profondeur relativement faible, la température et la salinité fluctuent grandement au cours des saisons mais également au cours d'une journée (pluie, ruissellement, ensoleillement etc). Actuellement la superficie de la lagune est de 44 hectares (Couvray et al 2020).

Les différentes caractéristiques de ce milieu ont permis l'apparition d'un écosystème remarquable et notamment le développement de différents herbiers de magnoliophytes marines dont *Cymodocea nodosa* et *Zostera noltei*. La morphologie particulière de la lagune plus la présence d'herbiers marin et en particulier ceux de cymodocée en faisait un milieu très favorable de nurseries pour bon nombre d'espèces avant les années 2000. Historiquement ces herbiers recouvraient la quasi-totalité de la lagune.

IV.2.2. Problématique

Par son caractère unique et sa proximité avec une zone urbaine de la côte, la lagune est soumise à de fortes pressions anthropiques. Aux impacts externes directs et indirects (artificialisation du littoral, urbanisation, lessivage des sols, pollution) s'ajoutent les impacts internes (fréquentation touristique, piétinements, échouage des navires dans le récif, pêche dans la lagune).

Après les années 1950 le littoral s'est progressivement urbanisé, favorisant le lessivage des sols vers la lagune. Jusque dans les années 1980 un chemin au sud existait pour relier à pied le Brusc aux Embiez, ce qui empêchait l'eau de circuler. La passe du Brusc a été comblée avant d'être réouverte en 1978. Un camping sauvage était également présent sur l'île du Gaou entre 1950 et le début des années 1990 et les eaux usées étaient directement reversées dans la lagune. De plus, le mouillage sauvage s'est multiplié à partir des années 1960 et s'est intensifié à partir des années 1970 avec des impacts directs sur le fond de la lagune du Brusc. Plus tard, la construction d'un parking puis les aménagements portuaires ont aussi participé à la dégradation de cette zone. Aujourd'hui les risques de pollutions ponctuelles (en particulier par des eaux usées ou des hydrocarbures) sont relativement élevés à cause de la présence de deux ports de plaisance de part et d'autre de la lagune. Le nombre important de bateaux augmente également le risque d'atteinte directe du récif affleurant (nombreuses cicatrices visibles dans la matte, dues à l'échouage régulier de navires dans le récif), ce qui pourrait entraîner la disparition du récif barrière. Celui-ci étant un élément clé du lagon, s'il venait à disparaître le lagon finirait par disparaître également.

Historiquement, des pêches à pieds traditionnelles étaient organisées plusieurs fois par an, impliquant un piétinement intense de la lagune. Plus récemment les sports nautiques se sont multipliés ce qui a également augmenté le risque de piétinement dans les eaux peu profondes.

Avec l'augmentation de la pression touristique la commune de Six-Fours-Les-Plages a décidé de retirer les banquettes de posidonies de ses plages situées au nord de la lagune. Or ces banquettes ont un rôle primordial contre l'érosion des plages. Le sable a donc fini par disparaître, poussant ainsi la commune à procéder à des rechargements réguliers, avec un sédiment vraisemblablement d'origine terrigène, dès le début des années 2000 et jusqu'en 2013. Au fur et à mesure des années, et des rechargements, les sédiments emportés par la mer ont fini par se retrouver à l'intérieur de la lagune, apportant un substrat pauvre en matière organique et étouffant les herbiers.

Autrefois l'herbier de cymodocée recouvrait majoritairement la lagune. En 2004 l'herbier représentait encore une superficie d'environ 30 hectares. Entre 2008 et 2011 c'est un effondrement de plus de 99,9 % qui a été observé dans la lagune, impliquant une régression quasi-totale d'une espèce protégée ainsi que la perte de l'intégralité de ses bienfaits et services écosystémiques en tant qu'espèce et en tant qu'ingénieur d'écosystème. La disparition de l'herbier serait vraisemblablement liée à son ensablement (Kirchhofer et al., 2016) mais également à un appauvrissement des sédiments superficiels en matières organiques. Une autre hypothèse émise, mais qui reste peu probable, serait lié à la prédation des saupes *(Sarpa salpa)*.

En 2014, seuls 50 m² de patchs de cymodocée étaient encore recensés. La zostère avait alors complètement disparu de la lagune. Puis entre 2014 et 2017 la zostère a recommencé à coloniser la lagune et devient pour la première fois la magnoliophyte la plus présente avec une superficie d'environ 1 600 m². En 2018 un total de 2 080 m² de cymodocée est répertorié, les herbiers de zostère s'étendent alors sur une superficie d'environ 4 740 m². Les patchs de zostère ont continué leur progression et représentent en 2020 16 200 m². Les patchs de cymodocée ont aussi poursuivi leurs croissances et atteignent en 2020 3 500 m². Il y a donc une reconquête des herbiers au cœur de la lagune, probablement suite à l'arrêt du rechargement des plages et au maintien d'une bonne qualité du milieu, mais la superficie reste encore très faible comparé au 30 hectares de cymodocée recensés en 2004. Les scientifiques pensent que la présence de zostère pourrait faciliter l'installation future d'une pelouse de cymodocée. Cependant, si l'herbier de zostère continue d'évoluer et de coloniser la lagune, devançant la cymodocée en termes de superficie, cela signifie que l'écosystème ne revient pas à court terme à son état antérieur et ne fait pas preuve de résilience (Couvray et al., 2021)

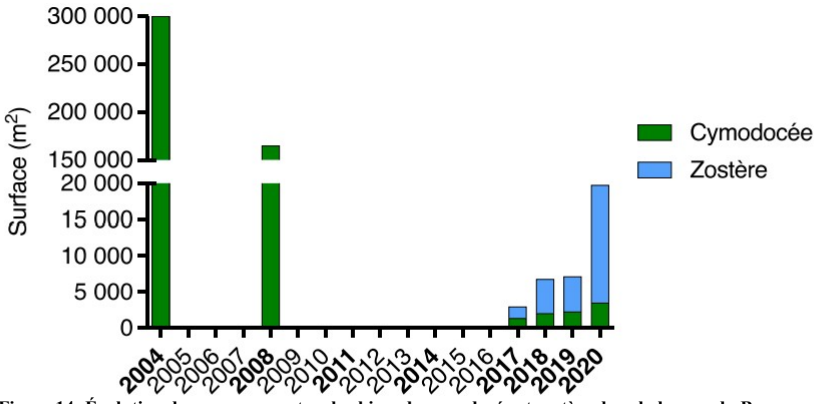


Figure 14: Évolution du recouvrement en herbiers de cymodocée et zostère dans la lagune du Brusc entre 2004 et 2018. En gras, les années ou un relevé des herbiers a été effectué. Remarque, en 2004 la zostère n'a pas été quantifiée. Source : Couvray et al., 2021. Projet SAR-LAB. *Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc*. Rapport intermédiaire. Phase 2 : 2019 – 2020. IOPR (Institut Océanographique Paul Ricard).

La saline des Embiez adjacente à la lagune est restée, elle, en bon état écologique. L'herbier de cymodocée présent dans la saline s'est maintenu en bon état, préservé des dégradations extérieures.

IV.2.3. Plan de restauration

La particularité de ce site et son fort potentiel écologique ont été reconnus dès 1987, classé ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique). Cependant l'augmentation de la fréquentation humaine a poussé les services de l'État à prendre des arrêtés préfectoraux en 2000, et municipaux en 2005, pour limiter les activités anthropiques ayant un impact direct sur le fond. Par la suite la navigation, le mouillage et le piétinement ont été interdits dans la lagune. En 2008 le pourtour de l'archipel des Embiez et la lagune du Brusc sont classées zone Natura 2000 dans le but de pouvoir concilier équilibre et durabilité de la biodiversité avec les activités humaines. Le site de la lagune du Brusc bénéficie également de

la labellisation Aire Spécialement Protégée d'Intérêt Méditerranéen (ASPIM) au titre de la convention de Barcelone. Malgré l'ensemble des protections juridiques les pressions anthropiques sont tellement importantes que la lagune est reconnue comme une « zone classée à très fort impact des pressions anthropiques côtières » (Couvray et al., 2020).

L'Institut Océanographique Paul Ricard (IOPR) implanté sur l'île des Embiez a mené plusieurs études sur la lagune du Brusc depuis les années 1970. Les différentes observations réalisées ces dernières années ont motivé l'Institut à créer un premier programme nommé, LANDEAU, pour caractériser le rôle de nurseries de la lagune et procéder à des expérimentations de transplantation de cymodocée. Les résultats ont démontré la faisabilité et l'efficacité d'une telle opération. À la suite de ce programme et des études réalisées sur la lagune, l'IOPR a lancé un programme de restauration écologique, le programme SAR-LAB (Site Atelier de Restauration écologique de la Lagune du Brusc). La cible prioritaire de ce programme était l'amélioration de la fonction de nurseries pour les poissons côtiers. Différentes actions ont été mises en place dont notamment la restauration des herbiers de cymodocée par une technique de transplantation. Ici la restauration de la cymodocée se définit comme un « renforcement de population », caractérisé dans la littérature comme « l'action de relâcher ou réimplanter des individus d'une espèce menacée dans une région d'où elle n'a pas disparu mais où ses effectifs sont considérés comme trop bas » (Boudouresque et al., 2006).

Pour lancer le projet de restauration plusieurs demandes et autorisations administratives ont été obtenues (demande d'AOT, étude des incidences au titre de Natura 2000, dossier Loi sur l'eau).

IV.2.4. Transplantations

Le projet de restauration de l'herbier de cymodocée du programme SAR-LAB a donc fait suite aux expérimentations concluantes de transplantation lors du projet LANDEAU. Le site donneur choisi pour prélever la cymodocée a logiquement été la saline des Embiez située aux abords de la lagune et dont l'herbier provient du même herbier ancestral autrefois présent dans la lagune.

Matériels et méthodes

La méthode de transplantation choisie est celle dite de faisceaux (rhizomes, racines, pousses) sans sédiment. Ils ont été prélevés dans la saline sur une superficie de 4m^2. La proximité (quelques centaines de mètres au plus) entre le site de prélèvement et le site de transplantation a facilité la logistique. La zone choisie pour la transplantation a été définie pour former un corridor de 140 m de long, reliant le récif barrière de posidonie à la saline des Embiez, deux habitats nurseries.

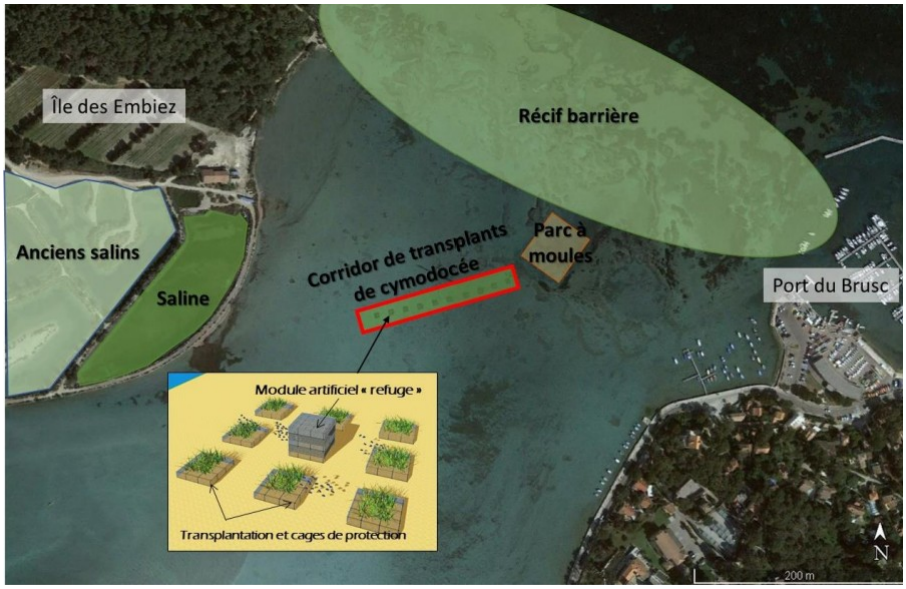


Figure 15: Localisation du corridor de transplants de *Cymodocea nodosa* dans la lagune du Brusc et schéma des modules de transplantation. Source : Couvray et al., 2021. Projet SAR-LAB. *Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc*. Rapport intermédiaire. Phase 2 : 2019 – 2020. IOPR (Institut Océanographique Paul Ricard).

10 modules de 5 m x 5 m ont (voir figure 15) été définis. À l'intérieur de chaque module 8 unités de plantation (UP) de 1m^2 de cymodocée ont été disposées. Dans chaque unité 100 faisceaux de cymodocées ont été transplantés directement dans le substrat sans attaches au sol. Une cage de protection, contre le broutage des pousses, a été installée sur chaque UP. Ces protections seront enlevées

une fois l'herbier suffisamment dense et étendu pour qu'il puisse subsister et continuer de se développer. Au centre de chaque module entre les UP un module artificiel de refuge pour les juvéniles a été disposé, en attendant la croissance des herbiers. L'ensemble représente donc 250 m² dont 80 m² de transplantation d'herbier comportant un total de 8000 faisceaux transplantés.

Le suivi de l'évolution des herbiers transplantés a été réalisé entre avril 2018 et avril 2021 par mesure de densité des faisceaux et d'extension des rhizomes. Les mesures de densité ont été effectuées sur 3 UP de 3 modules 2 fois par mois avec un quadrat de 20 cm x 20 cm. L'extension des rhizomes a été mesurée avec un mètre ruban à partir de l'extérieur de chaque côté des UP échantillonnées. La transplantation et les suivis ont été réalisés en PMT au vu de la faible profondeur de la zone.

Résultats

Au cours des premiers suivis entre avril 2018 et août 2018 (période de densité maximale avant la perte des feuilles saisonnières) la densité est passé de 80 ± 0 faisceaux/m² à 643 ± 211 faisceaux/m². Par comparaison la densité de l'herbier de cymodocée naturelle variait, en 2017, entre 700 et 2 000 faisceaux/m². La densité a ensuite régressé naturellement jusqu'au mois de mars 2019, sans toutefois descendre en dessous de la valeur initiale d'avril 2018. En avril 2019, un an après les premières mesures de suivi, les densités atteignaient déjà 228±77 faisceaux/m², soit un herbier presque 3 fois plus dense qu'en avril 2018. En août 2019 la densité la plus importante à été observée avec de 878 ± 252 faisceaux/m². Encore 1 an après en août 2020 les densités observées étaient inférieures à celles observées en août 2018 et 2019 avec 547 ± 147 faisceaux/m². En comparaison la densité de l'herbier naturel en août 2019 était de 1279± 947 faisceaux/m² et de 1854 ± 479 faisceaux/m² en août 2020 (Couvray et al., 2021).

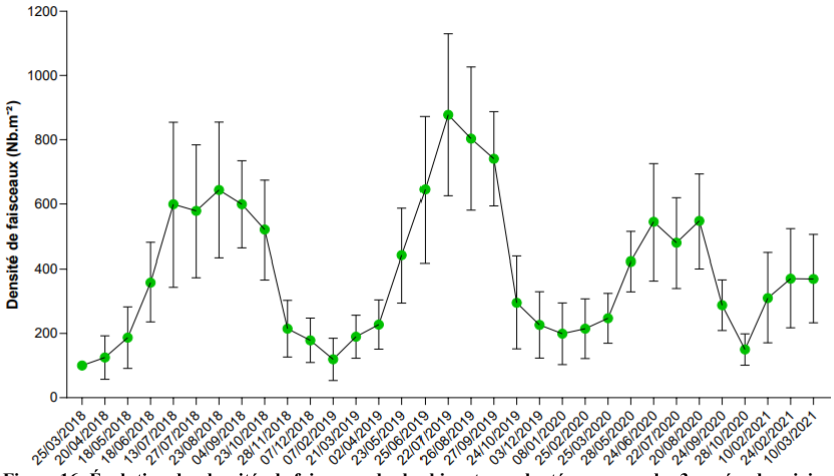


Figure 16: Évolution des densités de faisceaux des herbiers transplantés au cours des 3 années de suivis. Source : Couvray et al., 2021. Projet SAR-LAB. *Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc*. Rapport intermédiaire.Phase 2 : 2019 – 2020. IOPR (Institut Océanographique Paul Ricard).

Concernant l'extension des rhizomes en dehors des cages de protection, les mesures de juillet 2018 montrent un gain de plus de 30 cm. En août 2019 l'extension des rhizomes en dehors des cages atteignait plus d'1 m. Les rhizomes ont fini par se rejoindre entre les UP au sein des modules. Cependant entre 2019 et 2020 la progression des rhizomes en dehors des cages de protections est presque nulle. L'extension des herbiers autour des modules de transplantations n'est donc pas significative sur cette période.

Figure 17: Exemple de densification des parcelles d'herbiers transplantés. Source : Couvray et al., 2020. Projet SAR-LAB. *Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc.* Rapport intermédiaire. Phase 1 : 2017 – 2018. IOPR (Institut Océanographique Paul Ricard).

Le dispositif de protection des transplantations semble avoir été efficace. Les herbiers ont pu se développer sans subir de broutage de la part de certaines espèces de poisson. En revanche les pousses à l'extérieur des cages présentaient des traces de broutages. D'autres cages de protections ont donc été installées au printemps 2020 pour protéger les rhizomes en expansions. Au cours du temps les cages ont été colonisées par des algues et des feuilles mortes de posidonie se sont retrouvées piégées dans les grilles. Un nettoyage des cages a donc été réalisé à la fin du mois de juillet 2020. Les cages ont ensuite été retirées en 2021 pour permettre à l'herbier de se développer naturellement.

La diminution de la densité des faisceaux observée sur les herbiers transplantés entre août 2019 et août 2020, pourraient s'expliquer par la présence des algues et feuilles mortes présentent sur les cages. En obstruant ainsi la lumière nécessaire aux faisceaux et à la plante pour se développer, les cages auraient également pu jouer un rôle limitant sur la croissance de l'herbier. Ceci pourrait expliquer la diminution de la densité des faisceaux de l'herbier transplanté en comparaison à l'augmentation de la densité des faisceaux de l'herbier naturel sur la même période.

Au cours des 3 ans de suivi la densité des herbiers transplantés a globalement augmentée. Les herbiers ont également gagné en superficie principalement sous les cages de protection à l'intérieur des modules. Des suivis de l'évolution des surfaces des herbiers transplantés et des herbiers naturels seront réalisés au moins jusqu'en 2022, pour conclure sur la réussite de cette opération de transplantation d'herbiers.

IV.3. La Grande Canarie

L'étude décrite dans cette partie n'a pas pour objectif de restaurer une zone dégradée, mais de tester la germination *in vitro* des graines de cymodocée puis la transplantation des plants *in situ*.

IV.3.1. Contexte et localité

La Grande Canarie, est une île espagnole située dans l'océan Atlantique, au large des côtes du Maroc, faisant partie de l'archipel des Canaries. Plus précisément le site de transplantation choisi est localisé sur la côte Est, en face de la commune de Taliarte.

La côte nord de l'île est influencée par les alizés venant du nord-est (Huetz de Lemps, 1969), qui entraînent un fort hydrodynamisme, avec de forts courants et des périodes de houle fréquentes. Cet hydrodynamisme élevé, ainsi que la nature rocheuse du fond, restreint les habitats propices à l'établissement d'herbiers de *Cymodocea nodosa*. Cependant, certaines zones sont partiellement protégées de l'action des vents dominants et leurs fonds sous-marins, peu profonds, présentent des zones avec un substrat sableux (parfois sablo-vaseux) qui permettent le développement de l'espèce. Les prairies d'herbiers sont généralement situées le long des côtes sud-est, semi-exposées et abritées. Les herbiers sont généralement, présents sous forme de plaques irrégulières en raison des conditions du milieu. La profondeur minimale que cette espèce peut tolérer est généralement imposée par l'instabilité du substrat ou l'exposition à marée basse. La profondeur maximale à laquelle elle pousse est conditionnée par la disponibilité de la lumière, atteignant 35 m de profondeur dans certaines localités. À ces profondeurs, la cymodocée est moins abondante et dans certains endroits elle est progressivement remplacée par *Caulerpa prolifera*.

IV.3.2. Problématique

Bien que des programmes de restauration aient été menés à partir de matériel végétal collecté dans des prairies donneuses, des chercheurs se penchent sur une autre approche pour diversifier et améliorer les techniques de restauration des herbiers. En raison de la charge logistique liée au déplacement des plantes

matures, l'utilisation de graines germées et de plants développés *in vitro* est considéré comme une alternative plus rentable (Zarranz et al., 2010).

Cette méthode est aussi susceptible d'éviter d'endommager les herbiers donneurs d'où les unités de plantation (constituées de plantes adultes) sont extraites. Le repiquage des graines germées augmente également la variabilité génétique dans une zone où un herbier doit être restauré ou replanté.

Cette phanérogame marine produit des banques de graines tout au long de l'année, mais les taux de germination dans la nature peuvent être variables (taux de germination autour de 50 % mais parfois peut être nul). De plus, une fois les graines germées, le recrutement réel peut être faible (Caye et al., 1986). D'où l'intérêt de cette étude qui permet d'étayer cette connaissance.

IV.3.3. Plan d'expérimentation

Dans cette étude, une méthodologie a été mise au point pour faire germer et cultiver des faisceaux de cymodocée dans des conditions de laboratoire, pour ensuite les réintroduire dans le milieu et valider ainsi une nouvelle approche pour la restauration des herbiers. En effet cette méthodologie fournit des semis qui pourraient être employés pour la restauration à petite échelle de zones stratégiques dégradées, ou pour améliorer la conservation d'herbiers existants en introduisant des variations génétiques dans le but de prévenir des épidémies par exemple. Les graines utilisées dans cette étude ont été récoltées en plongée sous-marine en mai 2007 dans un herbier de *Cymodocea nodosa* située au large de Juan Grande sur la côte sud-est de La Grande Canarie. Une fois récoltées, les graines ont été placées dans un filet en nylon pour les maintenir humides pendant le transfert au laboratoire (dans les 2 h suivant le prélèvement).

Figure 18: (A–C) Trois stades de développement différents : (A) Stade I, graines en germination ; (B) Stade II, allongement du cotylédon ; (C) Stade III, développement des premières nouvelles feuilles. Source : Zarranz et al., 2010. ***Restoration of Cymodocea nodosa seagrass meadows through seed propagation: germination in vitro, seedling culture and field transplants.***

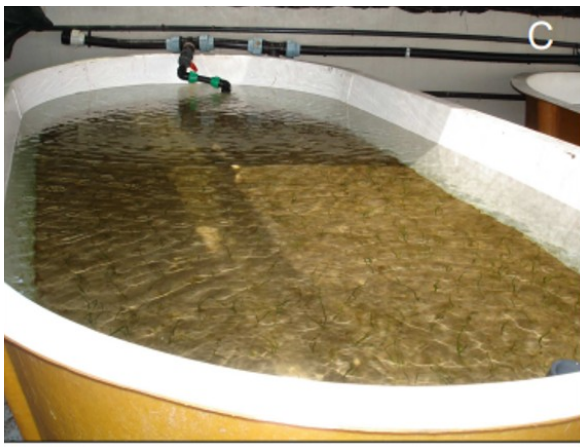


Figure 19: Acclimatation des plantules en réservoirs. Source : Zarranz et al., 2010. ***Restoration of Cymodocea nodosa seagrass meadows through seed propagation: germination in vitro, seedling culture and field transplants***

Une fois au laboratoire les graines sont disposées sur un substrat riche en nutriment auquel de l'eau à salinité ambiante soit 36,6 PSU est ajoutée. Le tout est placé dans une chambre de culture à une température de 24°C et exposé à une alternance lumière/obscurité. Pour lancer la germination de la graine, les scientifiques induisent un choc hyposalin qui abaisse la salinité de l'eau de moitié (18 PSU) pendant 30 jours. Les graines sont ensuite mises à nouveau dans une eau à 36,6 PSU pour les acclimater à la salinité ambiante. Les graines vont alors germer et se développer pendant 3 mois. La première étape est l'apparition d'un germe, puis le développement des cotylédons (feuilles primordiales), et enfin le développement des autres feuilles. La dernière étape avant de transplanter les cymodocées dans le milieu naturel, consiste à les laisser se développer et s'acclimater aux conditions du milieu naturel dans une eau à 21 °C à salinité ambiante (36,6 PSU) dans un courant permanent. Après 45 jours des feuilles et des racines sont apparues et les plants sont prêts à être déplacés. Environ 60 % des graines cultivées ont germé après trois mois (Zarranz et al., 2010).

IV.3.4. Transplantations

La zone choisie pour l'expérimentation de transplantation est une zone côtière (océan ouvert) abritée des vents de Nord Est où le littoral est orienté Sud-Est. La zone est dite semi-exposée. La transplantation a été réalisée dans 6 m de profondeur, en bordure d'une prairie naturelle, présentant donc les conditions idéales pour le développement de la plante.

Matériels et méthodes

En mai 2008, les plantes ayant développé suffisamment de racines et de pousses ont été transférées sur la zone. Trois techniques de transplantation ont été comparées. La première technique consiste à attacher avec du fil des plants sur 3 filets en nylon de 20 cm x 20 cm. 20 plants sont disposés sur chaque filet. On a donc 60 plants au total pour une densité de 500 plants/m². La seconde technique consiste à regrouper des plants dans 36 compartiments (de 3 × 3 × 5 cm) répartis sur 3 plateaux (12 compartiments par plateau) biodégradables faits de poussière de fibre de coco compressée. 3 plants sont disposés dans chaque compartiment soit un total de 108 plants avec une densité 3 333 plants/m². Pour la dernière technique un ensemble de 76 plants ont été plantés directement dans les sédiments avec une densité de 3 377 plants/m². Les filets et les plateaux ont été ancrés dans le sédiment à l'aide d'agrafes métalliques. Pendant neuf mois, le suivi des transplantations a été effectué en mesurant le pourcentage de survie et la longueur moyenne des feuilles pour chaque méthodologie de transplantation.

Résultats

Après la transplantation, les taux de survie des plantes fixées sur les filets et sur les plateaux ont chuté jusqu'au mois de septembre. Par la suite, les plants attachés aux filets sont morts en 2 mois et seuls quelques fragments nécrotiques sont restés attachés, tandis que les plants sur les plateaux se sont stabilisés à 40 % de taux de survie. Les meilleurs résultats ont été obtenus par transplantation directe dans le substrat. Le taux de survie des plants directement transplantés dans le substrat est resté stable jusqu'au mois d'octobre. Puis ce taux a légèrement régressé jusqu'au mois de février 2009 pour atteindre 80 % de survie. Les plants ont survécu à un hiver et forment un petit patch dans lequel un nouveau tissu de rhizomes plagiotropes a été observé. La longueur des feuilles était très variable lors de la transplantation des plants, mais s'est finalement stabilisée à la fin de l'expérience.

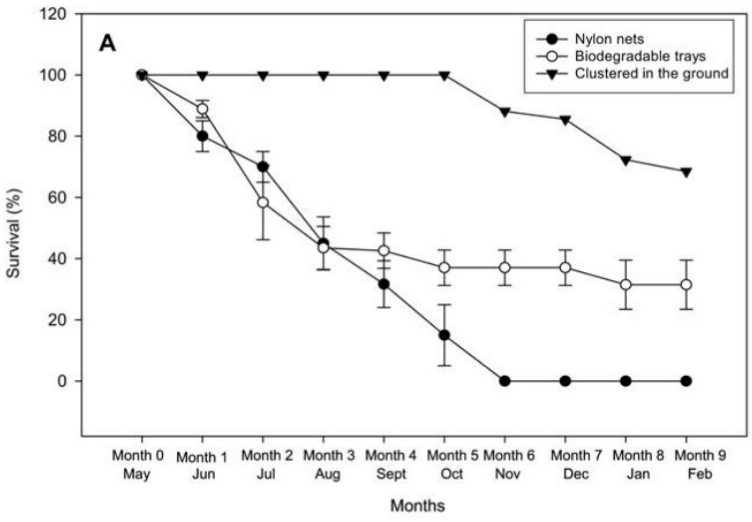


Figure 20: Taux de survie des trois différentes méthodologies de transplantation. Source : Zarranz et al., 2010. ***Restoration of Cymodocea nodosa seagrass meadows through seed propagation: germination in vitro, seedling culture and field transplants.***

Cette expérimentation de germination puis le transplant de faisceau en milieu naturel est intéressante mais les quantités et les surfaces transplantées ne sont pas suffisamment importantes pour conclure à un réel succès. De plus le taux de survie, à l'exception des faisceaux transplantés à même le substrat, est faible. Pour justifier le succès relatif de leur expérimentation de transplantation les chercheurs se basent sur d'autres recherches. « D'après Kirkmann (1998) et Marbà et al. (2004), le développement de rhizomes plagiotropes signifie l'établissement d'une croissance clonale nécessaire à la formation de nouveaux patchs de cymodocée. Marbà et al. (2004) ont rapporté que 50 à 70 % des semis d'herbiers marins meurent dans la nature avant que la croissance clonale commence » (Zarranz et al., 2010). Ils en concluent donc qu'au bout de 9 mois la

croissance clonale est déjà en place et donc que le taux de survie devrait être bon. Une prolongation du suivi de la croissance des plants aurait permis de valider cette hypothèse.

Ils concluent également que la technique de transplants sans accroche dans le sédiment n'est pas aussi critique que mentionné dans d'autres publications ou rapports. L'hydrodynamisme du site de transplantations est un paramètre déterminant pour l'accroche ou non des plants dans le substrat.

Concernant la variation de taille des feuilles, ils attribuent cette observation au broutage par certaines espèces de poisson. L'explication d'un meilleur taux de survie des techniques par plateaux et par rhizomes dans le sédiment, s'expliquerait par le fait que le développement de rhizome plagiotrope pourrait avoir atténué les attaques d'herbivores, lorsque les semis ont été regroupés avec une densité de 3 000 plants/m².

V. Discussion

À l'échelle globale, les herbiers à *Cymodocea nodosa* semblent être en expansion, d'une part parce que le développement de l'espèce est favorisé par le réchauffement de l'eau de mer, et d'autre part, parce qu'elle bénéficie du déclin des herbiers à *Posidonia oceanica*, la matte morte de *P. oceanica* étant à certains endroits colonisée par *C. nodosa* (Boudouresque et al., 2021). Cependant, sur plusieurs localités, la cymodocée a subi d'importantes dégradations. La question liée à sa restauration est donc pertinente dans certains cas.

La cymodocée semble être une plante robuste qui s'adapte bien et donne de bons résultats à la suite des transplantations, comme on a pu le voir dans les différents projets présentés plus haut. Elle grandit et s'étend rapidement par ses rhizomes plagiotropes si les conditions environnementales lui sont favorables. Les projets présentés dans ce rapport ont été délibérément choisis pour leurs résultats positifs et encourageants. Mais il existe d'autres projets de restauration de l'herbier de cymodocée qui ont échoué comme celui réalisé au Portugal (Paulo et al., 2019). Après une saison de croissance, durant l'hiver 2009, une tempête a tout arraché y compris l'herbier naturel à proximité de la zone.

D'autres projets de restauration de l'espèce sont en cours de réalisation ou viennent d'être achevés et les résultats ne sont pas encore disponibles. Par exemple en Italie à Caleri au niveau du delta du fleuve Po et à Montefalcone dans le cadre du programme Interreg Italia-Croazia des comparaisons entre deux techniques avec mottes et rhizomes ont été réalisées, mais les résultats ne sont pas encore publiés. Le Marine Plant Ecology Research Group du CCMAR de l'université d'Algarve est également en cours de recherche et d'expérimentation sur des techniques de transplantation de l'espèce.

La transplantation

Dans ce document, divers environnements et différentes techniques employées ont été exposés pour tenter de procéder à une comparaison. Cependant étant donné les différences environnementales et les caractéristiques spécifiques à chaque zone géographique, comparer les projets entre eux n'a pas vraiment de sens. Néanmoins on peut relever des résultats communs dans certains projets.

Les méthodes de transplantations manuelles par mottes ou par rhizomes semblent donner des résultats similaires en taux de survie et d'expansion de la superficie. Bien que certaines études indiquent que l'utilisation de mottes réduit le stress de la plante lors de la transplantation et augmente ces chances de survie (Fonseca et al., 1998), dans l'étude de cas de Venise en 1994-1995 la différence semble négligeable. En revanche, la technique dite par rhizomes semble moins impactante pour l'herbier donneur. Cette technique semble donc être à privilégier.

L'utilisation d'accroches dans le sédiment reste encore sujet à controverse. Comme on a pu le voir dans le projet de restauration de la Lagune du Brusc et de la Grande Canarie, la fixation à l'aide d'agrafes

n’est pas nécessaire pour la survie des plants tant que la zone de transplantation reste relativement abritée. Bien qu’il soit préférable de ne rien ajouter dans le sédiment lors du transplant pour des raisons évidentes de pollution, cela peut cependant être nécessaire dans un milieu à fort hydrodynamisme.

Les bons résultats obtenus lors des germinations *in vitro* et le taux de survie de l’échantillon transplanté *in situ* à même le sédiment et sans attache (Zarranz et al., 2010), ne suffisent pas à conclure à un réel succès dans le temps. Cependant cette étude permet de valider la partie germination *in vitro* avec un taux de succès de 60 %, et démontre aussi la faisabilité de l’opération de transplantation sur le court terme. Cette approche permet d’une part de réduire l’impact sur le site donneur, mais également les coûts et d’autre part d’introduire une diversité génétique dans des zones présentant une faible diversité génétique, prévenant ainsi d’éventuelles épidémies. Une autre étude sur le sujet de la conservation et la germination *in vitro* donne des indications pour un stockage sur du long terme (ce qui permet d’avoir une banque de graines avec une diversité génétique et des semences disponibles tout au long de l’année) et pour optimiser la germination des plants (l’apport de lumière serait plus important pour les plantules que la fertilisation) (Alexandre et al., 2018).

Concernant la transplantation mécanique, bien que les résultats semblent intéressants avec un faible impact, voire neutre après plusieurs années, sur le site donneur et un bon taux de survie sur le site transplanté, cette technique n’est pas appropriée à beaucoup de localités. De plus le rapport entre le coût, les moyens déployés et les bénéfices ne semble pas positif d’après les chercheurs italiens. Pour Adriano Sfriso (Professeur en écologie en charge des projets de restauration de la Lagune de Venise) le seul cas qui justifierait d’employer de tels moyens serait pour déplacer une importante superficie d’herbiers vouée à disparaître, suite à la réalisation de travaux où se trouverait un herbier. Toujours d’après Adriano Sfriso, les transplantations faites avec de petites mottes ou des rhizomes peuvent facilement être réalisées par n'importe qui à faible coût et avec peu d'effort. Ceci permet également une plus grande diffusion des plantes et en 3-4 ans de donner de meilleurs résultats. D’après son expérience, si les conditions environnementales sont appropriées, de petits déclencheurs suffisent et la recolonisation se produit alors naturellement.

Dans un milieu fermé ou semi-abrité disposant d’un faible hydrodynamisme, les scientifiques s’accordent à dire que si les conditions sont favorables à l’installation ou à la recolonisation d’un herbier suite à l’amélioration des conditions environnementales, alors une seule petite quantité de transplants bien localisée serait plus rentable que d’implanter de grandes surfaces. Pour réaliser une « bonne » restauration, plutôt que la quantité de plants, c’est la densité des faisceaux transplantés qui semble la plus importante pour améliorer le taux de survie et de croissance, augmentant ainsi la structure et la rigidité de l’herbier (Zarranz et al., 2010).

En revanche en milieu ouvert, comme c’est le cas au Portugal (Paulo et al., 2019), les chances de survie d’un herbier transplanté dans un milieu ouvert sujet à d’importantes tempêtes hivernales (mais également au broutage), semblent être liées à la superficie de UP de l’herbier transplanté. L’étude conclue que comme la restauration n’a réussi que dans les configurations utilisant les plus grandes tailles d’UP, la taille des mottes d’herbiers transplantées est déterminante. Il semble que cette zone côtière ouverte soit réceptive à la recolonisation des herbiers et que le plus grand obstacle à surmonter soit une perturbation post-plantation causée par les tempêtes et le pâturage. L’étude conclue que les futures tentatives de restauration envisagent l'utilisation de grandes greffes (dans ce cas sur plusieurs mètres carrés) pour augmenter la probabilité de résister aux tempêtes.

Pour la lagune du Brusc, l’expansion naturelle de la zostère semble être plus importante à moyen terme que celle de la cymodocée bien que celle-ci ait été renforcée par des transplantations. Une des conclusions tiré par l’IOPR serait que le milieu n’a pas réussi à revenir à son état d’origine à moyen terme. Cependant la cymodocée croit au milieu de la zostère, cette dernière pourrait donc servir de « facilitateur écologique » pour la réimplantation de la cymodocée à long terme : à suivre dans le temps.

Concernant le rapport coût/réalisation/bénéfice, il est très difficile de donner une réponse même approximative. D’une part, car il n’y a pas (pour l’instant) de données publiques, d’autre part, car les localités, les conditions environnementales, les techniques et les ressources employées sont très diverses. Cependant au vu des résultats obtenus et des observations scientifiques sur les précédents programmes, la restauration de

cette espèce nécessite peu de moyen en comparaison à celle d'autres herbiers comme *posidonia oceanica* par exemple. La mise en œuvre de transplantations peut être relativement simple à mettre en place et les premiers résultats sont visibles après quelques mois seulement.

Les travaux de recherche d'Alexandre Meinesz (professeur émérite du laboratoire ECOSEAS, Université de Nice) l'ont amené à penser que la transplantation de la cymodocée est assez facile à condition de la transplanter dans un site favorable où la salinité de l'eau peut être inférieure à 30 PSU (fonds sablo-vaseux avec percolation de la nappe phréatique, proximité de rivières, étangs, etc.). De larges disparitions de pelouses à cymodocées qu'il a observé au cours de ses travaux sont uniquement dues aux pompages d'eau douce effectués à terre entraînant une disparition des nappes phréatiques qui percolaient à travers les petits fonds côtiers (Meinesz., 2021).

Un problème récurrent concernant les publications traitant de la restauration des herbiers en mer Méditerranée est que la majeure partie de la littérature traite de techniques, décrit des expériences à une échelle très locale et ne concerne que le court terme (Boudouresque et al., 2021).

La restauration

Une partie des scientifiques qui travaillent sur le sujet semble de plus en plus réticente à la transplantation et préfère insister sur l'importance de la non dégradation, plutôt que d'employer des techniques de restauration dont la transplantation, comme argument pour justifier la destruction d'un herbier « naturel ».

Dans une publication intitulée « Restoration of Seagrass Meadows in the Mediterranean Sea: A Critical Review of Effectiveness and Ethical Issues » Boudouresque et al., exposent certains principes et contradictions autour de la restauration des herbiers marins dont la cymodocée. Ils expliquent que de façon plus générale la restauration des herbiers ne doit pas être employée comme solution à tout problème de dégradation en utilisant une littérature scientifique parfois mal interprétée, mais elle doit être basée sur les besoins réels et justifiée au niveau local.

Ils notent également qu'il faut faire une différence entre un repeuplement dans une zone où l'herbier a partiellement voir totalement disparu et une création d'habitat, c'est-à-dire la transplantation d'une espèce d'herbier dans un habitat qui n'a jamais abrité l'espèce, ce qui se résumerait par la destruction d'un habitat (substrat sableux nu par exemple), au profit d'un autre.

Un autre point concernant la transplantation est qu'elle doit s'intégrer dans un programme plus vaste de restauration écologique, en privilégiant d'abord la régénération naturelle de l'herbier suite à la mise en place d'actions permettant d'améliorer les conditions du milieu et visant le retour aux conditions environnementales avant dégradations. Le coût relatif à une relocalisation d'un herbier doit être comparé à l'investissement permettant l'amélioration des conditions environnementales (par exemple, ancrage écologique, traitement des eaux usées, interdiction du chalutage et de l'ancrage des navires, interdiction de la création ou de l'expansion des ports et des marinas, interdiction de l'élimination de la banquette de *P. oceanica* sur les plages, etc.) (Boudouresque et al., 2021). Si après la mise en place de différentes mesures de protection ou d'amélioration du milieu il n'y a pas de retour de l'herbier, alors une phase de transplantation peut être envisagée, en réalisant au préalable des expérimentations sur des petites surfaces pour valider la faisabilité.

Ils concluent en développant que les succès présents dans de la littérature méritent d'être réexaminés d'un œil critique. Une différenciation doit être faite quant aux raisons des régressions d'herbiers. Lorsqu'elles sont d'origine naturelle (tempêtes par exemple) la recolonisation naturelle est souvent relativement rapide. Cependant dans certaines zones localisées, un fort impact anthropique a pu être déterminé comme cause de dégradation, et peut nécessiter une restauration active de la part de l'Homme. Cependant la comparaison de la recolonisation naturelle à la suite d'un plan de restauration passif par rapport à la recolonisation assistée par des opérations de transplantations n'est pas systématique et mériterait d'être plus documenté.

VI. Conclusion

Les herbiers de cymodocée sont des habitats d'intérêt écologique et économique. Leur restauration dans des secteurs où ils ont fortement régressé voire disparu, pourrait donc avoir un intérêt pour retrouver l'état initial d'un biotope.

Cette étude a pour but d'aider à la compréhension de la restauration de la cymodocée notamment grâce à différentes techniques de transplantations. On peut considérer qu'il existe aujourd'hui un ensemble de solutions techniques fiables pour la réimplantation des phanérogames dont la cymodocée. Bien que l'évaluation à long terme ne soit pas toujours réalisée, il apparaît que des résultats intéressants peuvent être obtenus par l'emploi des principales techniques analysées dans ce rapport. En effet la transplantation constitue un outil de restauration efficace, à condition qu'un processus décisionnel cohérent soit mis en œuvre, dans un contexte de gestion globale des milieux littoraux à l'échelle régionale. Il convient donc dans un premier temps d'éliminer (ou de réduire drastiquement) les facteurs de dégradation ou de perturbation présents, et d'empêcher l'apparition de nouvelles perturbations pour permettre au milieu de retrouver les conditions propices à la récupération naturelle. Le cas échéant, la transplantation peut être utilisée pour aider l'herbier à se reconstruire.

Aujourd'hui, bien que la restauration de la cymodocée ne soit pas le sujet le plus documenté, la mise en commun des différentes méthodes et résultats déjà obtenus offre des possibilités d'échanges et de comparaison pour les gestionnaires du milieu marin.

Outre l'importance de développer les techniques de restauration des herbiers pour aider au mieux la nature à se reconstruire dans certains cas, il apparaît comme primordial de changer d'approche autour du vivant. L'impact de l'Homme sur l'environnement ne peut pas être systématiquement compensé ou diminué par des actions d'ingénieries écologiques par exemple. Les principaux efforts devraient à l'avenir se porter davantage sur la non dégradation et la conservation des milieux naturels.

Références bibliographiques

Alberto F., Massa S., Manent P., Diaz-Almela E., Arnaud-Haond S., Duarte C.M., Serrao E.A., 2008. Genetic differentiation and secondary contact zone in the seagrass *Cymodocea nodosa* across the Mediterranean–Atlantic transition region.

Alexandre A., Silva J., and Santos R., 2018. Light Is More Important Than Nutrient Ratios of Fertilization for *Cymodocea nodosa* Seedling Development.

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 des herbiers à Posidonia oceanica. RAMOGE pub. 202 pp.

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. Review Water 2021, 13(8), 1034.

Caye G., Meinesz A., 1985. Observations on the vegetative development, flowering and seeding of *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson, on the Mediterranean coast of France. Aquat. Bot. 22: pp. 277–289.

Caye G., Meinesz A., 1986. Experimental study of seed germination in the seagrass *Cymodocea nodosa*.

Couvray S., Simide R., Kirchhofer D., Vion A., Bonnefont J-L., 2020. Projet SAR-LAB. Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc. Rapport intermédiaire. Phase 1 : 2017 – 2018. 140 pp.

Couvray S., Madelaine C., Vion A., Simide R., Kirchhofer D., Bunet R., 2021. Projet SAR-LAB. Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc. Rapport intermédiaire. Phase 2 : 2019 – 2020. 100 pp.

Curiel D., Scarton F., Rismondo A., Marzocchi M., 2003. Pilot transplanting project of *Cymodocea nodosa* et *Zostera marina* in the Lagoon of Venice: Results and Perspectives.

Curiel D., Pavelic S., Kovacev A., Miotti C., Rismondo A., 2021. Marine Seagrasses Transplantation in Confined and Coastal Adriatic Environments: Methods and Results. Review Water 2021.

Fernandez Torquemada Y., Sanchez Lizaso J.L., 2006. Effects of salinity on growth and survival of Cymodocea nodosa (Ucria) Ascherson and Zostera noltii Hornemann.

Feugas M.P., Lamare V., Pergent G., *in :* DORIS, 19/01/2021 : *Cymodocea nodosa* (Ucria) Asch., https://doris.ffessm.fr/ref/specie/762.

Fonseca M.S., Kenworthy J., Thayer G.W., 1998. Guidelines for the Conservation and Restoration of Seagrasses in the United States and Adjacent Waters. NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No. 12. NOAA Coastal Ocean Office, Silver Spring, MD. 222 pp.

García Gutiérrez D., (Tuteur : Dr. Tuya Cortés F.) 2019. Spatial and temporal variability of *Cymodocea nodosa* meadows in Gran Canaria island. Bachelor thesis. Facultad de Ciencias del Mar.

Huetz de Lemps A., 1969. Le climat des îles Canaries. Société d'édition d'enseignement supérieur. 224 pp.

Katwijk M.M., Bos A.R., de Jonge V.N., Hanssen L.S.A.M., Hermus D.C.R., de Jong D.J., 2008. Guidelines for seagrass restoration : Importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects.

Kirchhofer D., Miard T., Couvray S., Bunet R., Aublanc P., Lecaillon G., Lourié S. M., Bonnefont J.L., 2016. Projet Landeau Synthèse 2015. Institut Océanographique Paul Ricard. 41 pp.

Manez-Crespo J., Tuya F., Fernandez-Torquemada Y., Royo L., del Pilar-Ruso Y., Espino F., Manent P., Antich L., Castejon-Silvo I., Curbelo L., de la Ossa J.A., Hernan G., Mateo-Ramírez A., Pereda-Briones L, Jimenez-Ramos R., Egea L.G., Procaccini G., Terrados J., Tomas F., 2020. Seagrass *Cymodocea nodosa* across biogeographical regions and times Differences in abundance, meadow structure and sexual reproduction.

Meinesz A., 2021. Protéger la biodiversité marine. ODILE JACOB. ISBN : 978-2-4150-0011-0. 297 pp.

Nunes A., Oliveira G., Mexia T., Valdecantos A., Zucca C., Costantini E.A.C., Abraham E.M., Kyriazopoulos A.P., Salah A., Prasse R., Correia O., Milliken S., Kotzen B., Branquinho C., 2016. Ecological restoration across the Mediterranean Basin as viewed by practitioners, Science of the Total Environment, 566-567, pp. 722-732.

OSPAR Commission (lead author Beatriz Ayala)., 2010. Background Document for *Cymodocea* meadows. Biodiversity Series, Publication Number: 487/2010. ISBN 978-1-907390-28-9.

Paulo, D.; Cunha, A.H.; Boavida, J.; Serrão, E.A.; Gonçalves, E.J.; Fonseca, M., 2019. Open coast seagrass restoration. Can we do it? Large scale seagrass transplants. Front. Mar. Sci. pp. 1–15.

Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M. 2012. Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques. Gland, Suisse et Malaga, Espagne : IUCN. 80 pp.

Reyes, J., M. Sanso´n and J. Afonso-Carrillo. 1995. Distribution and reproductive phenology of the seagrass Cymodocea nodosa (Ucria) Ascherson in the Canary Islands. Aquat. Bot. 50 : pp. 171 – 180.

Sfriso, A.; Buosi, A.; Tomio, Y.; Juhmani, A.S.; Facca, C.; Sfriso, A.A.; Franzoi, P.; Scapin, L.; Bonometto, A.; Ponis, E.; et al. 2019. Aquatic Angiosperm Transplantation: A Tool for Environmental Management and Restoring in Transitional Water Systems. Water 2019.

Short F.T., Carruthers T.J.R., Waycott M., Kendrick G.A., Fourqurean J.W., Callabine A., Kenworthy W.J., Dennison, W.C., 2010. *Cymodocea nodosa*. The IUCN Red List of Threatened Species 2010.

Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group., 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Tagliapietra D., Baldan D., Barausse A., Buosi A., Curiel D., Guarneri1 I., Pessa G., Rismondo A., Sfriso A., Smania D., Ghirardini A.V., 2018. Protecting and restoring the salt marshes and seagrasses in the lagoon of Venice.

Terrados J., Borum J., 2004. Why are seagrasses important? Goods and services provided by seagrass meadows. In: (J. Borum, C.M. Duarte, D. Krause-Jensen and T.M. Greve, eds) European seagrasses: an introduction to monitoring and management. The M & MS project, Copenhagen. pp. 8–11.

UNEP-Nairobi Convention/WIOMSA., 2020. Guidelines for Seagrass Ecosystem Restoration in the Western Indian Ocean Region. UNEP, Nairobi. 63 pp.

Zarranz M.E., Gonzalez-Henriquez N., Garcia-Jimenez P., Robaina R.R., 2010. Restoration of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows through seed propagation: germination in vitro, seedling culture and field transplants.

Annexe 6

Restauration de l'herbier de posidonie dans la lagune du Brusc

Par Mathilde BOUE

Enjeux et contraintes de la restauration de la lagune du Brusc.

DU Restauration Ecologique des Petits Fonds Marins Cotiers.

Mai 2022

Préparé par

Mathilde Boué

Tutorat de

Fabrice Bernard

RESUME

Les petits fonds marins côtiers sont pourvoyeur de nombreux services écosystémiques que ce soit pour l'Homme ou pour la Nature. Les lagunes, de manières plus précises, sont des écosystèmes uniques, calmes et parfaitement adaptés aux besoins des juvéniles de poissons qui y passent un stade critique de leur vie. En plus des poissons, ce sont les oiseaux ainsi que les Hommes qui profitent de cet environnement particulier. Cependant, les pressions ne cessent de s'accumuler sur ces milieux très prisés. La Lagune du Brusc, dans le Sud-Est de la France n'y a malheureusement pas échappé et son état s'est dégradé de manière rapide et inexorable dans le début des années 2000. Afin de limiter les pertes, des actions de restaurations écologiques ont été menées au sein de la lagune pour lui rendre ses fonctions et son état d'origine. Certains herbiers de cymodocées et de zostères ont été replantés afin de favoriser le retour des prairies entières. Les fonctions de nurseries de la lagune ont été stimulées par la mise en place de BioHut et l'élevage de juvénile pour renforcer les populations. Beaucoup de restrictions ont dues être mise en place afin de rendre durable ces actions qui auraient été menacées par trop de pressions. Le suivi et la sensibilisation du public ont été les dernières action mises en place pour garantir la pérennité du projet. L'état de la lagune s'est rapidement amélioré notamment grâce à la limitation des dégradations.

ABSTRACT

Small coastal seabeds provide many ecosystem services for both humans and nature. The lagoons are unique ecosystems, calm and perfectly adapted to the needs of juvenile fish that spend a critical stage of their lives. In addition to the fish, birds and humans benefit from this special environment. However, the pressures do not cease to accumulate on these very specific environments. The Lagune du Brusc, in the South-East of France, has unfortunately not escaped it and its state has been rapidly and inexorably degraded in the early 2000s. To limit the losses, ecological restoration actions have been carried out within the lagoon to return it to its original state and functions. Some cymodocea and zostera beds have been replanted to promote the return of entire meadows. The nursery functions of the lagoon were stimulated by the establishment of BioHut and juvenile rearing to strengthen the populations. Many restrictions had to be put in place to make these actions sustainable, which would have been threatened by too much pressure. Monitoring and public awareness were the last things put in place to ensure the sustainability of the project. The state of the lagoon has rapidly improved thanks to the limitation of degradation.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction 1
1.1. Définition et principes de la restauration écologique en milieu marin 1
1.2. La législation autour de la protection et de la restauration des côtes 3
1.3. Le cas de la lagune du Brusc, historique et dégradation 4
2. Objectifs 7
3. Evaluation du projet de restauration 7
3.1. Réduction des pressions anthropiques 7
3.1.1. Etat des lieux et pressions anthropiques 7
3.1.2. Pressions non anthropiques 8
3.1.3. Actions mises en place 8
3.2. Actions pour la restauration du milieu 8
3.2.1. Restauration des fonctions de nurseries 10
3.2.2. Replantage des herbiers de cymodocées et de zostères 13
4. Suivis mis en place et résultats 16
5. Discussion 18
6. Conclusion 19

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Taux d'occupation des petits fonds de 0 à - 10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à nos jours 1
Figure 2 : réglementation concernant la législation en termes d'environnement marin 4
Figure 3 : Carte présentant la localisation et la superficie de la partie classée de la Lagune du Brusc ... 6
Figure 4 : Résumé des actions de restauration mises en place sur la lagune 9
Figure 5 : Cycle de vie des poissons de l'état de larve à celui d'adulte 10
Figure 6 : Capture des post-larves dans la lagune du Brusc 12
Figure 7 : Localisation des BioHut dans le port des Embiez 13
Figure 8 : Cartographie des habitats de la lagune du Brusc 14
Figure 9 : Mesures du recouvrement en cymodocées et zostères 15
Figure 10 : Repiquage de boutures de Cymodocea nodosa dans l'étang du Brusc 16
Figure 11 : Surface des herbiers de Cymodocées en 2017 puis 2019 18
Figure 12 : Surface des herbiers de Zostères en 2017 puis 2019 18

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Listage des habitats présents sur la lagune du Brusc 6
Tableau 2 : Listage des espèces d'intérêts présentes sur la Lagune du Brusc 7
Tableau 3 : Résumé des projets et appellation utilisé lors de la restauration de la lagune 9
Tableau 4 : Abondance et diversité des recrutements dans la lagune du Brusc en 2015 et 2016 17

1. Introduction

1.1. Définition et principes de la restauration écologique en milieu marin

Depuis une dizaine d'année, les projets, les études ou encore les travaux ayant pour thème la restauration écologique en zone côtière marine fleurissent. L'anthropisation des littoraux, la densification de la population ou encore l'artificialisation du littoral détruisent petit à petit nos côtes et les biocénoses qui s'y trouvent Figure 1. La Méditerranée n'est pas en reste notamment en raison de son statut particulier : enclavée au milieu des continents et extrêmement soumise aux pressions anthropiques (Lenfant *et al.* 2015). Par le passé et même encore aujourd'hui, les constructions humaines ne tenaient pas ou très peu compte de la présence d'écosystèmes sensibles et précieux pour le maintien de la biodiversité.

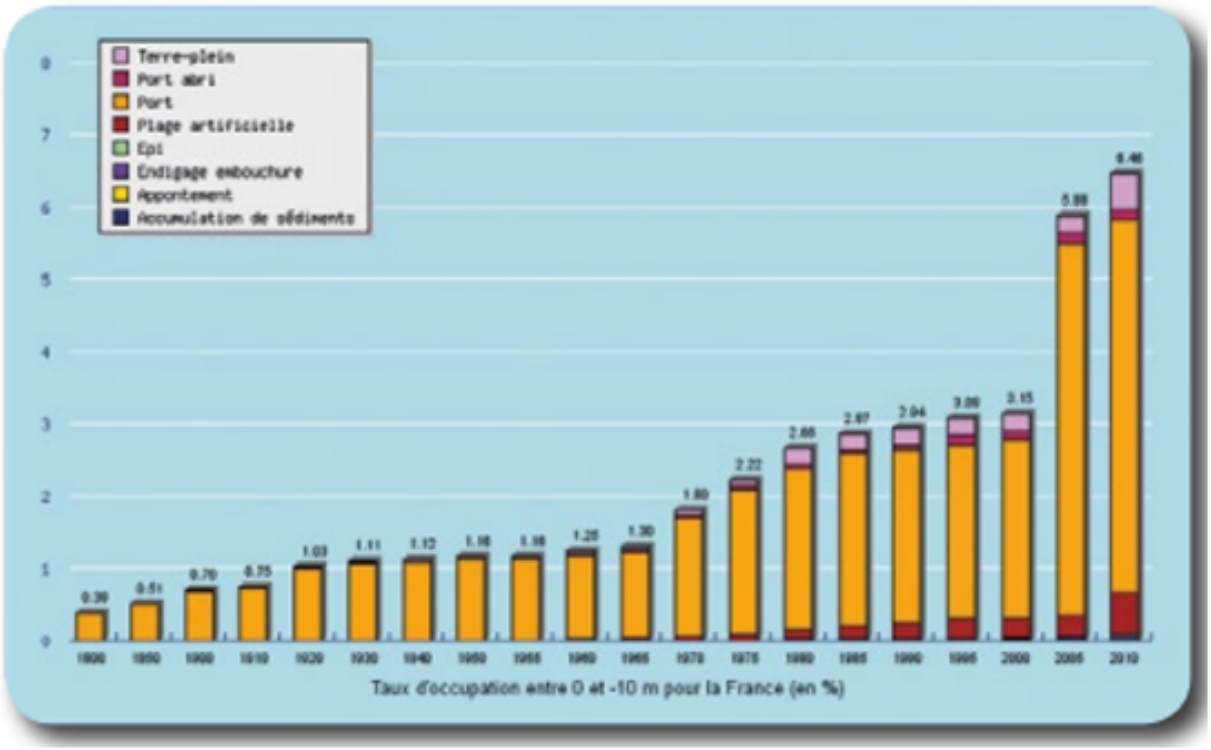


Figure 1 : Taux d'occupation des petits fonds de 0 à - 10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à nos jours. Données MEDA

Avec cet essor, la restauration écologique, un domaine des sciences marines relativement jeune a due voir le jour. La restauration écologique est jeune. Elle permet de passer d'un écosystème perturbé par les activités humaines le plus souvent, à un écosystème dit d'origine ou de référence. La particularité de la restauration est qu'elle prend en compte toutes les fonctions écologiques du milieu ainsi que tous ses acteurs contrairement à la réhabilitation par exemple. Elle ne restaure pas seulement une des nombreuses fonctions de l'écosystème. Il est également important de noter qu'il s'agit d'une action humaine volontaire mise en place pour la reconquête de la biodiversité. Enfin, la restauration ne peut avoir lieu qu'après la réduction des pressions appliquées à

l'écosystème. Afin de valoriser et de s'appuyer sur cet élan, de nouvelles solutions techniques et des ateliers ont vus le jour ce qui a permis de classer les actions menées en restauration marine en quatre catégories distinctes.

La première qui est souvent réputée la plus efficace est la restauration dites passive. Ce type de restauration part du principe que lorsque on libère la nature des pressions exercées par l 'Homme celle-ci se régénère seule grâce à sa forte capacité de résilience. L'une des actions de restauration représentant le mieux ce genre de mesures est celle de l'étang de Thau (Derolez *et al.* 2020). Celui-ci précédemment soumis à de nombreuses crises anoxiques a été libéré d'une grande partie des pressions humaines par la diminution des rejets humains dans ses eaux. S'en est alors suivi un renouvellement des eaux et l'amélioration de leur qualité. Cette meilleure qualité des eaux a permis une réduction de la biomasse phytoplanctonique et donc des crises anoxiques dans un délai assez court d'environ 3 ans. Evidemment, il arrive que pour des raisons internes ou externes les restauration passives soient des succès moins francs ou qui prennent plus de temps. Ici, on réduit au maximum l'action de l'Homme pour laisser la nature effectuer son travail.

Le deuxième type de restauration proposée est celle dite active et on en dénombre trois. Ici, on parle de réintroduire des espèces dites ingénieures qui permettent de recréer un habitat et donc les fonctions écosystémiques qui s'y rapportent. En Méditerranée, il existe quelques espèces comme les huitres plates ou des macroalgues (Gianni 2016) qui proposent ce genre de fonction. Cependant, la restauration active n'est viable à long terme que si elle est précédée d'un gros travail en amont de réduction des pressions. SI ce travail n'est pas effectué avant la restauration, les espèces réintroduites subiront le même sort que leurs prédécesseurs. Peu de restauration de ce genre ont vu des succès à grande échelle, il s'agit souvent d'expérimentations à petite échelle ou bien en laboratoire. Sur Terre, l'exemple de la réintroduction des palétuviers sur des zones marécageuses en est cependant un bon exemple.

La création et l'introduction de récifs artificiels ou d'habitats artificiels constitue la troisième des catégories (Georges *et al.* 2019). Il s'agit ici d'une méthode assez controversée et à laquelle sont largement préférées des techniques plus « douces ». En effet, introduire un habitat artificiel dans un milieu naturel ne fait pas vraiment parti de la catégorie de la restauration mais plutôt de celle de la réhabilitation. Il est vrai que les habitats sont rapidement colonisés mais sont rarement identiques aux anciens habitats détruits. Il arrive même parfois que des espèces indigènes le colonisent, ce que soutient leurs détracteurs. La vérité, comme souvent, se trouve certainement au milieu, entre les oasis de vie que ces récifs proposent et le risque d'attirer des espèces étrangères ou de créer de nouveaux écosystèmes au lieu de restaurer les anciens.

La dernière des catégories de restauration est celle qui consiste à valoriser les ouvrages humains. Une des fonctions la plus restaurée est celle des nurseries dans les ports (Lecaillon *et al.* 2011). Les nurseries étant immensément dégradée, le travail à faire dessus est conséquent. La façon la plus simple de restaurer cette fonction est de complexifier la structure 3D des ports par l'ajout de structure. De nombreuses villes ainsi que de nombreuses société crée et valorise des structures accueillant les juvéniles pour leur permettre de migrer en sécurité vers la vie adulte. Même si à

petite échelle, l'efficacité est assez frappante il faudrait vérifier cette dernière à plus grande échelle pour valider son impact à plus long terme.

1.2. La législation autour de la protection et de la restauration des côtes

Afin de protéger ces milieux, il est important d'avoir une législation sur laquelle s'appuyer pour pouvoir défendre les droits de l'environnement. Cependant, nous allons voir que celle-ci reste assez faible ou peu codifiée bien qu'en développement depuis les années 1970. La première échelle de protection à laquelle s'intéresser est évidemment internationale. Peu de textes relatifs à la protection de l'environnement et encore moins à la protection du milieu marin existe. Ces textes permettent notamment une prise de conscience générale de la nécessité de protection et lance l'effort collectif. On peut notamment citer la convention de RAMSAR (1971) pour les zones humides ou encore celle de Barcelone (1976) pour la protection de la Méditerranée (De Klemm 1990). D'autres sommets ont également été réunis comme Rio mais rares sont les décisions qui finissent par être tenues. Ces conventions ont pour but d'unifier les codes et de proposer un fil rouge pour protéger l'environnement marin afin d'éviter au maximum ses dégradations.
L'échelle inférieure est celle de l'Union Européenne. Ici, la volonté de préserver les milieux et les écosystèmes associés à vue une nette progression positive depuis une vingtaine d'années. La première mesure forte est celle de 1992 qui a vu naître le réseau Natura 2000 grâce à la mise en place d'une directive cadre majeure : la directive habitat (CEE 92/43). Natura 2000 permet la protection grâce à différents statuts de zones terrestres ou marines particulièrement rares ou vulnérables comme la lagune. Bien qu'utile, le degré de protection associé à Natura 2000 dépend majoritairement de la gestion du site. Environ 200 zones en France comportent aujourd'hui un habitat maritime protégée (Duhalde 2016). Cependant, la gestion des sites Natura 2000 laisse encore à désirer. Une autre directive majeure aujourd'hui dans la législation environnementale européenne est évidemment la directive Cadre sur l'Eau datant de l'année 2000 (2000/60/CE). Elle permet la gestion et la protection des masses d'eaux afin de rétablir leur bon état écologique initialement pour 2015. L'objectif est ambitieux mais c'est surtout une belle avancée car les masses d'eaux sont considérées et à peu près gérée notamment entre 0 et 1 mile nautique. Une dernière des dernières directive majeure mise en place au niveau Européen date de 2008. La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (2008/56/CE) a pour objectif l'utilisation durable des mers et la conservation des écosystèmes marins pour 2020 (Régimbart 2016). Elle s'appuie sur les anciennes directives listées plus haut et est retranscrites en France par le Plan d'Action pour le Milieu Marin (PAMM).
Enfin, le dernier échelon auquel nous nous intéresserons ici est celui de la France (Levraut and Oliveros 2013). La première Loi sur l'eau date de 1964. Son objectif est d'organiser la gestion de l'eau par bassin et de protéger les eaux de captages. Elle vise à protéger l'eau pour les besoins de l'Homme. Dans cet objectif de protection, le Conservatoire du Littoral a été créé en 1975 afin de protéger les littoraux de l'anthropisation sauvage en les achetant.
Parmi les lois Françaises, la loi Littoral de 1968 est l'une de plus connues. Elle interdit notamment la construction de structures à moins de 100 mètres du littoral. Son objectif est évidemment de

préserver le littoral de l'urbanisation. En 2006 la Directive Cadre sur l'Eau est transposée en droit français et la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) voit le jour. Elle vient rénover le cadre global défini par les précédentes Lois sur l'Eau, en intégrant notamment des objectifs d'atteinte du bon état écologique des masses d'eau (Levraut and Oliveros 2013). Il existe d'autres lois, amendements, plan de gestion qui existent à ces trois échelles **Figure 2**. Il est également évident que d'autres échelles plus petites existent comme l'échelle régionale, ou encore au niveau du site en question. Cependant, l'idée que la qualité des milieux est de plus en plus scrutée et soumise à des lois depuis 50 ans est véridique à toutes les échelles. La protection et la conservation des systèmes sont devenu importants aux yeux de la plupart des utilisateurs ce qui impose aux décideurs de prendre des décisions et d'entrer en action. C'est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de site proche des gens et qui ont une importance culturelle ou financière majeure.

Figure 2 : réglementation concernant la législation en termes d'environnement marin (Lenfant et al, 2015)

1.3. Le cas de la lagune du Brusc, historique et dégradation

La lagune du Brusc se situe dans le département du Var sur la commune de Six-Fours-les-Plages Ce site peut être découpé en deux entités : la lagune du Brusc en elle-même et les hauts fonds de l'archipel des Embiez. La lagune du Brusc, d'une superficie de 62 ha, se situe au sud-est du port du Brusc. Elle est délimitée à l'est par le continent, au sud par les îles du Petit Gaou et du Grand Gaou, et à l'ouest par l'île des Embiez. Au nord, elle est délimitée par un récif barrière de *Posidonia oceanica*, s'étendant de l'île des Embiez en direction nord-ouest/sud-est jusqu'à l'extrémité de la

jetée du port du Brusc. Dans sa partie sud, c'est un herbier à *Cymodocea* en épiflore qui la caractérise (MNHN & OFB 2003). Trois passes relient la zone sud de la lagune à la mer : la passe du Petit Gaou, entre le continent et l'île du Petit Gaou ; la passe du Grand Gaou, entre les îles de Petit Gaou et du Grand Gaou ; la passe des Embiez, entre les îles du Grand Gaou et des Embiez. La lagune a fait l'objet en 1987 d'un classement en Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF). Les hauts fonds de l'archipel des Embiez sont délimités en profondeur par l'isobathe -30 m. L'archipel comprend l'île des Embiez, l'île du Gaou au sud-est, l'île du Petit Rouveau au Nord-Ouest, l'île du Grand Rouveau à l'ouest, l'îlot de la Cauvelle entre les îles des Embiez et du Grand Rouveau et les rochers des Magnons à l'ouest de l'archipel. La partie occidentale de l'archipel a également fait l'objet d'un inventaire ZNIEFF en 1987. La Lagune du Brusc est l'une des rares lagunes présentes de ce côté-ci de la Méditerranée. Les îles qui l'entourent et la protège ont une haute valeur esthétique qui attirent par conséquent de fortes pressions anthropiques notamment en période estivale. Cet attrait touristique implique une forte anthropisation des milieux pour accueillir les visiteurs. Qui dit visiteurs dit piétinages, envasements, sports nautiques et donc destruction des habitats et des fonctions de nurseries et de nourriceries des juvéniles. Cette accumulation de pressions aux fils des ans a abîmé les herbiers de posidonies qui sont également menacés par l'extension de l'espèce exogène *Caulerpa taxifolia* (Boudouresque *et al.* 1995). Cependant, le récif qui avait été fortement dégradé se régénère petit à petit et une bonne gestion lui permettra de revenir à son état originel. Pour toutes ces raisons, ce site a donc été proposé à l'inscription au futur réseau Natura 2000 en mars 1999 sous le code FR 9302001. Il comprend la lagune du Brusc et l'ensemble de l'archipel des Embiez jusqu'à l'isobathe -30 m. La procédure a pris énormément de temps puisque c'est en 2014 que Natura 2000 a décidé de classer la lagune comme zone spéciale de conservation (Roy and Navelot 2014). Le classement de cette petite zone a permis de concrétiser les efforts mis en place en amont pour être dans la continuité du projet. Son accès est fortement réglementé, toute navigation est interdite à l'exception des kayaks et paddle, on ne peut pas non plus s'y aventurer à pied. Ceci a pour objectif de limiter le piétinement et permettre aux herbiers de reprendre de la vigueur d'années en années.

Figure 3 : Carte présentant la localisation et la superficie de la partie classée de la Lagune du Brusc (Données INPN)

Hormis le fort attrait touristiques cité plus haut, la lagune était également une zone de nurserie de choix pour les juvéniles car abritée du vent, des courants et des prédateurs. Les herbiers disparaissant et le récif se dégradant, cette fonction a été progressivement détruite, ne permettant pas un renouvellement des stocks ichtyologiques dans la région. Pour donner suite au classement et dans l'ordre de la procédure Natura 2000, l'inventaire de la zone est effectué pour servir d'état initial et pouvoir derrière mesurer l'efficacité des mesures de restauration. Nous pouvons donc aujourd'hui caractériser et étudier les habitats présents sur la lagune classés selon la Directive cadre Faune Flore et Habitats (cf. 1.2). Il est également possible de trouver une liste des espèces emblématiques qui y sont présentes et qui constituent les habitats.

Tableau 1 : Listage des habitats présents sur la lagune du Brusc (Données Natura 2000)

Code de l'habitat	Habitat	Superficie
1120	Herbiers de Posidonie (habitat prioritaire)	396 ha
1170	Récifs	50 ha
1160	Grandes criques et baies peu profondes	36.5 ha
1110	Bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine	23.4 ha
1140	Replats boueux ou sableux exondés à marée basse	0.1 ha
1150	Lagunes côtières (habitat prioritaire)	0.1 ha
8330	Grottes marines submergées ou semi-submergées	0 ha

Tableau 2 : Listage des espèces d'intérêts présentes sur la Lagune du Brusc (Données Natura 2000)

Code de l'espèce	Espèce	Famille
1349	Tursiops truncatus	Mammifères marins
1224	Caretta caretta	Reptiles
X	Pinna nobilis	Invertébrés
X	Cymodocea nodosa	Plante
X	Posidonia oceanica	Plante

Ces deux listes **Tableau 1**,**Tableau 2** permettent de se rendre compte de la diversité d'habitats ainsi que d'espèces d'intérêts présents sur un petit espace. En se rappelant qu'il n'y a que très peu de lagune de ce type en Méditerrané Est, l'évidence de sa protection et de sa restauration devient une évidence.

2. Objectifs

Bien que la lagune nous rende de nombreux services, nous n'avons pas pu ni voulu en empêcher la destruction. Aujourd'hui, la volonté de la remettre en état est une bonne chose mais sa restauration au sens strict est-elle vraiment possible ? Les deux services majeurs perdus que sont la nurserie et l'attrait touristique sont-ils restaurables ? L'effort de restauration nécessite des réductions de pressions avant toute intervention ce qu'a permis dans un premier temps le classement Natura 2000. Nous étudierons donc les méthodes de restauration mises en place à différentes échelles pour récréer la biodiversité de toute la lagune. Seulement, une restauration n'est jamais complète si un suivi correct et bien défini n'est pas mis en place à long terme. Nous étudierons donc également ce dernier et les perspectives envisagées pour ce milieu fragile.

3. Evaluation du projet de restauration

3.1. Réduction des pressions anthropiques

3.1.1. Etat des lieux et pressions anthropiques

La Lagune du Brusc a toujours été une zone soumise à des pressions. Au 20ème siècle celles-ci étaient relativement faibles et se limitaient souvent aux pressions de pêches artisanales. Cependant, en avançant dans le temps, la Lagune en plus de sa proximité avec le petit port du Brusc est devenue un lieu d'élevage avec quelques parcs à moules mis en place. Les pressions se sont diversifiées et intensifiées puisque les sports nautiques s'y sont ajoutés sans aucune réglementation (kayak, paddle, kitesurf). Le passage à pied dans la lagune n'était aucunement réglementé, abimant les herbiers de quelque espèce que ce soit. Les zones de nurseries composées d'herbiers de Cymodocées ou encore le récif barrière de posidonie de la partie Nord de la Lagune étaient les premiers impactés. La partie Sud a elle était beaucoup moins abîmée en raison de la difficulté d'accès. Aucun règlement sur le traitement des eaux ni sur la protection du milieu n'était mis en place.

3.1.2. Pressions non anthropiques

Si les pressions anthropiques étaient une cause majeure de la dégradation du milieu, d'autres facteurs externes s'y sont ajoutés. Un recul du récif barrière en raison de l'arrivée de la plante invasive *Caulerpa taxifolia* a eu lieu autour de l'année 2004 (Boudouresque *et al.* 1995). Aujourd'hui la caulerpe s'est stabilisée et à même tendance à reculer ce qui permet au récif de se stabiliser également. De plus, les herbiers de cymodocées ont été broutés par une surpopulation de saupes dont les causes de l'arrivée massive n'ont pas été définies. Enfin, l'envasement de la lagune à la suite des modifications des courants ou des vents a été une conséquence possible des pressions précédentes. Pour ce qui est des salins et de leur abiotisation, la fermeture progressive de leur lien à la lagune a provoqué leur perte de vitalité.

3.1.3. Actions mises en place

Si le classement en zone Natura 2000 en 2014 ainsi que le renouvellement et l'adaptation de sa charte tous les 5 ans ('Charte Natura 2000') a permis la protection de la lagune de manière légale, d'autres actions ont été menées en amont pour essayer de ralentir la dégradation et d'endiguer les pressions. Si le petit port du Brusc n'a pas été touché en raison de sa taille et de ses années d'existence, des aménagements ont été effectuées afin de préserver les fonds. En effet, les bateaux ne s'ancrent plus au sol mais sur des bouées ancrées à vis sur les fonds ou à des anneaux dans le substrat rocheux. La lagune dès le récif barrière est interdite d'accès notamment à pied afin de protéger les herbiers et d'assurer les fonctions de nurseries en les laissant au calme. Les sports nautiques ainsi que le mouillage sont également prescrits. Les seuls qui restent autorisés sont la pirogue, le kayak et l'aviron qui ne dégradent en rien les fonds marins (MNHN & OFB 2022). La charte inclut à la suite de cela des mesures de traitement des eaux qui imposent des produits antifouling écologique, l'interdiction de vidanger les bateaux dans la lagune ou encore n'utiliser que des produits d'entretien respectueux de l'environnement. La pêche est également soumise à réglementation qu'elle soit de loisirs ou professionnelle comme toutes les activités nautiques. Toutes ces mesures bien qu'elles soient parfois à moitié respectée en raison des gestions toujours trop approximatives ont permis de diminuer fortement les pressions. Cette diminution des pressions a dans un premier temps permis à la lagune de se régénérer et de retrouver un équilibre naturel grâce à comme on l'a vu plus haut une restauration passive. L'intervention de l'Homme pour sa restauration active n'est survenue qu'après.

3.2. Actions pour la restauration du milieu

Plusieurs dégradations ont dû être traitées. Le recul des herbiers de cymodocées, l'invasion des posidonies par la Caulerpe ainsi que la perte des fonctions nurseries. En parallèle des actions visant au minimum à réhabiliter ces différents environnement ont pris place dans la lagune (Saragoni 2018) Figure 4, Tableau 3.

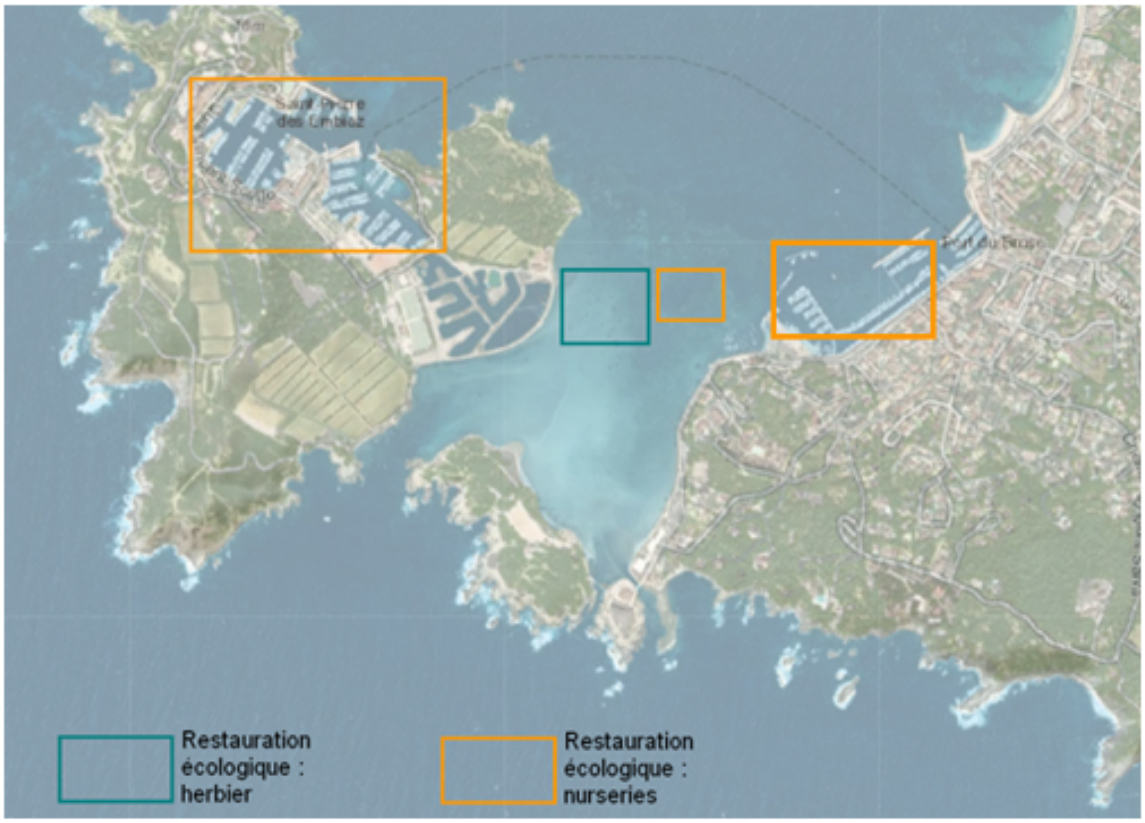


Figure 4 : Résumé des actions de restauration mises en place sur la lagune

Tableau 3 : Résumé des projets et appellation utilisé lors de la restauration de la lagune

Nom du projet	Objectif général	Application à la lagune
LAND'EAU	Etudier les populations de post-larve et les capacités des habitats à les protéger	Capture par BioRestore afin d'étudier les post-larve de la lagune
SARLAB	Réaliser des actions de restauration écologique en combinant divers aménagements en faveur de la biodiversité	Restauration des nurseries et des herbiers
NAPPEX	Appellation qui identifie les ports exemplaires en termes de biodiversité et d'habitats favorables aux larves de poissons.	Labellisation des ports.
RESPIRE	Réseau de surveillance du recrutement en Méditerranée	Suivi de la restauration

3.2.1. Restauration des fonctions de nurseries

La fonction principale pour ce qui est de l'écosystème de la lagune du Brusc est celle de nurserie. En effet, les juvéniles de poissons aiment les lieux calmes et abrités, peu profonds avec un habitat propice au camouflage et à la survie. Ces lieux sont très souvent conquis par les Hommes pour en faire des ports, des marinas ou des baies touristiques car ils recherchent les mêmes caractéristiques. Seulement ces zones de nurseries sont primordiales pour la croissance des jeunes et donc le maintien des populations. En effet, le cycle de vie des poissons se déroule dans des lieux très différents selon les stades de croissance. Après la reproduction en pleine eau, les œufs sont protégés dans un nid plus ou moins solide. Lorsqu'ils éclosent, les larves sont disséminées au gré des courants en pleine eau pendant une période propre à chaque espèce (+/ – 30 jours) (Bouchoucha *et al.* 2016). Une fois ce stade pélagique passé, les larves entrent en stade dit « post-larve » durant lequel elles vont s'activer pour la première fois pour essayer de rejoindre et de coloniser un habitat propice à leur survie qui se situe majoritairement près des côtes dans des eaux peu profondes. Elles sont alors considérées comme des juvéniles et ce sont eux qui vont grandir à l'intérieur des nurseries jusqu'à la taille dite taille refuge. Cette caractéristique est purement physique puisqu'elle correspond à la taille à laquelle les juvéniles n'entrent tout simplement plus dans la bouche des prédateurs. Ils deviennent alors adultes et entrent en phase de recrutement. Ils vivent alors comme des poissons classiques **Figure 5**. Tout au long de ce cycle, la mortalité décroit. Plus de 90% des larves pélagiques vont mourir. Chez les post-larve ce sera entre 80 et 85% et ainsi de suite jusqu'à la phase adulte. Durant ces phases pélagiques, la mortalité permettra de supprimer toute aberration génétique ou faiblesse physique qui pourraient fragiliser la population à la longue (Lenfant *et al.* 2015).

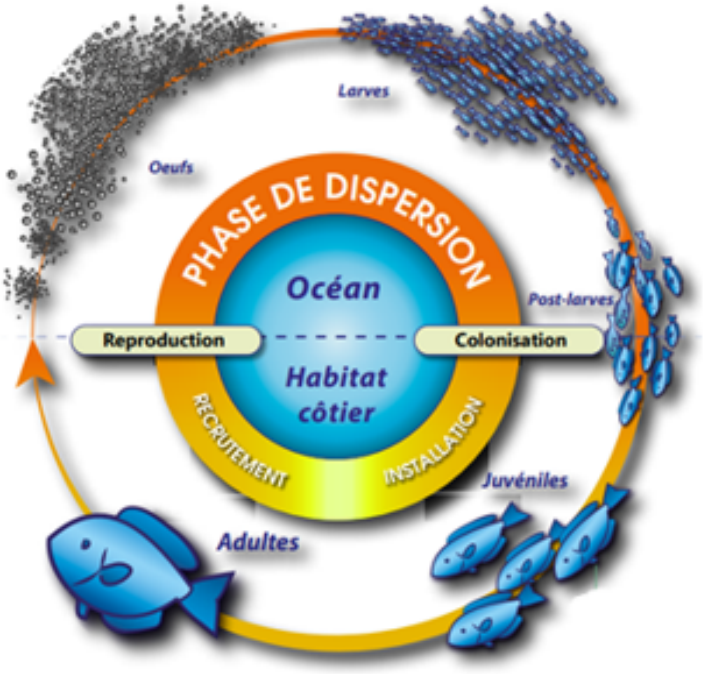


Figure 5 : Cycle de vie des poissons de l'état de larve à celui d'adulte (Lenfant et al, 2015)

Ces habitats de nurserie permettent aux juvéniles qui ont un besoin supérieur aux adultes de protection ainsi que d'alimentation pour survivre. Ce sont donc des zones essentielles car si l'on supprime ces zones protégées, la population chute en raison d'un trop petit nombre de poissons qui entrent en phase de recrutement. La population se retrouve alors en danger. Ces habitats peuvent être considérés comme tels car il propose une nourriture variée et abondante, des zones protégées et permettent donc une croissance plus rapide qu'ailleurs. Toutes ces qualités sont généralement regroupées à l'étage infralittoral car il y permet encore la croissance d'algues et notamment les magnoliophyte comme les cymodocées (Lenfant *et al.* 2015). Ces herbiers sont des cachettes idéales pour les jeunes qui vont donc vivre entre 0-20m voire parfois dans moins d'1 mètre d'eau. Une dizaine d'habitats sont considérés comme des nurseries en raison de leur localisation. Les petits fonds sableux, caillouteux ou rocheux, les concrétions organogéniques, les herbiers, les lagunes/estuaires, les vasières, les bancs rocheux, les infrastructures artificielles et les ports. La lagune du Brusc propose plusieurs de ces habitats essentiels : la lagune en elle-même, les petits fonds sableux, les herbiers et les infrastructures artificielles avec le port et la présence du parc à moules.

La première étape de la restauration des fonctions de nurseries de la lagune était le projet LAND'EAU. Ce projet avait pour objectif la connaissance des post-larves et l'efficacité de protection des milieux sur ces jeunes. Pour ce faire, les post-larves de la lagune ont été capturées par utilisation du procédé de capture type « filet de crête » qui n'avait encore jamais été utilisé en mer Méditerranée et seulement en Polynésie. Il permet la capture des post-larves d'espèces qui ne sont pas photosensibles. Deux filets de crêtes ont été installés sur les deux graus qui relient la lagune à la mer sur une section de 1 mètre de large et 70 cm de profondeur durant six nuits par mois sur une période de six mois soit d'avril à septembre. Pour ce qui est des larves photosensibles c'est le piège lumineux de type CARE® (Ecocean) qui a été utilisé. Huit sites ont été choisis, et les pêches ont lieu en même temps que pour les filets de crête **Figure 6**. L'identification et l'élevage des espèces collectées ont été effectués dans les locaux de l'Institut Paul Ricard, situé en bordure de lagune. Le suivi des populations de jeunes recrues de poissons est effectué sur cinq zones dont deux zones restaurées et trois zones naturelles (triplicata de $1m^2$). Cette première action a permis d'acquérir de nouvelles connaissances concernant les dynamiques de populations des poissons côtiers pour tenter d'aider les pêcheries locales qui sont un atout économique et culturel de la région PACA. Selon les résultats, il sera possible de l'appliquer à d'autres zones littorales Méditerranéenne. Les relevés dans le port des Embiez et du Brusc ont permis de déterminer qu'ils sont des sites attracteurs de post-larves de poissons et qu'ils sont fréquentés par des juvéniles de plusieurs espèces. Nous étudierons les résultats des manipulations dans une partie suivante.

Figure 6 : Capture des post-larves dans la lagune du Brusc (Donnée ECOCEAN)

Une fois les deux années de recherche et de suivi du projet LANDEAU basé la compréhension du fonctionnement de l'écosystème de la lagune, c'est une autre étape qui a pu débuter. SAR-LAB (Site Atelier de Restauration écologique de la Lagune du Brusc) est un projet de restauration de la lagune du Brusc qui consiste en plusieurs volets, (Institut Océanographique Paul Ricard 2022). La restauration de fonctions écologiques en zones portuaires ou en petits fonds côtiers, la réhabilitation de fonctions écologiques, la restauration des zones humides en zone méditerranéenne et la poursuite de la R&D. La restauration des nurseries au sein de SAR-LAB passe par l'amélioration des zones portuaires pour une amélioration de leurs fonctions écologiques de nurserie. Comme expliqué plus haut, la complexification des milieux déjà existants par des aménagements artificiels en structure 3D est une technique de restauration qui a déjà fait ses preuves. Ces structures visent à augmenter la capacité d'accueil des juvéniles et à pallier l'absence d'habitat naturel en attendant sa restauration. La lagune se prêtait parfaitement à ce type d'aménagements puisqu'elle présentait notamment un ancien parc de mytiliculture ainsi que deux ports. Dans le port du Brusc ce sont 57 micro-récifs d'1m² qui ont été installées en 2017. Dans celui des Embiez ce sont 83 BioHut diverses qui ont été installées **Figure 7**. Sur l'ancien parc à moules, 40 BioHut d'1m² ont également été installées parmi les 230 piquets en métal qui forment les vestiges du parc.

Figure 7 : Localisation des BioHut dans le port des Embiez

3.2.2. Replantage des herbiers de cymodocées et de zostères

Les cymodocées aussi appelées *Cymodocea nodosa* ou cymodocées est une magnoliophyte. Par sa répartition et son étendue elle est la seconde magnoliophyte de Méditerranée après la célèbre *Posidonia oceanica*. Elle est cependant plus petite et forme des herbiers moins dense que cette dernière. De plus, la cymodocée possède un attrait biologique plus faible que sa grande sœur. En termes de diversité, les herbiers de cymodocées n'attirent « que » 110 espèces de faune vagile (Rouanet *et al.* 2008). Les cymodocées forment des prairies sur des fonds meubles plus disséminés que les herbiers de posidonie. Cependant, *Cymodocea nodosa* n'est pas la seule espèce de cymodocées présente dans la lagune. *Zoostera noltei* ou zostère est également présente. Plus petite, plus blanche et plus lisse, elle contribue à piéger les sédiments comme la première. Leurs systèmes racinaires sont cependant différents puisque chez la première chaque noeud donne naissance à une racine unique et ramifiée tandis que chez la seconde chaque noeud donne naissances à plusieurs racines fines. Elles forment à elles deux des herbiers enchevêtrés de différentes taille mais avec les mêmes missions. En termes de physiologie, le système végétatif des cymodocées est fait de rhizomes cylindriques et minces qui croissent de manières horizontales. Les feuilles sont étroites et allongées avec de fines nervures parallèles. Elle perd ses feuilles en hiver et est donc une espèce vivace, ce qui peut surprendre. En été au contraire elle croit grandement bien que son évolution spatiale puisse être importante une année puis disparaitre l'année suivante ce qui rend les suivis variables.
Pour ce qui est de leurs services écosystémiques rendus, les cymodocées sont un pilier incontournable pour la stabilité des fonds meubles sur lesquels elles poussent. Elles maintiennent les sédiments fins au même titre que les arbres le font avec les sols. Les cymodocées sont ainsi une espèce essentielle au maintien des écosystèmes. Elles se développent ainsi dans les criques et les baies peu profondes comme dans la lagune en arrière du récif barrière de posidonie. Tout

comme cette dernière, les magnoliophyte sont également de vastes puits de carbone bleu qui retiennent une grande partie de nos émissions. Les cymodocées forment donc un des habitats prioritaires présenté plus haut qui est celui des « lagunes méditerranéennes ». Cet habitat très particulier est caractérisé par des étangs littoraux salés mais aussi dans certaines zones marines estuariennes. La caractéristique majeure est celle d'une eau irrégulièrement dessalée et une température qui varient irrégulièrement également. Tous les organismes (faune ou flore) de cet habitat sont donc soumis à d'importantes modifications et variations de salinité et de température. Dans la lagune du Brusc, trois faciès sont présents : le faciès à *Cymodocea nodosa*, celui à *Zoostera noltii*et enfin celui à *Upogebia sp* qui est un crustacé Figure 8.

Figure 8 : Cartographie des habitats de la lagune du Brusc

Pour ce qui est de la réglementation, les cymodocées sont protégées par un Arrêté de protection datant du 19 juillet 1988. Elle est même inscrite dans la convention de Berne et au niveau du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM). Enfin, cette espèce figure également dans l'annexe III des Aires Spécialement Protégées et en annexe IV des Espèces Menacées. C'est ainsi que la restauration des herbiers de cymodocées est devenue un des axes majoritaires

de la protection de la lagune. Cependant, si cette immense prairie (44 ha) de cymodocées était en parfait état dans les années 1950, elle fut subitement décimée en 2008 pour ne représenter que 17ha de surface jusqu'à presque totalement disparaitre en 2011 **Figure 9**. Si comme nous l'avons dit précédemment, l'ensablement et la suractivité touristique étaient en cause, d'autres études permettent d'y rajouter le broutage excessif des saupes (Boudouresque *et al.* 2021). Quelque en soit la raison, des programmes et des activités de restauration ont été mis en place sous le projet SAR-LAB pour appuyer et appliquer les textes de lois et les projets de recherche et développement.

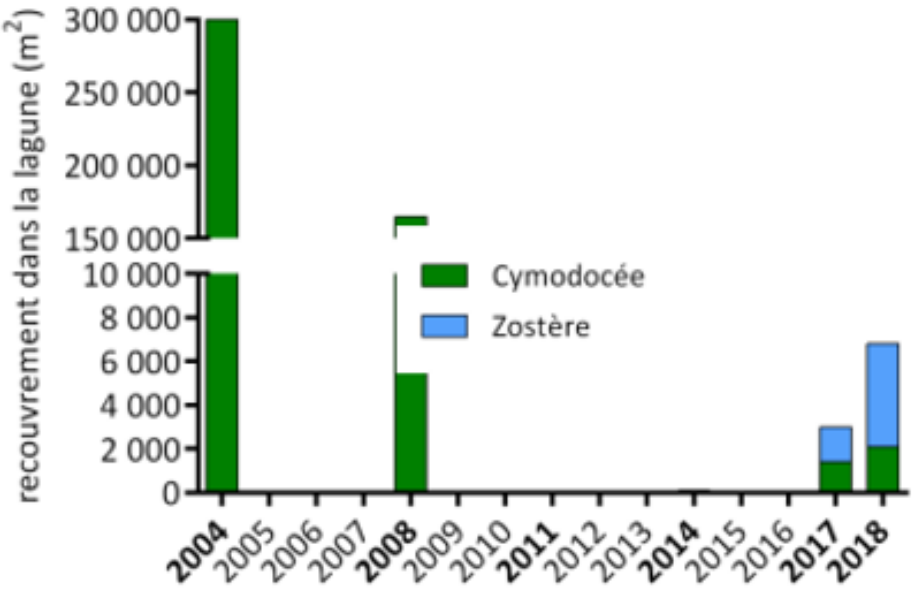


Figure 9 : Mesures du recouvrement en cymodocées et zostères avec en gras les années de mesures.

Pour ce qui est des techniques utilisées, les chercheurs se sont appuyés sur la vigueur et la résilience de l'herbier pour impacter le moins possible le milieu. Son repeuplement a été favorisé par le plantage de boutures en bonne santé qui dans l'idéal servirait de base au nouvel herbier. Si différentes techniques existent selon l'importance de la dégradation, la zone, le fond ou encore la plante à replanter, la lagune du Brusc a opté pour une technique relativement simple. Les boutures de *Cymodocea nodosa* ont été fixées au fond grâce à des piquets et des agrafes (Boudouresque *et al.* 2021). De nombreuses expériences passées de grande ampleur et dans le monde entier (Etats-Unis, Angleterre, Australie (Bastyan and Cambridge 2008)) avait déjà été menées avec succès. Dans la lagune du Brusc, 80 aires de repiquage de 1m² ont été créés pour former un corridor de 140m de long. Ces boutures ont été récupérées dans les zones marines annexes afin de conserver une logique géographique. Il s'agissait de faisceaux flottants arrachés par les tempêtes ou les ancres. Après repiquage, fort des études menées, les bouturages ont été recouverts de cage grillagée de 20cm de haut et de mailles de 5cm pour éviter le broutage et donc la destruction par les saupes et autres herbivores. Les résultats ont été plutôt bon grâce notamment aux cages et ont permis la reprise de l'herbier. Bien que les résultats soient très corrects puisque l'herbier a grandi, les études ont montrées que le broutage par les saupes était la raison majeure de la disparition de l'herbier.

Figure 10 : Repiquage de boutures de Cymodocea nodosa dans l'étang du Brusc. Pour les besoins de la photographie et du suivi, la cage a été élevée verticalement (Données Institut Paul Ricard)

Les cages misent en place ont donc conduit à une artificialisation assez conséquente de la lagune Figure 10. Des manières plus douces de procéder auraient pu être envisagés comme par exemple, comprendre en amont l'envahissement de la lagune par les saupes. Traiter cette cause afin de ne plus en subir les conséquences aurait permis d'éviter la pause de métal sous l'eau. D'autres matériaux plus écologiques existent également (fibres de coco, bambous) et aurait pu remplacer les agrafes ou les piquets métalliques (Da Ros *et al.* 2021).

4. Suivi mis en place et résultats

Le suivi mis en place pour le projet LAND'EAU consistait en de nombreuses plongées de suivi afin d'observer la protection qu'offrait l'habitat aux juvéniles. Les plongées étaient effectuées toutes les 2/3 semaines afin de mesurer le taux de persévérance des larves, c'est-à-dire le temps global que les larves vont passer sur l'habitat notamment par comptage (Bouchoucha *et al.* 2016). Que ce soit pour l'effort de connaissance ou encore pour le suivi des juvéniles relâchés, la plongée a été l'outil principal de suivi. Une méthode d'observation standardisée a été mise en place sur des habitats artificiels propices à la protection des jeunes poissons. Il s'agit du protocole RESPIRE qui est également un réseau. Ce réseau vise à apporter des éléments de réponse sur la caractérisation des populations de post-larves à la côte et leur évolution dans le temps et dans l'espace pour anticiper les dynamiques des populations adultes sur le moyen/long terme. Ces caractéristiques sont estimées grâce à l'abondance et à la diversité des recrues présentes sur site. Il s'agit d'un projet également mené par Ecocean toujours dans l'objectif d'améliorer nos connaissances sur les juvéniles. Les comptages s'effectuent trois fois par an en mars, juin et octobre et se sont achevés en 2021. Il est toutefois important de prendre en compte que la première année de suivi a été perturbée par les travaux du port du Brusc ou encore par la turbidité inhabituelle dans le port des Embiez. Les résultats de la mise en place de BioHut dans la zone ont été en demie teintes. En effet, les BioHut posées dans le parc à moules ont attirées peu de juvéniles qui y ont préféré l'herbier de nouveau en croissance. Ces structures mises en place dans cette zone en particulier n'apportent pas de réel gain écologique contrairement à celles mises en place dans les ports Tableau 4.

Tableau 4 : Abondance et diversité des recrutements dans la lagune du Brusc en 2015 et 2016 (Données ECOCECAN)

Date	mars-15	mars-16	juin-15	juin-16	sept-15	sept-16
Abondance	196	107	153	161	61	95
Diversité	4	5	8	8	9	13

On peut noter que les recrutements sont très marqués en mars et juin. Les analyses en composantes principales réalisées lors du traitement des données du réseau RESPIRE ont montré qu'en PACA, mars est marqué par un pic de sars à tête noire (*Diplodus vulgaris*) et de saupes (*Sarpa salpa*), juin par un recrutement de sars communs (*Diplodus sargus*) et d'oblades (*Oblada melanura*) et le mois de septembre par les castagnoles (*Chromis chromis*) et les crénilabres (*Symphodus sp*). Il convient cependant de préciser que les densités de ces recrutements varient fortement puisqu'en septembre, le peu d'abondance dans les sites valorise le recrutement même si celui-ci est minime. Les recrutements de castagnoles et de labres sont donc très inférieurs à ceux des sars, des saupes ou des oblades. L'autre donnée importante est la diversité qui elle augmente de mars à septembre. Les suivis haute fréquence mis en place dans d'autres sites n'ont pas été appliqué au Brusc car il n'y a eu que quatre mois de suivi.

Pour ce qui est du suivi des herbiers, c'est également la plongée qui a été choisie afin de mesurer le recouvrement ainsi que la densité.

L'objectif principal était d'évaluer les effets de ces restaurations sur les fonctions de nurseries mais également sur l'état de l'écosystème. Les mesures étaient relativement simples mais cohérentes avec l'idée de laisser la nature effectuer son travail après avoir reçu un peu d'aide. Les transplantations de cymodocées et de zostères ont été un succès. Les transplants ont survécu et grandi. Leur densité a même été multipliée par 8 au cours de la première saison de développement. Le moment crucial que représentait l'hiver pour ces espèces a également été surmonté puisque les boutures ont survécu. L'herbier replanté mesurait en 2018 100m² contre 80m² lors de sa plantation. En parallèle, l'herbier naturel a également vu une période de croissance bénéfique le faire évoluer de 1400 à 2080m² entre 2017 *et 2018*.

Aucune preuve des effets de l'apport des nouveaux transplants pour la santé de l'herbier d'origine n'a cependant pu être prouvé. Toutefois, les juvéniles de poissons ne font aucune différence entre ces deux herbiers car ceux-ci se retrouvent avec les même caractéristiques d'abondance et de diversité entre l'herbier replanté et l'herbier naturel. Il s'agit ici d'un fort critère de réussite de la restauration de l'herbier. La restauration de l'herbier a donc permis de gagner du terrain sur la zone ensablée ainsi que de rendre ses fonctions de nurseries au coeur de la lagune.

Figure 11 : Surface des herbiers de Cymodocées en 2017 puis 2019 (Données MEDTRIX)

Figure 12 : Surface des herbiers de Zostères en 2017 puis 2019 (Données MEDTRIX)

5. Discussion

Au vu de l'efficacité des transplantations de cymodocées et de zostères dans la lagune, on peut se demander quel aurait été l'effet ou le gain écologique de transplanter des faisceaux de posidonie sur les zones de mates mortes du récif barrière. De nombreux projets en ce sens existent avec différentes techniques. Le transplant de faisceaux par agrafes comme le projet REPIC à Golf Juan ou encore le projet expérimental de transplantation de motte d'herbiers avec leur substrat dans le cadre de l'agrandissement du port de Monaco. Les résultats de ces projets de restauration sont de manière générale assez encourageants. Cependant, bien qu'attaqué par les caulerpes envahissantes, le récif barrière s'est relativement bien régénéré seul au cours des dernières années garantissant la protection et l'hydrodynamisme de la lagune (Boudouresque *et al.* 1995). Restaurer cette partie-là n'était donc pas une des priorités. Concernant les transplants de cymodocées et de zostères, la technique utilisée était relativement douce pour le milieu si on exclut les cages métalliques qui ont protégés les jeunes pousses durant un premier temps. Les agrafes restent une des techniques les plus avantageuses puisqu'elle n'est pas la plus onéreuse, a de très bons résultats et ne laisse pas trop de matériel anthropique dans l'environnement (Boudouresque *et al.* 2021). Il existent cependant d'autres matériaux plus adaptés au milieu comme la fibre de coco justement utilisées dans le cadre du déplacement de l'herbier à Monaco (Andromède Océanologie). Celle-ci est idéale pour permettre à la plante de s'installer dans son nouveau substrat mais également car elle se dégrade assez rapidement pour ne laisser aucune trace. L'efficacité en elle-même de la transplantation à l'échelle de la lagune reste une réussite pour ce qui est du gain écologique. Les nurseries proposées par ECOCEAN ont eu deux poids différents. Si celles installées dans les ports ont permis une diversité et une abondance de juvéniles plus grandes dès les premières années de suivi et ce malgré des conditions difficiles, les BioHut posées au sein du parc à moules n'ont pas trouvé de clients. Les herbiers nouvellement plantés y ont été préférés car à proximité et plus naturels. La question ne se posait pas avec les BioHut des ports qui ne présentait pas de milieu naturel semblables et de qualité à proximité. Les relâchés de juvéniles quant à eux ont faits leurs preuves à divers endroits comme dans les eaux Marseillaises avec le projet

CasCioMar qui a montré un recrutement de juvéniles supérieurs à ceux comptés précédemment et sur une longue période. Cette technique de capture, élevage, relâchés de juvéniles comporte comme partout des avantages et des inconvénients. La première idée qui pourrait faire douter est celle de la capture « sélective » des post-larves. Le brassage génétique pourrait être perturbé et donc affaiblir la population à long terme. Cependant, les larves capturées sont déjà revenues jusqu'à la lagune et le brassage génétique a déjà été effectué. Le fait de faire croitre les larves en laboratoire comporte aussi la question de l'acclimatation à l'Homme. Pour éliminer cet inconvénient possible, les chercheurs ont décidé de couper l'alimentation à la main en fin de croissance pour permettre aux juvéniles de reprendre des réflexes de fuite devant l'Homme. L'avantage de ce genre de méthode réside dans le fait que des centaines de juvéniles en bonne santé et à taille refuge sont relâchés dans l'environnement ce qui permet de renforcer les populations d'une année sur l'autre. Le projet CasCioMar par exemple capture chaque année des post-larve qu'ils relâchent ensuite dans les zones de nurseries. Les chiffres des suivis sont bons et montrent une augmentation sur toutes les années des poissons à tous les stades, confirmant que ceux-ci restent sur zone et renforcent bien la population locale sans mortalité supplémentaire ou défaillance génétique. Parallèlement, les salins présents sur l'île des Embiez ont eux aussi eu droit à des améliorations puisqu'une martellière a été installée pour restaurer le passage de l'eau afin d'assurer son renouvellement. La vie est revenue dans cette zone précédemment abiotique permettant le retour de l'avifaune et de la biodiversité qu'elle attire. Enfin, les actions de sensibilisation ainsi que la signalisation adéquate ont été installée tout autour de la lagune. Il pourrait être intéressant de renforcer encore cet axe qui est trop souvent négligé par rapport aux suivis scientifique. Or, si des actions sont menées mais que le public n'y est pas initié et ne se sent pas concernés, les résultats n'auront que peu de poids auprès des plus grands acteurs de la préservation de notre environnement. Emmenez les scolaires, proposez des ateliers de repiquage pour initier le public ou encore proposer des interventions plus visuelles pour marquer les visiteurs serait un plus pour garantir la pérennité de la restauration plutôt réussie de la lagune.

6. Conclusion

La restauration de la lagune du Brusc s'inscrit dans une volonté de redonner vie à des paysages Méditerranéens détruits par les ports, les marinas et les anthropisations diverses. Il est nécessaire de rendre les fonctionnalités premières de ces zones abîmées pour garantir un cycle de vie complet aux poissons qui vivent dans ces eaux. La restauration marine est une des solutions envisagées mais elle ne peut être pérenne si un gros travail de réduction des pressions et d'amélioration de la qualité de l'eau n'est pas fait en amont. La restauration passive reste la favorite car la marque de l'Homme est très limitée. Cependant, ce n'est pas toujours suffisant et il devient nécessaire d'agir. La question se pose alors des techniques les plus adaptées qui donneront les meilleurs résultats. La restauration de la lagune du Brusc a été une réussite par l'important travail de réduction des pressions effectué en amont. Celui-ci a permis de recréer un environnement favorable à la reprise des activités écosystémiques qui étaient là auparavant. La main de l'Homme a alors pu derrière

effectuer son travail dans de bonnes conditions en proposant des solutions qui ont fonctionné dans la grande majorité. Même si les BioHut du parc à moules semblent peu attirantes, l'herbier et les ports ont repris vie et de nombreux juvéniles ont été recensés. Il reste maintenant à surveiller le recul de la caulerpe au sein du récif barrière qui s'est engagé depuis quelques année pour laisser place à la reprise de la posidonie. Il en va de même pour les salins qui ont été reconnectés à la mer. Ce sont des travaux de suivis et de surveillance qui vont nécessiter une grande attention de la part des scientifiques. Enfin, le point clé de la pérennité des travaux reste l'implication du public proche et la sensibilisation de ce dernier aux enjeux du moment. Il est important de continuer à vulgariser les connaissances sur le milieu marin pour faciliter sa protection et ceci avant sa dégradation et donc sa restauration. La bonne reprise des herbiers et de nurseries dans la lagune ainsi que l'utilisation du filet pour larves non photosensible permet d'envisager la réplication de ces actions dans d'autres zones de Méditerranée même si la lagune du Brusc reste la seule en Méditerranée Est. D'autres sont en revanche présentes du côté du Languedoc et il pourrait être intéressant de mettre en parallèle divers actes de restauration qui ont pu y être effectués.

REFERENCES

Andromède Océanologie Species transplantation. *Andromède Océanologie*. https://www.andromede-ocean.com/species-transplantation/. Accessed 18 May 2022

Bastyan G. R., and Cambridge M. L. (2008). Transplantation as a method for restoring the seagrass Posidonia australis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **79**, 289–299. doi:10.1016/j.ecss.2008.04.012

Bouchoucha M., Darnaude A., Gudefin A., Neveu R., Verdoit-Jarraya M., Boissery P., and Lenfant F. (2016). Potential use of marinas as nursery grounds by rocky fishes: insights from four Diplodus species in the Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **547**, 193–209. doi:https://doi.org/10.3354/meps11641

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

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

Charte Natura 2000 https://www.ville-six-fours.fr/pdf/decouvrir/charte-natura-2000.pdf. Accessed 4 May 2022

Da Ros Z., Corinaldesi C., Dell'Anno A., Gambi C., Torsani F., and Danovaro R. (2021). Restoration of Cymodocea nodosa seagrass meadows: efficiency and ecological implications. *Restor. Ecol.* **29**, e13313. doi:10.1111/rec.13313

De Klemm C. (1990). La Convention de Ramsar et la conservation des zones humides côtières, particulièrement en Méditerranée. *Rev. Jurid. Environ.* **15**, 577–598. doi:10.3406/rjenv.1990.2647

Derolez V., Soudant D., Malet N., Chiantella C., Richard M., Abadie E., Aliaume C., and Bec B. (2020). Two decades of oligotrophication: Evidence for a phytoplankton community shift in the coastal lagoon of Thau (Mediterranean Sea, France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **241**, 106810. doi:10.1016/j.ecss.2020.106810

Duhalde M. (2016). Analyse des instruments des politiques de la biodiversité : le cas de Natura 2000 en milieu littoral et marin. phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01403848

Georges V., Audo M., Sebaibi N., and Boutouil M. (2019). Développement d'éco-matériaux compatibles avec l'impression 3D pour la fabrication de récifs artificiels. *Acad. J. Civ. Eng.* **37**, 1–4. doi:10.26168/ajce.37.1.1

Gianni F. (2016). Conservation and ecological restoration of Mediterranean marine forests. phdthesis, Université Nice Sophia Antipolis. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01816187

Institut Océanographique Paul Ricard (2022). SAR-LAB. *Institut océanographique Paul Ricard*. https://www.institut-paul-ricard.org/programmes_recherche/sar-lab/

Lecaillon G., Blin E., Lenfant P., Murenu M., Felix-Hackradt F., and Garcia-Charton J. (2011). Des solutions opérationnelles et innovantes de restauration des populations de poissons marins côtiers associés à des aménagements littoraux. 6.

Lenfant P., Gudefin A., Fonbonne S., Aronson J., Blin E., Aqua J.-L., Calvet C., Catalon E., Consultants A., Julien E., Direach L. L., Posidonie G., Neveu R., Pastor J., Pristchepa S., and Quenouille B. (2015). Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée : Orientations et principes. 98.

Levraut A.-M., and Oliveros C. (2013). La politique française du littoral. *Géosciences* 11.

MNHN & OFB (2003). Inventaire national du patrimoine naturel (INPN) - Lagune du Brusc. https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9302001

MNHN & OFB (2022). INPN, ZNIEFF Mer 93M000066 - LE BRUSC. https://inpn.mnhn.fr/zone/znieffMer/93M000066/tab/commentaires

Régimbart A. (2016). Elaboration de propositions de suivi de la pêche récréative au titre de la DCSMM. https://archimer.ifremer.fr/doc/00511/62258/

Rouanet E., Lelong P., Lecalard C., Rebillard D., Mauffray M., Rauby T., Aublanc P., Bonnefont J.-L., and Martin Y. (2008). Etude des biocénoses marines du site Natura 2000 FR 9302001 'Lagune du Brusc'. Contrat Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée. *Inst. Océan. Paul Ricard* 171.

Roy L., and Navelot P. (2014). 'Arrêté du 21 janvier 2014 portant désignation du site Natura 2000 lagune du Brusc (zone spéciale de conservation).'

Saragoni G. (2018). Colloque Driver. 16.

Annexe 7

Sentiers et musées sous-marins, des outils de restauration écologique ?

Par Céline CAMBAS

DU Restauration Écologie des petits fonds côtiers marins
Tuteur – Olivier Bocquet

LES SENTIERS ET MUSEES SOUS-MARINS, OUTILS DE RESTAURATION ?

Faculté des sciences de l'université de Montpellier
Céline Cambas

Mai 2022

Remerciements

Je souhaite remercier tout d'abord l'ensemble des professeurs et intervenants qui m'ont apporté de nombreuses connaissances nécessaires à la réalisation de ce rapport.

Ensuite, j'aimerais particulièrement adresser mes remerciements à Julie Deter pour ces conseils inspirant ainsi qu'Olivier Bocquet, mon tuteur pour ses conseils structurant et sa relecture avisée du rapport.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillée et soutenue dans le cadre de ma réorientation professionnelle et qui m'ont permis de suivre ce Diplôme Universitaire.

Résumé

En moins de 50 ans, l'Homme a démultiplié ses pressions anthropiques sur les écosystèmes marins. Surpêche, surfréquentation, artificialisation du littoral font partie des principales causes de la réduction de la biodiversité marine globale et particulièrement dans la zone épipélagique.

Dans ce contexte, la restauration écologique a, depuis une bonne dizaine d'année, pour but d'aider les écosystèmes endommagés à recouvrir une certaine stabilité, une fois que les pressions ont pu être contrôlées. En parallèle de nouvelles animations, des musées et sentiers sous-marins, sont apparues. Utilisant parfois des solutions liées à la restauration écologique comme les récifs artificiels, ces initiatives ont pour objectif de sensibiliser le grand public, de participer au changement de comportement et ainsi d'éviter les impacts néfastes des activités humaines.

Débutant par un état de l'art de ces trois types de projets (musée et sentier sous marins ainsi qu'implantation de récifs artificiels), ce rapport montre qu'individuellement ils ne couvrent que partiellement le concept d'activité de développement durable, i.e. alliant bénéfices écologiques, sociaux et économiques.

Cela dit, une solution hybride appelée espace REPC (espace de Restauration Ecologique Pédagogique et Culturel) est proposée. Basée sur un projet multi-objectifs :

- De restauration de services écosystémiques,
- De recherche scientifique,
- De sensibilisation pédagogique,
- D'intérêts Culturels et patrimoniaux,

Ce type de projet permettrait de créer une solution « vertueuse » de restauration écologique profitant des techniques de récifs artificiels et de l'attrait des sentiers pédagogiques et des musées sous-marins.

Ensuite, ce rapport développe les impacts potentiels environnementaux et sociaux économiques qui découleraient de l'implantation d'un espace REPC. Cette analyse montre l'intérêt des impacts positifs mais aussi l'importance de la prise en considération des impacts négatifs dès le début du projet.

Enfin, des recommandations globales ont été proposées, concernant d'une part les phases essentielles d'un projet d'implantation d'espace REPC et d'autre part les caractéristiques d'emplacements, de matériaux et d'activités.

De façon générale, ce rapport illustre une réelle tendance vers ce type projet « multi-objectifs », concrétisant une vision écosystémique et apportant des valeurs environnementales, sociales et économiques.

Sommaire

1. Introduction : Contexte et objectif du rapport 1
2. Etat de l'art 3
   2.1 Restauration écologique – services écosystémiques 3
   2.2 Récif artificiel 4
      2.2.1 Typologies et objectifs 4
      2.2.2 Caractéristiques extrinsèques des récifs artificiels 5
      2.2.3 Matériau et Forme 5
   2.3 Musée sous-marin 6
      2.3.1 Typologie et objectifs 7
      2.3.2 Emplacement 7
      2.3.3 Matériau 8
      2.3.4 Tarification 8
   2.4 Sentier sous-marin 8
      2.4.1 Typologie et objectifs 8
      2.4.2 Emplacement 9
      2.4.3 Activités et Outils pédagogiques 10
      2.4.4 Tarification 10
      2.4.5 Science participative 11
   2.5 Synthèse des limites de l'état de l'art 11
3. Proposition d'une solution hybride vertueuse 13
4. Impacts des espaces de Restaurations Ecologiques, Pédagogiques et Culturels ? 13
5. Recommandations pour la conception d'un récif artificiel sous-marin, les questions à se poser 15
   5.1 Etapes clés d'un projet d'espace de restauration écologique, pédagogique et culturel (REPC) 15
      5.1.1 Etudes préliminaires et avant-projet 15
      5.1.2 La gestion et le suivi 16
   5.2 Le choix de l'emplacement et de l'aménagement de site 16
   5.3 Le choix des matériaux et le cycle de vie des modules 17
   5.4 Les outils pédagogiques, culturels et scientifiques 18
   5.5 Science participative 18
6. Conclusion 19
7. Bibliographie 21
8. Illustrations et tableaux 22

1. Introduction : Contexte et objectif du rapport

Depuis toujours, les écosystèmes marins et terrestres évoluent naturellement. Ils passent d'un état d'équilibre à un autre progressivement, en fonction d'évènements climatiques, volcaniques, océaniques et ce, malgré leur résilience et leur résistance.

Depuis moins de 50 ans, des pressions anthropiques directes et indirectes provoquent de nombreux évènements perturbateurs. De plus en plus intenses et fréquents, ils sont définis comme « inédits dans l'histoire de l'Humanité ». En ce qui concerne le milieu marin, les facteurs les plus conséquents sont : l'exploitation directe des ressources, en particulier la surexploitation des poissons, des crustacés et d'autres organismes, la pollution d'origine terrestre et marine, notamment en provenance des réseaux fluviaux, et enfin, les changements d'utilisation des terres et des mers, par le développement d'infrastructures et de l'aquaculture dans les zones littorales. (IPBES, 2019).

Dans ce contexte, la capacité d'auto-régénération des écosystèmes se réduit jusqu'à les forcer à se transformer. On dit que les écosystèmes se dégradent. Aux vues de ses responsabilités, l'intervention de l'Homme devient nécessaire pour éviter leur effondrement :

> Ainsi, au-delà des actions de gestion et/ou de protection**, la restauration écologique** est un outil qui permet d'aider un écosystème endommagé à recouvrir un état d'équilibre acceptable. (LENFANT P., 2015). Depuis une dizaine d'années, des solutions techniques sont envisagées, testées et développées. Le repiquage d'herbiers de posidonie, le bouturage de Cystoseires, les mouillages écologiques sont des exemples de solutions largement étudiées. Mais, l'une des plus connues reste l'implantation de récifs artificiels.
>
> **Un récif artificiel** est une structure construite par l'Homme, volontairement immergée, installés dans des sites initialement dégradés. Une fois que les pressions ont été minimisées, ces récifs artificiels aident les écosystèmes en créant de nouveaux habitats. Ils leur permettent d'abord de retrouver un maximum de fonctions écologiques (nurserie, protection, nourricerie, etc.) puis de développer la vie marine.

En parallèle, de nouvelles activités aquatiques touristiques se sont développées le long des côtes souvent déjà endommagées par les pressions anthropiques (surfréquentation, artificialisation du littoral). Contrairement à une majorité d'entre elles, elles ont des objectifs relatifs à la conservation et la protection de la biodiversité marine : « direct » en immergeant des artefacts permettant à la vie de s'y installer ou « indirect » en développant des projets pédagogiques ou de sciences participatives. Les musées et sentiers sous-marins font partie de ces nouvelles initiatives :

> **Un musée sous-marin** est un lieu d'exposition permanente ou temporaire d'œuvres, de vestiges ou d'épaves par les visiteurs en apnée ou en plongée sous-marine.
>
> Un **sentier sous-marin** est un parcours aquatique pédagogique composé de plusieurs étapes d'observation correspondant aux points d'intérêts (habitat et espèces emblématiques).

Ainsi, de nombreuses solutions existent, évoluent ou se créent permettant de replanter, bouturer, reconstruire, développer des habitats ou des espèces spécifiques, mais développant aussi les moyens de sensibiliser, enseigner et étudier les océans. Parmi eux, les récifs, les sentiers et les musées sous-marins ont chacun **des objectifs différents mais aussi des points communs et des complémentarités**. Conçus ensemble, ces projets techniques pourraient contribuer à une solution de restauration écologique alliant bénéfices écologiques, sociaux et économiques. Elle rentrerait dans le cadre de

l'économie bleue promue par l'ONU, en répondant à plusieurs Objectifs de Développement Durable (ODD) en particulier le 14 « vie aquatique », le 4 « éducation de qualité », et le 8 « Travail décent et croissance économique ». (ONU, 2015).

L'objectif de ce rapport est d'envisager une solution « vertueuse » de restauration écologique basée sur les techniques de récifs artificiels, sentiers pédagogiques et musées sous-marins. Des recommandations seront proposées permettant aux parties prenantes et aux décideurs de concevoir cet espace sous-marin de restauration écologique tout en participant à la sensibilisation et l'éducation ainsi qu'en développant l'activité économique et les emplois locaux.

Ainsi, ce document présente dans un premier temps un état de l'art décrivant, d'une part, les interactions entre les écosystèmes et la société humaine et proposant, d'autre part, un aperçu des principales caractéristiques des solutions de récifs artificiels, de musées et de sentiers sous-marins dans le monde.

Cet état de l'art conduit, dans un second temps, à la proposition d'une solution « vertueuse » de restauration écologique identifiée comme « espace de restauration écologique pédagogique et culturel » (espace REPC) permettant de dépasser les limites des solutions actuelles.

Enfin, l'étude des impacts environnementaux et socio-économiques d'une telle solution aboutit à des recommandations permettant de concevoir, d'implémenter et de gérer un espace REPC.

Figure 1: Antiopelle (Antiopella cristata), Comatule (Antedon mediterranea)

2. Etat de l'art

2.1 Restauration écologique – services écosystémiques

Les écosystèmes vivent et évoluent quand les espèces s'y reproduisent, s'y protègent, s'abritent, se nourrissent, s'équilibrent. On appelle ces activités naturelles des fonctions écologiques ou écosystémiques. Certaines de ces fonctions apportent à l'Homme des bénéfices, on les appelle alors des services écosystémiques. Par exemple, la photosynthèse permet aux phytoplanctons de se développer, et permet aussi de créer de l'oxygène.

On peut définir différents types de services : des **services de support** (création d'oxygène), des **services de régulation** (Protection contre l'érosion du littoral), des **services d'approvisionnement** (production de ressources Halieutiques) ou des **services socio-culturels** (support pour le tourisme, pour la recherche, l'éducation).

Les bénéfices apportés à l'Homme par ces services sont souvent attachés à des valeurs. Une valeur intrinsèque est attribuée à un habitat riche en biodiversité, une valeur patrimoniale à une espèce endémique, une valeur instrumentale à un écosystème ayant un intérêt touristique, ou encore une valeur d'option est attribuable à une espèce apportant un potentiel d'innovation technologique.

Le schéma suivant illustre cette relation imbriquée justifiant qu'un écosystème dégradé ou détruit réduit directement ou indirectement les services écosystémiques utiles à l'Homme pour sa survie ou même son bien-être.

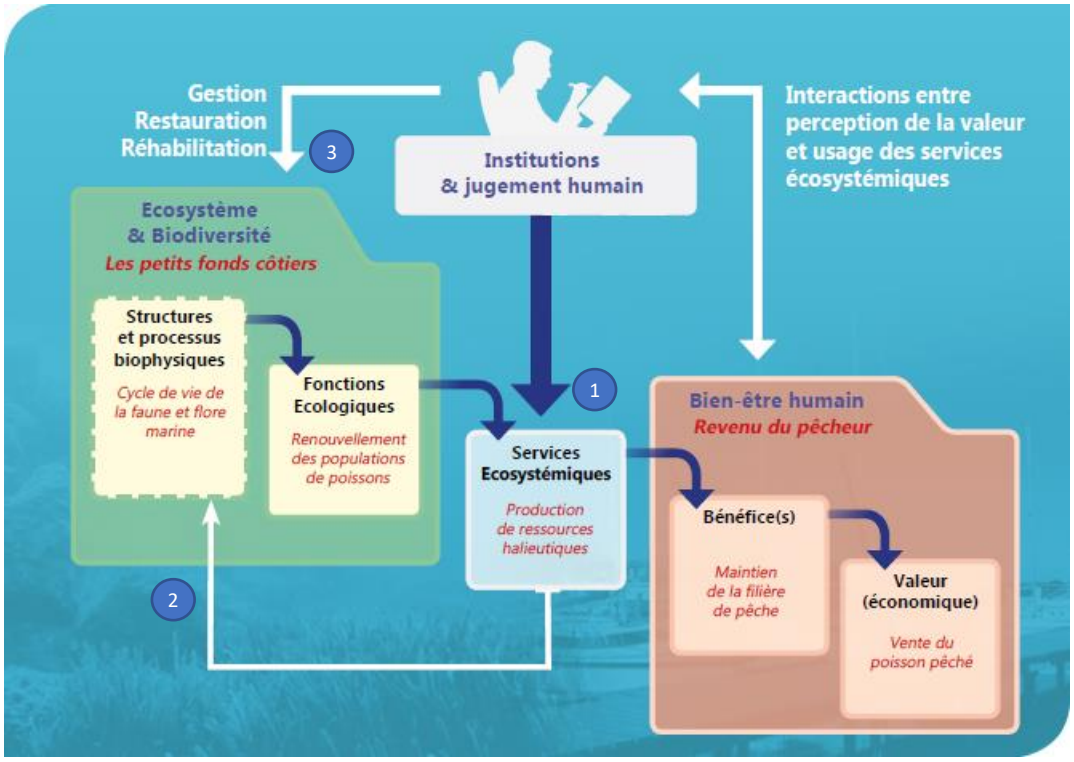


Figure 2: Relation entre écosystème et la société humaine (LENFANT P., 2015)

Enfin, il permet aussi de mettre en évidence :

- **Un cercle vicieux**, si la pression anthropique (1) est incontrôlée et provoque une exploitation des services écosystémiques non durables : Dans ce cas, les écosystèmes (2) se dégradent et réduisent les services, bénéfices et valeurs attachés.

- **Un cercle vertueux** Si la pression anthropique (1) est limitée ET si une action de restauration écologique est entreprise sur un écosystème endommagé (3) : Dans ce cas, les écosystèmes se régénèrent, récupèrent leurs fonctions écologiques et fournissent de nouveau les bénéfices associés ainsi que ses potentiels valeurs directes ou indirectes.

Ainsi, on peut considérer qu'une action de restauration écologique devrait permettre de rétablir non seulement les caractéristiques fonctionnelles d'un écosystème mais aussi de relancer ou de développer des valeurs socio-économiques d'une région.

2.2 Récif artificiel

2.2.1 Typologies et objectifs

La restauration écologique est communément définie par le « processus qui assiste le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (SER, 2004). Les récifs (ou habitats) artificiels est l'un des outils mis en place dans le cadre d'un projet de restauration écologique.

Les récifs artificiels vont créer des habitats destinés à des différentes biocénoses. Ces habitats déterminent leur typologie (Cépralmar, 2015) :

- Habitat pour des espèces benthiques et sessiles (représente une majorité des Récifs artificiels aujourd'hui)
- Habitat pour les juvéniles
- Habitat pour des espèces pélagiques

Figure 3: Récifs artificiels adaptés à différents objectifs de restauration écologique

Chacun de ces types de récifs artificiels peuvent être immergées à des fins :

1. De **production** de ressources halieutiques : pour augmenter la productivité et la sédentarisation d'espèces sur des sites spécifiques ou pour développer la biodiversité en restaurant la richesse et la diversité des sites.
2. D'**études scientifiques** : pour des évaluations in situ, des innovations, etc.
3. De **loisir** : pour répondre à une demande touristique, avec potentiellement une recherche d'esthétique et d'activité ludique
4. De protection d'un lieu : pour lutter contre les vagues, le vent et parfois le chalutage illégal

D'ailleurs, UNEP a clarifié la définition pour la focaliser sur les 3 premiers objectifs : « *Un récif artificiel est une structure immergée délibérément construite ou placée sur le fond marin pour imiter certaines fonctions d'un récif naturel, telles que la protection, la régénération, la concentration et/ou le renforcement des populations de poissons. …* » Il peut aussi inclure « *… la promotion de la recherche, des possibilités de loisirs et de l'utilisation éducative de la zone* » (UNEP, 2009)

Dans l'ensemble, la colonisation des récifs artificiels se réalisent sur une période de 3 à 5 ans. Ils auront initialement un rôle **d'attraction des espèces environnantes**, pour ensuite réellement fonctionner comme un habitat naturel en **produisant de la biomasse** pendant quelques dizaines d'années. Enfin, en fonction des caractéristiques extrinsèques et intrinsèques, ils entreront dans une phase « terminale » (enfouissement, décomposition, etc.) (Cépralmar, 2015).

2.2.2 Caractéristiques extrinsèques des récifs artificiels

Un projet d'installation de récifs artificiels suit des étapes précises et parfois contraignantes, proposées par la convention de Londres avec ses « directives pour l'implantation des récifs artificiels » (UNEP, 2009) et certaines même imposées en France par la règlementation avec le code de l'environnement et le code général de la propriété publique : **Étude d'impact sur l'environnement, analyse des coûts/avantages, enquête publique**.

Ces études sont indispensables à la réussite d'un projet de restauration écologique puisqu'elles permettent, dès la conception, d'adapter chacune des caractéristiques du projet au contexte, aux besoins et à ses contraintes socioéconomiques et environnementales. Ainsi, les caractéristiques extrinsèques des récifs artificiels suivantes, constituent le facteur de réussite le plus déterminant car elles conditionnent la diversité des espèces et les conditions environnementales (RIERA, 2020):

- **L'emplacement du site** – par exemple la proximité de zones hautement productives, la pauvreté en substrat rocheux du site, la limitation possible des pressions anthropiques, la protection réglementaire existante de la zone, etc. peuvent être des facteurs de choix de l'emplacement du site.
- **La position et l'orientation des récifs artificiels** – par exemple, en fonction des caractéristiques du biotope (physique et chimique), les ressources lumineuses et de nutriments, les courants, les sédiments, la bathymétrie peuvent imposer certains choix de position ou d'orientation des récifs.

2.2.3 Matériau et Forme

De façon générale, « *la construction de récifs artificiels doit être faite à partir de matériaux inertes n'engendrant pas de pollution des écosystèmes par lessivage, altération physique ou chimique, et/ou activité biologique, afin de ne pas entraîner une exposition accrue des contaminants nuisibles aux organismes. Ces matériaux peuvent être naturels, recyclés ou préfabriqués … Par ailleurs, les structures utilisées doivent tout d'abord offrir un design correspondant à leurs objectifs et avoir des dimensions et des formes pouvant favoriser le recrutement de la vie marine à sa surface et aux alentours* » (RIERA, 2020)

Objets/matériaux de la vie courante : le principe de récifs artificiels est une technique ancestrale utilisée par les pêcheurs avec des matériaux simples et à portée de mains (par exemple, l'amphore pour piéger les pieuvres) permettant de développer ou d'attirer des communautés de poissons

Epaves. Le premier récif artificiel pour la pêche a été décrit au Japon par les écrits du règne de l'empereur Joo entre 1652 et 1655. Il est constitué d'une épave en bois remplie de pierres. Aujourd'hui, les épaves sont toujours utilisées comme récifs artificiels, mais sont en général fabriquées en métal et

suivent des évaluations et procédures de dépollutions très contraignantes (pour celles qui sont volontairement coulés, bien sûr) (NOAA)

Le béton est l'un des deux matériaux avec l'acier le plus utilisé (PIOCH, 2008). Il est peu coûteux, facile à fabriquer et permet une multitude de forme dont la complexité facilite l'installation des différentes espèces du récif (fixées, vagiles, nectonique). Néanmoins, le béton garde un impact environnemental important dû à sa fabrication et la potentielle pollution dispersée lors de son érosion marine (RIERA, 2020). Cela dit de nombreuses études montrent son efficacité et cherchent à optimiser les phénomènes de colonisation biologique. Par exemple, en associant à sa conception des bio-activateurs, on observe un rapide développement des biofilms (microalgues et petits organismes) malgré une réduction de la résistance mécanique du matériau (Souche, 2016). En parallèle, on observe que le rajout de coquilles dans sa formulation augmente sa résistance en diminuant sa détérioration (Hector Cuadrado Rica, 2016). Ainsi, au fil des recherches scientifiques, la conception du béton s'améliore, et répond aux besoins des outils de restauration écologique.

De plus, Il est important de souligner les différentes techniques permettant au béton de prendre différentes formes. En effet, entre les parpaings qui peuvent aussi bien être fabriqués « à la main » ou de façon industrielle, les récifs moulés comme les « reefballs » utilisant des moules à usage unique en résine et fibre de verre (Clean, 2015) ou les récifs « sculptés » par des imprimantes 3D, l'impact global sur l'environnement peut être extrêmement disparate.

L'acier est aussi très largement utilisé (PIOCH, 2008). Il a de bonnes propriétés mécaniques, et une forte plasticité ce qui permet d'envisager de nombreuses architectures adaptables à l'environnement visé.

Le plastique « polypropylène » sous forme de roselière, par exemple : ces récifs ont des qualités de souplesse et de résistance intéressantes dans certains milieux. Ainsi, même si la décomposition progressive du polypropylène par hydrolyse, constitue indéniablement une source de polluant ingéré par les organismes du récif, les scientifiques souhaitent encore évaluer l'étendue de l'impact polluant par rapport à sa résistance dans le temps. (Actu-Environnement, 2021)

Les pneumatiques. Malgré les inconvénients avérés aujourd'hui (pollutions, lestages obligatoires, faible niveau de colonisation, émission de métaux lourds) Les pneumatiques ont beaucoup été utilisés dans de nombreux pays dans les années 1970. Aujourd'hui, il reste une problématique environnementale puisque même son enlèvement pollue et doit être géré de façon progressive (en petite quantité échelonnée sur plusieurs années) pour éviter l'impact d'une trop grande quantité de polluants dispersés d'un coup (Cf Conclusion, de l'Etat des lieux de la baie de Golfe Juan (Francour Patrice, 2017).

Les matériaux naturels. On pourrait penser que les matériaux naturels sont une bonne source de créativité. Le bambou, les fibres de cocotier, les coquilles, les blocs de roche, les cordes, le bois ont déjà été testé et ont montré une certaine efficacité (PIOCH, 2008). Mais dans l'ensemble, la résistance mécanique doit être suffisante afin que la structure (RIERA, 2020) :

- Ne soit pas déplacée par la houle ou par des engins de dragage,
- Puisse résister aux conditions marines (vagues, courant ou processus d'érosion).

2.3 Musée sous-marin

Une liste de musée est proposée en Annexe 1

2.3.1 Typologie et objectifs

Différents types de musées sous-marins peuvent être visités dans le monde, on trouvera :

- **Musée d'art**, dont les pièces sont réalisées par des artistes, puis immergées
- **Musée historique** (épaves), dont les pièces sont principalement des navires ayant coulé involontairement ou des véhicules divers (navires, avions, bus, wagon de métro, etc.), a priori dépollués et volontairement immergés par l'Homme.
- **Musée archéologique**, dont les pièces sont des ruines ou objets, vestiges d'anciennes civilisations soit trouvées sur place soit déplacées sur le site. Dans ce cas, ces musées ont parfois des objectifs de conservation des pièces en contradiction avec des objectifs de restauration écologique

Comme tous les musées « terrestres », les objectifs des musées sous-marins sont bien sûr **culturels, historiques, patrimoniaux** et aussi pédagogiques. Les gestionnaires et artistes souhaitent attiser la curiosité des visiteurs en leur faisant découvrir un monde sous-marins fragile.

En fonction des sites, les visiteurs peuvent y avoir accès en PMT (palme masque tuba) ou en bouteille de plongée. Leur gestion peut être confiée à des associations ou entreprises touristiques locales qui organisent la visite soit gratuite, soit payante (de 20 à 100 euros, souvent en fonction des besoins de guide et de matériel). Ainsi, les musées peuvent atteindre des **objectifs socioéconomiques** en créant un attrait culturel et en favorisant les emplois localement.

Enfin, la majorité des musées ont été créés sur des sites subissant des pressions touristiques (MUSA au Mexique), climatiques (Ngaro Underwater Marine Sculpture Trail, Australie), ou suite à une catastrophe naturelle (Molinere Underwater Sculpture Park, Grenade). Or, chaque œuvre peut être envisagée et conçue comme une solution de restauration, comme un récif artificiel, améliorant les fonctions de protection, de nurserie et de garde-manger. Ainsi, les musées ont comme **objectif supplémentaire la restauration d'habitat** qu'ils utilisent d'ailleurs amplement dans leur stratégie de communication. Cela dit, très peu mettent en place des suivis scientifiques ou écologiques qui permettraient de confirmer leur impact et d'améliorer les techniques de récifs artificiels.

Figure 4: évolution de la faune/flore fixée « Holy Man » au Molinere Bay Underwater Sculpture park

2.3.2 Emplacement

Souvent situés dans des aires marines protégées sur des substrats sablonneux, l'emplacement des musées est défini en fonction :

- Des activités souhaitées : par exemple la profondeur influence le site et le parcours facilitant l'accès aux nageurs (PMT) et/ou aux plongeurs (certifiés ou pas),
- Des directives artistiques : Les pièces exposées peuvent être placées en plein eau, complètement immergées (en général jusqu'à 10-15m), ou semi-immergées en fonction de la marée.
- De leur facilité d'accès et leur type de financement souhaité : par exemple, à distance des côtes, les musées organisent les déplacements en bateau nécessaires (parfois avec des partenaires locaux, club plongée). Ainsi ils peuvent contrôler la fréquentation et le prix d'accès (s'ils le souhaitent).
- Des études environnementales, par exemple certains musées ont pris en compte des résultats comme :
    - Le courant de récif naturel, ou simplement la présence de nutriments et de planctons, facilitant la colonisation des pièces.
    - Les études de fréquentation, afin de la redistribuer et de protéger des espaces fragiles et trop fréquentés

2.3.3 Matériau

Les œuvres d'art ou pièces exposées dans ces musées sous-marins sont en très grande majorité en béton (ayant des caractéristiques impactant plus ou moins l'environnement, PH neutre, biogène, aussi bien à la fabrication qu'au niveau érosion et propagation de polluant), en acier inoxydable, basalte et « agrégats », bois.

2.3.4 Tarification

Certains des musées sous-marins ont mis en place un accès payant, soit en contrôlant directement l'accès, soit en facturant des frais d'entrée aux entreprises privées ou associations (Plongées sous-marines, balades en bateau, etc.). Quand l'accès n'est pas directement payé par les visiteurs, les musées sont intégrés dans les aires marines protégées et financés par les gestionnaires (collectivités, régions, subventions, etc.)

2.4 Sentier sous-marin

Une liste de musée est proposée en Annexe 2

2.4.1 Typologie et objectifs

Les sentiers marins ont été définis en France en 2007, dans l'article 1 de la Charte des sentiers-sous-marins :

« Un sentier sous-marin est **une activité aquatique organisée et éducative** ayant pour objectif de faire découvrir e*n toute sécurité la diversité des paysages marins, mettre l'accent sur la fragilité des écosystèmes et accompagner les changements de comportement*" (CPIE, 2007)

Il existe différentes typologies de sentier sous-marin liés aux types de pratique :

- **Pratique en autonomie** dans une zone délimitée et protégée, équipée de supports de découverte : des panneaux terrestres et/ou aquatiques ainsi qu'un balisage en mer permettent d'identifier le parcours et d'apporter des informations sur la faune, la flore, le paysage et l'environnement.
- **Pratique accompagnée** : un accompagnateur prend en charge un petit groupe, accueille, explique les gestes à adopter pour ne pas dégrader le milieu puis il fait découvrir le milieu au groupe, en adaptant son message

Ce concept s'est développé dans différents pays ((E. Wegner, 2006), mais toujours avec **un objectif commun : la découverte du monde sous-marin**

Les sentiers sous-marins proposent avant tout des **activités de loisirs**, attirant les touristes pour la plongée et son intérêt ludique. Ensuite**, l'objectif pédagogique** est systématiquement mis en avant par les gestionnaires et finalement très apprécié des visiteurs. Comme le montre cette étude d'un des premiers sentiers au Brésil : Même si les attentes initiales des participants étaient liées à la plongée (36%), le principal aspect souligné par la suite était l'expérience éducative au sein de l'environnement marin (71%) (Flávio Berchez, 2005).

Au-delà de cet objectif commun, chaque sentier sous-marins cible **une ou plusieurs de ces vocations**. En fonction de ce choix, les activités et moyens de communication seront différents (CPIE, 2007) :

- L'écotourisme (découverte de la faune et de la flore),
- L'éducation et la sensibilisation à l'environnement,
- La valorisation du patrimoine de la collectivité, d'un territoire,
- La gestion de territoire et préservation du milieu.
- Les loisirs, baignade et sport,
- La formation professionnelle,
- L'objectif économique (source de revenus),
- L'objectif social (animation à caractère social).

Enfin, la gestion des activités autour des sentiers sous-marins peut être attribuée aux associations, clubs de plongée ou PME. Ainsi, **la communauté locale est impliquée** et peut même créer des emplois. (K.Abbad, 2022)

Figure 5 : Sentier sous-marin des Îles Lavezzi, en Corse

2.4.2 Emplacement

La très grande majorité des sentiers sous-marins se trouvent **dans des parcs ou plus généralement des aires marines protégées (AMP)**. Ce sont des zones propices au développement de l'éducation environnementale, de la recherche scientifique et des activités touristiques. Les sentiers sous-marins en tant qu'activités écotouristiques sont très populaires dans ces zones, combinant découverte et éducation environnementale. (Cf (K. Abbad, Jan 2022))

De plus, il est à noter que la mise en place de sentier sous-marins pourrait contribuer à la bonne gouvernance de l'AMP, notamment en déléguant leur gestion aux clubs de plongée, **en contribuant au renforcement des capacités des acteurs locaux** et en améliorant la communication entre eux. (K. Abbad, Jan 2022)

Par ailleurs, les parcours de ces sentiers sous-marins, sont dans une zone balisée permettant d'assurer la sécurité et la surveillance des visiteurs, dont la profondeur se trouve entre 0 et 10 m. (CPIE, 2007)

2.4.3 Activités et Outils pédagogiques

En fonction des objectifs ciblés par le projet de sentiers sous-marins (listés ci-dessus), différentes activités peuvent être envisagées :

- **Jardin découverte** : dans ce cas l'activité se réalise de façon libre, en autonomie. Il peut s'adresser à tout type de public souhaitant évoluer à leur rythme.
- **Ecole de la mer** : Cette activité est mise en place dans le cadre d'un projet scolaire ou de stage spécifique. Elle est encadrée par un accompagnateur (professeur, scientifique, écologue, naturaliste) et rentre dans un programme de plusieurs activités (exposés, travaux dirigés/pratiques, expérimentations, etc.)
- **Guide de la mer** : cette activité est assurée par un guide et sera en général ponctuelle. Destinée au grand public, elle permet de découvrir la mer ou d'approfondir ses connaissances en étant dirigée par un professionnel s'adaptant au niveau de connaissance des visiteurs

Bien sûr, un projet de sentier sous-marin pourra proposer l'une, l'autre ou un mixte de ces activités. Tout dépendra des ressources et budgets attribués.

Concernant les outils pédagogiques, certains sont en libre accès, ils peuvent être utilisés par les guides ou même pour certains, achetés ou loués par les visiteurs

- **Panneaux sur la plage**, ils présentent le parcours avec les points remarquables, la faune et la flore, en général
- **Panneaux immergés**, fixés aux points remarquables ou prêtés/loués individuellement aux visiteurs, ils présentent avec plus de précision les habitats, espèces, précautions à prendre.
- **Tubas FM sur bande sonore**, les informations présentées sont plus simples à comprendre que par la lecture, mais les observations associées peuvent être en décalage avec le discours.
- **Tubas FM sur balise**, lancé à la demande des visiteurs, les informations pourront être plus facilement mémorisées
- **Planchette immergeable** sur laquelle les visiteurs pourront annoter ou dessiner tout au long du parcours -Elle peut être envisagée aussi pour des jeux d'identification, des questionnaires, des concours de dessins.
- **Planche descriptive de la faune et de la flore** qui est largement diffusée par diverses structures. Ludique (recherche des espèces) et pratique, elle peut être ensuite conservée par le pratiquant. Elle contient souvent des messages sur le comportement à adopter.
- **Le livret remis à la fin** pour faire signer un acte d'engagement du pratiquant (CPIE, 2007)

2.4.4 Tarification

Les sentiers sous-marins ont en général un accès gratuit. En effet, étant gérés par des aires marines protégées, les gestionnaires englobent leur coup de fonctionnement. Cela dit en fonction des pays, il existe parfois des frais d'entrée dans l'AMP.

Parallèlement, les services proposés, comme par exemple la location de matériel (PMT, tuba FM) ou l'intervention d'un guide sont presque toujours payant.

2.4.5 Science participative

Quelques rares sentiers sous-marins propose une nouvelle activité : les sciences participatives.

Cette activité a pour but de collecter des données fiables en grande quantité à des fins scientifiques. Grâce à des protocoles simples mais rigoureux, des amateurs comme des spécialistes peuvent y participer.

Souvent basée sur la prise de photos, la localisation et l'identification d'espèces, cette activité enrichissante pour le visiteur et utile à la science mériterait de se multiplier. Pour l'instant, elle est proposée en complète autonomie comme par exemple sur le sentier Wild Derrynane[1] d'Irlande ou ponctuellement accompagnée comme au sentier sous-marin de Théoule sur Mer[2] qui propose une application guidée du programme national de sciences participatives BioLit.

Des activités de sciences participatives, dédiées aux sentiers sous-marins et à leur alentours pourraient être développées et permettre plus de précisions pour leurs suivis écologiques. Par exemple, un comptage de quelques espèces ou familles facilement identifiables le long du parcours pourrait être demandé aux visiteurs intéressés et motivés.

2.5 Synthèse des limites de l'état de l'art

L'état de l'art ci-dessus a présenté trois différents types de projets dans des régions ou les pressions de surfréquentation et de surpêche sont importantes mais contrôlables. Chacun d'entre eux participe à « l'écosystème » de ces régions, mais aucun ne couvre l'ensemble des objectifs d'un développement durable et ses dimensions environnementales, sociales et économiques indissociables :

Les sentiers sous-marins ont pour principal objectif de sensibiliser, d'être un support scientifique, d'enseignement et de communication.

> Mais l'intégration de solutions de restauration écologique sur ces parcours n'est que très rarement envisagée. Pourtant, les récifs artificiels sont conçus en adéquation avec les réglementations, les actions de gestion mises en place et surtout l'évaluation des enjeux environnementaux requises dans les aires marines protégés où se trouvent les sentiers. Ainsi, ces solutions de restauration écologique permettraient d'amplifier les actions de conservation (en développant les espèces existantes) et de protection (en détournant les flux touristiques des sites les plus fragiles).

Les musées sous-marins ont pour principal objectif le développement culturel d'une région, l'inspiration et le changement de comportement envers les océans et la biodiversité.

> La restauration écologique n'est que rarement l'objectif principal même s'il fait réellement partie de l'argumentaire des gestionnaires. Les « œuvres » sont souvent peu adaptées à l'environnement du site et aux critères favorisant leur colonisation. Leur efficacité en terme écologique en devient médiocre.

[1] https://www.vincenthylandartist.com/underwater-nature-trail, point (9) des consignes données.
[2] https://www.theoule-sur-mer.org/event/programme-biolit-science-participative-au-service-de-la-faune-et-de-la-flore-sous-marine/

De plus, les suivis scientifiques et écologiques sont pratiquement inexistants. Pourtant, ils permettraient de donner d'une part des arguments pour ce type de projet aux financeurs, et, d'autre part des contenus de communication à destination des gestionnaires ou des visiteurs, au fil de la vie du Musée.

Enfin, très peu de sensibilisation directe est proposée au cours des visites, on parle plutôt de sensibilisation implicite. Pourtant, les musées ont en général un objectif pédagogique qui est d'ailleurs souligné parmi les missions légales des musées relevant du ministère français de la Culture et de la Communication (2002-5, 2004). Or, les artistes de ces musées sous-marins mettent déjà l'accent sur le côté évolutif de leurs œuvres dans le milieu marin, il n'y a donc qu'un petit pas à faire vers l'aspect pédagogique.

Les récifs artificiels ont pour principal objectif la production de biomasse et de biodiversité. Les projets de restauration écologie sont particulièrement cadré et réglementé (études d'impact environnemental et socioéconomique, validations scientifiques, suivi écologiques, etc.) et suit des phases de projet strict.

Néanmoins, ces projets s'appuient en grande majorité sur des subventions qui les rendent dépendants de procédures longues et incertaines. Cette dépendance peut provoquer des retards, des limites et/ou des impératifs de suivi manqués.

De plus, par manque de temps ou de budget, l'ensemble des parties prenantes n'est pas toujours engagé dès le début du projet. A terme, il manque parfois la motivation et l'adhésion de certains participants, ce qui peut nuire ou ralentir le projet.

Le tableau suivant propose une synthèse des objectifs et des limitations de chacun de ces projets

Projets	Objectifs principaux		Limites
Sentiers sous-marins		Sociale : patrimoine, éducation, sensibilisation, loisir Economie : proposition de matériel, guide écologie marine Environnement : possible réduction et contrôle de la surfréquentation	Sociale : science (suivis scientifiques, recherche) Environnement : création d'habitat, développement de la diversité, évaluation/suivi d'impact
Musées sous-marins		Sociale : culture, patrimoine, loisir Economie : tickets d'entrée, accompagnement sur site Environnement : possible réduction et contrôle de la surfréquentation, augmentation biomasse	Sociale : éducation/ sensibilisation, science (suivis scientifiques) Environnement : éco-conception des œuvres, évaluation/suivi d'impact
Récifs artificiels		Sociale : sensibilisation, éducation, science Economie : économie bleue (ressources halieutiques, tourisme, puits de carbone, protection du littoral, etc.) Environnement : restauration des fonctions écologiques des fonds marins	Sociale : Engager l'ensemble des parties prenantes, emploi local. Economie : complexité de financement des projets de restauration.

3. Proposition d'une solution hybride vertueuse

Comme on peut le comprendre à l'aide de l'état de l'art, les projets relatifs à la restauration écologique ainsi qu'a la protection et à la conservation des écosystèmes marins dans les zones touristiques se développent mais ne répondent que partiellement à une solution de « restauration et de conservation écologique idéale », c'est-à-dire une solution :

- Basée sur des caractéristiques de développement durable améliorant les **valeurs environnementales, sociales et économiques**
- Répondant aux « **multi-objectifs** » :
    - de restauration de services écosystémiques,
    - De recherche scientifique
    - Pédagogiques (sensibilisation, éducation scolaire et professionnelle)
    - Culturels et patrimoniaux

On appellera par la suite, ce type de solution : un espace de restauration écologique, pédagogique et culturel, **espace REPC**.

La mise en place d'une telle solution de restauration écologique, scientifique, pédagogique et culturelle correspond à un projet « multi-objectifs ». Décrit dans le « guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels », ces projets seront amenés à se développer puisque leurs objectifs, destinés à différent acteurs, **renforcent l'adhésion** de chacun et fournissent une **valorisation économique** du site (Cépralmar, 2015).

4. Impacts des espaces de Restaurations Ecologiques, Pédagogiques et Culturels ?

Dans la perspective de ce type de projet d'espace REPC, il est important d'envisager l'ensemble des potentiels impacts positifs ou négatifs sur l'Environnement et sur l'Homme.

Le tableau suivant liste ces impacts en y associant trois facteurs :

- **Direct/ indirect** : exprime une relation de cause à effet entre le projet et l'environnement (ex : mise en place de récifs artificiels -> augmentation de la biomasse sur le site). Un impact indirect découle d'un impact direct et lui succède (ex : augmentation de la biomasse sur le site -> augmentation de la fréquentation touristique du site)
- **Positive/négatif** : exprime le type de modification engendré par le projet, sur l'environnement ou le contexte socio-économique d'une région (Exemple pour l'environnement : augmentation de la biomasse a un impact « positif », alors que le process de fabrication de certains matériaux à un impact « négatif »). Ce facteur dépend beaucoup des études préliminaires et de leur prise en considération au cours du projet (ex : le choix du site d'implantation peut être positif s'il développe des fonctions écologiques sur un site initialement dégradé mais pourrait être négatif s'il se situe sur un banc de sable présentant un faciès à cymodocées (Herbiers protégés - *Cymodocea nodosa*)
- **Permanent/ponctuel** exprime une notion de durée de l'impact. Un impact ponctuel peut disparaitre à court/moyen terme (ex : travaux de rénovation d'un quai) alors qu'un impact permanent est définitif ou perdure à long terme (ex : destruction de la posidonie)

Environnement, impacts de :

L'amélioration des caractéristiques biologiques du site d'implantation et le fond marin avoisinant, et des communautés benthiques	D	+	Pe
La redistribution des pressions touristiques existantes (plongée et pêche récréative) sur les écosystèmes naturels sensibles	I	+	Pe
La réduction de la pression exercée par la pêche commerciale et artisanale sur les écosystèmes naturels sensibles	I	+	Pe
La protection des écosystèmes vulnérables contre les techniques de pêche destructrices/illégales	I	+	Pe
La compensation d'une perte d'habitat survenue ailleurs	D	+	Pe
La réinstallation d'une biocénose après une catastrophe naturelle (ouragan) ou industrielle (marée noire)	D	+	Pe
Les validations scientifiques de technique de restauration écologique	I	+	Pe
Le changement du type d'habitat, difficilement évitable si l'habitat initial n'est pas de type rocheux ou coralligène	D	-	Pe
Les perturbations physiques et chimiques réelles sur le biotope alentours, même si des modélisations permettent d'atténuer cet impact (mouvement des courants, des sédiments, variation de température, de luminosité, PH, etc.)	I	-	Pe
La mise en suspense de sédiments par les palmes et le passage de visiteurs (Flávio Berchez, 2005)	I	-	Po
La pollution provenant de **la dégradation physico-chimique des structures** des modules due à l'érosion	D	-	Pe
L'augmentation globale de la fréquentation touristique dans la région (dégradation volontaire ou pas du littoral et fonds côtiers, pollution macro-déchets ménagers, débordement de station d'épuration, etc.)	I	-	Pe
Les Mouillages sauvages de plaisanciers autour du site souvent par manque d'information les ancres peuvent dégrader les habitats alentours (herbiers de posidonie, coralligène)	I	-	Pe
La fabrication des matériaux et l'assemblage des modules (émission de CO2, Extraction de minerai,	D	-	Pe
Le transport des modules sur site	D	-	Po
La mise en place des modules sur le site (vibration, bruit sous-marin, pollution de l'eau, dépôt de sédiment)	D	-	Po

Tableau 1 : récapitulatifs des impacts environnementaux d'un projet d'espace de restauration écologique, pédagogique et culturel » (UNEP, 2009), (PIOCH, 2008)

Socio-économique, impacts de :			
L'augmentation des ressources marines pour le secteur de la pêche	D	+	Pe
La valorisation de la pêche artisanale côtière (en améliorant les conditions de travail, la sécurité des stocks (quantité et diversité) et en approchant de la cote les lieux de pêche)	I	+	Pe
L'amélioration de l'attrait touristique des petits fonds marins dans la région (génère des retombées financières)	I	+	Pe
Le développement de l'intérêt patrimonial et artistique de la région	I	+	Pe
L'augmentation des activités de loisir, culturelles et pédagogiques (génère des retombées financières)	I	+	Pe
La contribution à l'évolution des comportements	I	+	Pe
L'augmentation des opportunités de recherches et d'éducation	I	+	Pe
La promotion des mouillages écologiques, nécessaires aux alentours du site	I	+	Pe

Les emplois générés par la gestion du site, entretien, exploitation (saisonniers et permanents)	D	+	Pe
La validation de l'efficacité de ce type de projet et la mise en place de Retour d'expérience, guide de recommandations, permis par les suivis scientifiques, écologiques et économiques**.**	I	+	Po
Le coût d'investissement du projet (de la conception à l'enlèvement potentiel des modules en fin de vie)	D	-	Po
La modification de la navigation sur site	I	-	Pe
Le conflit d'usage du site à gérer (entre plaisanciers, baigneurs, visiteurs)	I	-	Po

Tableau 2 : récapitulatifs des impacts socioéconomiques d'un projet d'espace de restauration écologique, pédagogique et culturel » (UNEP, 2009), (PIOCH, 2008)

Attention, il est impossible de hiérarchiser ces impacts. Leur importance va dépendre du contexte du projet, des caractéristiques du projet même et surtout de **la prise en compte de ces impacts possibles pendant le projet et de la mise en place de moyen d'atténuation des impacts négatifs**.

5. Recommandations pour la conception d'un récif artificiel sous-marin, les questions à se poser

5.1 Etapes clés d'un projet d'espace de restauration écologique, pédagogique et culturel (REPC)

Parmi les différentes étapes d'un projet, les deux phases suivantes semblent critiques :

- D'une part l'avant-projet, qui permettra de valider dès le départ la faisabilité, l'adhésion et le financement en fonction de critères environnementaux et socio-économiques.
- D'autre part, la mise en place des actions de gestion du site qui assure le succès des objectifs initiaux de l'ensemble des parties prenantes ((gestionnaires, propriétaires, usagers, clubs de plongée et d'activités nautiques, scientifiques, élus, etc.)

5.1.1 Etudes préliminaires et avant-projet

Chaque écosystème, même appauvri, a son propre équilibre ; dès qu'un événement se produit, cet équilibre va être déstabilisé. En fonction de la résistance et de la résilience du système, cet événement peut amener à un nouvel équilibre. Dans le cas de la mise en place d'un « espace des restauration écologiques », **l'objectif est de rétablir ou d'augmenter des fonctions et services écosystémiques perdus**. En d'autres termes, le but est de provoquer un événement pour changer l'équilibre appauvri en cours.
Cette action étant une action volontaire de l'Homme il est essentiel, de s'assurer de la réussite de cet objectif mais aussi des objectifs socio-économiques associés à chaque projet. D'ailleurs les réglementations de la plupart des pays proposent un cadre législatif pour ce type de projet basé sur des demandes d'autorisation, d'études d'impacts et des suivis écologiques et socioéconomique plus ou moins contraignants suivant les pays. Par exemple, la directive des Nations Unies sur l'implantation des récifs artificiels demande la réalisation d'études essentielles (UNEP, 2009):

- D'une **étude d'impact sur l'environnement** qui devrait prendre en compte :
    - Des études océanographiques, du biotope, de la biocénose, de la géographie de la région et du contexte socio-économiques qui aboutiront à un état zéro du site.
    - L'étude spécifique des impacts du projet d'implantation évaluant les choix de conception des récifs, son implantation, son exploitation et son démantèlement potentiel
- Une **analyse coûts/avantages** environnementaux et socio-économiques sur l'ensemble du projet (de sa conception à son démantèlement)

- D'une **enquête publique** qui permet entre autres d'initier l'adhésion de l'ensemble des parties prenantes du projet

Cette étape « d'avant-projet » permet de valider le projet dans son ensemble (faisabilité, efficacité écologique, adhésion des acteurs, etc.), d'en déduire des facteurs de succès qui devront être suivis tout au long du projet (exploitation inclue) et d'aboutir à des autorisations réglementaires.

5.1.2 La gestion et le suivi

Une fois le projet livré, les modules, le balisage et les outils pédagogiques installés, la mise en place et le suivi des actions de gestion est certainement la partie la plus délicate.
La **gestion intégrée des zones côtières** (GIZC) est une approche à recommander qui s'adresse aux zones littorales où se concentre un nombre grandissant d'activité humaines (tourisme, pêche, plaisance, etc.) et d'impacts terrestres ou marins (pollution, destruction des habitats, réduction des populations endémiques, etc.). Elle fait même l'objet d'une recommandation européenne en 2002, dont la mise en œuvre en France a été décidée par le Comité Interministériel de la Mer du 29 avril 2003. Son but est la mise en place d'actions de gestion, tel qu'un projet d'espace REPC où les enjeux sont multiples, parfois en opposition, et dont les objectifs proviennent de multiple acteurs (collectivités, services de l'État, acteurs socioéconomiques, associations, …). (CPIE, 2007)

Ainsi, en France la stratégie de l'état spécifie que la gestion devrait s'articuler autour des cinq axes suivants (Cépralmar, 2015) :
- **La concertation avec les acteurs locaux**, basée sur des responsabilités partagées, des décisions concertées et des échanges d'informations réguliers.
- **L'encadrement des usages sur le site**, en définissant le périmètre de l'espace, les périodes d'activités et les types de restrictions (ex : interdiction aux pêcheurs, restrictions sur une période aux activités de randonnées et/ou aux études scientifiques)
- **La surveillance in situ et la prévention** des situations à risques, en fonction de la fréquentation et de la réglementation sur le site.
- **La communication et la sensibilisation** des acteurs qui sont des facteurs clés de réussite de l'animation de la gestion
- **Le suivi des impacts environnementaux et socio-économiques du récif/module** faisant suite à l'état zéro défini en avant-projet (et souvent précis en phase de conception)

Des exemples d'actions de gestion possibles en fonction des objectifs de l'espace REPC sont extraites du « Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon » en ANNEXE4.

5.2 Le choix de l'emplacement et de l'aménagement de site

Les observations réalisées présentées dans l'état de l'art ainsi que les recommandations proposées dans le guide de Cepralmar sur les récifs artificiels soulignent l'importance des études préliminaires et de leur prise en compte en phase de conception.

- **Les caractères physiques et chimiques** (Courant, bathymétrie, température, luminosité, etc.)
- **L'influence des biocénoses et biotope alentours** (proximité d'habitats naturels sains, de nurseries, intensité des flux trophiques, etc.)
- **L'aménagement global du site, sa complexité et sa diversification** permettant une approche systémique des objectifs fonctionnels. Le concept de village incluant diffèrent des modules de différents fonctions en corrélation avec les écosystèmes naturels proches est particulièrement recommander.

5.3 Le choix des matériaux et le cycle de vie des modules

Concernant les matériaux, de nombreuses références listent les options déjà envisagées et/ou en cours d'optimisation pour la conception de récifs. Concernant les pièces de musées et dans une moindre mesure les modules de sentiers sous-marins, la liste se restreint à l'acier et au béton plus ou moins évolué (PH neutre, niveau de porosité et de rugosité, etc.). Dans l'ensemble, même si certains ont été reconnus comme « à proscrire » (par exemple le pneu) il est difficile de proposer une liste idéale de matériaux.
Cela dit, certains critères caractérisant les matériaux et les formes des modules d'espace REPC sont très souvent soulignés comme essentiels :

- **Complexité et hétérogénéité** (RIERA, 2020) : ce sont des critères liés à l'arrangement global des modules dans l'espace mais aussi des critères macroscopiques relatif à chaque module individuellement et microscopiques relatifs aux surfaces de ces modules.
- **Résistance** (RIERA, 2020) : ce critère physique permet à la structure d'assurer une résistance mécanique suffisante pour ne pas être déplacée ou endommagée par les conditions marines difficiles (houle, courant, érosion)
- **Inertie** : ce critère assure que les matériaux ne peuvent engendrer de pollution des écosystèmes par lessivage, altération physique ou chimique, et/ou activité biologique. On pourra y inclure les effets de la bio-érosion pour lequel le béton est aujourd'hui discuté voir parfois critiqué.
- **Durabilité** : Ce critère concerne l'empreinte environnementale du matériau. Un matériau durable est capable d'être utilisé sans être consommé ou détruit. Il ne détruit pas nos ressources naturelles et peut aussi être utilisé par les générations futures. Ce critère impacte entre autres, la provenance et le transport des matériaux ainsi la construction et le démentiellement des modules.
- **Circularité** : ce critère fait référence à une notion nouvelle, celle de l'économie circulaire. L'objectif est donc de concevoir des modules dont les matériaux sont réemployables (réparés, améliorés, désassemblés et réutilisés sans perdre leur valeur). Les résultats du projet européen FCRBE[3] (facilitating the circulation of reclaimed building elements in northwestern Europe) peuvent être sources d'inspiration avec des manuels pratiques des fiches matériaux des listes de fournisseurs possibles.

De plus, un projet d'espace REPC aura une complexité supplémentaire, celle de devoir répondre a des objectifs environnementaux ET socio-économiques, comme par exemple le développement de la vie marine, mais aussi l'assurance d'un minimum de risques accidentels relatifs au public visiteur.

De façon plus général, **l'ADEME propose la réalisation d'une Analyse du Cycle de Vie[4] (ACV) des matériaux et des modules de l'espace REPC, en phase d'avant-projet**. L'ensemble des étapes du cycle de vie est étudié avec une approche multicritère détaillant les flux entrants (matières premières), les flux sortants (pollutions émises) ainsi que leurs impacts environnementaux.
L'objectif d'une telle analyse permet de présenter une vision globale des impacts générés par l'espace, déclinée selon différentes simulations. Il est possible de comparer deux projets ou d'évaluer un projet en fonction de l'état zéro du site. La force de l'ACV est de restituer la complexité de l'environnement et d'éviter des choix qui auraient pour conséquence de dégrader des milieux qui n'avaient pas été considérés, ou de déplacer les impacts d'une étape du cycle de vie à une autre.
L'ACV est un outil normalisé au niveau international ISO (14040 à 14043) permettant une harmonisation de la méthodologie employée, davantage de robustesse et de fiabilité des résultats.

[3] https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5516-reemploi-des-materiaux-de-construction.html
[4] https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv

5.4 Les outils pédagogiques, culturels et scientifiques

Différents outils permettent de diffuser le message aux visiteurs comme illustré dans le chapitre « Activités et Outils pédagogique » : des panneaux, des fiches immergeables ou pas, des tuba FM. Malgré qu'ils soient aujourd'hui proposés essentiellement dans un contexte de sentier sous-marin, il n'y a aucune raison qu'ils ne soient pas adaptés pour délivrer un message culturel comme dans les musées standards.

Ensuite, le choix de ces outils dépend de plusieurs critères définis en avant-projet (CPIE, 2007):

- **La méthode de communication** en fonction
    - Des objectifs de l'activité (sensibilisation, scientifique, éducation, etc.)
    - Des sujets abordables souhaités (environnement, histoire, patrimoine, artistique, etc.)
    - Du public cible (nombres, classes d'âges, niveau de connaissance, etc.)
    - Du temps imparti à l'activité (température de l'eau, nombre de module)
    - De la vitesse de transmission du message. Plus le message sera donné proche de l'observation in situ, plus il sera facile pour le visiteur de le retenir.
    - De la profondeur et de la visibilité des modules
- **Le budget initial et les revenus envisagés** : Le choix des outils n'étant pas exclusif, en fonction du budget initial il est, par exemple, envisageable d'installer un panneau terrestre et des tuba FM à louer apportant des revenus pour la maintenance et éventuellement la réalisation de fiches éducatives gratuites ou de fascicules de jeux pédagogiques payants.

5.5 Science participative

Aujourd'hui, cette activité peu développée autour des sentiers et musées sous-marins. Pourtant elle est en plein essor au niveau national et international. De nombreuses solutions permettant aux citoyens d'amener leur aide à la science se développent dans différents pays et dans différents contextes (associatifs, scolaires, touristiques, etc.).

D'ailleurs, en France le projet de **Loi de Programmation de la recherche 2021-2030** :

- Propose des mesures inédites (réseau universitaire, dispositifs valorisant l'engagement des personnels de recherche, dispositif d'accompagnement),
- Développe le label « science avec et pour la société »
- Débloque des budgets importants (subventions, appel à projet, etc.)

Ainsi, la mise en place de telles activités au sein d'un espace REPC ne ferait que renforcer la cohésion entre les parties prenantes (collectivité, plongeurs, scientifiques, grand public, clubs associatifs, etc.)

6. Conclusion

Dans un monde où les milieux marins sont particulièrement impactés par des pressions anthropiques de plus en plus fortes, l'Homme essaie de de soutenir et d'améliorer l'état des écosystèmes endommagés et de créer des activités plus durables et respectueuses de son environnement. Son objectif est de mieux « s'intégrer » à la Nature en développant des valeurs environnementales et socio-économiques.

Dans ce cadre, ce rapport a illustré les différentes caractéristiques des projets **d'implantation de récifs artificiels, de sentiers et de musées sous-marins**, et a permis de souligner qu'individuellement, ils ne couvraient que partiellement les objectifs de développement durable.

Ainsi, **une solution hybride appelée espace REPC** (espace de Restauration Ecologique Pédagogique et Culturel) a été proposé afin de participer aux ODD définis par l'ONU

- 14 « vie aquatique » : restaurations écologiques, recherches scientifiques et suivis écologiques
- 4 « éducation de qualité » : activités éducatives et de sciences participatives
- 8 « Travail décent et croissance économique » : emplois locaux directs et indirects relatifs au caractéristiques pédagogiques, patrimoniales et culturelles de ces espaces.

Les impacts environnementaux et sociaux économiques qui découleraient de ce type de projet ont ensuite été étudiés. Cette analyse montre **l'intérêt des impacts positifs** mais aussi l'importance de la prise en considération **des impacts négatifs dès le début du projet**. En effet, pour la majorité d'entre eux des moyens d'évitement ou d'atténuation existent si une réflexion est initiée en phase de faisabilité et de conception.

Enfin, des recommandations globales ont été proposées, concernant d'une part **les phases essentielles d'un projet d'implantation d'espace REPC** et d'autre part les caractéristiques **d'emplacements**, de **matériaux** et d'**activités**.

De façon générale, ce rapport illustre **une réelle tendance vers ce type projet « multi-objectifs »**, **certes complexes mais dont les bénéfices en sont décuplés**. D'ailleurs, le sentier sous-marin de port Fréjus en cours de réalisation, est un bel exemple de cette tendance : Des modules ludiques en forme d'espèces marines, conçues comme des récifs artificiels accompagnés d'activités pédagogiques guidées constituent une très bonne base pour un espace REPC.

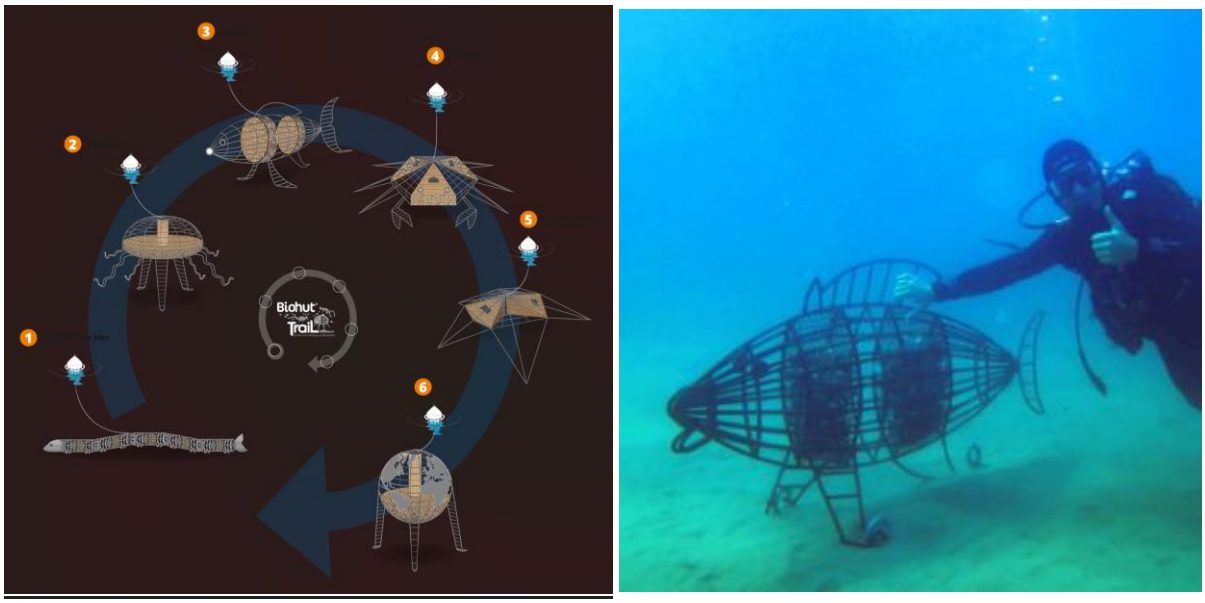


Figure 6: sentier pédagogique du port Fréjus un exemple de solution d'hybridation très proche de l'espace REPC

Bien sure les projets existants de récifs artificiels, de musées ou de sentiers sous-marins ne sont pas inutiles, ils font une partie du travail. Mais on peut espérer que ce type de rapport puisse amener le dynamisme supplémentaire pour optimiser chacun d'entre eux.

7. Bibliographie

2002-5, Article1 - Loi n°. 2004. *Loi n° 2002-5 du 4 janvier 2002 relative aux musées de France.* s.l. : https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000005632040/, 24 02 2004.

Actu-Environnement. 2021. Les récifs artificiels sont-ils vraiment bénéfiques pour l'environnement ? *youtube.* s.l. : https://www.youtube.com/watch?v=UDzgvTaQVrU, 24 03 2021.

Cépralmar. 2015. *Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon.* s.l. : Cépralmar, Région Languedoc-Roussillon, 2015.

Clean, Foundation. 2015. Atlantic Reef Balls construction & installation. *youtube.* [En ligne] 24 03 2015. https://www.youtube.com/watch?v=7Ugv_prwKQo.

CPIE, J-L BAUDE, P BOISSERY, B. DURAND, E. JOURDAN, C. MASCLEF, N. QUELIN, V. RAIMONDINO. 2007. *Guide méthodologique et technique des sentiers sous-marins.* 2007.

E. Wegner, F. C. Tonioli and D. Q. Cabral. 2006. Underwater Trails: a New Possibility of Marine Tourism. 2006, p. https://www.jstor.org/stable/25741727.

Flávio Berchez, Fabiana Carvalhal, Maria de Jesus Robim. 2005. Underwater interpretative trail: Guidance to improve education and decrease ecological damage. *International Journal of Environment and Sustainable Development* . Jan 2005.

Francour Patrice, Taneez Mehwish, Hurel Charlotte, Guibbolini Marielle, Risso Christine. 2017. Etat des lieux de la zone aménagée en récifs artificiels à l'aide de pneumatiques dans la baie de Golfe Juan (Alpes-Maritimes, France). s.l. : Convention de partenariat Agence des airesmarines protégées et Université Nice-Sophia Antipolis. ECOMERS, publ., Nice : 1-104, 10 2017.

Hector Cuadrado Rica, Mohamed Boutouil, Bertrand Boudart, Pascal Claquin, Fanny Leroy. 2016. Colonisation et détérioration des bétons incorporant des coquilles pour récifs artificiels. 2016, pp. https://www.mattech-journal.org/articles/mattech/abs/2016/05/mt160066/mt160066.html.

IPBES, Sandra Díaz (Coprésidente, Argentine), Josef Settele (Coprésident, Allemagne), Eduardo Brondízio (Coprésident, Brésil/États-Unis d'Amérique). 2019. *Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.* Paris : IPBES, 2019.

K. Abbad, R. Semroud, V. Andreu-Boussut, S. Bengoufa. Jan 2022. Underwater trail: A tool for an integrated management of marine. Jan 2022, pp. Volume 49 - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352485521004722.

K.Abbad, R.Semroud, V.Andreu-Boussut, S.Bengoufa. 2022. Underwater trail: A tool for an integrated management of marine protected areas in the Western Mediterranean Basin. *Regional Studies in Marine Science.* jan 2022.

LENFANT P., GUDEFIN A., FONBONNE S., LECAILLON G., ARONSON J., BLIN E., LOURIE S.M., BOISSERY P., LOEUILLARD J.-L., PALMARO A., HERROUIN G., PERSON J. 2015. *Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes.* 2015.

Manon Mercader, Amélie Fontcuberta, Alexandre Mercière, Gilles Saragoni, Pierre Boissery, Lucas Bérenger, Rémy Dubas, Gilles Lecaillon, Jérémy Pastor, Philippe Lenfant. 2016. Observation of juvenile dusky groupers (Epinephelus marginatus) in artificial habitats of North-Western Mediterranean harbors. *Marine Biodiversity.* 28 04 2016.

NOAA. Artificial reefs in National Sanctuary. *Florida Keys National Marine Sanctuary.* [En ligne] https://floridakeys.noaa.gov/artificialreefs/arethere.html.

ONU. 2015. 17 objectifs pour sauver le monde. *ODD.* [En ligne] 2015. https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/.

PIOCH, Sylvain. 2008. Les « habitats artificiels » : élément de stratégie pour une gestion intégrée des zones côtières ? s.l. : Université Montpellier III Paul Valery, 28 05 2008.

RIERA, Elisabeth. 2020. Vers une construction raisonnée d'une nouvelle génération de récifs artificiels : Analyses comparatives des facteurs intrinsèques favorisant leur colonisation de la micro à la macro-échelle. *Thèse de Doctorat.* s.l. : Université Nice Cote d'Azur, 2020.

SER, Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration.* 2004.

Souche, Jean-Claude. 2016. Effets de bétons bio-actifs sur la colonisation marine en environnement méditerranéen. 2016, pp. https://www.mattech-journal.org/articles/mattech/abs/2016/05/mt160049/mt160049.html.

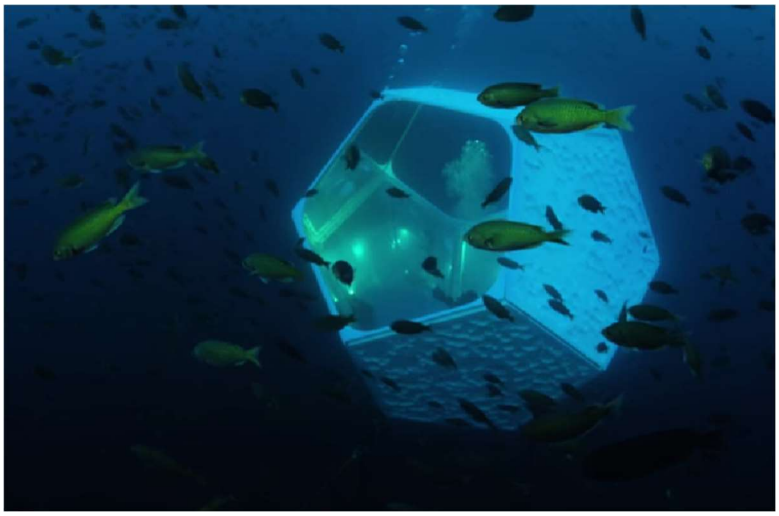
UNEP. 2009. London Convention and Protocol/UNEP Guidelines for the Placement of Artificial Reefs. London, UK : 100pp, 2009.

8. Illustrations et tableaux

Figure 1: Antiopelle (Antiopella cristata), Comatule (Antedon mediterranea) 2
Figure 2: Relation entre écosystème et la société humaine (LENFANT P., 2015) 3
Figure 3: Récifs artificiels adaptés à différents objectifs de restauration écologique 4
Figure 4: évolution de la faune/flore fixée « Holy Man » au Molinere Bay Underwater Sculpture park 7
Figure 5 : Sentier sous-marin des Îles Lavezzi, en Corse 9
Figure 6: sentier pédagogique du port Fréjus un exemple de solution d'hybridation très proche de l'espace REPC 20

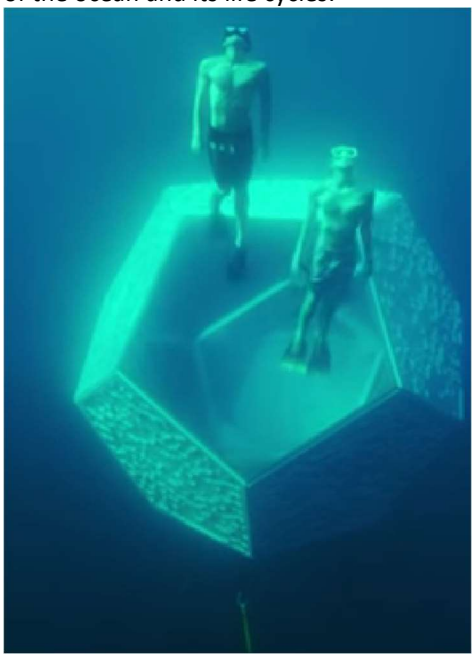
ANNEXE 1 : illustration des Musées sous-marins dans le monde

Underwater Pavilions (art + awareness)



Underwater Pavilions is artist Doug Aitken's large-scale installation produced by Parley for the Oceans and presented in partnership with The Museum of Contemporary Art, Los Angeles (MOCA). The work consists of three temporary underwater sculptures, floating beneath the ocean's surface that swimmers, snorkelers, and scuba divers swim through and experience.

Geometric in design, the sculptures create underwater spaces synthesizing art and science as they are constructed with carefully researched materials and will be moored to the ocean floor. Part of each structure is mirrored to reflect the underwater seascape and create a kaleidoscopic observatory for the viewer, while other surfaces are rough and rock-like. The environments created by the sculptures will constantly change with the currents and the time of day, focusing the attention of the viewer on the rhythm of the ocean and its life cycles.



How were the pavilions designed and installed to be ocean-friendly?
Doug Aitken's studio consulted closely with Parley's network of marine experts, scientists, and engineers, including renowned oceanographer Sylvia Earle and submarine builder Liz Taylor, for the design of the three underwater sculptures. The installation site, located just outside a marine protected area, was selected after a video survey of the dive park conducted by local expert Bill Bushing. Other consultants include Westerly Marine, Avalon Harbor Patrol, and local mooring services.

Objectif: art, sensibilisation, science
Lieu : Californie
Depuis:2016 (enlevé depuis quelques années)
https://www.youtube.com/watch?v=IGqkd9iuLvc
price. Closed, waiting for other dates

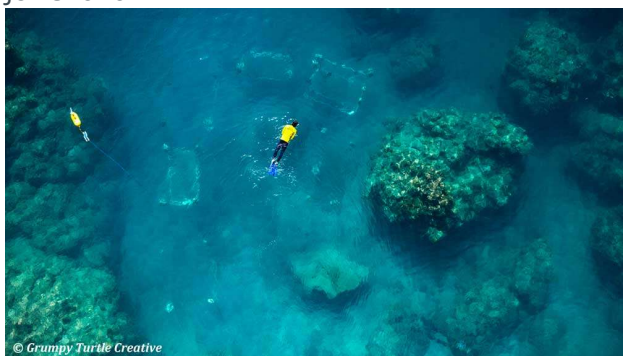
Ngaro Underwater Marine Sculpture Trail (coral reef + tourism + education)

Whitsundays Reef Recovery and Public Art Project

The Whitsunday Reef Recovery and Public Art Project involves collaboration between government, industry, scientists, artists, indigenous and community for the design and installation of underwater marine art and coral reef restoration. One of the major objectives of this project is to provide **new tourism experiences which will further enhance visitor experience and education**. With the art pieces having a marine wildlife theme, we believe they will provoke conversation and deeper consideration of the marine environment, Indigenous culture, coral reef restoration and sustainability.

Reef Ecologic's Whitsundays Tourism Recovery Project commenced in 2018 consisting of coral reef restoration activities to assist the recovery of two location in the region. The project also led the design, creation and installation of 6 Underwater and inter-tidal interpretive art pieces across the Whitsundays region. These art installations are available to visit, while the reef restoration activities continue to assist the recovery of Whitsunday reefs.

We chartered a total of five tourism vessels and involved 50 tourism, science and community stakeholders in outplanting coral in June2020



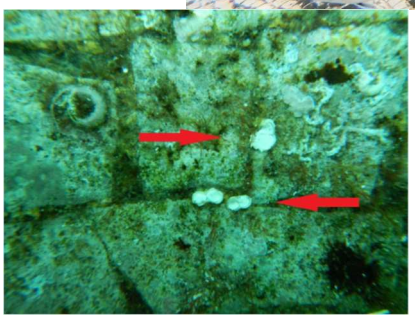
Objectifs :
support tourism industry socially and economically, help for coral reef restoration, training and participative science
Lieu: AU, great barrier
Depuis : 2018
https://vimeo.com/448365862
price : only accessible via liveaboard trip from 400AUD

Underwater Archaeological Park of Baia (archelogy conservation, education, science)

Réserve marine protégée depuis 2002 avec vestiges d'une ancienne cité romaine ; plongée sous-marine et excursions en bateau.
Particulièrement frappante est la présence de quelques fumerolles, émissions de gaz du sous-sol dûes à l'activité volcanique.

La réalisation des Parcs Archéologiques Subaquatiques et la création d'itinéraires avec des panneaux informatifs et éducatifs nous permettent, d'une part, de transformer les fonds marins en véritables musées en élargissant les possibilités de jouissance du patrimoine culturel et, d'autre part, d'offrir un éventail encore plus large d'emplois pour les spécialistes dans le domaine de l'éducation, de la gestion et de la conservation du patrimoine culturel.

A statue in the castle of Baiae completely disfigured by *lithophagous species*



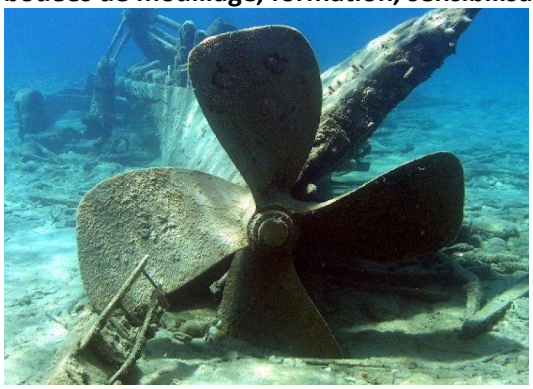
Detail of a mosaic pavement in the Underwater Marine Park of Baiae. Arrows indicate the feeding holes
sealed with white plasticine.

Objectifs. Archéologie, scientifique et éducation
Lieu : Italie, Naples, baia
Depuis 2002
https://www.youtube.com/watch?v=EVXWEk0tjAs

L'article de Roberto Pietriaggi illustre l'incompatibilité des objectifs de conservation dun musée archeologique et des objectifs restauration ecologique.
Management strategies for conservation restoration and fruition of
underwater archaeological parks, January 2016, Roberto Petriaggi

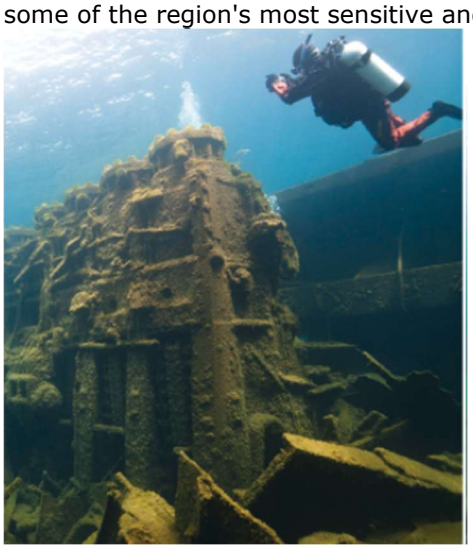
Prix: from 23euro snorkling to 90 no licence scuba for 1 dive

Michigan's Underwater Preserve System (protection archéologique, charte plongeurs, bouées de mouillage, formation, sensibilisation)



In the early years of the United States, the Great Lakes were a natural highway to its interior. The vast inland waterway provided convenient but dangerous transportation. Sudden storms, fog, heavy traffic, and shipping companies demanding that schedules be kept regardless of weather, all resulted in the **loss of thousands of schooners, steamers and barges**. The bottomland of the Great Lakes is littered with these lost ships that are time capsules from another era. **They have been preserved by the cold, freshwater of the Great Lakes**

Since 1980, Michigan's underwater preserve system has grown to occupy more than 2300 square miles of Great Lakes bottomland in twelve distinct underwater preserves. They protect some of the region's most sensitive and historic underwater resources.



The **Michigan Underwater Preserve Council, Inc.** (MUPC) is a private, non-profit, volunteer driven organization. It was incorporated in 1989 to preserve and protect the Great Lakes shipwrecks in Michigan waters, to educate divers and non-divers on their history and to aid in their preservation. Its membership is drawn from all of Michigan's underwater preserves.

The MUPC actively encourages the establishment of safe mooring buoys on shipwrecks located in Michigan's underwater preserves. Properly placed moorings make Michigan's shipwrecks safely accessible to everyone. A priority for the future is the placement of permanent mooring sites off the shipwrecks to spare them from harm. This will free the wrecks from the hooks, lines and chains that are used when moorings are placed directly on them.

In addition to its mooring program, the MUPC actively promotes Michigan's preserves and shipwrecks at tradeshows across the Midwest. Its diver education activities include publication of this Divers Guide, encouragement of good diver ethics and sponsorship of underwater archeology training for divers.

Objectifs : protection archéologique, charte plongeurs, bouées de mouillage, formation, sensibilisation
Lieu : US, michigan
https://www.youtube.com/watch?v=3liLesPg05I
Prix : 36USD licenced scubadive for 1 dive

Molinere Underwater Sculpture Park - restauration after Hurricane Ivan in 2004, promote tourism through local history and culture reference. Awareness and education

Molinere Bay Underwater Sculpture Park was the first of Jason deCaires Taylor's underwater gardens. It was widely acclaimed as the first of its kind. The site is now listed as one of National Geographic's 25 Wonders of the World.

The 75 works cover an area of 800 square metres and are **located in a series of sand patches and gullies between natural rock formations**. At depths of **5-8 metres**, they are accessible by scuba diving, snorkeling and glass bottom boats

Molinere Bay suffered considerable **storm damage from Hurricane Ivan in 2004** and the placement of these artificial structures has provided **a new base for marine life to proliferate**. **A long-lasting and pH neutral cement** offers a stable and permanent platform which **is textured to allow coral polyps to attach themselves** to the sculptures.

Cast from children with diverse backgrounds, they are a symbol of unity and resilience.

"**Using evolution of marine life on the sculpture to illustrate the children, the human and more widely the life adaptation capabilities and their diversity" -**

"Inspriing artworks revealing the ocean strength and fragility, referencing historical, cultural, social events" _ CC

https://www.youtube.com/watch?v=8LXbNumWfn0

Objective: restauration after Hurricane Ivan in 2004, promote tourism through local history and culture reference. Awareness and education

Date 2006

Materials: **pH neutral cement, stainless steel**

Price: Those wanting to visit the Grenada Underwater Sculpture Park can purchase a day pass from the Ministry of Fisheries at a cost of US$1 for snorkellers or US$2 for divers. All proceeds go towards the upkeep of the park and the protected marine area

Museo Atlántico Lanzarote

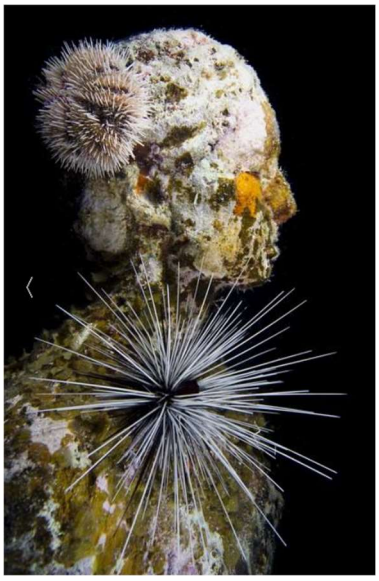
Museo Atlántico is the first underwater art museum in Europe and the Atlantic Ocean. It is situated **within Lanzarote's UNESCO World Biosphere Reserve** and is accessible to divers and snorkelers. The Museum was officially inaugurated in January 2017 by the President of Lanzarote, Pedro San Gines.

The formations are all configured so that they aggregate fish on a large scale and the casts become anchors for new coral growth, attracting local fish species and creating new eco-systems. The sculptures are frequented by rare angel sharks, schools of barracudas and sardines, octopus, marine sponges and the occasional butterfly ray.

Le Museo Atlántico est **destiné à générer un énorme récif artificiel et se compose de dix groupes de statues différentes**. Les modèles utilisés pour ces sculptures sont des résidents de Lanzarote. Vous pouvez également voir le célèbre Raft de Lampedusa, une référence à la crise des réfugiés en Europe. Avec cet impressionnant récif de sculptures, l'artiste veut **attirer l'attention sur la beauté du monde sous-marin et la nécessité de le protéger**.

Objectifs : recif artificiel pour developper faune et flore.
Sensibilisation protection de la nature, histoire et patrimoine, social, education
Depth: 14m
Lieu : Canaries, Lanzarote
Date: 2016
Materials: Stainless steel, pH neutral cement, basalt and aggregates
Prix : 51euro / plongée certifié

MUSA ((Museo Subacuático de Arte)**)**



M.U.S.A. (Museo Subacuático de Arte) is one of the largest and most ambitious underwater art attractions in the world. Located near the island of Isla Mujeres and the coast of Punta Nizuc in Cancún, the museum features over 500 permanent life-size sculptures created by Jason deCaires Taylor, Karen Salinas Martínez, Roberto Diaz Abraham, Rodrigo Quiñones Reyes, SalvadorQuiroz Ennis, Ekier Amado Gil

Cancún Marine Park is one of the most visited stretches of water in the world. It receives over 750,000 visitors a year, which places immense pressure on its natural resources. Visitors to the marine park now divide their time between the museum and the natural reef**, providing significant rest for natural overstressed areas**.

Over 90 fishermen and women were cast for M.U.S.A., **creating a movement of people in defence of the sea**

The sculptures are made from **long-lasting pH neutral cement** that provides a stable and permanent platform to encourage coral growth. They are **positioned downstream from natural reefs so after spawning there are areas for coral to settle**.

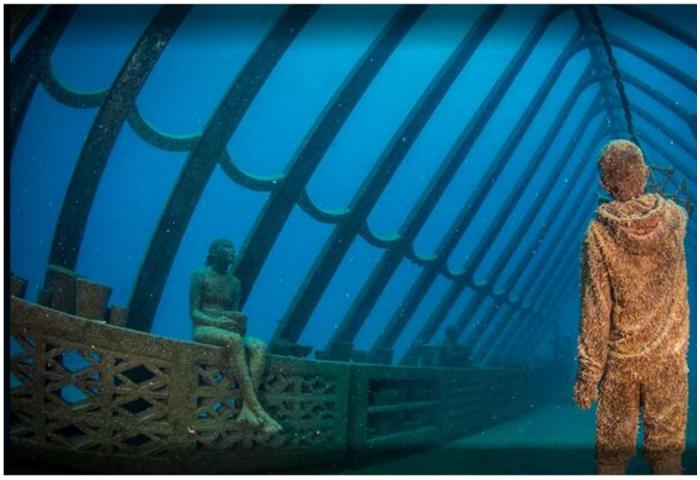
Objectifs : réduire la pression touristique des sites naturels, créer un cohésion locale socio-professionnelle, création de récifs et des habitats artificiels, replantation de gorgone

Materials: **Stainless steel, pH neutral cement, basalt and aggragates**
Location : 2 sites, 5m réservé au snorkeling, 10m pour plongeur et snorkeling. En aval courant des récifs coraliens naturels
Date : 2009
Prix: 2 dives (MUSA + natural reef), certified 100USD, 70USD snorkeling

MOUA Museum of Underwater Art

MOUA offers a contemporary platform to share the stories of the reef, and the culture of its First Nations people, as well as to generate a meaningful conversation and solution to reef conservation. The museum is managed by MOUA Ltd, a Not For Profit, Donation Gift Recipient company, initiated by 2 scientists (Dr Adam Smith, Dr Paul Marshall) and a tourism expert (Paul Victory)

Main underwater artwork is in John Brewer Reef, located in the Great Barrier Reef Marine Park, approximately 80km from Townsville - 2 hours by boat, 10-15 metre visibility with natural coral walls and a flat sandy base

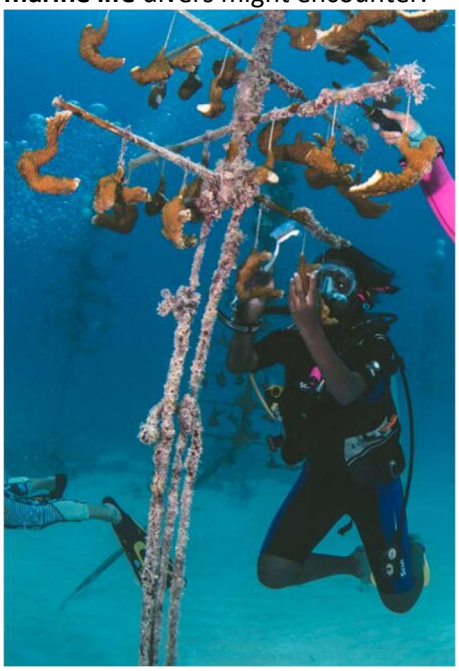


Objectif : Environnement, tourism, education and conservation, indigenous story telling, arts and culture, local job

Prix Includes two certified dives with all diving equipment
1 Adult x **AU$368.21**

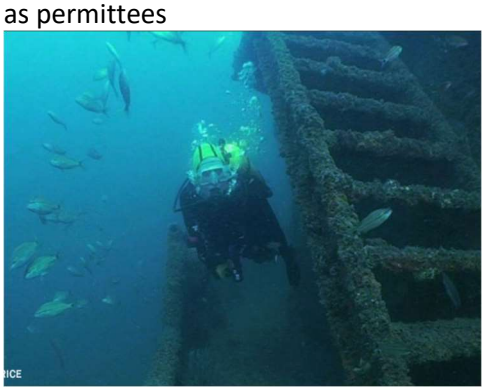
Sanctuary Shipwreck Trail of Florida Keys National Marine Sanctuary

Within Florida Keys National Marine Sanctuary lies a trail of **9 historic shipwrecks**, scattered along the coral reefs and buried in the sandy shallows a few miles off shore
Visitors are encouraged to explore the sites along the trail. An **underwater guide** is available for each site on the Shipwreck Trail, providing the shipwreck and **mooring buoy positions**, **history**, a **site map**, and **information about marine life** divers might encounter.



Ensuring that the desired benefits of the reef are reached (ie creation of successful reef) requires planning, long-term monitoring, and evaluation.

While all sanctuary shipwrecks are available for the public to explore, but not disturb, the Office of National Marine Sanctuaries seeks to engage people in actively investigating this sunken heritage. Members of the public can participate in research with sanctuary research partners or as permittees



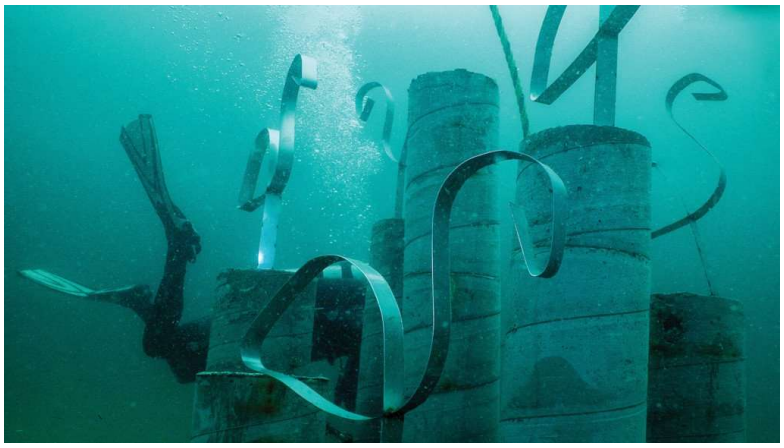
In general, development of artificial reefs is not allowed within national marine sanctuaries due to regulations that prohibit placing items or depositing materials on the seafloor. However, within Florida Keys National Marine Sanctuary, four ships have been permitted to sink since sanctuary regulations became effective in 1997.

Reefs provide habitat for a wide variety of marine life. In areas such as the Florida Keys, reefs are closely connected to the economy, attracting tourists that use local businesses and supporting fisheries. Sometimes those reefs are natural (coral) reefs and sometimes they are human-made structures placed on the seafloor.

There are a limited number of artificial reefs within Florida Keys National Marine Sanctuary.

Objectifs: Sanctuaire de protection et de conservation marine, artificial reef to support tourism activity and marine life biodiversity, mooring buoy, Research and awareness
Lieu: Florida keys
Materiau epaves et vestiges
prix

The Underwater Museum of Art, in Santa Rosa Beach, Florida



The UMA is the first presentation of the (Cultural Arts Alliance) CAA's Art In Public Spaces Program and augments (South Walton Artificial Reef Association) SWARA's mission of creating marine habitat and expanding fishery populations while providing enhanced creative, cultural, economic and educational opportunities for the benefit, education and enjoyment of residents, students and visitors in South Walton. The Underwater Museum of Art is located in approximately 60-feet of water and therefore necessitates the need for visitors to be certified divers in order to access the park at depth. Snorkelers can view the museum from a comfortable depth above the installations

Call to artists info: clean concrete and limestone are the only approved materials to be used for the bulk of the sculpture stainless steel and aluminum may be incorporated into the design but it must be half inch gauge or larger all materials will be vetted to conform to permit
artists need to make their best effort in the design to mitigate risk of damage to artwork from anchors size and dimension guidelines are as follows there really is no one-size-fits-all rule but artists should keep in mind that bigger taller heavier and less detailed sculptures will actually fare better at 60-foot water depths if a piece is too short or small is less likely to be noticeable or sustainable in these waters sculptures should not contain any delicate or thin protruding pieces that could easily be broken… https://www.youtube.com/watch?v=otRTOHsH8Bc

Objectif: create habitat, expend fishery resources, providing cultural, economic, educational opportunities

Date:2018
Price: free access

Musée Sous marin de Marseille

Le Musée Subaquatique de Marseille
est un espace sous-marin dédié à l'art, à la biodiversité marine
et à la protection de l'environnement

Le MSM propose de découvrir 10 sculptures immergées à 100 m de la plage des Catalans à 5 m de profondeur.

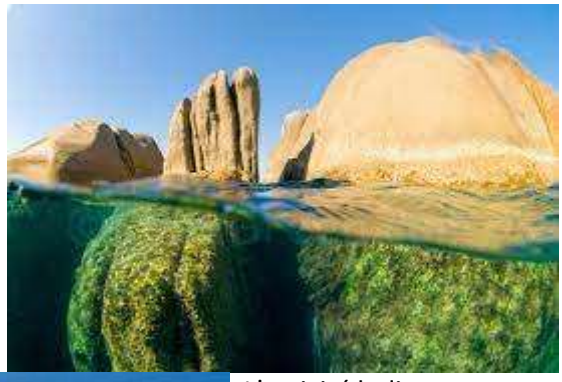
La visite du musée est libre et se fait sous la responsabilité des usagers

Dans le cadre des visites guidées individuelles ou en groupe, vous pouvez vous rapprocher de notre club partenaire le GRASM et réserver votre visite. Des sessions de visites sont ouvertes sur le calendrier du musée.

Objectifs : art, protection de de la biodiversité
Lieu : 100m de la plage à 5m de profondeur.
Materiau : Les statuts sont moulées avec du silicone puis coulé pour devenir des statuts de béton

ANNEXE 2 illustration des sentiers sous-marins dans le monde

Sentier sous-marin des Îles Lavezzi, en Corse
Un paradis situé à 7 km des côtes françaises et accessible en 20 mn en navette.
l'archipel est classé en zone de protection renforcée depuis la création de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio en 1982.



L'activité ludique et pédagogique a été conçue et organisée par l'Office de l'Environnement de la Corse dans le but de sensibiliser les vacanciers à la protection des fonds marins par l'émerveillement et la connaissance.

Les randonnées palmées sont encadrées par un animateur professionnel titulaire d'un brevet d'État d'apnée et de plongée qui entraîne les randonneurs à la découverte des différents écosystèmes marins rencontrés. A l'aide de plaquettes immergeables conçues pour identifier les espèces et de briefings de surface, le guide transmet ses connaissances au niveau de la faune et flore marines, de leurs comportements et des interactions observées.

Objectifs :
Ludique et pédagogique

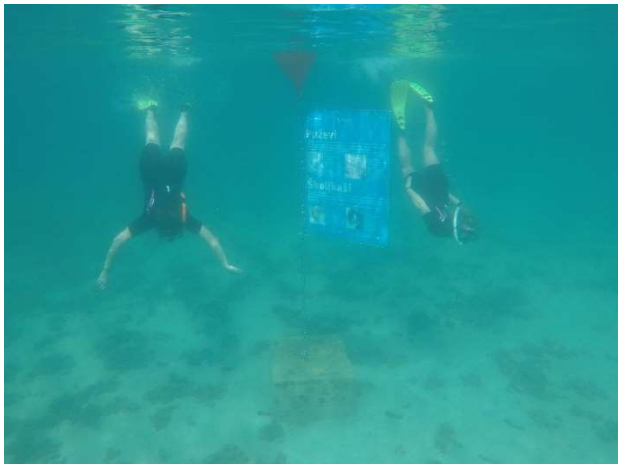
Lieu : Corse, zone de protection renforcée de la réserve naturelle de Bonifacio

Materiel : guide + plaquette emmergeables

Prix : gratuit avec guide de l'OEC

UTW Telašćica Nature Park, Croatia

On Friday, June 23, 2017, the first underwater **educational trail** "Tripuljak" was opened in the oasis of ecotourism – Telašćica Nature Park. The educational trail was developed within the SEA-Med project "Establishing Sustainable Economic Activities in Marine Protected Areas" and represents a unique experience of natural and cultural values of the rich and preserved submarine life.



The tour takes 30 minutes and includes swimming and underwater sightseeing at low depths with the option of using audio guides and educational boards at the points of experience.

the Nature Park area **in accordance with the Nature Protection Act of the Republic of Croatia.**

The "Tripuljak" submarine trail is an innovative tourist product of PP Telascica, which will teach all the lovers of the underwater world in an easy way.

Objectif: education
Materiel: audio guide
Lieu: Telascica nature park
Prix : entrée d'un bateau de -7m 15eur/jour

https://sunce-st.org/en/vijesti_en/telascica-nature-park-is-richer-for-the-first-underwater-trail/

UTW Brijuni Nature Park, Croatia

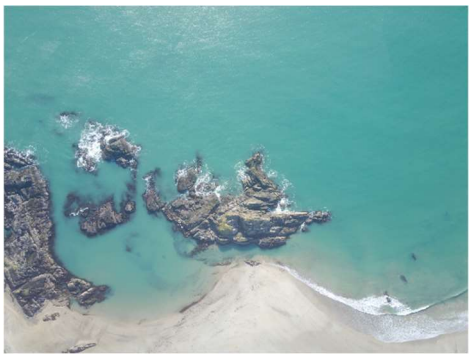
The remains of an authentic Roman villa are located on the eastern side of Veli Brijuni on the sea bed in Verige Bay. Swimming and snorkelling on the 500-metre long trail, accompanied by our experienced and knowledgeable divers, visitors will be able to experience the unforgettable underwater world of the Brijuni and discover numerous fascinating sea animals, guardians of the villa since Roman times.

Objectif: tourism, education and patrimonial
Materiel: guide
Lieu: Telascica nature park
Prix : entrée d'un bateau de -7m 15eur/jour

https://www.np-brijuni.hr/en/explore-brijuni/trails/educational-underwater-trail

Wild Derrynane UWT, Ireland

Créé et développé par Vincent Hyland (Wild Derrynane) , ce parcours prend environ 1 heure à compléter. 16 points d'intérêt sous-marins avec un mélange de flore et de faune marines. Convient aux plongeurs de tous niveaux. Une merveilleuse vitrine de l'habitat côtier marin peu profond d'Irlande.



- Respectez les principes de la zone sans laisser de traces/sans emporter
- Observez, prenez des photos, ne touchez pas la vie marine
- Science citoyenne - Veuillez enregistrer vos photos d'observations en identifiant @wildderrynane sur les réseaux sociaux

Objectifs : pédagogique et recueil de donnée pour science participative
Lieu : Carrigycrone
Materiel : carte/instruction papier
Prix : gratuit

https://www.vincenthylandartist.com/underwater-nature-trail

Metsähallitus underwater nature trail, finland national park

Located in the Archipelago National Park, Metsähallitus first ever underwater nature trail is situated on the shore of Stora Hästö Island. This special trail is intended for boaters, nature school students, archipelago ecotourism entrepreneurs and divers, as well as others interested in underwater nature.

starting point is marked by a white buoy (see map). The trail may be followed by swimmining (with swimming goggles), or **by snorkelling or diving**. The **information plates** are fixed to concrete plates located on the seabed at depths of **0.5-10 metres**, depending on which route is taken. There are two routes, i.e. the "little porpoise" and the "grey seal". Along the former, which measures **150 metres**, signs can even be read just floating on the surface. However, the **300 metres** "grey seal" route is intended for divers only. All information plates are linked by rope and marked with yellow buoys to make the trail easy to follow. **The guide plates inform visitors in finnish and swedish about underwater nature**

https://www.nationalparks.fi/archipelagonp/trails/underwaternaturetrail

Objective: information, education
Lieu : parc national de finlande,
Materiel : plaquette fixée sous l'eau
Prix: free

Biohut trail de Port Fréjus

Plusieurs modules représentant des animaux marins seront immergés en juin2022, pres de quai extérieur au port Fréjus du côté de la plage. En libre acces, les modules seront localisés avec une bouée de balisage.

Les modules sont construits comme les nurseries artificielles « Biohut » avec :

- Une première cage métallique rempli de coquille d'huitre, permettant l'accroche de a faune et de la flore fixée, constituant progressivement un garde-manger et un habitat temporaire pour les poissons juvéniles.
- Une seconde cage entourant la première et protégeant les juvéniles en empêchant d'éventuels prédateurs de s'approcher.

L'ensemble de ces modules sera déplacé (tout en restant dans l'eau) vers l'intérieur du port en hiver pour éviter aux modules d'être emporter ou endommagé par la houle

Un suivi écologique en prévu pour évaluer l'efficacité des biohut artistiques ainsi que l'impact du déplacement des biohuts

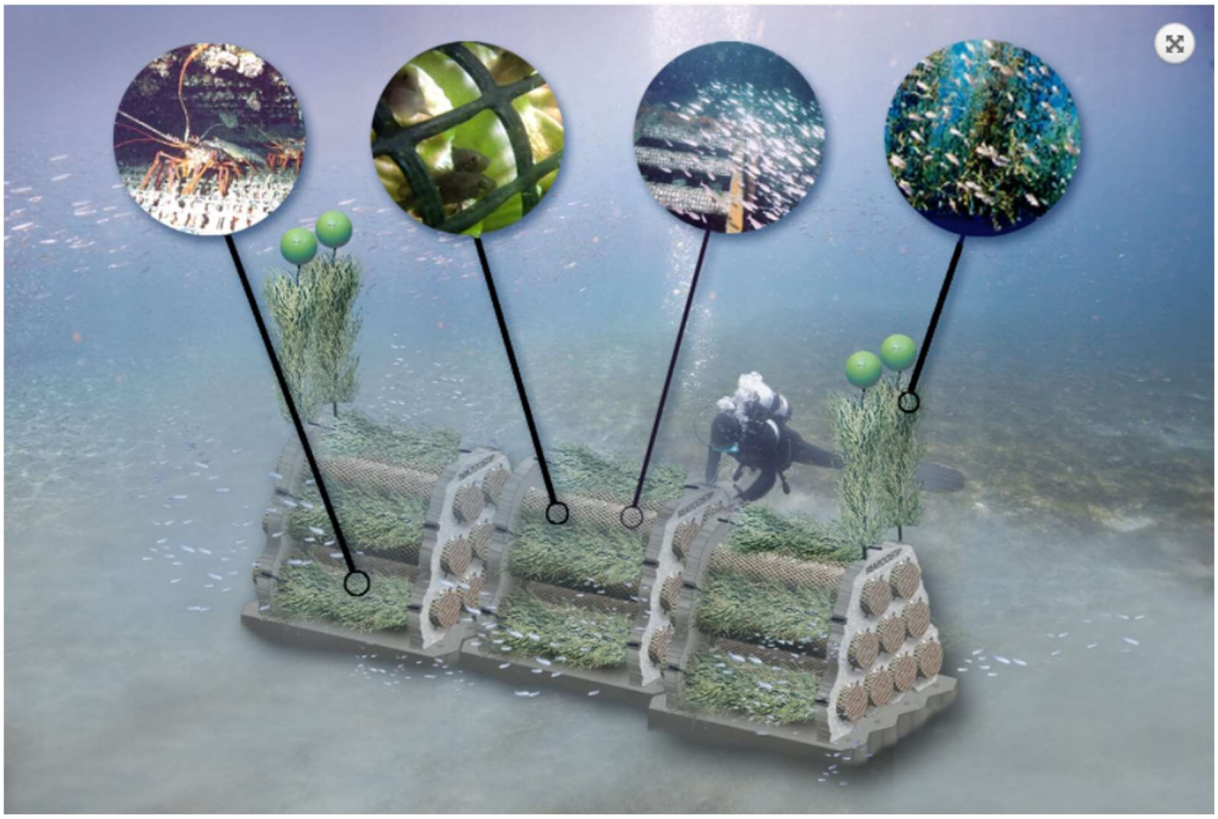
Pendant la saison estivale, il est prévu 4 visites guidées hebdomadaires d'une heure et demi financées par la Capitainerie. Elles seront animées par un club de plongée.

Lieu, libre accès, Fréjus
Matériel : acier + coquille d'huitre
Prix : free
Objectif : Le sentier sous-marin BIOHUT TRAIL propose ainsi d'atteindre 4 objectifs écologiques et sociétaux majeurs :
– **Objectif environnemental** par l'apport de fonctionnalités écologiques par la création d'habitats artificiels à fort potentiel de colonisation,
– **Objectif de préservation** grâce au détournement du public hors de zones naturelles en bon état,
– **Objectif de renforcer** l'engagement écologique des gestionnaires par la mise en place de continuité écologique entre leurs milieux artificiels aménagés et les milieux naturels,
– **Objectif d'éducation** facilitant l'accessibilité de l'information et la sensibilisation du grand public.

ANNEXE 3 : Recifs artificiels

- Beton biogene, Beton poreux, rugueux fonction écologiques sur substrat (seaboost)

https://www.seaboost.fr/contact-seaboost/



- Acier acier crapal (c'est un mélange acier recouvert de zinc + un peu d'aluminium). (ecocean)

https://www.ecocean.fr/

- Béton biodégradable de qualité marine à PH équilibré, fabriqué avec des moules en résine et fibre de verre, mais LOL (reef ball https://reefballfoundation.org/concrete-specs/)

ANNEXE 4 : Recommandations d'actions de gestion possibles en fonction des objectifs

Objectif	Encadrement des usages	Animation/communication	Surveillance	Suivi et autres modalités
1. Production halieutique				
Site à faible conflit (existant ou potentiel) / peu fréquenté	• Respecter la jachère de 3 ans • Appliquer les règles en vigueur dans la zone des 3 milles. En cas de non respect de règles, envisager de développer un projet intégrant des récifs anti-chaluts combinés aux récifs productifs	• Communication et valorisation des résultats des suivis aux usagers • Faire évoluer les règles de gestion	• Surveillance assurée par l'État suffisante	> Boite à outils suivis standardisés
Site à forte fréquentation et pression	• Respecter la jachère de 3 ans • Possible interdiction des usages extractifs pendant une période de temps définie dans l'année (calendrier d'accès au site) sur tout ou partie du site	• Communication et valorisation des résultats des suivis aux usagers • Faire évoluer les règles de gestion • Sensibilisation en mer et à terre	• Surveillance assurée par l'État suffisante • Etablir des règles de surveillance • Définir des sanctions à appliquer	
2. Récréatif/pédagogique				
Pêche récréative et chasse sous-marine	• Respecter la jachère de 3 ans • Appliquer les règles en vigueur dans la zone des 3 milles • Mise en place de charte de bonne conduite	• Définir une structure animatrice • Communication et valorisation des résultats des suivis aux usagers et accompagnement de l'évolution des règles de gestion • Définition concertée des modalités de mise en place des concours et compétitions	• Surveillance générale par les affaires maritimes • Gestion des bouées d'ancrage des navires de plongées/chasse • Balisage si nécessaire, à acter en comité de pilotage	> Boite à outils suivis standardisés
Plongée	• Estimer les capacités de charge par site afin de réglementer les accès aux clubs • Définir les modalités d'accès aux mouillages • Interdiction totale ou partielle sur tout ou partie du site • Prévoir les interactions avec la pêche professionnelle, la pêche de plaisance ou la chasse sous-marine • Prévoir la mise en place de calendriers d'accès au site pour les différents usages • Mise en place de charte de bonne conduite	• Définir une structure animatrice • Valorisation des résultats des suivis auprès des usagers • Sensibilisation des usagers		
Pédagogie et découverte biodiversité marine	• Réglementation des accès en fonction des capacités de charge par site • Mise en place de charte de bonne conduite		• Mise en place de bouées et de panneaux d'informations sous-marins • Définition des modalités d'entretien des bouées • Encadrement des plongées par du personnel en mer	
3. Reconstruction				
Restauration des biocénoses/ maintien bon état zone aquacole	• Sanctuarisation du site permanente et donc interdiction de toute activité dans un périmètre donné pour éviter la pêche à proximité et les risques sanitaires et de dégradation des ouvrages	• Structure animatrice ou animation par le maître d'ouvrage • Valorisation et communication régulière des résultats des suivis aux usagers • Faire évoluer les règles de gestion • Communiquer sur les actions et les programmes de restauration	• Balisage : si nécessaire, à acter en comité de pilotage • Surveillance accrue : en fonction des résultats du suivi et de l'évolution du milieu	Suivi des structures et suivi VMS des chalutiers pour vérification de l'impact sur l'éloignement et sanctions renforcées en cas de non respect > Boite à outils suivis standardisés

Annexe 8

Restaurer l'habitat coralligène en transplantant du corail rouge

Par Rémi CONTE

Diplôme d'université

« Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Restaurer l'habitat coralligène en transplantant du corail rouge

Tutrice : Julie Deter

Rémi Conte
Année 2022

Le héros [Persée] puise de l'eau, y lave ses mains victorieuses ; et, pour que le sable dur n'endommage pas la tête hérissée de serpents, il adoucit la rudesse du sol grâce à un lit de feuilles, y étend des algues poussées sous les eaux et y dépose, sur la face, la tête de Méduse, fille de Phorcys. La tige fraîchement coupée, et qui, grâce à sa moelle spongieuse, garde encore quelque vie, sensible à la vertu du monstre, durcit à son contact ; ses branches, ses feuilles furent pénétrées d'une rigidité d'un genre inconnu. Alors les nymphes de la mer font l'épreuve du prodige sur plusieurs autres tiges et, à leur grande joie, il se renouvelle ; et le répétant, elles ensemencent l'eau de fragments détachés de ces tiges. Aujourd'hui encore, les coraux ont conservé cette même propriété qu'ils durcissent au contact de l'air et que la tige, flexible dans l'eau, se pétrifie au-dessus de l'eau.

Ovide, Les Métamorphoses, livre IV, trad. J. Chamonard, Paris, Flammarion, 1966, p. 131.

Résumé

Le bassin méditerranéen est un « point chaud » de biodiversité. Les fonds coralligènes constituent le second pôle de biodiversité le plus important avec près de 1666 espèces. Cet habitat abrite également des services écosystémiques indispensables au bien-être humain. Malheureusement, cet écosystème est menacé par des pressions anthropiques et le changement global. Aujourd'hui, les méthodes de restauration écologique actives sont des outils complémentaires aux méthodes de restauration passives traditionnelles. Ainsi, parmi le coralligène, le corail rouge (*Corallium rubrum)* est une espèce ingénieur et emblématique de méditerranée qui subit les effets du changement global et la surexploitation de la pêche légale et illégale. Pour répondre à cette problématique en termes de restauration écologique active, la transplantation du corail rouge (*C. rubrum)* est l'une des réponses. Suite à différentes expérimentations, la technique de la grille en position érigée avec l'utilisation d'un mastic époxy à deux composant pour fixer les transplants est aujourd'hui la meilleure technique en termes de survie. Les colonies mères prélevées doivent être de 10 cm minimum avec un taux de nécrose inférieur à 10 % provenant soit, des prélèvements de braconniers, de colonies tombées du substrat, ou de prélèvements scientifiques en milieu naturel. La localité du prélèvement doit préférentiellement se trouver en faible profondeur, où les colonies ont un plus fort potentiel d'adaptation aux stress thermiques. Toutefois, des pistes d'améliorations et d'approfondissements sont encore à explorer.

Actuellement, les outils de restauration passive et les méthodes de restauration actives sont complémentaires pour renforcer la trajectoire de régénération du corail rouge (*C. rubrum*) afin de tendre vers un rétablissement de la complexité structurelle du coralligène.

Mots clés : coralligène, corail rouge, transplantation, restauration écologique.

Abstract

The Mediterranean basin is a biodiversity "hot spot". The coralligenous beds are the second most important centre of biodiversity with almost 1666 species. This habitat also provides ecosystem services that are essential for human well-being. Unfortunately, this ecosystem is threatened by anthropogenic pressures and global change. Today, active ecological restoration methods are complementary tools to traditional passive restoration methods. For example, among the coralligenous species, the red coral (*Corallium rubrum)* is an ingeneer species in the Mediterranean sea that is suffering by the effects of global change and overexploitation by legal and illegal fishing. To respond this issue in terms of active ecological restoration, the red coral (*C. rubrum*) transplantation is one of the solutions. Following various experiments, the grid technique in an erected position with the use of a two-component epoxy mastic to fix the transplants is today the best technique in terms of survival. The mother colonies taken, must be at least 10 cm long with a necrosis rate of less than 10%, either from poachers, from colonies that have fallen out of the substrate, or from scientific samples taken in the natural environment. The sampling site should preferably be located at a shallow depth, where the colonies have a greater potential to adapt to thermal stress. However, there is still avenues for improvement and further development.

Currently, passive restoration tools and active restoration methods are complementary to strengthen the regeneration trajectory of red coral (*C. rubrum*) in order restore the structural complexity of the coralligenous.

Keywords : coralligenous, red coral, transplantation, ecological restoration

Table des matières

1. Introduction 1

1.1. Contexte général 1

1.2. Etat des fonds de coralligène 2

1.3. Menaces sur l'habitat coralligène 4

1.4. Objectifs 8

1.5. Modes de restauration de l'habitat coralligène 8

2. Expérimentations de restauration de l'habitat coralligène par la transplantation du corail rouge 12

2.1. Les techniques de transplantation de *Corallium rubrum* 12

2.2. Les expérimentations en cours 16

3. Discussion 18

3.1. Limites des techniques 20

3.2. Recommandations 20

4. Conclusion 21

I. Références bibliographiques 1

II. Annexes I

Table des Figures

Figure 1 - Biocénose coralligène 1
Figure 2 - Pertes et gains de services en fonction de l'utilisation des écosystèmes et de la règlementation (modifié d'après MEEDD/MNHN, 2010) 2
Figure 3 - Mise en place d'une mesure de gestion sur un écosystème dégradé (modifié d'après MEEDD/MNHN, 2010) 2
Figure 4 - Les différentes valeurs pouvant être données à l'habitat coralligène (modifiée d'après FRB, 2013). 4
Figure 5- Les trois types de réponses/actions possibles suite à une dégradation d'un ou plusieurs écosystèmes, les niveaux de gestion nécessaire et les objectifs correspondants. La notion de seuil d'irréversibilité est parfois théorique et de toute façon difficile à préciser sur le terrain (modifié d'après Aronson et al., 2007) 9
Figure 6 - Méthode Driving Forces – Pressures – State – Impact – Responses (DPSIR) appliqué au corail rouge (Corallium rubrum)(modifié d'après Lenfant, 2022). 10
Figure 7 - Principes sur la restauration du corail rouge (Basé sur les travaux de Ounanian et al., 2018). (D'après Smith et al., 2021) 11
Figure 8 - Les tubes sont coulées dans des cylindres en béton, qui sont fixés à un cadre en fer, dont les coins sont enfoncés dans trois sacs de jute remplis de béton. Chaque cylindre porte sept branches d'une différente espèce (*E. singularis ; P. clavata ; C. rubrum*). Le plongeur effectue les mesures de longueur à l'aide d'une règle en plastique, tandis que les notes sont prises sur une ardoise en formica au moyen d'un crayon à charbon solide attaché (d'après Weidenberg, 1979). 13
Figure 9 - Protocole expérimental de transplantation in situ de C. rubrum synthétisant les critères de prélèvement des transplants, le nombre de transplantations réalisées par sous-site, par site et au total, et les différents sites retenus (modifié d'après Estaque, 2021). 17
Figure 10 – Photographie des transplantations de Corallium rubrum (Estaque, 2021) 17
Figure 11 - Caractéristiques démographiques dans les populations transplantées et naturelles de C. rubrum (Montero-Serra, 2017). 19

Liste des tableaux

Tableau 1 - Différentes techniques de transplantation de Corallium rubrum (modifié d'après Villechannoux et al. 2022). 14

1. Introduction

1.1. Contexte général

Le bassin méditerranéen est un « point chaud » de biodiversité (Myers *et al.*, 2000) contenant environ 18% de la biodiversité marine connue (Bianchi *et al.* 2000 ; Coll *et al*. 2010) soit environ 17 000 espèces. Parmi les écosystèmes les plus riches de Méditerranée figurent les récifs coralligènes (Figure 1) dénommés ainsi pour le corail rouge (*Corallium rubrum* (Linnaeus, 1758)) qu'ils abritent (Marion, 1883). En raison de cette richesse et de cette grande diversité, on considère que le coralligène est un des habitats ayant la plus haute valeur écologique de Méditerranée (INPN, 2022).

Figure 1 - Biocénose coralligène

Cet écosystème méditerranéen existe pour sa valeur intrinsèque et il est un support pour les êtres humains, qui en tirent des services écosystémiques. Cependant, cet écosystème (et d'autres) est aujourd'hui menacé par des pressions non négligeables qui suppriment ou détériorent par conséquent les services écosystémiques associés (Figure 2).

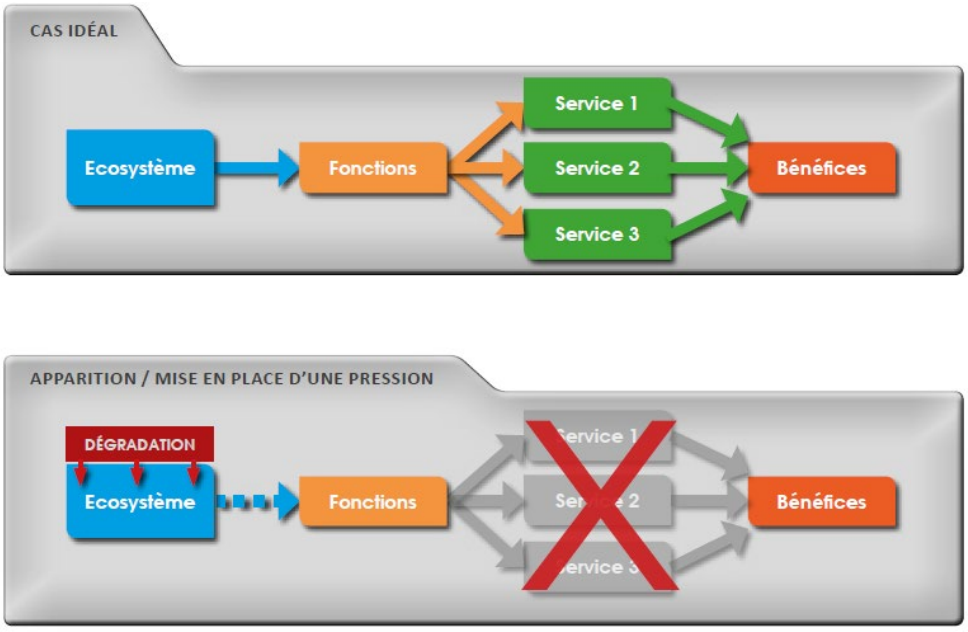


Figure 2 - Pertes et gains de services en fonction de l'utilisation des écosystèmes et de la règlementation (modifié d'après MEEDD/MNHN, 2010)

Les impacts sont d'autant plus forts à proximité des côtes (Harley *et al.,* 2006) car les activités et les pressions sont plus importantes et les écosystèmes qui s'y trouvent sont sensibles. Il est donc nécessaire d'agir en mettant en place des mesures de gestion (Figure 3) qui diminuent ces pressions et/ou les impacts afin de protéger ou restaurer les habitats marins côtiers.

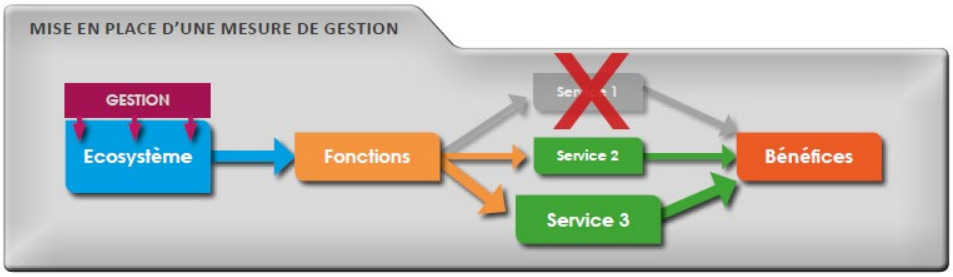


Figure 3 - Mise en place d'une mesure de gestion sur un écosystème dégradé (modifié d'après MEEDD/MNHN, 2010)

1.2. Etat des fonds de coralligène

La méditerranée abrite des services écosystémiques indispensables au bien-être humain (Plan Bleu Méditerranée, 2019).

Après les herbiers de posidonies, les fonds coralligènes constituent le second pôle de biodiversité avec près de 1666 espèces dont 1241 invertébrés, 315 espèces d'algues et 110 espèces de poissons associés (Ballesteros, 2006). Le coralligène désigne classiquement des

fonds concrétionnés caractéristiques des substrats durs méditerranéens de l'étage circalittoral (Laborel, 1987). Le terme de « coralligène » a été employé pour la première fois par Marion (1883) afin de désigner les fonds durs existants entre 30 et 70m de profondeur et appelés « brundo » par les pêcheurs marseillais (Sartoretto, 2012). Les études biocénotiques ont révélé la complexité tridimensionnelle de cet habitat (de Jode, 2018 ; Hong, 1982 ; Laubier, 1966). Le coralligène est considéré comme un carrefour éco-éthologique grâce à l'extrême hétérogénéité structurale de l'habitat. La croissance des algues calcaires, consolidées et compactées par des invertébrés constructeurs et des processus physico-chimiques, façonne des anfractuosités qui, remodelées par les foreurs vont constituer des réseaux cavitaires qui abritent une faune variée et riche ayant souvent des besoins et des relations très diverses (Sartoretto, 2017).

Il est donc difficile de trouver un consensus pour une définition stricte. Dans ce rapport, le terme coralligène correspondra à un fond dur circalittoral, d'origine biogénique, principalement édifié par l'accumulation d'algues calcaires encroûtantes et foliacées vivant dans des conditions de luminosité réduite (Ballesteros, 2006).

Cet habitat constitue un abri pour de nombreuses espèces à fort intérêt patrimonial ou commercial (Sartoretto *et al.*, 2012). Les fonds coralligènes sont également des zones de ressources alimentaires et de recrutement (Thierry de Ville d'Avray, 2018). Leur complexité structurale et la beauté des peuplements d'invertébrés associés (gorgones, éponges, bryozoaires) font des formations coralligènes des paysages sous-marins exceptionnels, attirant de nombreux plongeurs sous-marins. Il s'agit également de lieux de pêche privilégiés pour les crustacés et les poissons (Sartoretto *et al.* 2012) (Figure 4).

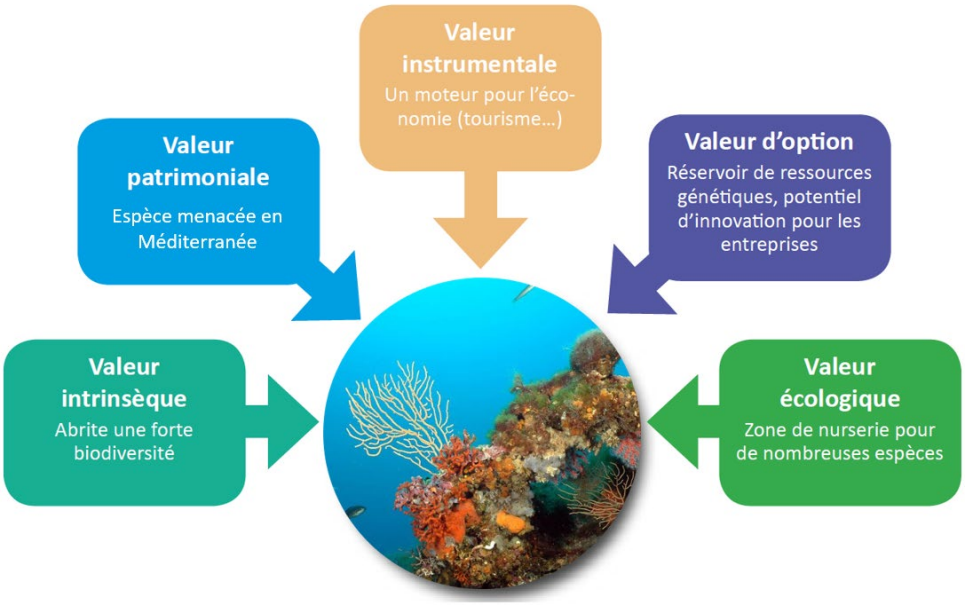


Figure 4 - Les différentes valeurs pouvant être données à l'habitat coralligène (modifiée d'après FRB, 2013).

1.3. Menaces sur l'habitat coralligène

Des menaces perturbent la stabilité des fonds coralligènes. Tout d'abord, il peut s'agir de la qualité chimique de l'eau avec par exemple les ions phosphates, présents dans certains engrais utilisés en agriculture qui peuvent empêcher la calcification (Simkiss, 1964). Mais aussi, une teneur en matière en suspension trop élevée dû à l'apport d'eaux usées ou de fonds remuées. Les cavités sont alors colmatées par les sédiments et les algues encroûtantes sont recouvertes, empêchant ainsi leur activité photosynthétique (Laborel, 1961). Ces pollutions ralentissent les activités bio-constructrices tant dis que celle des foreurs est activée. Ces phénomènes entraînent une réduction de la densité des individus de 75 % et une diminution de la richesse spécifique de 45 % au profit d'espèces généralistes et érodeuses (Hong, 1983 ; Muséum national d'Histoire naturelle, 2017). La pêche peut également avoir un impact négatif, entraînant une modification de la structure des peuplements avec une raréfaction de certaines espèces de crustacés et de la plupart des poissons de grande taille (Weinberg, 1991). La pêche au chalut est interdite sur le coralligène car elle a une action particulièrement destructrice avec son action mécanique, souvent accompagné d'une remise en suspension des sédiments (Boudouresque *et al.,* 1990). La pêche traditionnelle et de loisirs est également source de dégâts physiques et de déséquilibre dans les diversités. Ensuite, les activités récréatives tel que la pratique de la plongée sous-marine peut induire une abrasion, des arrachages, des prélèvements, des déplacements et des

dérangements d'espèces. Ces nuisances sont amplifiées par l'hyperfréquentation de certains sites et l'ancrage des bateaux (Plathong *et al.,* 2000; Tratalos et Austin, 2001). Finalement, l'arrivée d'espèces envahissantes entraine une compétition avec les espèces autochtones. C'est par exemple, le cas des algues filamenteuses *Acrothamnion preisseii* et *Wormesleyella setacea* qui forment des feutrages épais qui recouvrent les concrétionnements et gênent l'activité photosynthétique des algues calcaires (Piazzi et Cinelli, 2000).

L'une des espèces emblématiques du coralligène, et particulièrement impactée par les pressions anthropiques est le corail rouge, *Corallium rubrum* (Linné, 1758) (Ballesteros, 2006 ; Laborel, 1961 ; Pérès *et al.* 1964). Cette espèce est un Cnidaire de l'ordre des Alcyonacea et du genre *Corallium*. Le corail rouge est emblématique de Méditerranée (Torrents, 2007) et très commun en Méditerranée nord-occidentale. C'est une espèce longévive, dont la colonie recensée la plus âgée avait plus de 100 ans (Riedl 1983; Garcia-Rodriguez *et al.,* 1986). Elle est gonochorique, avec une reproduction sexuelle qui se déroule seulement en été, avec une faible fécondité des polypes, moins d'une larve produite par polype (Santangelo *et al.*, 2003 ;Torrents *et al.*, 2011) et des densités de recrutement élevées (Bramanti *et al.*, 2005 ; Santangelo *et al.*, 2012). Les colonies peuvent déjà être fertiles à 2 cm de hauteur, mais la fertilité optimale est atteinte à 6 cm (Tsounis *et al.* ,2006 ; Torrents *et al.*, 2005). Son taux de croissance est lent, pour la hauteur, elle est de l'ordre de 1,78 mm/an en moyenne (Marschal *et al*. 2004) à 1 cm/an en moyenne (Bavestrello, 2009). Pour le diamètre basal, elle est de 0,24 mm/an (Marschal *et al.* 2004) en moyenne à 0,6 mm/an (Bavestrello, 2009). Le corail rouge est retrouvé de 10 à plus 1000 m de profondeur (Leyla *et al*., 2016). Les différentes populations de cette espèce vivent donc dans des habitats aux conditions très variées. Les populations moins profondes évoluent dans un environnement relativement plus variable et marqué par des fluctuations de températures saisonnières importantes (Bensoussan *et al*., 2010), tandis que les populations profondes se trouvent dans des conditions de températures plus stables aux alentours de 13 °C. Les populations superficielles vivant très près de leur seuil de thermotolérance (25°C) (Torrents *et al.,* 2008; Bensoussan *et al.,* 2010) sont donc grandement menacées par les anomalies thermiques (Garrabou *et al*., 2001; Harmelin et Garrabou, 2005; Linares *et al*., 2005, 2008; Torrents *et al.*, 2008).

Etant donné que l'une des menaces prépondérantes est le changement global, et que les organismes benthiques sessiles sont les plus exposés aux modifications environnementales du fait de leur mode de vie fixé (Estaque, 2021), le corail rouge est une espèce particulièrement menacée. En effet, en méditerranée nord-occidentale, le changement global s'est

particulièrement fait ressentir par des anomalies de températures durant les étés 1999, 2003 et 2006 qui ont causé des vagues de mortalités massives de peuplements de nombreux invertébrés telles que des gorgones (Ben Mustapha et El Abed, 2001 ; Cerrano *et al*., 2000; Perez *et al.,* 2000; Romano *et al.,* 2000; Garrabou *et al.,* 2009). Ces anomalies thermiques croissantes couplées à l'acidification des océans ont également provoqué des épisodes de blanchiment des corallinacées *(Mesophyllum spp.* et *Lithophyllum spp.)*(MME-T-MEDNet., 2019). Il peut également s'agir d'événements climatiques extrêmes comme la tempête de 2008 aux îles Mèdes (Espagne) qui a détruit la moitié des espèces du site (Teixidó *et al.,* 2013). L'un des éléments préoccupants réside dans la récurrence rapprochée de ces épisodes qui constituent une sérieuse menace à moyen et long terme, pour le maintien des peuplements d'espèces dont la résilience est faible.

L'une des menaces qui pèse sur le corail rouge est aussi sa valeur commerciale. Il est récolté depuis l'Antiquité pour l'utilisation de son squelette calcaire en bijouterie et en ornementation (Marchetti, 1965; Morel *et al.,* 2000). Il faut des décennies pour qu'une colonie atteigne une taille économiquement intéressante (valeur marchande actuelle d'environ 1000 USD par gramme (Villechanoux *et al.*, 2022)). Dans les années 1980, la surexploitation des colonies de corail rouge par la récolte légale et illégale, en particulier avec l'utilisation d'engins destructeurs (Bruckner, 2016 ; Cattaneo-Vietti, 2016 ; Cau *et al.,* 2016 ; Rossi *et al.,* 2008 ; Tsounis *et al.,* 2010) a entrainé une réduction d'une classe de taille importante par une récolte sélective de population et ainsi une diminution de la ressource (Satangelo *et al.,* 1993 ; Ortoez, 1986 ; Ledoux *et al.,* 2020 ; Bruckner, 2009). L'espèce subit également une forte pression de plongée sous-marine sur certains sites sur lesquelles le mouvement des plongeurs détériore les espèces érigées, laissant place à des organismes incrustants ou massifs (Garrabou *et al.,* 1998).

En outre, le corail rouge n'est pas sous une menace d'extinction imminente mais sa population est sans aucun doute en train de décroitre à cause des risques cités précédemment (Satangelo *et al.,*1993 ; Ortoez, 1986 ; Ledoux *et al.,* 2020 ; Bruckner, 2009). Ainsi, cette espèce à récemment été inscrite comme espèce en danger sur la Liste Rouge d'espèces menacés de Méditerranée de l'UICN (Otero *et al.,* 2017). Le corail rouge est également inscrit à l'annexe II de la convention de Berne et à l'annexe III de la convention de Barcelone et son exploitation est aujourd'hui très réglementée (Thierry de Ville d'Avray, 2018). Cependant, l'espèce ne figure pas à l'annexe II de la « Convention on the Trade in Endangered Species (CITES) » malgré deux propositions qui ont été faites ces dernières années (CITES, 2010 ; CITES, 2007). Aujourd'hui, le corail

rouge peut être préservé notamment grâce à la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) qui vise à maintenir ou restaurer un bon fonctionnement des écosystèmes marins tout en permettant l'exercice des usages en mer pour les générations futures (Milieu Marin France, 2020). Néanmoins, ce processus est retardé par un manque de connaissances sur les caractéristiques physiologiques, de croissance, de reproduction, de distribution, ainsi que l'absence ou l'insuffisance de données historiques de référence et par des obstacles dans les définitions et les méthodes partagés de suivis à différentes échelle régionales (Smith *et al.*, 2021). Selon le pays et les efforts scientifiques investis, les études à une échelle large sur le corail rouge sont rares du fait de son temps de vie long. Ces lacunes apparaissent dans les évaluations officielles des Etats Membres (EM) de l'Union Européenne soumises à la Directive Habitats. Pour cette espèce, l'Italie, par exemple, fait état d'un "statut de population inconnu", la Grèce d'une "aire de répartition inconnue", la Croatie d'un "habitat inconnu pour l'espèce" et de "perspectives d'avenir inconnues", tandis que Malte, suite à de nouvelles découvertes faites par le projet LIFE BaĦAR pour N2K, fait état d'un "statut de population favorable" basé sur de nouvelles données. La Commission Générale des Pêches pour la Méditerranée (CGPM) a mis en œuvre un nouveau programme de recherche régional sur le corail rouge afin de combler les lacunes en matière de données en acquérant à la fois données dépendantes de la pêche (via des observateurs à bord) et indépendantes de la pêche (via des enquêtes en mer par ROVs) afin de mettre à jour les évaluations de stocks, d'obtenir des éléments de référence pour la gestion et d'étudier la reconstitution des populations exploitées et protégées (FAO, 2020).

Aujourd'hui, les techniques de restauration traditionnelle passives (réglementations, aires marines protégées) peuvent contribuer à réduire ou à supprimer les menaces (Edgar *et al.,* 2014). Mais pour rétablir les populations et les communautés endommagées, la restauration active peut s'avérer être un outil complémentaire efficace (Possingham *et al.* 2015). Au cours des dernières décennies, la restauration écologique dans le domaine marin, a généralement réussi qu'à de très petites échelles spatiales et continuent de présenter de nombreux défis (Edwards & Gomez 2007 ; Rinkevich 2015). Les principales opérations asexuées de restauration écologique marine ont consisté à transplanter des fragments de coraux ou des pousses d'herbiers afin d'éviter les premiers stades de vie sensibles (Edwards & Clark 1998). En Méditerranée, peu d'études se sont penchées sur la restauration écologique d'espèces ingénieures du coralligène, c'est-à-dire des organismes, comme le corail rouge, qui modulent la biodisponibilité des ressources pour les autres espèces (Garrabou *et al.*, 2017). Pourtant, la

préservation du corail rouge est aujourd'hui menacée par de multiples pressions anthropiques (récolte, mouillage, anomalies thermiques, …) (Ferrigno *et al.*, 2020, Cerrano *et al.*, 2013).

1.4. Objectifs

Face aux pressions anthropiques croissantes auxquelles fait face le coralligène, il est impératif de renforcer la trajectoire de régénération en apportant des éléments de réponse, complémentaires à la restauration écologique traditionnelle passive. Compte tenu de la complexité de cet habitat, il est primordial de focaliser les efforts sur une espèce clé de voûte et menacé, tel que le corail rouge (*Corallium rubrum*). Ainsi, nous pouvons nous demander dans quelle mesure la transplantation du corail rouge est un outil pour restaurer les fonds coralligènes ? Pour répondre à cette problématique, nous verrons dans un premier temps les modes de restauration de l'habitat coralligène avant de nous intéresser plus particulièrement à l'analyse de diverses expérimentations de transplantation du corail rouge. Enfin, nous discuterons des résultats présentés, des limites techniques ainsi que de recommandations.

1.5. Modes de restauration de l'habitat coralligène

Dans un premier temps, il impératif de rappeler que parmi les nombreuses mesures de gestion, il faut tout d'abord prioriser la non-dégradation[1] et la limitation des pressions[2]. Néanmoins, lorsqu'il est déjà trop tard et que l'état d'un écosystème est déjà perturbé ou dégradé, les actions envisageables varient selon la situation et les objectifs à atteindre (Figure 5).

[1] La non-dégradation concerne la conservation de zones, souvent à fort intérêt environnemental, par le biais de la maitrise des activités humaines, la création de réserves naturelles ou d'aires marines protégées, pour peu que la gestion soit effective (Lenfant ***et al.,*** 2015).

[2] La limitation des pressions s'appuie sur des efforts faits en amont pour réduire les impacts sur l'environnement (Lenfant ***et al.,*** 2015).

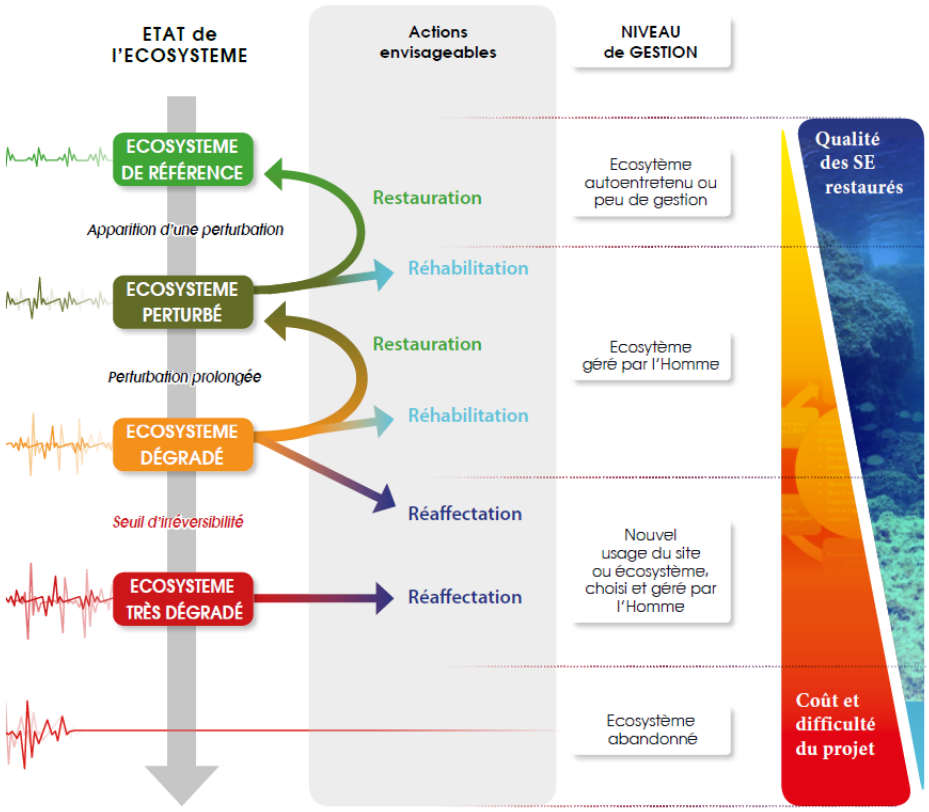


Figure 5- Les trois types de réponses/actions possibles suite à une dégradation d'un ou plusieurs écosystèmes, les niveaux de gestion nécessaire et les objectifs correspondants. La notion de seuil d'irréversibilité est parfois théorique et de toute façon difficile à préciser sur le terrain (modifié d'après Aronson *et al.,* 2007)

La réhabilitation consiste en la régénération de certaines fonctions de l'écosystème existantes avant la perturbation. La réaffectation, c'est la reconversion de l'écosystème trop endommagé vers de nouveaux usages (Lenfant *et al.,* 2015). Et la restauration écologique, désigne une activité intentionnelle qui initie ou accélère le rétablissement d'un écosystème avec le respect de sa composition spécifique, sa structure des communautés, ses fonctions écologiques, sa cohérence avec l'environnement physique et sa connectivité avec le paysage alentour. Elle suppose et nécessite une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle et évolutive des écosystèmes ciblés, de l'histoire de la dégradation anthropique et, enfin, du choix d'un écosystème de référence pour guider la planification, la réalisation, le suivi et l'évaluation du projet de restauration (Gouvernement Merlittoral2030, 2021).

Pour analyser l'état de *Corallium rubrum* dans une situation, il est possible de sélectionner une force motrice initiale et de s'appuyer sur le modèle DPSIR (Driving Forces, Pressures, State, Impact, Responses) proposé par l'Agence Européenne pour l'Environnement, pour trouver une des actions réponses à mettre en place (Figure 6).

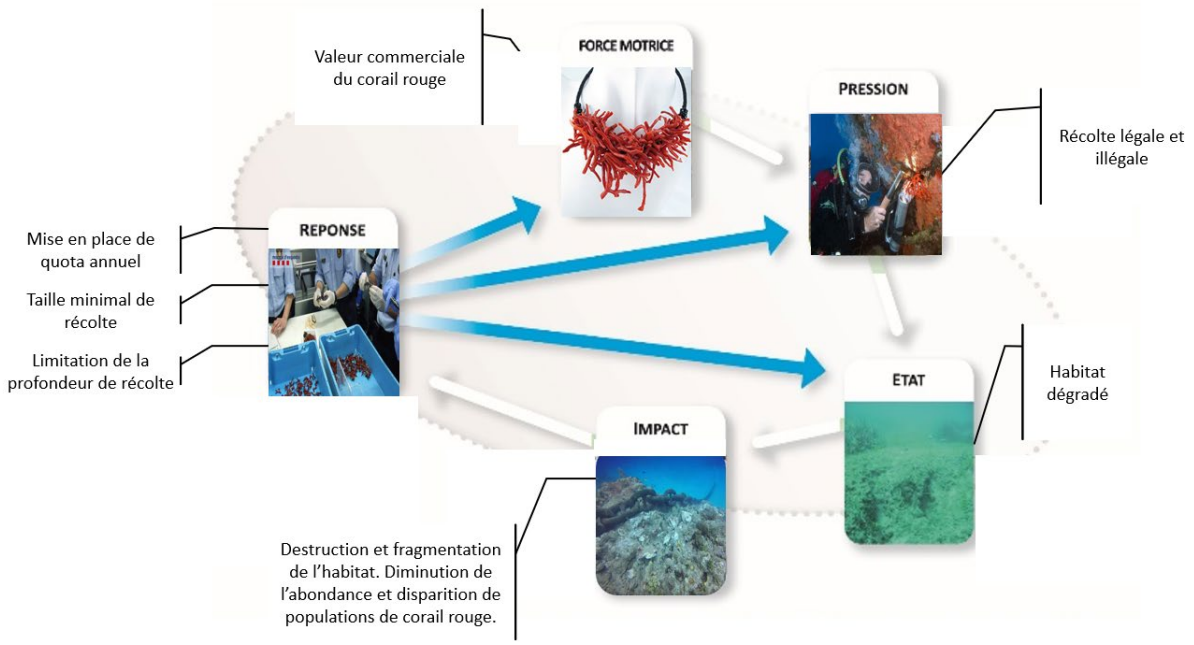


Figure 6 - Méthode Driving Forces – Pressures – State – Impact – Responses (DPSIR) appliqué au corail rouge (*Corallium rubrum*)(modifié d'après Lenfant, 2022).

Les réponses apportées se distinguent en deux principaux processus d'intervention sur la nature. Il peut s'agir de la restauration passive, c'est-à-dire le rétablissement des conditions naturelles pour tendre vers l'état originel, sans autre intervention que par le biais de la réduction des pressions ou de la suppression des impacts si possible, on parle également de mésologie écocentrique (Berque, 1985), « Putting Nature First » (Smith *et al.,* 2021)(*Figure 7B*).

D'autre part, si la restauration passive n'est pas suffisante, l'intervention directe de l'Homme est nécessaire en faisant appel aux concepts de l'ingénierie. Dans ce cas, le but peut être de restaurer les bénéfices avec une forte intervention de l'Homme de manière anthropocentré (Figure 7 C), ou de restaurer les bénéfices avec une faible intervention de l'Homme et de manière durable (Figure 7 D).

Aussi, il est important de rappeler qu'il est généralement très difficile d'atteindre un retour à l'état vierge d'un écosystème dégradé malgré le fort potentiel de résilience des écosystèmes. Le processus de bioconstruction des fonds coralligènes nécessite un temps très long qui ralenti le retour à cet état vierge. L'écart entre l'état originel et l'état atteint est alors appelé hystérésis.

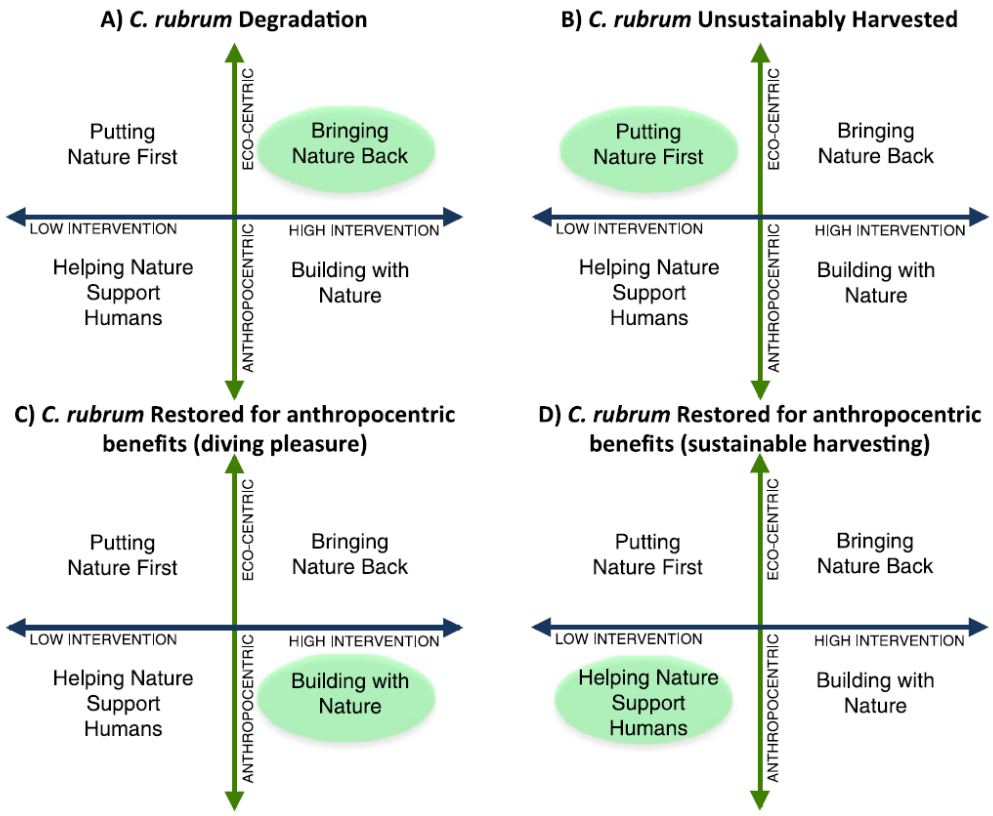


Figure 7 - Principes sur la restauration du corail rouge (Basé sur les travaux de Ounanian et al., 2018). (D'après Smith *et al.,* 2021)

Parmi les interventions passives on distingue par exemple les Aires Marines protégées (AMP). Toutefois, pour le corail rouge, Linares *et al*., a suivi neuf populations pendant 3 à 13 ans dans différentes Aires Marines Protégées de méditerranée nord-occidentale. Ils ont révélé un état de conservation de la population de corail rouge loin de ce que nous attendons dans les AMP du fait de facteurs externes parfois difficilement contrôlables : braconnage, plongée sous-marine, plaisance, prédation, faible taux de recrutement, taux de dispersion des larves de gorgones limitée (Ledoux *et al.,* 2010), évènements catastrophiques et effets du changement climatique de manière générale (Shaish *et al.,* 2010 ; Gomez *et al.,* 2014). Par conséquent, il est peu probable, en l'état actuel, que les populations protégées servent de source aux populations exploitées. Il est donc nécessaire d'améliorer le réseau actuel d'AMP mais aussi d'évoluer vers un cadre légal plus restrictif pour les populations de corail rouge, même s'il existe déjà des mesures (taille minimale de récolte fixé à 7 mm de diamètre (1983), interdiction d'utiliser la drague à l'échelle méditerranéenne (1994) et interdiction récolter des populations de *C. rubrum* au-dessus de 50 m de profondeur (Cau *et al.,* 2013)). Les mesures plus strictes consisteraient par exemple, à fixer des quotas annuels ou encore d'interdire la pêche du corail rouge comme cela a été décrété en 2017 par le gouvernement espagnol. En effet, un moratoire sur 10 ans a

été instauré sur la récolte du corail rouge le long de la Costa Brava. Le but étant d'assurer le rétablissement de cette espèce. Cette mesure a été prise sur la base d'un rapport de scientifiques indiquant que 90 % des récifs de corail rouge le long de la côte catalane, à des profondeurs inférieures à 50 m, étaient en "mauvais état" (Philips, 2018).

Toutefois, une majorité d'experts expriment un consensus sur le besoin d'agir à travers un mélange entre restauration active et passive. En effet, il est encore temps d'agir pour trouver un compromis entre réduction de la récolte de corail rouge et exploitation durable comme il est fait par exemple en Sardaigne avec l'exploitation du corail rouge autorisée mais avec une limite de profondeur de 80 m et une limite de taille basale de 10 mm. La CGPM recherche également des mesures efficaces en matière de contrôle, d'évaluation et de traçabilité de la pêche illégale (GFCM, 2019). Carugati *et al.* proposent l'utilisation d'observateurs scientifiques embarqués obligatoire comme mesure de gestion (Carugati *et al.,* 2020). De plus, les programmes de suivi à long terme peuvent fournir des données appropriées mais le financement limite souvent la durée du suivi après les actions de restauration et les expériences (Precht & Robbart 2006 ; Lindenmayer & Likens 2009).

Dans la suite du rapport, il s'agira de recenser parmi les interventions actives, les diverses expérimentations existantes pour la transplantation du corail rouge, afin d'en extraire une analyse et des perspectives.

2. Expérimentations de restauration de l'habitat coralligène par la transplantation du corail rouge

2.1. Les techniques de transplantation de *Corallium rubrum*

Depuis la fin du 20^{e} siècle, la transplantation de *Corallium rubrum* à plusieurs fois été expérimenté. Historiquement, le premier essai a été réalisé *in situ* en 1979 par Steven Weidenberg utilisant des blocs en béton comprenant des tubes en PVC où les transplants étaient maintenus jusqu'à la transplantation d'un morceau de coralligène dans son entièreté. Les résultats furent très mauvais (0% de survie) dus à l'échec de la méthode, causant la mort des transplants (Weidenberg, 1979) (Figure 8).

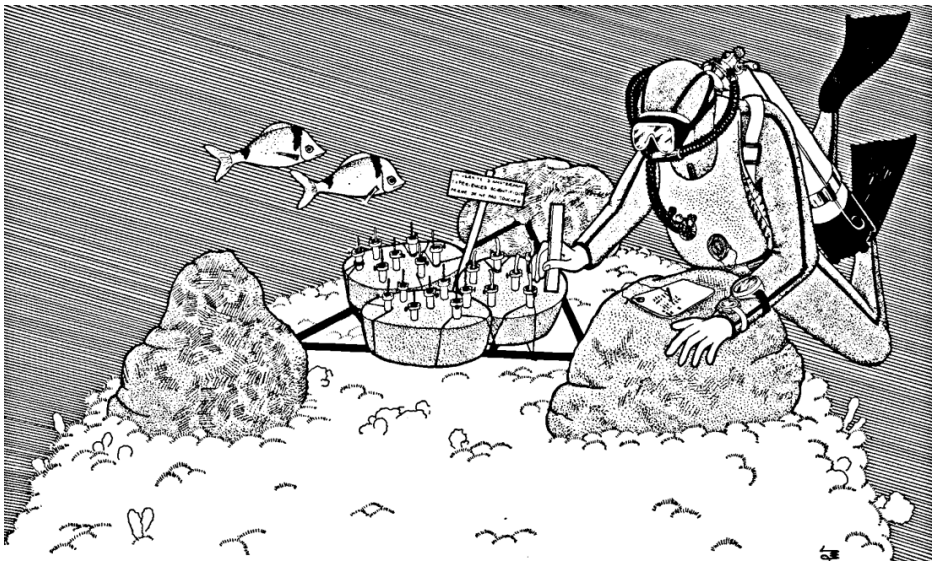


Figure 8 - Les tubes sont coulées dans des cylindres en béton, qui sont fixés à un cadre en fer, dont les coins sont enfoncés dans trois sacs de jute remplis de béton. Chaque cylindre porte sept branches d'une différente espèce (*E. singularis ; P. clavata ; C. rubrum*). Le plongeur effectue les mesures de longueur à l'aide d'une règle en plastique, tandis que les notes sont prises sur une ardoise en formica au moyen d'un crayon à charbon solide attaché (d'après Weidenberg, 1979).

Au cours de la décennie suivante, quatre autres tentatives ont suivi, parmi lesquelles une méthode a été jugée non appropriée, tandis que les données manquent pour les autres (Bianconi, 1988; Giacomelli *et al.,* 1989 ; Arosio *et al.,* 1989 ; Cattaneo-Vietti *et al.,* 1991). En 1992, la première expérience à grande échelle sur substrat artificiel a obtenu des taux de survie de 40 %, la perte étant uniquement due au détachement et non à la mort de l'organisme. Il s'agissait de la première expérience utilisant une résine pour fixer les transplants sur le substrat de porphyre (Pais *et al.,* 1992). Après cette étude, l'utilisation de résine est devenue la principale technique de fixation des transplants de *C. rubrum*. Depuis, les transplantations de corail rouge se sont faites rares.

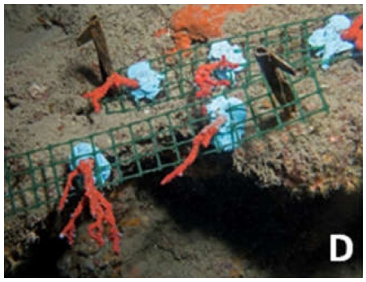
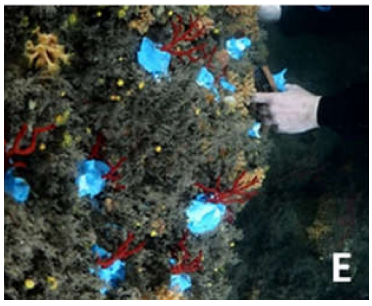
Au total, 10 publications scientifiques ont été trouvées pour les expériences de transplantation menées soit en France, Italie, ou en Espagne, toutes dans des eaux peu profondes (25-40 m de profondeur) (Villechanoux *et al.,* 2022) (Annexes).

Tout d'abord, avant la transplantation, le fragment doit être prélevé par des plongeurs professionnels soit depuis une colonie vivante en milieu naturel, ou bien depuis des colonies tombées du substrat (naturellement ou par arrachage involontaire (plongeurs, pêche)) ou encore depuis des colonies vivantes prises par des braconniers.

Ensuite, les principales techniques de transplantation sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 1)(Villechanoux *et al.,* 2022). Pour évaluer ces techniques, trois critères sont principalement analysés : 1) le taux de survie et le taux de perte de la colonie, 2) l'apparition de nouvelles branches, et 3) les variations du schéma de croissance.

Tableau 1 - Différentes techniques de transplantation de *Corallium rubrum* (modifié d'après Villechannoux *et al.* 2022).

Méthode	**Photo**	**Taux de survie / taux de perte** **Apparition de nouvelles branches** **Variations du schéma de croissance**
Polystyrène		La méthode du polystyrène présente un taux de survie des transplants *de C. rubrum* après 4 ans de 30 % (n = 6). Un déclin majeur à été observé un jour après le début de l'expérience avec une perte de 15% et 2 mois après le début de l'expérience avec une perte de 40 % dû à des détachements (Villechanoux *et al.,* 2022). Un autre déclin à été enregistré 50 mois (2020) après, quand aucun suivi n'a pu être fait à cause de la pandémie de COVID-19. L'échec technique à touché 70 % des transplants pour cette méthode. 50 % des transplants ont perdus des branches et 17 % des transplants ont gagné de branches.
Grille sous les cavités		La méthode de grille sous les cavités présente un taux de survie des transplants de *C. rubrum* après 4 ans de 32 % (n = 8). Une première diminution de survie des transplants de 52 % à été observé un an après à cause d'une chute de la grille. Les années suivantes, la diminution a continué avec une perte total en 2020 de 12 % des transplants. L'échec technique a touché 60 % des transplants pour cette méthode (dont 24 % sont dû au détachement de la grille).

		46 % des transplants ont perdus des branches tandis que 8 % des transplants ont gagné des branches. La nécrose a affecté seulement 4 % des transplants (n = 1).
Mastic époxy sur les rochers		33 % des transplants en position érigé ont survécu (n = 3) après 3 ans et 6 mois. La méthode montre une première perte des transplants de 11 % après un an. L'échec technique à touché 44 % des transplants pour cette méthode. Les transplants ont perdu 44 % des branches et aucune branche n'a été gagné. La nécrose a affecté 22 % des transplants (n = 2).
Grille sur les rochers		60 % des transplants en position érigé avec la grille sur les rochers, ont survécu (n = 3) après 3 ans et 6 mois. Après 5 mois une première perte de 20 % à été observé et après 3 ans l'une des grilles s'est détachée menant à une perte de 20 % de tous les transplants. L'échec technique à touché 40 % des transplants pour cette méthode. Les transplants ont perdu 60 % des branches et aucune branche n'a été gagné.
Transplantation des colonies peu profondes en eau profonde		Le taux de survie des colonies à été de 82 % (n = 30) après un an et demi. La perte de 18 % est dû au détachement du mastic epoxy et aucun transplant mort n'a été observé. Seulement 3 % (n = 1) des transplants survivants a été affecté par une diminution des ramifications de 12,5 % de leurs branches.

Les techniques du polystyrène et des grilles PVC sont utilisées afin de maintenir les transplants contre le substrat. Aucune information n'est donnée sur la fixation du polystyrène tandis que les grilles PVC sont fixées avec des chevilles métalliques.

Villechanoux *et al.,* ont étudiés la croissance par la taille des transplants pour les deux techniques de grilles (10 transplants sous les cavités et 3 sur les rochers). La plupart des transplants sous les cavités (80 %, n = 8) diminuent en taille un an après la transplantation. Pour la technique de la grille sur les rochers, 18 % diminuent en taille après un an tandis que les autres méthodes ont augmenté en taille. Un test de corrélation montre une corrélation non significative entre la différence de ramification et les variations de croissance par la taille (Villechannoux *et al.* 2022*).*

2.2. Les expérimentations en cours

Le projet TRANSCOR (Septentrion, 2021), mené par Septentrion, a commencé en mars 2019 jusqu'à décembre 2021. Il a permis, entre autres, de prélever des fragments de corail rouge auprès de colonies donneuses qui ont été transplantés ailleurs pour créer de nouvelles colonies. Le but étant d'étudier la survie de l'espèce dans trois situations différentes. Premièrement, le changement de température (liée à la profondeur), deuxièmement le changement de température et de support et finalement avec une température constante. L'objectif ensuite est de comprendre la résistance de *C. rubrum* à la méthode de transplantation, au changement de contexte thermique (i.e. anomalies thermiques) et au changement de contexte environnemental (i.e. pollution anthropique).

Les critères de choix des sites de transplantation étaient (1) la présence d'un habitat coralligène en bon état de conservation, (2) l'abondance de colonies de *C. rubrum,* (3) la présence de grandes colonies de corail rouge, (4) la faible présence de dégradation mécanique et (5) la faible fréquentation par les plongeurs.

Les manipulations de transplantation ont été effectuées en plongée sous-marine selon le protocole défini dans le projet MERCES, 2017 (J. Garrabou, comm. pers. d'après Estaque, 2021). 10 colonies mères saines de *C. rubrum* (i.e. nécrose < 10 %) ayant une taille suffisante (i.e. 10 cm) ont été identifiées puis utilisées pour chaque sous-site.

Pour *C. rubrum*, deux fragments d'une taille supérieure à 3 cm ont été prélevés sur chaque colonie mère, pour un total de 20 transplants par sous site. Au total 60 colonies mères de *C. rubrum* ont étaient prélevées pour la réalisation de 120 transplantations (Figure 9).

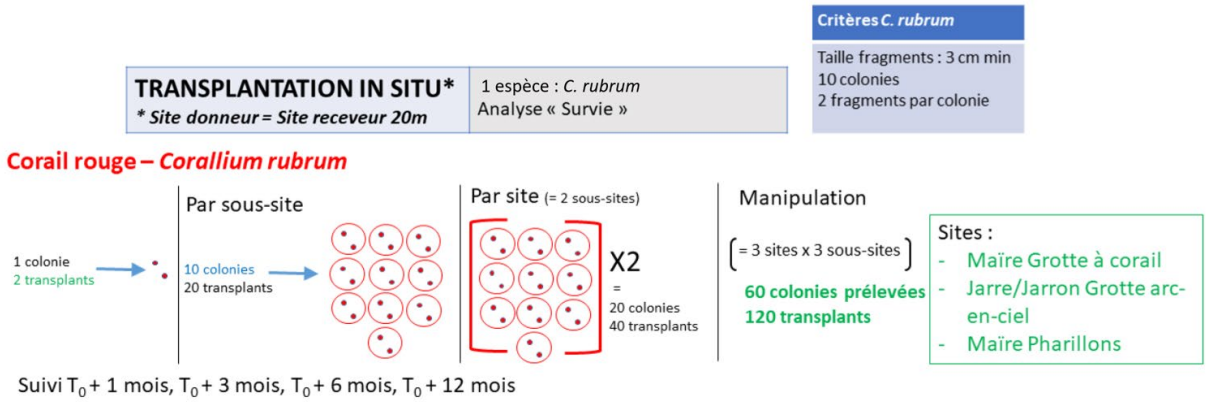


Figure 9 - Protocole expérimental de transplantation *in situ* de *C. rubrum* synthétisant les critères de prélèvement des transplants, le nombre de transplantations réalisées par sous-site, par site et au total, et les différents sites retenus (modifié d'après Estaque, 2021).

Les fragments ont été prélevés en les cassant manuellement, et ont été conservés dans un dispositif permettant le stockage des fragments provenant de chacune des colonies mères séparément. La transplantation a ensuite été effectuée dans le Parc National des Calanques, à l'aide d'un mastic époxy bi-composant IVEGOR® après avoir mis à nu le substrat à l'aide d'une brosse métallique pour favoriser une meilleure prise du mastic. Les fragments étaient ensuite insérés dans une boule de mastic de taille adaptée pour enfin être apposés contre le substrat par pression à l'aide des doigts (Figure 10). Les plongeurs manipulant les fragments à transplanter portaient systématiquement des gants en latex afin d'éviter tout potentiel transfert de pathogènes pouvant influencer la survie des transplants. Pour chacun des sous-sites, une logique de lecture de gauche à droite et de haut en bas a été conservée afin de permettre une meilleure identification des transplants lors du suivi (Estaque, 2021).

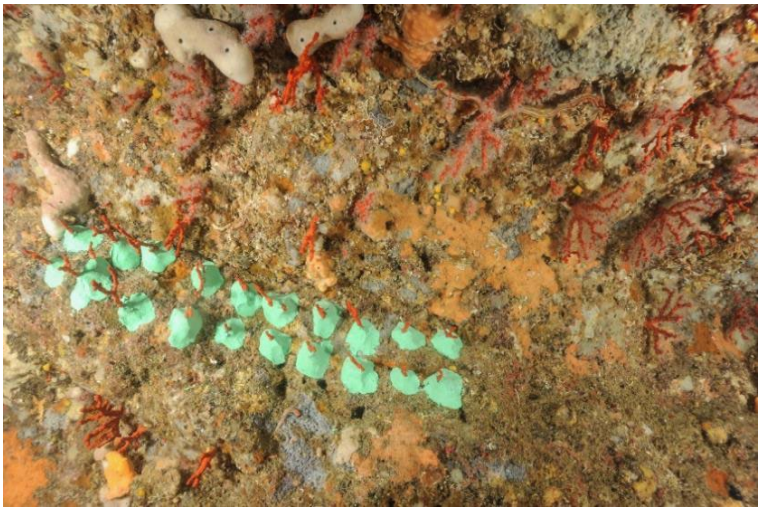


Figure 10 – Photographie des transplantations de *Corallium rubrum* (Estaque, 2021)

Ensuite, des suivis ont été réalisé avec des observations visuelles pour évaluer la présence ou l'absence des transplants ainsi que leur taux de nécrose. Aussi des relevés photogrammétriques ont permis d'évaluer la croissance des transplants, qui sont en cours d'analyse. Les premiers résultats à T + 6 mois montre que 89,3 % des transplants ne présentaient pas de signe de nécrose. De plus, les transplants de *C. rubrum* avaient un taux de présence de 67,5 % avec une potentielle influence du site ou du sous-site de transplantation, qui est peut-être dû à la présence de fort courant ou de grande affluence de plongeurs. Ces résultats sont donc encourageants, néanmoins, d'autres résultats vont paraître afin de connaitre le suivi sur le plus long terme et aussi le devenir des colonies prélevées.

Un autre projet innovant est nommé OpCoral. Il est porté par Ecocean, l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et Andromède océanologie. Il consiste à prélever et élever des invertébrés associés aux fonds coralligènes de Méditerranée en vue d'une réimplantation dans le milieu naturel. La ferme dispose d'aquarium et de bassin conçue pour élever et bouturer, entre autres, le corail rouge en recréant le flux lumineux des profondeurs dans laquelle se trouve l'espèce. L'idée étant, entre autres, d'élever le corail rouge en milieu artificiel afin de booster sa croissance et ses capacités de résilience lorsqu'il sera réimplanté dans le milieu naturel. Le projet est actuellement arrêté par manque de financement.

Enfin, afin de faciliter le développement d'une culture de la restauration marine en Europe, l'Union Européenne a fondé et finance le projet MERCES (www.merces-project.eu), qui porte sur les habitats coralligènes. Le programme a débuté le 1er juin 2016 pour une durée de 48 mois. Dans ce contexte, de nouvelles méthodes de restauration sont en phase de test afin de valider différentes approches au niveau régional. Les méthodes portent sur des espèces de macro invertébrées de trois groupes taxonomiques clés (Cnidaria/Anthozoa, Porifera/Demospongiae et Bryozoa) en Espagne, en Italie et en Croatie. Les protocoles de restauration portent sur diverses techniques de transplantations à partir de donneurs de tailles petites à moyennes. Par exemple, ce projet a permis de financer en partie l'étude de Villechanoux *et al.*, qui a recensée et testée les différentes techniques de transplantation de *Corallium rubrum.*

3. Discussion

La transplantation de corail rouge est une méthode qui fonctionne et offre une importante survie des transplants, les mortalités sont principalement dues à des erreurs techniques (Linares *et al.,* 2008; Montero-Serra *et al.,* 2018). I. Montero-Serra souligne l'extrême résistance des colonies

de *C. rubrum* au stress de la transplantation avec des taux de survie similaires à ceux des populations naturelles (Figure 10, Montero-Serra, 2017) (Figure 11).

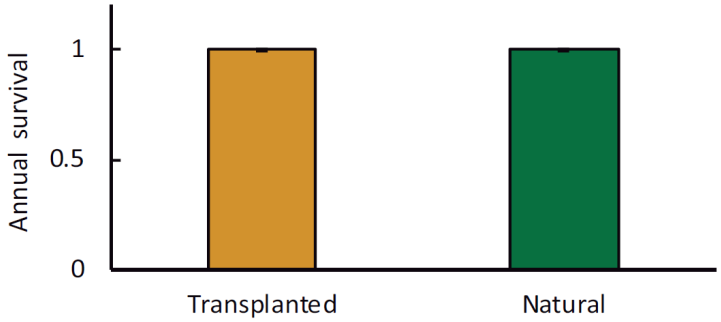


Figure 11 - Caractéristiques démographiques dans les populations transplantées et naturelles de *C. rubrum* (Montero-Serra, 2017).

Ces taux de survie sont élevés malgré le stress de la récolte, le maintien hors de l'eau dans les filets de braconniers, le transport, le maintien en aquarium pendant une semaine et enfin la transplantation dans l'habitat naturel. De plus, après 4 ans, les colonies de *C. rubrum* transplantées présentaient une proportion de colonies fertiles et une fréquence plus élevée de larves par polype comparé aux colonies des populations naturelles (Montero-Serra, 2017). Néanmoins, les projections stochastiques développées ont révélé que des périodes allant de 30 à 40 ans peuvent être nécessaires pour que les populations de *C. rubrum* transplantées présentent la taille de colonies comparables à celles observées dans les populations naturelles bien préservées (Linares *et al.,* 2010 ; Montero-Serra *et al.,* 2018). Cela s'explique du fait que *C. rubrum* est une espèce longévive, à croissance lente, à maturité retardée, à faible dispersion larvaire et à faible recrutement (Coma *et al.,* 1998; Garrabou et Harmelin, 2002; Marschal et *et al.,* 2004; Linares *et al.,* 2010; Santangelo *et al.,* 2012).

Du point de vue de la perte des branches et de la diminution de la hauteur des colonies, les résultats suggèrent, indépendamment de la technique utilisée, un comportement adaptatif de *C. rubrum*. L'espèce s'adapterait aux nouvelles conditions environnementales pour répondre au stress. L'absence de corrélation entre la différence de ramification et les variations de croissance par la taille peut être due à la petite taille de l'échantillon, ou pourrait hypothétiser que les branches perdues n'étaient pas seulement la branche apicale mais aussi des branches latérales. Les pertes de branches pourraient ainsi ressembler à une procédure d'autotomie, qui n'a été observée que dans des conditions de laboratoire pour *Corallium rubrum* (Russo *et al.*, 1999). Ces observations ainsi que le faible taux de mortalité (5 %) des transplants confirment la résistance et la capacité d'adaptation élevées de *C. rubrum*, observée précédemment dans d'autres expériences de transplantation et dans des conditions environnementales instables

(Montero-Serra, 2018 ; Cattaneo-Vietti *et al.,* 1991 ; Pais *et al.,* 1992 ; Cerrano *et al.,* 1997 ; Cerrano *et al.,* 2000 ; Ledoux *et al.,* 2020 ; Ledoux *et al.,* 2015 ; Haguenauer, *et al.,* 2013).

3.1. Limites des techniques

La transplantation de *C. rubrum* en position renversée sous des cavités est une méthode novatrice (Villechanoux *et al.,* 2022) qui permet d'augmenter les chances de survie à long terme. En effet, la méthode réduit le risque de destruction par la pêche commerciale et artisanale et elle réduit également le risque de sédimentation. Parmi les 2 méthodes testées en position renversée (polystyrène et grille sous les cavités), après 4 ans, les résultats sont similaires en termes de taux de survie (32 % et 30 % respectivement)(Villechanoux *et al.,* 2022). Cependant, la technique du polystyrène utilise un matériau non naturel qui a subi un détachement précoce et lent. La technique de la grille sous les cavités utilise également un matériau non naturel et a subi un détachement plus tardif mais soudain.

Ces techniques de transplantations présentent des taux de survie supérieurs aux expérimentations de *C. rubrum* en position érigée, ce qui suggère que l'inclinaison du substrat peut fortement affecter la survie des transplants.

3.2. Recommandations

La meilleure méthode, en termes de survie, est la technique de la grille en position érigée avec l'utilisation d'un mastic époxy à deux composant pour fixer les transplants. Le protocole de transplantation à suivre est celui du projet MERCES, 2017, communiqué par Estaque, 2021 afin d'avoir une méthodologie commune et de pouvoir comparer les résultats à plus grande échelle.

Le fragment à transplanter doit provenir d'une colonie encore vivante. Ce fragment peut provenir de prélèvements de braconniers, de colonies tombées du substrat, ou de prélèvements scientifiques en milieu naturel. Si cette dernière méthode est utilisée, le prélèvement doit répondre à des critères précis : la taille de la colonie mère doit être de 10 cm minimum avec un taux de nécrose inférieur à 10%. Cette colonie mère peut ensuite être divisée en plusieurs fragments de 3 cm minimum. Aussi, la localité de prélèvement doit préférentiellement se trouver en faible profondeur, où les fluctuations de températures saisonnières sont plus importantes, entrainant ainsi un plus fort potentiel d'adaptation aux stress thermiques pour ces colonies (Ledoux *et al.,* 2010a; Haguenauer *et al.,* 2013; Mokhtar-Jamaï *et al.,* 2013; Pratlong *et al.,* 2015, Aurelle *et al.*, 2018).

Toutefois, des pistes d'améliorations sont à explorer. Tout d'abord, il reste à éclaircir l'intérêt réel de la grille (aide à la fixation des transplants ? réduction réelle des risques de détachement ?). De plus, il faut améliorer les techniques de fixation de la grille en vissant plus fermement, plus profondément et également trouver un matériau plus naturel que celui utilisé actuellement. En outre, les phases expérimentations actuels et futurs doivent inclure l'étude des potentielles adaptations génétiques ou phénotypiques des populations de *C. rubrum* face aux anomalies thermiques (Ledoux *et al.,* 2010a, 2015) et les éventuelles modifications du microbiome qui renseignent sur l'installation de pathogènes pouvant causer des épisodes de mortalités (Bally et Garrabou, 2007). Aussi, il faut prendre en compte le suivi des colonies prélevées (colonies mères) afin de connaitre leur devenir.

Dans ce contexte, malgré l'efficacité de la transplantation du corail rouge et le faible effort initial de transplantation, il convient d'éviter l'utilisation anarchique et abusive de ces techniques comme alibi à des destructions liées à de nouveaux aménagements (Boudouresque, 1993). La transplantation peut être utilisée pour renforcer ou maintenir des populations de corail rouge soumises à des pressions anthropiques telles que l'exploitation (Garrabou et Harmelin, 2002; Tsounis *et al.,* 2006, 2007; Linares *et al.,* 2010), la plongée (Coma *et al.,* 2004; Linares *et al.,* 2007, 2008; Piazzi *et al.,* 2012) ou les filets de pêche et les ancrages (Ferrigno *et al.,* 2018) ou des anomalies de thermiques (Garrabou *et al.,* 2001; Harmelin et Garrabou, 2005; Linares *et al.,* 2005; Torrents *et al.,* 2008). Enfin, la transplantation peut être aussi utilisée pour éviter la mort de colonies de *C. rubrum* tombées de leur point d'attache sur le substrat (Linares *et al.,* 2008) ou pour sauver des colonies vivantes saisies à des braconniers (Montero-Serra *et al.*, 2018).

4. Conclusion

Le coralligène est un habitat primordial en Méditerranée, autant pour la richesse de sa biodiversité, que pour les services écosystémiques qu'il offre. Sa grande biodiversité en fait un habitat complexe et malheureusement soumis à de multiples pressions liées à l'homme et au changement global. Les outils de conservation traditionnelles jusqu'alors proposés reposent sur la restauration passive avec l'utilisation d'AMP et de mesures réglementaires. Malheureusement, leur rôle n'est aujourd'hui plus suffisant. Il est dorénavant nécessaire de renforcer la trajectoire de régénération afin de rétablir la complexité structurelle du coralligène. Pour cela, on peut utiliser la restauration active qui se focalise sur les espèces ingénieurs, tel

que le corail rouge, qui ont un effet positif de résilience sur l'ensemble de l'habitat endommagé. La transplantation est une méthode qui fonctionne relativement bien et les principaux échecs sont liées aux techniques utilisées. La technique de la grille en position érigée, avec l'utilisation d'un mastic époxy à deux composant est actuellement la meilleure méthode en termes de survie, même s'il reste encore à des améliorations à effectuer. Aussi, les connaissances sur le corail rouge font toujours face à des lacunes et à de multiples incertitudes (état de la population, maladies, coûts, et succès à long terme de la restauration). Il faut donc continuer les efforts de discussion sur l'état de conservation du coralligène à l'échelle de la Méditerranée, ce qui permettra de garantir un consensus scientifique solide porté par l'Union Européenne et de lancer des projets de restauration écologique actifs. Ces projets doivent être coordonnées autour du bassin méditerranéen et doivent coupler restauration passive (AMP) et restauration active (Possingham *et al.*, 2015).

I. Références bibliographiques

Arosio, P.; Russino, G.; Russino, G.F. Il trapianto del nobile corallo. Sci. Vita Nuova 1989, 9, 32–35.

Aronson, J., D. Renison, O. Rangel-Ch., S. Levy-Tacher, C. Ovalle and A. Del Pozo. 2007c Restauración del capital natural: Sin reservas no hay bienes ni servicios. Ecosistemas 16(3):15–24.

Aronson J., Aguirre N., Munoz J. Ecological Restoration for Future Conservation Professionals: Training with Conceptual Models and Practical Exercises. 2010. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/250231660_Ecological_Restoration_for_Future_Conservation_Professionals_Training_with_Conceptual_Models_and_Practical_Exercises (Consulté le 21 mai 2022).

Aurelle D., Pratlong M., Haguenauer A., Minnee E., Toulza E., Linares C., López-Sendino P., Garrabou J., Ledoux J.B., Mitta G., et Pontarotti P. 2018. Population genomics of the red coral Corallium rubrum: from local adaptation to conservation. Disponible sur : https://digital.csic.es/handle/10261/193052 (Consulté le 22 mai 2022).

Ballesteros E. 2006. Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge. Taylor & Francis Disponible sur : https://digital.csic.es/handle/10261/132026 (Consulté le 1 mai 2022).

Bally M. et Garrabou J. 2007. Thermodependent bacterial pathogens and mass mortalities in temperate benthic communities: a new case of emerging disease linked to climate change. Global Change Biology, 13(10). DOI : 10.1111/j.1365-2486.2007.01423.x

Bavestrello G. et Cerrano C. 2009. BIOLOGICAL INTERACTIONS AFFECTING THE GROWTH RATES OF RED CORAL (CORALLIUM RUBRUM) COLONIES. Proceedings of the 1st Symposium on the Coralligenous and other calcareous bio-concretions of the Mediterranean Sea, Disponible sur : https://www.academia.edu/38101023/BIOLOGICAL_INTERACTIONS_AFFECTING_THE_GROWTH_RATES_OF_RED_CORAL_CORALLIUM_RUBRUM_COLONIES (Consulté le 21 mai 2022).

Ben Mustapha K., Komatsu T., Hattour A., Sammari C., ZARROUK S., SOUISSI A., et ABED A. 2002. Tunisian mega benthos from infra (Posidonia meadows) and circalittoral (coralligenous) sites. Bulletin de l'Institut National Scientifique et Technique d'Oceanographie et de Pêche de Salammbô, 29.

BERQUE A. 1985. MILIEU, TRAJET DE PAYSAGE ET DÉTERMINISME GÉOGRAPHIQUE. L'Espace géographique, 14(2), p. 99-104.

Bianconi, C.H.; Rivoire, G.; Stiller, A.; Boudouresque, C.F. Le Corail Rouge Collarium rubrum (Lamarck) Dans La Reserve Naturelle de Scandola (Corse). Trav. Sci. Par. Nat. Reg. Nat. Corse. Fr. 1988, 16, 1–80.

Boissery, 2014. Restauration du milieu marin méditerranéen, état des travaux en cours et perspectives. Rapport Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 59 pages ».

Bouchoucha M. RESTAURATION ÉCOLOGIQUE : , p. 17.

Bruckner AW (2009) Rate and extent of decline in Corallium (pink and red coral) populations: existing data meet the requirements for a CITES Appendix II listing. Mar Ecol Prog Ser 397:319–332

Bruckner A.W. 2016. Advances in Management of Precious Corals to Address Unsustainable and Destructive Harvest Techniques. Dans : Goffredo S., Dubinsky Z. (éd.). The Cnidaria, Past, Present and Future: The world of Medusa and her sisters. Cham : Springer International Publishing, p. 747-786. Disponible sur : https://doi.org/10.1007/978-3-319-31305-4_46 (Consulté le 21 mai 2022).

Carugati L., Cau A., Follesa M.C., Melis R., Moccia D., Porcu C., Salvadori S., et Cannas R. 2020. Onboard Scientific Observers Provide a Realistic Picture of Harvesting and Management Priorities for the Precious Red Coral (*Corallium rubrum* L.). Frontiers in Marine Science, 7. Disponible sur : https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2020.00482 (Consulté le 8 mai 2022).

Cattaneo-Vietti, R.; Bavestrello, G.; Barbieri, M.; Senes, L. Premières expériences d'élevage de corail rouge dans la réserve sous-marine de Monaco. Assoc. Monégasque Pour La Prot. De La Nat. Compte-Rendu Des Act. 1991, 1991, 44–45.

Cattaneo-Vietti, R.; Bavestrello, G.; Barbieri, M.; Senes, L. Premières expériences d'élevage de corail rouge dans la réserve sous-marine de Monaco. Assoc. Monégasque Pour La Prot. De La Nat. Compte-Rendu Des Act. 1991, 1991, 44–45.

Cattaneo-Vietti R., M. Bo, R. Cannas, A. Cau, C. Follesa, E. Meliadò, G. F. Russo, R. Sandulli, G. Santangelo & G. Bavestrello (2016) An overexploited Italian treasure: past and present distribution and exploitation of the precious red coral Corallium rubrum (L., 1758) (Cnidaria: Anthozoa), Italian Journal of Zoology, 83:4, 443-455, DOI: 10.1080/11250003.2016.1255788

Cépralmar, Région Languedoc-Roussillon - Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon : 236 pages.

Cerrano, C.; Bavestrello, G.; Cicogna, F.; Cattaneo-Vietti, R. New Experiences on Transplantation and Red Coral Harvesting Effects in the Ligurian Sea. In Red Coral and Other Mediterranean Octocorals: Biology and Protection; Ministero per le Politiche Agricole: Roma, Italy, 1997; pp. 57–73

Cerrano, C.; Bavestrello, G.; Cattaneo-Vietti, R.; Cicogna, F. New Transplantation Techniques for the Mediterranean Red Coral. Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova 2000, 64–65, 73–81.

Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi, C., Cattaneo-vietti, R., Bava, S., Morganti, C., Morri, C., Picco, P., Sara, G., Schiaparelli, S., Siccardi, A. and Sponga, F. (2000), A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. Ecology Letters, 3: 284-293. https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00152.x Advances in Management of Precious Corals to Address Unsustainable and Destructive Harvest Techniques | SpringerLink. Disponible sur : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-31305-4_46 (Consulté le 8 mai 2022b).

CITES. Consideration of Proposals for Amendment of Appendices I and II—Proposal 4. CoP15 Prop.21. In Proceedings of the Fifteenth Meeting of the Conference of the Parties, Doha, Qatar, 13–25 March 2010. Available online: https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/15/prop/E-15-Prop-21.pdf (accessed on 2 January 2022).

CITES. Consideration of Proposals for Amendment of Appendices I and II—Proposal 4. Fourteenth Meeting of the Conference of the Parties, CoP14 Prop.21. The Hague, The Netherlands, 3–15

June 2007. Available online: https://cites.org/sites/default/files/ eng/cop/14/prop/E14-P21.pdf (accessed on 2 January 2022)

Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., Kaschner K., Lasram F.B.R., Aguzzi J., Ballesteros E., Bianchi C.N., Corbera J., Dailianis T., Danovaro R., Estrada M., Froglia C., Galil B.S., Gasol J.M., Gertwagen R., Gil J., Guilhaumon F., Kesner-Reyes K., Kitsos M.-S., Koukouras A., Lampadariou N., Laxamana E., Cuadra C.M.L.-F. de la, Lotze H.K., Martin D., Mouillot D., Oro D., Raicevich S., Rius-Barile J., Saiz-Salinas J.I., Vicente C.S., Somot S., Templado J., Turon X., Vafidis D., Villanueva R., et Voultsiadou E. 2010. The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. PLOS ONE, 5(8). DOI : 10.1371/journal.pone.0011842

Coma, R. et al. (1995) 'Reproduction and cycle of gonadal development in the Mediterranean gorgonian Paramuricea clavata', Marine Ecology Progress Series, 117, pp. 173–183. doi: 10.3354/meps117173.

Coma, R. et al. (1998) 'Growth in a Modular Colonial Marine Invertebrate', Estuarine, Coastal and Shelf Science, 47(4), pp. 459–470. doi: 10.1006/ecss.1998.0375.

Coma, R. et al. (2004) 'LONG-TERM ASSESSMENT OF TEMPERATE OCTOCORAL MORTALITY PATTERNS, PROTECTED VS. UNPROTECTED AREAS', Ecological Applications, 14(5), p. 13. https://doi.org/10.1890/03-5176.

DCSMM. Dans : DCSMM [En ligne]. Disponible sur : https://dcsmm.milieumarinfrance.fr/ (Consulté le 7 mai 2022d).

DCSMM. Dans : Milieu Marin France [En ligne]. Disponible sur : https://www.milieumarinfrance.fr/A-propos/Actualites/Le-nouveau-site-de-la-DCSMM (Consulté le 7 mai 2022k).

Directive 92/43/CEE du Conseil, du 21 mai 1992, concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, 1992. Disponible sur : http://data.europa.eu/eli/dir/1992/43/oj/fra (Consulté le 8 mai 2022).

Di Franco A., Marchini A., Baiata P., Milazzo M., et Chemello R. 2009. Developing a scuba trail vulnerability index (STVI): A case study from a Mediterranean MPA. Biodiversity and Conservation, 18. DOI : 10.1007/s10531-008-9461-x

Edgar G.J., Stuart-Smith R.D., Willis T.J., Kininmonth S., Baker S.C., Banks S., Barrett N.S., Becerro M.A., Bernard A.T.F., Berkhout J., Buxton C.D., Campbell S.J., Cooper A.T., Davey M., Edgar S.C., Försterra G., Galván D.E., Irigoyen A.J., Kushner D.J., Moura R., Parnell P.E., Shears N.T., Soler G., Strain E.M.A., et Thomson R.J. 2014. Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. Nature, 506(7487). DOI : 10.1038/nature13022

Edwards A.J. et Clark S. 1999. Coral Transplantation: A Useful Management Tool or Misguided Meddling? Marine Pollution Bulletin, 37(8). DOI : 10.1016/S0025-326X(99)00145-9

Edwards A. et Gomez E. 2007. Reef Restoration Concepts & Guidelines.

Fava F., G. Bavestrello, L. Valisano & C. Cerrano (2010) Survival, growth and regeneration in explants of four temperate gorgonian species in the Mediterranean Sea, Italian Journal of Zoology, 77:1, 44-52, DOI: 10.1080/11250000902769680 Governing marine ecosystem

restoration: the role of discourses and uncertainties - ScienceDirect. Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308597X18302033 (Consulté le 8 mai 2022i).

FAO. 2020. Report of the forty-third session of the General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM): Athens, Greece, 4–8 November 2019. Rome, Italy : FAO, 202 p. (General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM) - Session Reports, 43) Disponible sur : https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8379en (Consulté le 8 mai 2022).

Ferrigno F., Appolloni L., Rendina F., Donnarumma L., Russo G.F., et Sandulli R. 2020. Red coral (Corallium rubrum) populations and coralligenous characterization within « Regno di Nettuno MPA » (Tyrrhenian Sea, Italy). The European Zoological Journal, Disponible sur : http://dx.doi.org/10.1080/24750263.2020.1742808 (Consulté le 21 mai 2022).

FRB (2013). Les valeurs de la biodiversite. Des cles pour comprendre la biodiversite n°3, mai 2013, frb, paris

Garrabou J., T. Perez, S. Sartoretto, et J. G. Harmelin. 2001. Mass mortality event in red coral Corallium rubrum populations in the Provence region (France, NW Mediterranean). *Mar Ecol Prog Ser*, 217, p. 263-272.

Garrabou J., Sala E., Arcas A., et Zabala M. 2008. The Impact of Diving on Rocky Sublittoral Communities: A Case Study of a Bryozoan Population. Conservation Biology, 12. DOI : 10.1111/j.1523-1739.1998.96417.x

Giacomelli, S.G.; Bavestrello, F.; Cicogna. Consultation Technique sur le Corail Rouge. Experiences in rearing Corallium rubrum. Fish. Rep. 1989, 413, 57–58.

Haguenauer A., Zuberer F., Ledoux J.-B., et Aurelle D. 2013. Adaptive abilities of the Mediterranean red coral Corallium rubrum in a heterogeneous and changing environment: from population to functional genetics. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 449. DOI : 10.1016/j.jembe.2013.10.010

HARDEN JONES F.R. (1968). Fish Migration. St. Martin Press, New York, 325 pp.

Hong J.-S. Université d'Aix-Marseille II et Facult?? des sciences. 1980. Etude faunistique d'un fond de concrétionnement de typre coralligène soumis à un gradient de pollution en Méditerranée nord-occidentale (Golfe de Fos). S.l. : [s.n.]

Jean-Claude Romano, Nathaniel Bensoussan, Walid A.N Younes, Denise Arlhac, Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés ?, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie, Volume 323, Issue 4, 2000, Pages 415-427, ISSN 0764-4469, https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)00141-4.
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0764446900001414)

Ledoux J.-B., Frias-Vidal S., Montero-Serra I., Antunes A., Casado Bueno C., Civit S., Lopez-Sendino P., Linares C., et Garrabou J. 2020. Assessing the impact of population decline on mating system in the overexploited Mediterranean red coral. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 30(6). DOI : 10.1002/aqc.3327

Ledoux, Jean-Baptiste & Aurelle, Didier & Féral, Jean-Pierre & Garrabou, Joaquim & Marschal, Christian. (2010). Experimental approach to the potential response of a long-lived invertebrate species facing the warming in the N-W Mediterranean.. Potential for adaptive evolution at species range margins: contrasting interactions between red coral populations and their environment in a changing ocean - Ledoux - 2015 - Ecology and Evolution - Wiley Online

Library. Disponible sur : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ece3.1324 (Consulté le 14 mai 2022o).

Lenfant P., Gudefin A., Fonbonne S., Aronson J., Blin E., Aqua J.-L., Calvet C., Catalon E., Consultants A., Julien E., Direach L.L., Posidonie G., Neveu R., Pastor J., Pristchepa S., et Quenouille B. Orientations et principes. , p. 98.

LENFANT P., GUDEFIN A., FONBONNE S., LECAILLON G., ARONSON J., BLIN E., LOURIE S.M., BOISSERY P., LOEUILLARD J.-L., PALMARO A., HERROUIN G., PERSON J., 2015. Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes.

Lenfant P. 2022. D.U. Restauration Ecologique des petits fonds côtiers. Orientations et Principes

Leyla K., Aguilar R., Alvarez H., Borg J.A., Evans J., García S., et Schembri P. 2016. New depth record of the precious red coral Corallium rubrum for the Mediterranean.

Lindenmayer D. et Likens G. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. Trends in ecology & evolution, 24. DOI : 10.1016/j.tree.2009.03.005

Lorenzo Bramanti, Giampaolo Magagnini, Lucio De Maio, Giovanni Santangelo, Recruitment, early survival and growth of the Mediterranean red coral Corallium rubrum (L 1758), a 4-year study, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Volume 314, Issue 1, 2005, Pages 69-78, ISSN 0022-0981, https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.08.029. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022098104005489) Survey of deep-dwelling red coral (Corallium rubrum) populations at Cap de Creus (NW Mediterranean) | SpringerLink. Disponible sur : https://link.springer.com/article/10.1007/s00227-008-0947-6 (Consulté le 8 mai 2022s).

Magazine H. [s d]. Catalonia’s Conflicted Effort to Save Red Coral. Dans : Hakai Magazine [En ligne]. Disponible sur : https://hakaimagazine.com/news/catalonias-conflicted-effort-to-save-red-coral/ (Consulté le 8 mai 2022).

Marion A.F. 1883. Esquisse d’une topographie zoologique du golfe de Marseille. Cayer et cie., 120 p.

MME-T-MEDNet: Mass mortality events in Mediterranean marine coastal ecosystems [dades de recerca]. Disponible sur : https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=NkgLpv4AAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=NkgLpv4AAAAJ:ILKRHgRFtOwC (Consulté le 21 mai 2022).

Montero Serra I., Garrabou J., Doak D., Figuerola L., Hereu B., Ledoux J.-B., et Linares C. 2017. Accounting for Life-History Strategies and Timescales in Marine Restoration. Conservation Letters, 11. DOI : 10.1111/conl.12341

Montero-Serra I., Garrabou J., Doak D., Figuerola L., Hereu B., Ledoux J.-B., et Linares C. 2017. Accounting for Life-History Strategies and Timescales in Marine Restoration. Conservation Letters, 7(1). Disponible sur : https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01699036 (Consulté le 7 mai 2022).

Montero-Serra I., Garrabou J., Doak D.F., Figuerola L., Hereu B., Ledoux J.-B., et Linares C. 2018. Accounting for Life-History Strategies and Timescales in Marine Restoration. Conservation Letters, 11(1). DOI : 10.1111/conl.12341

Mokhtar-Jamai, K., Coma, R., Wang, J., Zuberer, F., Feral, J.-P., & Aurelle, D. (2013). Role of evolutionary and ecological factors in the reproductive success and the spatial genetic structure of the temperate gorgonian Paramuricea clavata. Ecology and Evolution, 3, 1765–1779. https://doi.org/10.1002/ece3.588

Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., et Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403(6772). DOI : 10.1038/35002501

Muséum national d'Histoire naturelle. IV.3.1. - Biocénose coralligène (C) (Biocénoses benthiques de Méditerranée). Dans : Inventaire National du Patrimoine Naturel [En ligne]. Disponible sur : https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/1010 (Consulté le 4 mai 2022).

Nike Bianchi C., Carla Morri, Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, Problems and Prospects for Future Research, Marine Pollution Bulletin, Volume 40, Issue 5, 2000, Pages 367-376, ISSN 0025-326X, https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00027-8. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X00000278) Patterns of variation in recruitment and post-recruitment processes of the Mediterranean precious gorgonian coral Corallium rubrum - ScienceDirect. Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022098111004862?via%3Dihub (Consulté le 14 mai 2022m).

Ortiz A., Massó C., Soriano Ó., et Limia J. 1986. La barra italiana como arte de pesca del coral rojo (Corallium rubrum L.) en el mar de Alborán (SE de España). Disponible sur : https://digital.csic.es/handle/10261/74859 (Consulté le 4 mai 2022).

Otero M.M., Numa C., M B., Orejas C., Garrabou J., Cerrano C., Kružić P., Chryssanthi A., Aguilar R., Kipson S., Linares C., Terrón-Sigler A., J B., Kersting D., P C.-A., García S., Goffredo S., Ocaña Vicente O., Caroselli E., et B Ö. 2017. OVERVIEW OF THE CONSERVATION STATUS OF MEDITERRANEAN ANTHOZOA. DOI : 10.2305/IUCN.CH.2017.RA.2.en

Perez T., Garrabou J., Sartoretto S., Harmelin J.-G., Francour P., et Vacelet J. 2000. Mortalité massive d'invertébrés marins : un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie, 323(10). DOI : 10.1016/S0764-4469(00)01237-3

Piazzi L. et Cinelli F. 2000. Effets de l'expansion des Rhodophyceae introduites Acrothamnion preissii et Womersleyella setacea sur les communautés algales des rhizomes de Posidonia oceanica de Méditerranée occidentale. Cryptogamie Algologie, 21(3). DOI : 10.1016/S0181-1568(00)00116-1

Plathong, S., Inglis, G.J. and Huber, M.E. (2000), Effects of Self-Guided Snorkeling Trails on Corals in a Tropical Marine Park. Conservation Biology, 14: 1821-1830. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2000.99301.x

Ponti M, Perlini RA, Ventra V, Grech D, Abbiati M, Cerrano C (2014) Ecological Shifts in Mediterranean Coralligenous Assemblages Related to Gorgonian Forest Loss. PLoS ONE 9(7): e102782. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102782

Ponti M., Perlini R.A., Ventra V., Grech D., Abbiati M., et Cerrano C. 2014. Ecological Shifts in Mediterranean Coralligenous Assemblages Related to Gorgonian Forest Loss. PLOS ONE, 9(7). DOI : 10.1371/journal.pone.0102782

Ponti M., Grech D., Mori M., Perlini R.A., Ventra V., Panzalis P.A., et Cerrano C. 2016. The role of gorgonians on the diversity of vagile benthic fauna in Mediterranean rocky habitats. Marine Biology, 5(163). DOI : 10.1007/s00227-016-2897-8

Ponti M., Turicchia E., Ferro F., Cerrano C., et Abbiati M. 2018. The understorey of gorgonian forests in mesophotic temperate reefs. Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst, 28(5). DOI : 10.1002/aqc.2928

Possingham H.P., Bode M., et Klein C.J. 2015. Optimal Conservation Outcomes Require Both Restoration and Protection. PLOS Biology, 13(1). DOI : 10.1371/journal.pbio.1002052

Pratlong M., Haguenauer A., Chabrol O., Klopp C., Pontarotti P., et Aurelle D. 2015. The red coral (Corallium rubrum) transcriptome: a new resource for population genetics and local adaptation studies. Molecular Ecology Resources, 15(5). DOI : 10.1111/1755-0998.12383

Precht W.F., éd. 2006. Coral Reef Restoration Handbook. Boca Raton : CRC Press, 384 p. DOI : 10.1201/9781420003796

Projet Rescor : Restauration d'une partie d'un récif à coralligène. Disponible sur : https://destimed.fr/+Dans-le-cadre-d-une-convention-de-recherche-et+ (Consulté le 7 mai 2022p).

Riedl R (1983) Fauna und Flora des Mittelmeers. Paul Parey, Hamburg

Russo, G.; Ulianich, L.; Cicogna, F. Autotomia e Frammentazione, Una Nuova Strategia Riproduttiva per Il Corallo Rosso. In Red Coral and other Octocorals Biology and Protection; Cicogna, F., Bavestrello, G., Eds.; Ministero per le Politiche Agricole: Roma, Italy, 1999; pp. 45–56.

Rinkevich B. 2015. Climate Change and Active Reef Restoration—Ways of Constructing the « Reefs of Tomorrow ». Journal of Marine Science and Engineering, 3(1). DOI : 10.3390/jmse3010111

Santangelo G., Carletti E., Maggi E., et Bramanti L. 2003. Reproduction and population sexual structure of the overexploited Mediterranean red coral Corallium rubrum. Marine Ecology Progress Series, 248. DOI : 10.3354/meps248099

Santangelo G., Bramanti L., Rossi S., G T., Vielmini I., Lott C., et Gili J.-M. 2012. Patterns of variation in recruitment and post-recruitment processes of the Mediterranean precious gorgonian coral Corallium rubrum. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 411. DOI : 10.1016/j.jembe.2011.10.030

Sartoretto S., Baucour C., et Seyne-sur-Mer L. ÉTAT BIOLOGIQUE Caractéristiques biologiques - biocénoses. , p. 11.

SCINTO A., BERTOLINO M., HUETE-STAUFFER C., PREVIATI M., ROMAGNOLI T., VALISANO L., CERRANO C. (2009) - Effects of the loss of Paramuricea clavata (Risso, 1826) forests on coralligenous assemblages. Rapp. Comm. int. Mer Médit, 39.

Simkiss K. 1964. PHOSPHATES AS CRYSTAL POISONS OF CALCIFICATION. Biol Rev Camb Philos Soc, 39. DOI : 10.1111/j.1469-185x.1964.tb01166.x

Species assessments at EU biogeographical level https://nature-art17.eionet.europa.eu/article17/species/summary/?period=5&group=Other+invertebrates&subject=Corallium+rubrum&region=MMED (Consulté le 8 mai 2022x).

Teixidó N., Casas E., Cebrián E., Linares C., et Garrabou J. 2013. Impacts on Coralligenous Outcrop Biodiversity of a Dramatic Coastal Storm. PLOS ONE, 8(1). DOI : 10.1371/journal.pone.0053742

Thierry de Ville d'Avray L. 2018. Identification et évaluation des services écosystémiques rendus par les habitats coralligènes. (These de doctorat). Aix-Marseille Disponible sur : http://www.theses.fr/2018AIXM0186 (Consulté le 21 mai 2022).

Torrents O., Garrabou J., Marschal C., et Harmelin J.G. 2005. Age and size at first reproduction in the commercially exploited red coral Corallium rubrum (L.) in the Marseilles area (France, NW Mediterranean). Biological Conservation, 121(3). DOI : 10.1016/j.biocon.2004.05.010

Torrents, O., Garrabou, J. Fecundity of red coral Corallium rubrum (L.) populations inhabiting in contrasting environmental conditions in the NW Mediterranean. Mar Biol 158, 1019–1028 (2011). https://doi.org/10.1007/s00227-011-1627-5

TRANSCOR. Dans : SEPTENTRION ENVIRONNEMENT [En ligne]. Disponible sur : https://www.septentrion-env.com/projet/etude-experimentale-de-la-transplantation-des-alcyonaires-corallium-rubrum-et-paramuricea-clavata/ (Consulté le 8 mai 2022v).

Tratalos J. et Austin T. 2001. Impacts of recreational SCUBA diving on coral communities of the Caribbean Island of Grand Cayman. Biological Conservation, 102. DOI : 10.1016/S0006-3207(01)00085-4

Tristan E. [s d]. Étude de la survie de transplants de Corallium rubrum et de Paramuricea clavata dans le cadre d'un programme expérimental de transplantation sur sites naturels (projet TRANSCOR). , p. 42.

Tsounis G., Rossi S., Gili J.-M., et Arntz W. 2006. Population structure of an exploited benthic cnidarian: the case study of red coral (Corallium rubrum L.). Mar Biol, 149(5). DOI : 10.1007/s00227-006-0302-8

Tsounis G., Rossi S., Grigg R., Santangelo G., Bramanti L., et Gili J.-M. 2010. The exploitation and conservation of precious corals. Oceanogr Mar Biol Annu Rev, 48, p. 161-212.

Valisano, L., Notari, F., Mori, M. and Cerrano, C. (2016), Temporal variability of sedimentation rates and mobile fauna inside and outside a gorgonian garden. Mar Ecol, 37: 1303-1314. https://doi.org/10.1111/maec.12328 The impacts of climate change in coastal marine systems. Disponible sur : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x (Consulté le 7 mai 2022u).

Valisano L., Notari F., Mori M., et Cerrano C. 2016. Temporal variability of sedimentation rates and mobile fauna inside and outside a gorgonian garden. Marine Ecology, 37(6). DOI : 10.1111/maec.12328

Villechanoux J, Bierwirth J, Mantas TP, Cerrano C. Testing Transplantation Techniques for the Red Coral Corallium rubrum. Water. 2022; 14(7):1071. https://doi.org/10.3390/w14071071

Vuignier G. et Bouladier E. 1989. Livre rouge - Gérard Vuignier - des végétaux, peuplements et paysages marins menacés de Méditerranée : troisième esquisse, mai 1989. Disponible sur : https://policycommons.net/artifacts/1371458/livre-rouge-gerard-vuignier-des-vegetaux-peuplements-et-paysages-marins-menaces-de-mediterranee/1985631/ (Consulté le 4 mai 2022).

Weinberg S. 1979. Transplantation Experiments with Mediterranean Gorgonians. Bijdragen tot de Dierkunde, 49(1). DOI : 10.1163/26660644-04901003

Workshop on red coral (WKREDCORAL) | General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM) | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible sur : https://www.fao.org/gfcm/technical-meetings/detail/en/c/1197297/ (Consulté le 8 mai 2022w).

II. Annexes

Tableau A – Liste des articles traitant des expérimentations de transplantation du *C. rubrum.*

Reference	Location	Technique	Depth (m)	Period Length	Substrate Type	Survival Rate	Detachment Rate	Mortality	Number of Colonies
Weinberg 1979 [47]	Banyuls-sur-Mer	Hard PVC-tube with 2 incisions + screws to hold the fragment fixed on cement blocks	10	few weeks	Photophilous algae	0%	0%	100%	NA
Bianconi et al., 1988 [48]	Scandola (Corsica)	Fixed on panels with metal wire	36–39	NA	Coralligenous	0%	0% (whole panel fell)	100%	NA
Giacomelli et al., 1988 [49]	Naples Zoologic station	Hanging colonies facing down, tied with a copper wire	NA	NA	Aquarium	Used a few colonies	NA	NA	NA
Arosio et al., 1989 [50]	Alghero (Sardegna)	Resin and stainless-steel tweezers	NA	NA	Coralligenous	NA	NA	NA	NA
Catteneo-Vietti et al., 1992 [51]	Montecarlo Marine Reserve	(i) Fixed with bolts to polypropylene panels (ii) held with plastic tweezers (iii) glued into porphyry bar wholes with Devcon resin	27/35	2 years	Artificial cement cave	40%	60%	0%	NA
Pais et al., 1992 [52]	Alghero (Sardegna)	Quick-settling cement as glue in holes on small tiles.	25	NA	Small concrete pipe with metal base	100%	2 colonies	0	NA
Chessa et al., 1997 [56]	Alghero (Sardegna)	Small boards with ready-to-set concrete	NA	NA	Cement tube	100%	0	0	NA
Cerrano et al., 1997 [53]	Gallinara island	Oily putty normally used for glass panes applied in the crevices as glue	20–24	NA	Coralligenous	0%	100%	0%	35
Cerrano et al., 1997 [53]	Gallinara island	Two-component epoxy putty	20–24	1 month	Coralligenous	100%	0%	0%	50
Cerrano et al., 2000 [54]	Portofino, Punta del Faro	Two-component epoxy putty	35	3 years	Coralligenous	10%	NA	NA	100
Cerrano et al., 2000 [54]	Portofino, Mohawk Deer wreck	Two-component epoxy putty	34	3 years	Metal sheets of wreck	0%	NA	NA	100
Cerrano et al., 2000 [54]	Gallinara island	Two-component epoxy putty	24	3 years	Coralligenous	50%	NA	NA	300

Tableau A1 – Suite

Reference	Location	Technique	Depth (m)	Period Length	Substrate Type	Survival Rate	Detachment Rate	Mortality	Number of Colonies
Cerrano et al., 2000 [54]	Gallinara island, Umberto I wreck	Two-component epoxy putty	40–50	3 years	Metal sheets of wreck	0%	NA	NA	140
Cerrano et al., 2000 [54]	Sorrentina peninsula, Scoglio del Vervece	Two-component epoxy putty	45	3 years	Coralligenous with *A. cavernicola*	80%	NA	NA	100
Cerrano et al., 2000 [54]	Sorrentina peninsula, Punta Campanella	Two-component epoxy putty	38	3 years	Biocenosis of *A. cavernicola* and *E. singularis*	80%	NA	NA	100
Cerrano et al., 2000 [54]	Sorrentina peninsula, Secca della Vetara	Two-component epoxy putty	38	3 years	Biocenosis	80%	NA	NA	100
Ledoux et al., 2015 [59]	Riou Island and Palazzu Island	Disks with 8 holes (1 hole = 1 colony), no putty used.	20/40	few months	Plates made of PVC disks	100%	0%	0%	192
Montero-Serra et al., 2018 [42]	Parc Natural del Montgri, Illes Medes i Baix Ter	Two-component epoxy putty	15–17	4 years	Coralligenous	99.10%	NA	NA	300

Annexe 9

Restauration écologique portuaire (REP) : synthèse des actions écologiques et de communication

Par Hannah DAUM

Université de Montpellier – Faculté des Sciences

Diplôme Universitaire

Restauration écologique des petits fonds marins côtiers

Restauration écologique portuaire (REP) : synthèse des actions écologiques et communication

Mémoire de projet

Nurserie de sars communs

Auteur : Hannah DAUM

Tutrice : Amélie FONTCUBERTA

Année 2022

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

FACULTÉ DES SCIENCES MONTPELLIER

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Madame Julie Deter et Monsieur Philippe Lenfant dont leur intérêt envers mon sujet de mémoire, encore peu étudié par le passé, m'a confortée dans mon choix de mes objectifs à atteindre.

Je remercie beaucoup ma tutrice Madame Amélie Fontcuberta, m'ayant suivie tout le long de mon travail en me donnant de nombreux conseils très pertinents.

J'aimerais également remercier les personnes ayant répondu à mon questionnaire lors de ma venue dans le port de Bormes-les-Mimosas et Port Camargue. Le temps qu'elles ont accordé à répondre à mes questions, m'a été très précieux, afin d'accomplir mon travail.

Pour terminer, je souhaite vivement remercier mon amie et collègue Charlène Steinmetz étant toujours à mes côtés depuis que nous avons commencé nos études ensemble.

Restauration écologique portuaire (REP) : synthèse des actions écologiques et communication

Hannah DAUM

Résumé

L'artificialisation des littoraux, et précisément des petits fonds côtiers, a considérablement augmenté ces 30 dernières années. Pourtant il s'agit là d'un milieu riche en biodiversité qui est détruit. Des opérations de restauration et de réhabilitation des fonctionnalités écologiques perdues, commencent à voir le jour et participent à la transition écologique tant convoitée. Cependant, le terme « restauration » fait encore davantage penser aux talents culinaires de la France qu'aux capacités qu'ont les scientifiques à réfléchir à la régénération de la biodiversité. Est-ce un manque de compréhension du grand public ou une lacune en termes de communication et sensibilisation des meneurs de projets autour de ces opérations ? Pourtant, il est grandement temps que la population soit informée et qu'elle soit en mesure d'expliquer l'objectif de la restauration écologique pour soutenir et participer à sa mise en place et à son développement. Pour arriver à bien comprendre le lien important qui lit la communication scientifique faite autour des projets de restauration écologique, nous allons étudier le cas concret de la restauration des fonctionnalités de nurserie dans les zones portuaires, en allant voir de plus près trois ports dans le sud de la France, qui essayent de littéralement « redonner vie » à leurs eaux. Puis, nous étudierons les outils de sensibilisation qui ont été proposés et finalement le résultat de cette communication sur le grand public en interrogeant directement les vacanciers et habitants des ports en question.

Table des matières

INTRODUCTION **1**

OBJECTIFS **3**

I. L'INTERET ECOLOGIQUE DE LA RESTAURATION ECOLOGIQUE DES PETITS FONDS COTIERS **3**

I.1 Qu'est-ce qu'un petit fond cotier ? L'interet de restaurer cet habitat 3
I.2 Les solutions de restauration en Mediterranee 5
I.2.1 Opération NAPPEX (Port de Fréjus) *5*
I.2.2 Opération RECOLAG (Grau du Roi et Port Camargue) *7*
I.2.3 Opération ReFish (Port Bormes-les-Mimosas) *8*

II. LE LIEN IMPORTANT ENTRE LA REP ET SES OUTILS DE COMMUNICATION **9**

II.1 Presentation de la communication de chaque projet 10
II.1.1 Port de Fréjus – Biohut® *10*
II.1.2 Port Camargue/Grau du Roi – RECOLAG *12*
II.1.3 Port de Bormes-les-Mimosas – ReFish *13*
II.3 Resultat des sondages 15
II.3.1 Port Camargue/Grau du Roi – RECOLAG *16*
II.3.2 Port de Bormes-les-Mimosas – ReFish *18*

DISCUSSION **19**

CONCLUSION **21**

BIBLIOGRAPHIE **23**

Table des figures

Figure 1 : Taux d'occupation des petits fonds de 0 à -10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à 2010 (Données MEDAM) 1
Figure 2 : Le cycle de vie des poissons côtiers (Lenfant et al. 2015) 4
Figure 3 : Le cycle de vie des poissons côtiers à l'état naturel, sans artificialisation du littoral (Lenfant el al. 2015) 4
Figure 4 : Le cycle de vie des poissons côtiers perturbé dû à l'installation d'infrastructure (Lenfant el al. 2015) 5
Figure 5 : Le cycle de vie des poissons côtiers restaurés grâce aux différents types de Biohut® 6
Figure 6 (Photos d'en haut à gauche à en bas à droite) : Les Biohut® « Quai », « Ponton », « Rivage » et « Digue » 6
Figure 7 : Emplacement des différents modules le long du grau reliant la lagune de Salonique et la mer 8
Figure 9 : Nurserie artificielle fabriquée par Seaboost 8
Figure 8 : Nurserie artificielle fabriquée par Seaboost (module Connectivité) 8
Figure 11 : Structure ReFish 9
Figure 11 : La structure ReFish devient une nurserie pour les post-larves et juvéniles 9
Figure 12 : « Les sentiers du mérou » sont largement mit en avance sur le port de Fréjus 10
Figure 13 : Publication Instagram du Port de Fréjus concernant la pose des panneaux explicatifs « Biohut® » 11
Figure 14 : Publication en « Story » du projet RECOLAG sur la page Instagram de Seaboost 12

Figure 15 : Panneaux explicatif du projet ReFish sur le port de Bormes-les-Mimosas 13
Figure 16 : Zone de sondage (en rouge) du port de Fréjus 15
Figure 17 : Zone de sondage (en rouge) de Port Camargue 16
Figure 18 : Vue d'ensemble de Port Camargue, la zone de mise à l'eau des modules et la zone de sondage 17
Figure 19 : Zone de sondage (en rouge) du port de Bormes-les-Mimosas 18

Table des tableaux

Tableau 1 : Résultats du sondage sur le projet RECOLAG à Port Camargue 17
Tableau 2 : Résultats du sondage sur le projet ReFish du port de Bormes-les-Mimosas 19

Introduction

Les littoraux représentent 4% du territoire métropolitain français mais on y trouve 10% de la population[1]. C'est un espace très convoité pour des raisons de commerce et de tourisme donc important pour l'économie du pays. La densité humaine le long des côtes est 2,5 fois plus élevée que la moyenne métropolitaine, d'où l'artificialisation des littoraux qui émerge[2]. Ce terme inclut les zones urbanisées, industries et commerces, routes, voies ferrées et les espaces verts aménagés.

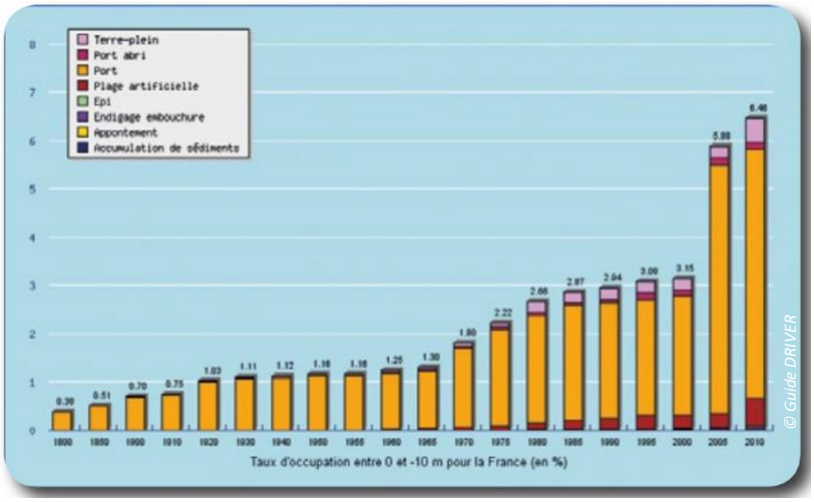


Figure 1 : Taux d'occupation des petits fonds de 0 à -10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à 2010 (Données MEDAM)

Évidemment, ces infrastructures impactent lourdement la faune et flore sauvage du milieu urbanisé, qui jouent un rôle important dans le maintien de l'équilibre des écosystèmes littoraux dont nous, les humains, faisons partie. L'artificialisation des littoraux contribue à la pollution des espaces naturels et au changement climatique, car cette avancée anthropique détruit les habitats d'espèces et augmente les émissions de gaz à effets de serre. Ne pas laisser la dynamique littorale faire son travail, induit une perte de sédiments à certains endroits, donc une hausse d'érosion et une homogénéisation de la côte. Cela réduit les habitats hétérogènes dont, par exemple, les espèces marines en phase juvénile montrent un grand besoin.

Pour remédier aux problèmes dû à l'artificialisation des habitats, ou au moins limiter les dégâts que cette anthropisation engendre, deux solutions se présentent : créer des aires maritimes protégées ou faire de la restauration écologique.

[1] Le service public d'information sur le milieu marin, « L'artificialisation du littoral ».
[2] Le service public d'information sur le milieu marin.

D'après la Society of Ecological Restauration (SER) en 2004 « La restauration écologique est le processus d'assistance au rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. »[3]. Selon l'ouvrage DRIVER[4], « la restauration écologique [au sens strict] considère l'écosystème dans son intégralité : [elle] doit réparer toutes les composantes du milieu, les fonctions écologiques et les services rendus [contrairement à la] réhabilitation [où] la réparation ne concerne que quelques fonctions, un service, l'habitat de certaines espèces ou le renforcement des populations. ».

La restauration écologique se définit en deux parties : active ou passive. La restauration écologique active nécessite l'intervention de l'Homme contrairement à la restauration passive où la nature arrive elle-même à se régénérer.

Aujourd'hui on retrouve un certain nombre de projets de restauration écologique mis en place dans les ports. Ces milieux, souvent pollués et bétonisés, peuvent malgré tout aujourd'hui, réduire les apports en polluants et les maitriser pour redonner vie aux espèces marines très affectées par l'artificialisation des littoraux. En méditerranée, des entreprises comme Ecocean, Seaboost ou Suez réfléchissent à des solutions à mettre en place pour favoriser le retour de la biodiversité dans les ports. Finalement, la restauration écologique est un outil récent dans les sciences naturelles et aujourd'hui encore peu diffusée. Lors de la mise en place d'habitats écologiques artificiels en milieu portuaire, la population est-elle au courant de ce bond en avant de la préservation de la biodiversité ? Si oui, a-t-elle compris et suivi ce processus ? Et si une des clés de l'efficacité de la restauration écologique portuaire résidait dans la communication et la sensibilisation ?

Pour arriver à sensibiliser les personnes à l'environnement, le changement climatique, la pollution, etc. il est nécessaire de leur apporter les connaissances scientifiques, pour avoir toutes les cartes en mains pour prendre les décisions les plus justes pour leur pays.

Au travers d'exemples concrets de restauration écologique des petits fonds côtiers, ciblant la réhabilitation des fonctionnalités de nurserie dans les zones portuaires, ce rapport s'attachera à présenter les retombées écologiques et scientifiques de ces opérations, mais aussi la sensibilisation du grand public.

[3] Society of Ecological Restauration (SER), « Society of Ecological Restauration (SER) ».

[4] Lenfant, Gudefin, et Fonbonne, « Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée - orientations et principes ».

Objectifs

Ce rapport est le fruit d'un projet mené dans le cadre du diplôme universitaire *Restauration écologique des petits fonds marins côtiers* à l'Université de Montpellier. Il s'agit ici, d'étudier trois sites ayant mis en place des structures de restauration écologique portuaire différentes, pour ensuite analyser la connaissance et compréhension de la population de ces dernières. Je vais regarder de plus près la communication qui a été faite ou non autour de ces différents projets. Les trois sites en question sont les ports de Bormes-les-Mimosas (projet ReFish porté par Suez), de Fréjus (projet de Biohut® porté par Ecocean) et les communes du Grau du Roi et de Port Camargue (projet RECOLAG porté par Seaboost). L'objectif de mon travail est de comprendre le plus précisément possible l'état des lieux des connaissances de la population autour du port (vacancier ou habitant) et pour cela je suis allé sur place interroger les personnes et analyser la mise en place d'outil de communication et d'explication (exemple : panneau d'affichage) concernant les projets de restauration écologique portuaire.

Ce mémoire commencera par une partie expliquant l'intérêt écologique de la restauration écologique des petits fonds marins côtiers et les différents types de solutions utilisées dans les trois ports choisis. Dans un second temps nous allons analyser la communication qui a été faite autour des différents projets et les résultats d'enquête sur le terrain. Nous allons finir par interpréter ces résultats afin de comprendre la performance des outils de communications mise en place pour chaque projet.

I. L'intérêt écologique de la restauration écologique des petits fonds côtiers

I.1 Qu'est-ce qu'un petit fond côtier ? L'intérêt de restaurer cet habitat

Les petits fonds côtiers sont des zones, comme leur nom l'indique, proche des côtes, là où l'eau est peu profonde. A l'état naturel, cet espace est particulièrement hétérogène, offrant une quantité importante d'habitats aux espèces marines côtières, notamment aux juvéniles de poissons. Il s'agit de petits fonds rocheux, sableux ou recouvert d'herbiers, qui pour les poissons, « sont une zone d'interface cruciale dans leur cycle de vie (zones de nurseries) et offre également à l'Homme de très nombreux services écosystémiques » ; comme nous l'apprend le centre de ressource de génie écologique[5].

[5] Centre de ressources Genie Ecologique, « Centre de ressources Genie Ecologique ».

Le passage dans la nurserie est une étape très importante dans la vie d'un poisson. « Pondus en pleine eau, les œufs de poissons dérivent au gré des courants puis se transforment en larves, jusqu'à atteindre le stade de post-larves [figure 2] qui se dirigent alors instinctivement vers les côtes. Une fois arrivés, ces jeunes stades de poissons ont besoin d'un habitat essentiel dit « habitat nurserie » leur fournissant nourriture et protection contre la prédation. »[6]

Nous allons parler de nurserie s'il s'agit d'un habitat qui remplit plus qu'un autre habitat, les quatre critères suivant[7] :

- Accueil une forte densité en juvéniles
- Présente une source de nourriture variée et adaptée
- Protège contre les prédateurs
- Permet une migration vers les zones où résident les adultes (assure la connectivité)

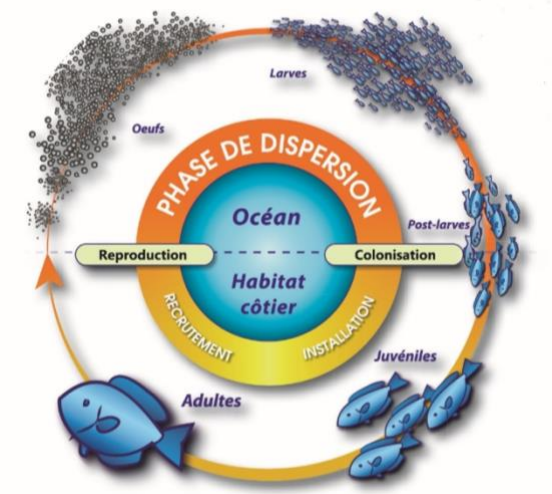


Figure 2 : Le cycle de vie des poissons côtiers (Lenfant et al. 2015)

Les zones de nurserie se situent le long du littoral à des endroits hétérogènes (figure 3), ce qui devient de plus en plus rare dû à l'homogénéisation du littoral engendré par l'artificialisation du milieu (figure 4).

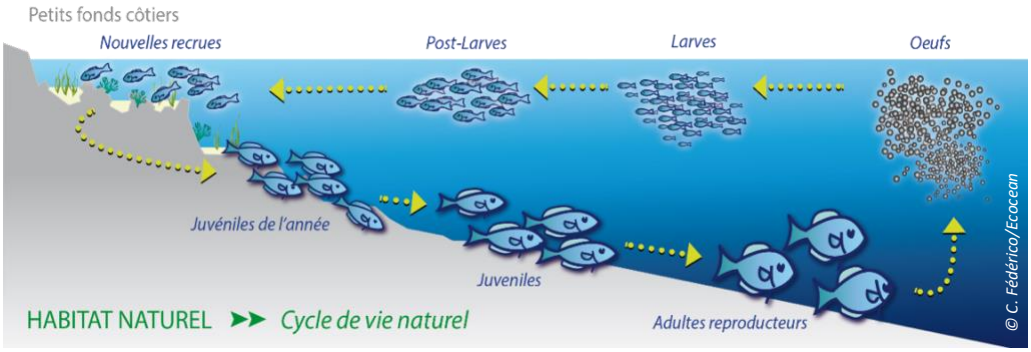


Figure 3 : Le cycle de vie des poissons côtiers à l'état naturel, sans artificialisation du littoral (Lenfant el al. 2015)

[6] Ecocean, « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2021 2020.
[7] Beck et al., « The Identification, Conservation, and Management of Estuarine and Marine Nurseries for Fish and Invertebrates ».

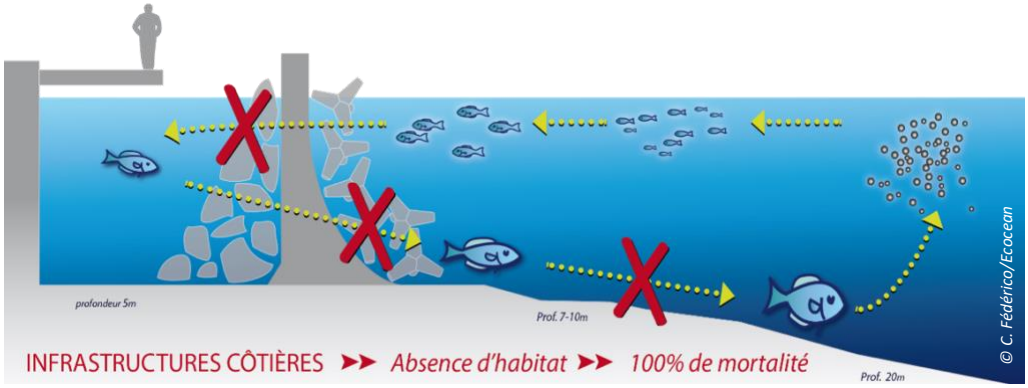


Figure 4 : Le cycle de vie des poissons côtiers perturbé dû à l'installation d'infrastructure (Lenfant el al. 2015)

C'est ainsi qu'intervient la restauration écologique des petits fonds côtiers : les scientifiques et ingénieurs cherchent à redonner des habitats adaptés aux post-larves arrivant sur les côtes pour accomplir leur cycle de vie.

C'est ainsi que ces 5 dernières années, plusieurs opérations de restauration ont été proposées dans les zones portuaires. Nous étudierons dans ce rapport trois d'entre elles : les opérations NAPPEX portées par Ecocean, les solutions de Seaboost et les solutions de SUEZ.

I.2 Les solutions de restauration en Méditerranée

I.2.1 Opération NAPPEX (Port de Fréjus)

Dans le cadre d'un grand projet de recherche et développement NAPPEX (Nurseries Artificielles Pour Ports Exemplaires), les nurseries artificielles Biohut® ont vu le jour. Aujourd'hui NAPPEX est devenu une « appellation qui identifie les ports exemplaires ayant comme engagement de favoriser la biodiversité dans leurs eaux par la mise en place d'habitats adaptés aux larves de poissons ainsi qu'à de nombreuses espèces marines »[8]. Ecocean a imaginé un habitat pouvant offrir aux poissons en phase post-larve à juvénile une protection, de la nourriture et une connectivité logique (facilité pour le poisson de sortir du port à l'âge adulte (figure 5)). Tous les matériaux qui composent les Biohut® sont recyclables ou biodégradables. Certaines structures contiennent des coquilles d'huitres qui jouent le rôle de « garde-manger »[9].

L'entreprise se charge de la fabrication de nurseries artificielles selon l'endroit exact de la mise à l'eau d'un Biohut®. Il existe les Biohut® « Quai », « Ponton », « Rivage » et « Digue »[10] dont on retrouve l'emplacement dans leur nom donné (voir figures 5 et 6).

[8] NAPPEX, « NAPPEX ».
[9] Ecocean, « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2019 2018.
[10] NAPPEX, « La gamme Biohut® ».

L'entreprise Ecocean à aujourd'hui placé 4563[11] Biohut® à travers la France et le monde.

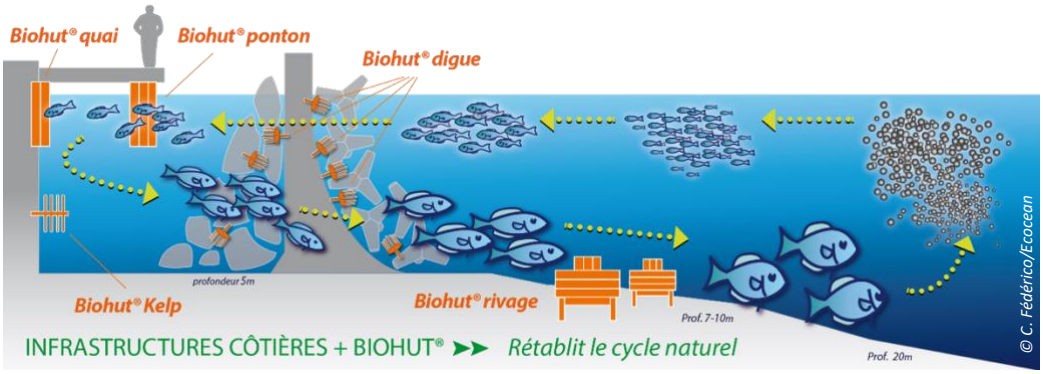


Figure 5 : Le cycle de vie des poissons côtiers restaurés grâce aux différents types de Biohut®

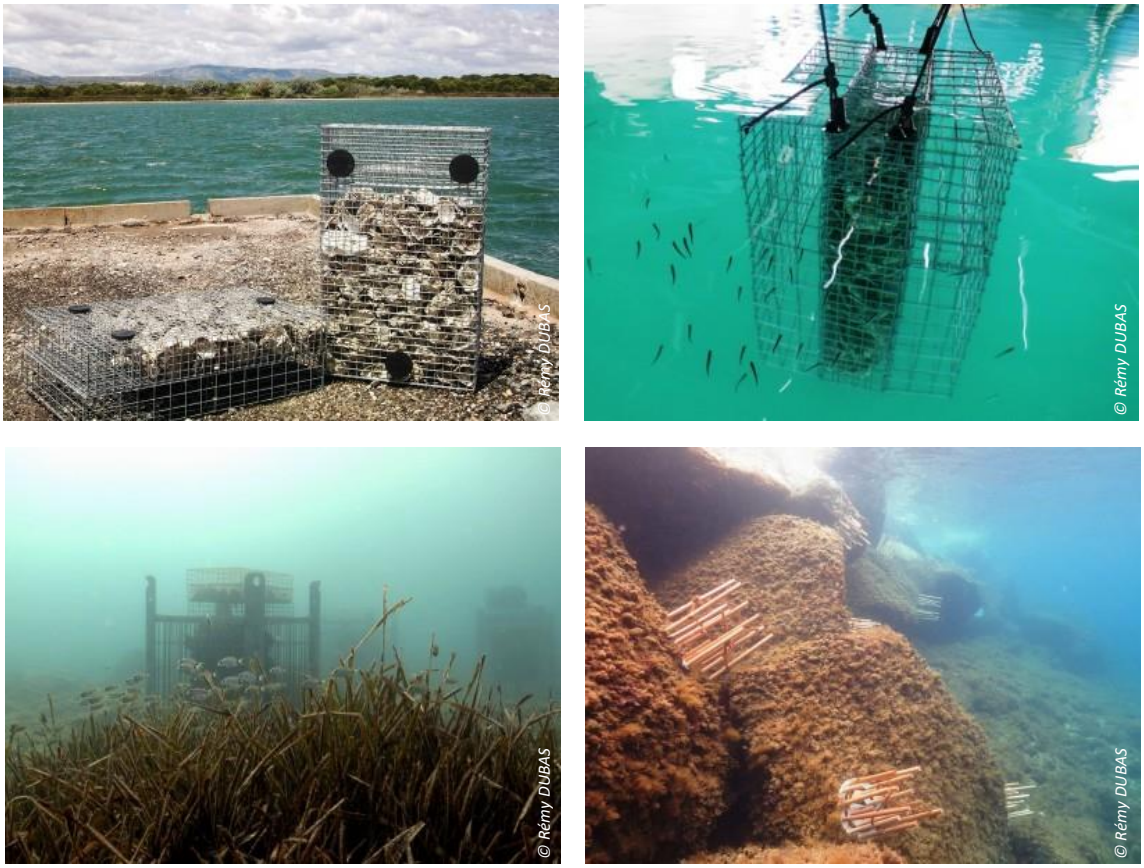


Figure 6 (Photos d'en haut à gauche à en bas à droite) : Les Biohut® « Quai », « Ponton », « Rivage » et « Digue »

56 Biohut® ont été placés au port de Fréjus (depuis mars 2018) dont 44 sur les pontons, 2 sur les quais et 10 sur les digues[12]. Des suivis écologiques sont régulièrement effectués par le bureau d'étude

[11] Ecocean, « Ecocean ».
[12] Ecocean, « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2021 2020.

Biotope (basé à Mèze), « afin d'améliorer les connaissances concernant la biodiversité et notamment le recrutement larvaire dans le port »[13].

I.2.2 Opération RECOLAG (Grau du Roi et Port Camargue)

Sur la frontière entre la commune du Grau du Roi et de Port Camargue longe un chenal maritime artificiel reliant la mer à la lagune de Salonique. Les juvéniles comme la daurade, le loup, le sar ou encore l'anguille utilisent cette lagune comme nurserie. « L'absence d'habitats et d'abris intermédiaires pour les stades larvaires qui cherchent volontairement à rejoindre la lagune en empruntant ce linéaire, limite la fonctionnalité de nurserie de l'étang de Salonique »[14].

Remarque : L'urbanisation du trait de côte languedocien (avec la mission racine) a fortement modifié le fonctionnement écologique des petits fonds côtiers et des milieux lagunaires du littoral d'Occitanie[15].

Des nurseries artificielles viseraient à faciliter l'entrée des juvéniles dans la lagune, leur développement en son sein ainsi que leur sortie de l'écosystème lagunaire urbain de Salonique vers les populations adultes en mer. Seaboost a installé des modules sur 14 lieux différents en France et à travers le monde[16].

C'est en ce sens que le projet RECOLAG (Restauration Écologique expérimentale de la COnnectivité mer/LAGune) a été mis en pratique par l'entreprise montpelliéraine de génie écologique Seaboost et le bureau d'études Biotope. Seaboost était chargé de la construction des nurseries et Biotope du suivi écologique.

RECOLAG a pour principal objectif d'étudier l'intérêt écologique de l'installation d'habitats artificiels visant à accueillir chaque année les juvéniles de poissons[17].

[13] Ecocean.
[14] Seaboost, « Projet RECOLAG - Seaboost ».
[15] Seaboost.
[16] Seaboost, « Seaboost - Nos Projets ».
[17] Seaboost, « Projet RECOLAG - Seaboost ».Seaboost, « Projet RECOLAG - Seaboost ».

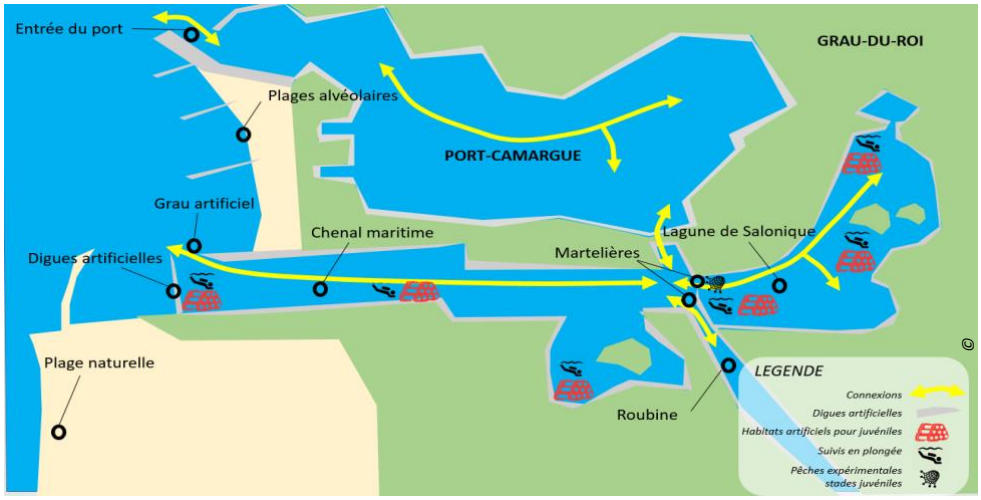


Figure 7 : Emplacement des différents modules le long du grau reliant la lagune de Salonique et la mer

L'entreprise Seaboost explique que ses nurseries (mise en place en 2020), appelé module *Connectivité* (figure 8) sont constituées de matériaux coquillés recyclés, de bambous, d'herbiers artificiels, des oursins biomimétiques et d'une structure en béton poreux bas carbone éco-conçu (figure 9)[18]. Ces habitats visent à offrir abris et alimentation aux juvéniles de poissons en phase de migration entre mer et lagunes.

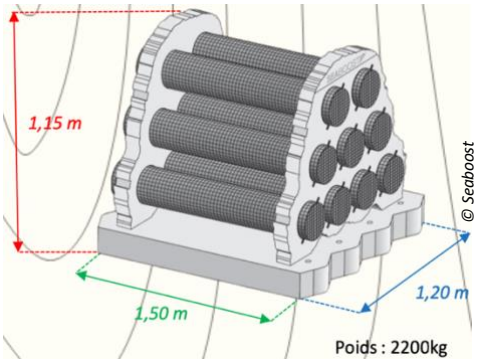


Figure 9 : Nurserie artificielle fabriquée par Seaboost (module Connectivité)

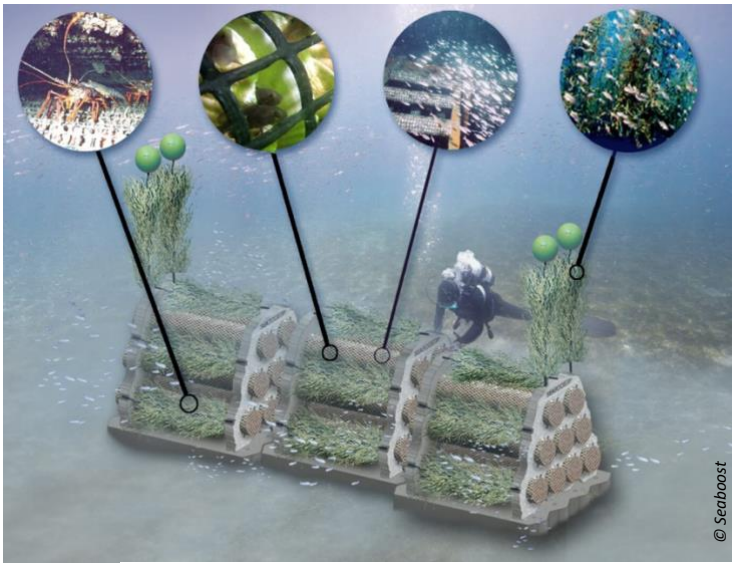


Figure 8 : Nurserie artificielle fabriquée par Seaboost

I.2.3 Opération ReFish (Port Bormes-les-Mimosas)

Le port de Bormes-les-Mimosas est certifié « port propre » depuis 2007. Cependant, des mortalités de juvéniles de poissons ont été observé et l'hypothèse émise (lors du colloque DRIVER à Montpellier

[18] Seaboost.

en 2018[19]) serait que cette mortalité soit notamment liée au manque d'habitat favorable. A l'inverse, sur les zones favorables, une mortalité importante est également observée et elle serait notamment liée à la surdensité d'individus.

La mise en place des premières nurseries artificielles ReFish (figure 11) à Bormes-les-Mimosas a eu lieu en 2017 après des études d'observations permettant de savoir quelle quantité de nurseries serait nécessaire pour régénérer la biodiversité du site.

La structure de ReFish est basée sur le fonctionnement des herbiers marins (figure 11) : nurserie, nourriture et habitat pour de très nombreuses espèces.

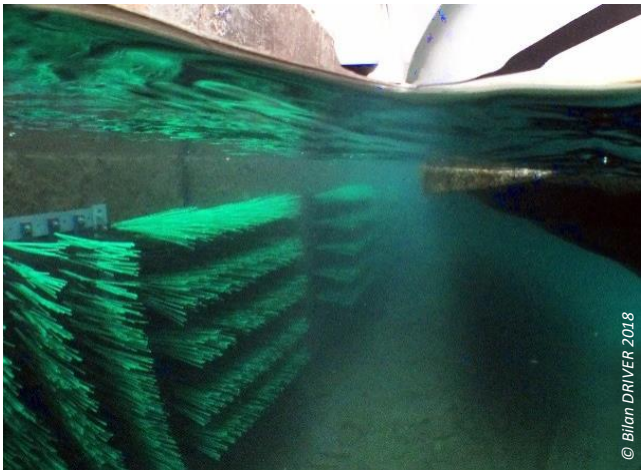


Figure 11 : Structure ReFish

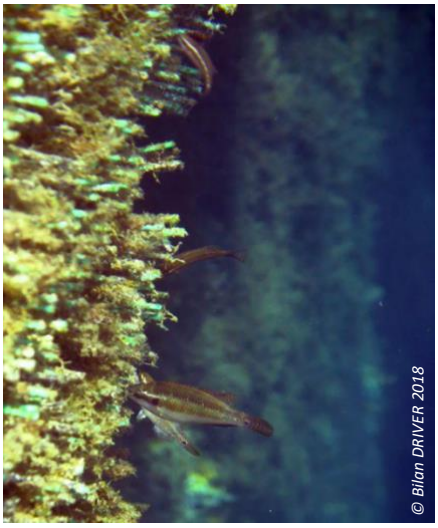


Figure 11 : La structure ReFish devient une nurserie pour les post-larves et juvéniles

Les structures sont rapidement colonisées par la faune et flore locale (algues et éponges) ce qui permet de recréer un lieu riche en biodiversité et d'accueillir les post-larves de poissons pour augmenter leurs chances de survie. L'entreprise Suez est à l'origine de la fabrication de ces modules. Les structures ReFish ont été installées également dans le Port de la Pointe Rouge.

II. Le lien important entre la REP et ses outils de communication

Dans cette partie nous allons analyser la communication ou sensibilisation qui a été faite par les différents meneurs de projets (dont les ports font partie) vu dans la première partie. Nous allons également étudier de plus près le niveau de connaissances des passants du port pour comprendre l'efficacité des outils de communication mis en place. Pour cela, je me suis rendu sur chacun des ports en demandant aux passant de répondre à mon questionnaire.

[19] Bilan DRIVER ReFish, « Projet pilote : Port de Bormes-les-Mimosas ».

II.1 Présentation de la communication de chaque projet

II.1.1 Port de Fréjus – Biohut®

En complément des nurseries artificielles installées dans le port, le port a décidé de créer un parcours pédagogique (« Les Sentiers du Mérou », figure 12) sensibilisant le public sur les thèmes fondamentaux de la biodiversité marine et des gestes écocitoyens. La mise en place des Biohut® est intégrée dans ce sentier. L'inauguration de ce parcours pédagogique a eu lieu en juin 2021, qui a été grandement marquée par la présence des élus locaux, de la presse et des meneurs de projets. Déjà, lors de l'inauguration des Biohut® en 2018, des ateliers de sensibilisation ont été proposés au public via des animations et des panneaux expliquant la mise en place de nurseries artificielles et la biodiversité du site[20].

Le rapport[21] nous affirme également que « Parallèlement à ce sentier pédestre, les animations continuent. Le lendemain de cette journée festive, les scolaires de la ville sont venus pour une opération de sensibilisation avec les équipes d'Ecocean sur le port. Des jeux sur l'environnement marin ainsi que la sortie d'une nurserie à poissons Biohut® ont rythmé la journée et ont permis de clôturer la fête de la biodiversité sur une opération de terrain. »

De plus, une exposition permanente des œuvres de l'artiste Steve Chaudanson est installée sur le port, afin de mettre en avant l'art reliée à des thématiques écologiques pour valoriser les actions du port sur l'environnement marin.

Figure 12 : « Les sentiers du mérou » sont largement mit en avance sur le port de Fréjus

[20] Ecocean, « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2019 2018.
[21] Ecocean, « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2021 2020.

Sur la page d'accueil du site du port[22] on ne trouve pas d'informations concernant les Biohut®. Dans la barre d'onglets, par contre, le « sentier du mérou » est bien présent à l'intérieur duquel on trouve un sous onglet concernant les Biohut®[23].

En allant sur les réseaux sociaux du port de Fréjus on constate que leur chaîne YouTube[24] ne présente pas de vidéo autour des Biohut® ; en revanche sur Facebook[25] et Instagram (avec leur presque 1200 abonnés) on trouve deux publications au sujet des Biohut® publié en juillet et novembre 2021 (voir figure 13) sachant qu'ils publient en moyenne 5 posts par mois. Il faut noter qu'on retrouve les mêmes posts, que ce soit sur Instagram ou sur Facebook. Ils contiennent des photos et un descriptif ludique et informatif également disponible en anglais. Les publications informent d'une mise en place d'un nouveau Biohut®[26] et de panneaux explicatifs de qu'est-ce qu'un Biohut®[27].

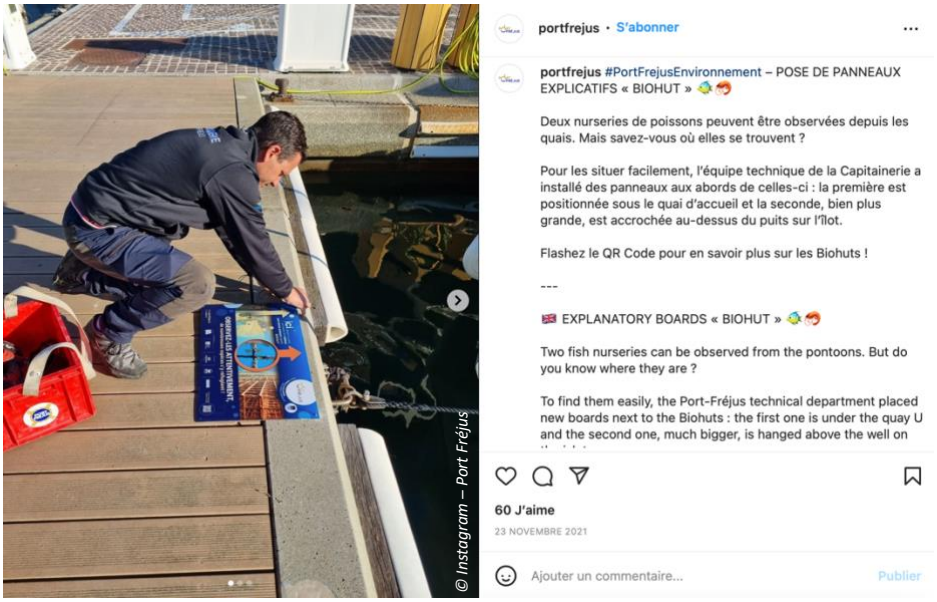


Figure 13 : Publication Instagram du Port de Fréjus concernant la pose des panneaux explicatifs « Biohut® »

Sur le site de la ville de Fréjus, dans l'onglet « environnement »[28] on ne trouve pas d'information concernant les Biohut®. En revanche, lorsque l'on tape « port de Fréjus » dans la barre de recherche du site, on obtient des informations au sujet des Biohut®[29].

[22] Port de Fréjus, « Port de Fréjus ».
[23] Port de Fréjus, « Les nurseries artificielles Biohut® dans le port de Fréjus ».
[24] Port de Fréjus, « Page YouTube Port de Fréjus ».
[25] Port de Fréjus, « Page Facebook du Port de Fréjus ».
[26] Port de Fréjus, « Post Instagram de l'installation de Biohut® au Port de Fréjus ».
[27] Port de Fréjus, « Post Instagram de l'installation de panneaux explicatifs au Port de Fréjus ».
[28] Ville de Fréjus, « Ville de Fréjus - Environnement ».
[29] Ville de Fréjus, « Ville de Fréjus Biohut® ».

Les Biohut® et le sentier du mérou de façon générale ne figure pas sur le site de l'office de tourisme de Fréjus[30].

Sur le site de Ecocean apparaît un onglet exprès « Sensibilisation » pour valoriser leurs actions[31]. On y trouve également une vidéo précise sur le port de Fréjus, avec un accent mis sur le fait qu'ils ont sensibilisé un groupe d'enfants en faisant des animations avec eux autour de la biodiversité et les Biohut®[32]. Sur leur compte Instagram[33], Ecocean se sert du réseau social pour sensibiliser les abonnés à la restauration écologique marine. Les rapports de projet de Ecocean sur l'installation de Biohut® dans les ports, notamment celui de Fréjus, présentent une partie appelée « Évènement et Sensibilisation » où, comme l'indique son titre, les ingénieurs développent ce qui a été fait en termes d'animation et d'installation (d'affiche, plaquette, panneau, etc.).

Sur le site de NAPPEX on découvre des vidéos expliquant ce qu'un Biohut® et un petit texte concernant le projet sur le port de Fréjus[34].

II.1.2 Port Camargue/Grau du Roi – RECOLAG

La communication faite autour du projet RECOLAG figure seulement sur les réseaux sociaux (Instagram et Facebook)[35] et le site internet de Seaboost. L'entreprise publie des images avec un descriptif soigné (voir figure 14) afin de sensibiliser leur presque 900 abonnés. La commune du Grau du Roi ne communique pas à ce sujet[36]. A l'intérieur du port il n'y a pas d'information concernant le projet.

Figure 14 : Publication en « Story » du projet RECOLAG sur la page Instagram de Seaboost

[30] Office de Tourisme de Fréjus, « Office de Tourisme de Fréjus ».
[31] Ecocean, « Ecocean - Sensibilisation ».
[32] Ecocean, « Ecocean - Sensibilisation Vidéo ».
[33] Ecocean, « Page Instagram - Ecocean ».
[34] NAPPEX, « NAPPEX - Port de Fréjus ».
[35] Seaboost, « Seaboost - Instagram ».
[36] Grau du Roi, « Grau du Roi - YouTube »; Grau du Roi, « Ville du Grau du Roi »; Grau du Roi, « Office de tourisme du Grau du Roi »; Grau du Roi, « Grau du Roi - Instagram »; Grau du Roi, « Grau du Roi - Facebook ».

II.1.3 Port de Bormes-les-Mimosas – ReFish

Sur la zone d'enquête du port de Bormes-les-Mimosas, un panneau explicatif du projet ReFish a été installé (voir figure 15). On n'y trouve pas d'informations concernant les matériaux (Les fibres sont-elles en plastique ou non ?). Dû à son emplacement, ce panneau est seulement visible par les personnes pouvant entrer dans l'eau avec un bateau et non pas par de simples passants.

Figure 15 : Panneaux explicatif du projet ReFish sur le port de Bormes-les-Mimosas

Sur le site internet du port[37] on apprend qu'ils ont également mis en place des nurseries artificielles de Seaboost (module *Connectivité*) sans avoir placé d'information sur le port (de ce que j'ai pu voir).

Sur le site du port il n'y a pas de lien direct avec Instagram. En trouvant leur page Instagram[38] (533 abonnés) on remarque qu'il n'y pas d'information concernant ReFish, ni de Seaboost.

Le lien Facebook qu'on retrouve sur le site du port ne renvoie pas au bon endroit de leur page Facebook. Sur leur compte Facebook[39] on voit une publication de la mise en place récente (février 2022) de modules de Seaboost mais rien sur ReFish.

Il n'y a pas de communication autour ReFish (ni de Seaboost d'ailleurs) qui a été faite sur le site internet de la ville[40] ni sur celui de l'office de tourisme[41] de Bormes-les-Mimosas.

[37] Port de Bormes-les-Mimosas, « Port de Bormes-les-Mimosas - Projet ReFish ».
[38] Port de Bormes-les-Mimosas, « Page Instagram du Port de Bormes-les-Mimosas ».
[39] Port de Bormes-les-Mimosas, « Page Facebook du Port de Bormes-les-Mimosas ».
[40] Bormes-les-Mimosas, « Ville de Bormes-les-Mimosas ».
[41] Bormes-les-Mimosas, « Office de tourisme de Bormes-les-Mimosas ».

L'entreprise Suez n'a pas communiqué (récemment) sur sa page Instagram[42] du projet ReFish.

Une exposition de photos, ayant comme objectif de sensibiliser les passants à la biodiversité, est accessible à tous le long du port. Néanmoins, cette exposition ne mentionne pas le projet de restauration écologique ReFish.

II.2 Mise en place des sondages

Pour chaque étude de cas j'ai posé les 7 questions suivantes :

1) Depuis combien de temps vivez-vous ici (si pas ici, d'où venez-vous ?) ? (La tranche d'âge est à noter)
2) Êtes-vous intéressé/impliqué dans les activités du port ? Participez-vous ?
3) Avez-vous un bateau au port ?
4) Êtes-vous au courant si le port s'implique écologiquement parlant (dans le maintien de la biodiversité) ?
5) Êtes-vous au courant que l'artificialisation des littoraux impacte la biodiversité marine proche des côtes ?
6) Pourriez-vous m'expliquer ce qu'une nurserie ?
7) Savez-vous ce qu'est la restauration écologique ?

Puis pour chaque port les questions personnalisées suivantes :

Port de Fréjus :

1) Avez-vous entendu parler des Biohut® ?
2) Étiez-vous au courant que le port de Fréjus est engagé dans cette restauration et a implanté des Biohut® ?

Port Camargue/Grau du Roi :

1) Avez-vous entendu parler de Seaboost ?
2) Étiez-vous au courant que Port Camargue est engagé dans cette restauration et a implanté des nurseries de Seaboost ?

Port de Bormes-les-Mimosas :

1) Avez-vous entendu parler de ReFish ?

[42] Suez, « Page Instagram - Suez ».

2) Étiez-vous au courant que le port de Bormes-les-Mimosas est engagé dans cette restauration et a implanté des nurseries de ReFish ?

Remarque : Concernant le projet sur les communes de Port Camargue et du Grau du Roi, je parlais de « Seaboost » et non de RECOLAG car lors de la mise en place des nurseries le logo de Seaboost figurait ce jour-là.

Ce questionnaire était destiné à n'importe quel passant (vacancier ou habitant). J'ai organisé les jours de sondage à Bormes-les-Mimosas et à Fréjus pendant le week-end de Pâques ensoleillé. Sachant que j'effectue mon stage de fin d'étude à l'Institut Marin du Seaquarium au Grau du Roi, j'ai pu choisir un jour de beau temps pour y aller. Mon parcours pour les sondages dépendait de la fréquentation du site : aux endroits du port où j'apercevais du monde j'y allais (voir figures 16, 17 et 19 aux pages 16, 16 et 18). Au moment-même de l'interrogation des passants, je faisais attention à dégager une bonne atmosphère pour rendre la personne alaise et non effrayée.

II.3 Résultat des sondages

Malheureusement je n'ai pas réussi à interroger une seule personne sur la zone d'étude du port de Fréjus. Il faut ajouter que le samedi 16 avril (le jour de ma venue) débutait la « semaine affoilante », un évènement rassemblant tout type de sport nautique à voile au port de Fréjus.

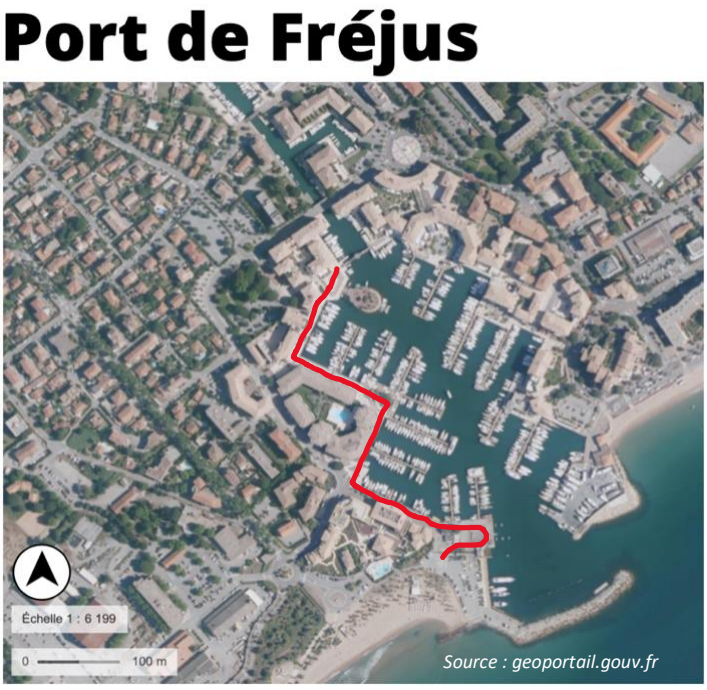


Figure 16 : Zone de sondage (en rouge) du port de Fréjus

II.3.1 Port Camargue/Grau du Roi – RECOLAG

J'ai effectué la campagne de sondage à l'intérieur de Port Camargue (voir figure 17) où j'ai réussi à interroger 14 personnes (voir tableau 1). J'ai choisi cette zone pour deux raisons : c'est une zone fortement fréquentée et le chemin longeant le grau (voir figure 18), reliant la lagune de Salonique à la mer, est seulement accessible pour les résidents donc n'est pas propice à mon enquête.

La première chose à prendre en compte lors de l'analyse des résultats de sondage est la tranche d'âge. Nous n'avons pas d'information sur le niveau de connaissance des personnes en dessous de 40 ans. On remarque que plus de la moitié des passants interrogés étaient des touristes venus, afin de profiter de leur bateau ou tout simplement d'une balade au port. Les personnes ont montré une base de connaissances en ce qui concerne la fragilité de la biodiversité face aux activités anthropiques voir même la définition d'une nurserie pour certains. Le projet RECOLAG ou encore ce qu'entreprend l'entreprise Seaboost, leur est inconnu, ce qui n'est pas étonnant vu le non affichage de la mise en place de nurseries artificielles dans la commune.
Lorsque j'ai posé la question aux passant s'ils savent ce qu'est la restauration écologique, certain ont répondus « oui » par compréhension du nom : « restaurer un système écologique » et non pas parce qu'ils l'ont lu ou entendu quelque part. Ce qui en résulte c'est que le terme de « restauration écologique » ne circule pas encore assez au travers le grand public.

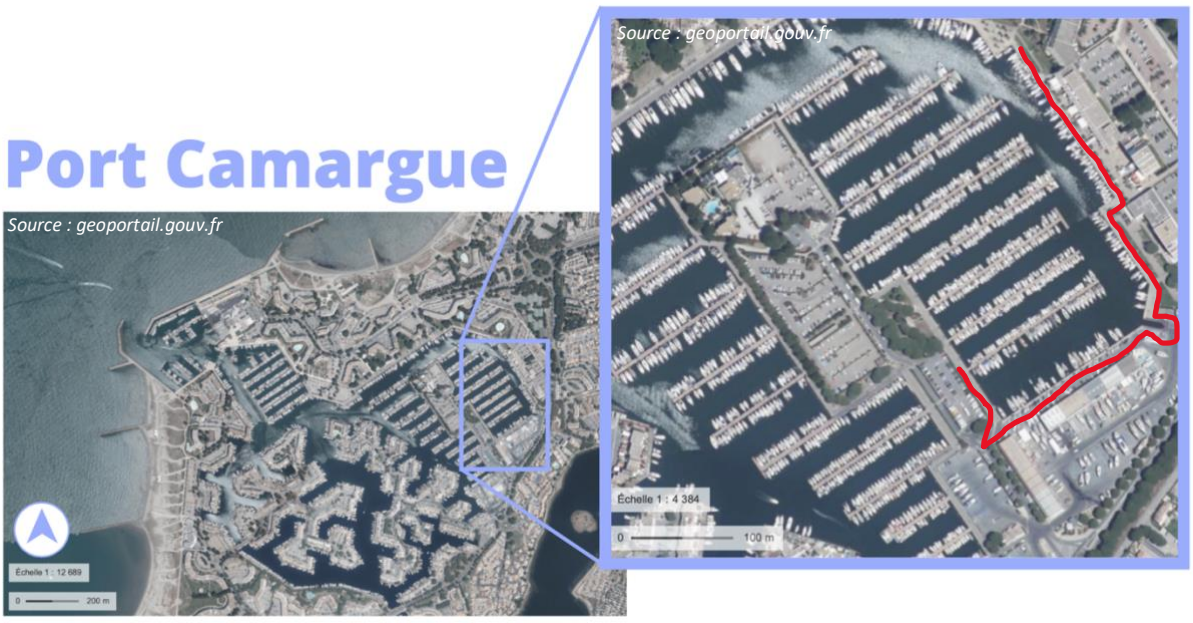


Figure 17 : Zone de sondage (en rouge) de Port Camargue

Figure 18 : Vue d'ensemble de Port Camargue, la zone de mise à l'eau des modules et la zone de sondage

Sondage sur la restauration écologique portuaire
Projet RECOLAG à Port Camargue/Grau du Roi

SEABOOST

vacancier (V) ou habitant (H)	tranche d'âge	participa-tion aux activités du port	bateau au port	port impliqué dans l'écologie	artif. des littoraux impact la biodiv.	savoir ce qu'une nurserie	savoir ce que la rest. éco.	projet Seaboost	projet Seaboost à Port Camarg.
H (depuis 40 ans)	50-60	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non
H	50-60	oui	oui	non	oui	oui	oui	non	non
V (depuis 2 ans) *	50-60	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui (mais pas le nom)
H (depuis 48 ans)	70	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	non
H (depuis toujours)	50	non	oui	oui	oui	oui	un peu	non	oui (mais pas le nom)
V (mais de la région)	70-80	non	non	oui	oui	non	non	non	non
V (mais de la région)	70-80	non	non	oui	oui	non	non	non	non
V	40	non	non	non	non	non	non	non	non
V	40	non	non	non	non	non	non	non	non
H (depuis 1 an)	40	non	non	oui	oui	oui	non	non	non
H (depuis 40 ans) - capitaine	50-60	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non
V	50	non	non	non	oui	non	non	non	non
V (depuis toujours)	40	non	non	oui	oui	oui	oui	non	oui (mais pas le nom)
V (depuis 10 ans)	40	non	non	oui	oui	oui	oui	non	oui (mais pas le nom)

*dans la newsletter du port ils n'en parlent pas

Tableau 1 : Résultats du sondage sur le projet RECOLAG à Port Camargue

II.3.2 Port de Bormes-les-Mimosas – ReFish

J'ai effectué une campagne de sondage au port de Bormes-les-Mimosas. Ce port, en termes de superficies, est nettement plus petit que les deux autres zones d'études (voir figure 19). J'ai réussi à interroger 11 personnes (voir tableau 2). La grande majorité des passants sont des vacanciers âgés de plus de 40 ans comme ça été le cas à Port Camargue. Nous n'avons de nouveau pas d'information concernant la tranche d'âge des plus jeunes. Pareillement qu'à Port Camargue, les personnes sont conscientes de l'impact des activités humaines sur la biodiversité et certains peuvent aussi expliquer ce qu'une nurserie de poissons. La notion de restauration écologique reste cependant encore un terme nouveau pour la plupart des interrogés. Le projet ReFish était inconnu à tout le monde. Seulement trois personnes avaient suivi de loin l'installation de nurseries artificielles mais n'aurait pas pu expliquer en quoi consiste ce projet. On se rend compte que même si le port a affiché un panneau définissant le projet ReFish, les personnes ne sont pas plus informées qu'à Port Camargue. On peut donc se poser la question si un panneau est suffisant pour sensibiliser le grand public à un tel projet. Certaines personnes ont témoigné de leur intérêt envers l'exposition photo que l'on trouve sur le port mais n'ont pas aperçu le panneau ReFish. Est-il positionné à un endroit judicieux ? Les participants aux activités et évènements du port reçoivent régulièrement une newsletter dans laquelle le port a annoncé l'existence du projet de restauration écologique. La personne ayant témoignée de ces mails explique qu'ils ne donnent pas envies d'être lu et elle a donc survolé l'information concernant ReFish.

Figure 19 : Zone de sondage (en rouge) du port de Bormes-les-Mimosas

Sondage sur la restauration écologique portuaire
Projet ReFish au port de Bormes-les-Mimosas

ReFISH

vacancier (V) ou habitant (H)	tranche d'âge	participation aux activités du port	bateau au port	port impliqué dans l'écologie	artif. des littoraux impact la biodiv.	savoir ce qu'une nurserie	savoir ce que la rest. éco.	projet ReFish	projet ReFish à B.-les-M.
V (cycliste)	50-60	oui	oui	non	oui	non	non	non	non
V (cycliste)	50-60	oui	oui	non	oui	non	non	non	non
V	30	non	non	non	oui	oui	oui	non	non
V (depuis 35 ans)	70-80	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non
V (depuis 35 ans)	70-80	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui (mais pas le nom)
V (depuis 35 ans) *	40-50	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui (mais pas le nom)
V (depuis longtemps)	40	non	non	oui**	oui	non	oui	non	non
V (depuis longtemps)	40	non	non	oui**	oui	non	oui	non	non
H	50-60	non	oui	non	oui	oui	non	oui	oui (grâce au panneau)
V (depuis 40 ans)	40	non	non	non	oui	non	non	non	non***
V	60	avant	avant	non	oui	oui	oui	non	non

*Ils sont au courant qu'il y a des panneaux/affiches à ce sujet et ils reçoivent des mails qu'ils ne lisent pas car c'est trop long etc. (ils ne donnent pas envie d'être lus). D'après eux, la communication autour de ce projet est trop superficielle.

**Ils ont beaucoup aimé l'exposition photo autour de la biodiversité du port que l'on trouve tout au long du port mais n'ont pas vu le panneaux Refish.

***Le monsieur explique qu'il travaille de nuit donc il ne voit pas le panneau.

Tableau 2 : Résultats du sondage sur le projet ReFish du port de Bormes-les-Mimosas

Discussion

Le port de Fréjus est exemplaire en termes de sensibilisation à la biodiversité marine. Son « sentier du mérou » est un sentier de communication et de sensibilisation aux opérations écologiques et éducatives faites dans le port. Le port a élaboré une stratégie en couplant le tourisme à la médiation scientifique. Ces efforts réalisés sont soutenus par une bonne communication sur les réseaux sociaux permettant également aux personnes non-francophones de se sensibiliser à l'environnement marin (choix des images et textes en anglais avec l'utilisation d'émojis). L'office de tourisme de Fréjus pourrait dédier une partie de son site internet au « sentier du mérou ».

Malheureusement, je n'ai pas de réponse concrète concernant les connaissances des passants à ce sujet qui m'aurait permis d'affiner mon analyse. Comme je l'ai notifié plus haut, un évènement a eu

lieu le jour de ma venue. Les personnes que j'ai essayé d'interroger étaient sûrement plus attirées vers l'événement et ne voulaient pas s'arrêter pour répondre à mes questions. Il aurait fallu que je reste plus longtemps sur place ou que je revienne un autre jour mais pour des raisons d'emploi du temps et de budget, je n'ai pas pu retenter ma chance.

Le sondage que j'ai effectué à Port Camargue permet de se rendre compte que très peu de personnes (en dessous de trois personnes sur dix) sont familier avec le projet RECOLAG et la restauration écologique de façon générale. Les panneaux explicatifs sont absents comme l'est aussi la communication faite par le port sur les réseaux sociaux. Mettre en avant ce projet de restauration écologique serait un plus intéressant pour le port en termes d'avancée écologique.
La seule visibilité de l'implantation de nurseries artificielles dans le grau reliant la lagune de Salonique à la mer se fait via le compte Instagram de Seaboost. Il aurait été intéressant d'interroger des personnes plus jeunes étant plus actifs sur les réseaux sociaux, afin de comprendre l'efficacité communicative à ce sujet. Les abonnés du compte Instagram de Seaboost ne sont probablement pas les mêmes que ceux qui rendent visite au Port Camargue donc finalement, il faudrait peut-être trouver un autre moyen de communication supplémentaire autour du projet pour ne pas seulement passer par les réseaux sociaux.

Sur le port de Bormes-les-Mimosas il existe un panneau explicatif du projet ReFish qui est malheureusement à un emplacement le rendant peu visible à tous. La communication via les réseaux sociaux faite autour des nurseries artificielles est quasi inexistante et pourtant elle pourrait attirer un grand nombre de personnes. Globalement le niveau de connaissances des passant était très faible au sujet de ReFish, ce qui est une suite logique due au résultat de communication et d'emplacement du panneau.
Une idée serait d'intégrer le projet de nurseries artificielles dans le parcours de l'exposition photo du port dans le même esprit que le « sentier du mérou » de Port Fréjus.

Les réseaux sociaux ne sont pas les seuls moyens pour communiquer : même s'ils prennent de plus en plus de place dans nos vies, l'apprentissage est très efficace via des animations ou des expositions. Des programmes de sensibilisation et d'éducation à l'environnement marin peuvent être régulièrement proposés par les ports que ce soit pour un public jeune ou adulte. Ces activités ou conférences pourront inclure les notions de restauration écologique et montrer l'engagement environnemental du port. De plus, les panneaux explicatifs sont très importants dans les ports. Souvent, un seul panneau n'est pas suffisant donc on peut imaginer d'afficher le même plusieurs fois

ou créer un parcours de différents panneaux racontant l'histoire des nurseries artificielles avec des photos, car ce sont elles qui captent l'attention du lecteur. Une autre idée serait par exemple d'afficher ces panneaux dans les campings aux alentours du port, afin de mettre de nouveau l'aspect environnemental du port en avant, tout en informant les vacanciers de cette avancée scientifique.

On remarque que les personnes ont globalement un début de savoir dans ce domaine : la plupart sont conscient que l'artificialisation des littoraux est néfaste pour la biodiversité et savent ce qu'une nurserie. C'est une bonne base sur laquelle les médiateurs scientifiques peuvent démarrer pour aller plus loin dans l'information.

Lorsque l'on analyse le niveau de connaissances des passants dans les différents ports, il est important de prendre en compte l'année de mise en place des structures. Le port de Bormes-les-Mimosas, avec le projet ReFish a été le premier parmi les trois à installer des nurseries artificielles dans son port. Si une bonne communication avait été faite, logiquement, les passants de Bormes-les-Mimosas seraient plus au courant de cette mise en place que ceux des deux autres ports (l'installation au port de Fréjus en 2021 et celle à Port Camargue en 2020), ce qui d'après les sondages n'est pas le cas.

Il est important d'ajouter que ces sondages représentent un échantillon assez petit du public qu'accueillent les ports chaque année. Les résultats d'enquête pourraient être plus précis si j'avais fait plusieurs missions de sondages ce qui n'était pas possible dans les conditions actuelles d'emplois du temps et de budget.

Conclusion

En Méditerranée plusieurs opérations de restauration écologique des fonctionnalités de nurserie ont été mises en place au cours des 5 dernières années. En étudiant trois d'entre elles (celle menée par Ecocean à Port Fréjus, celle de Seaboost à Port Camargue et celle de Suez au port de Bormes-les-Mimosas), je souhaitais montrer si leur efficacité et leur intérêt écologique étaient mis en avant et connus du grand public. En effet, démontrer les retombées et l'efficacité écologiques de ces procédés relève d'études scientifiques approfondies et chaque procédé et méthodologie d'installation s'interprètent au regard de suivis écologiques mis en place et des résultats obtenus. Ces analyses sont d'ailleurs discutées au cours de colloques rassemblant les spécialistes de ces thématiques, comme lors des colloques DRIVER menés par l'Université de Perpignan (UPVD) et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC).

Il me paraissait néanmoins primordial d'analyser si ces résultats ou du moins les objectifs de ces opérations, étaient bien communiqués et expliqués au grand public afin qu'il s'empare du sujet et y contribue. L'étude menée m'a montré des niveaux de communication variables (outils divers, fréquence de communication différentes, public ciblé, etc.) pouvant s'expliquer soit par une volonté du meneur de projet de privilégier une communication simpliste, soit par un manque de proposition de l'apporteur de solution. D'après mes retours de sondage, le public est encore trop peu averti et intégré au projet, sauf sur Port Fréjus où un sentier pédagogique et éducatif lui est proposé. Sur les autres sites, le niveau de maturité de l'opération peut également expliquer le mode de communication, qui se veut davantage descriptif pour les projets de recherche et développement que explicatif pour les projets plus opérationnels.

Finalement, les opérations de restauration dans les ports sont de formidables outils pour dynamiser la biodiversité marine, mais également pour intégrer et éduquer le public aux enjeux environnementaux. Les gestionnaires et les apporteurs de solutions peuvent donc jouer un rôle majeur dans le maintien de l'écosystème marin.

Bibliographie

Agreste - Enquêtes Teruti 2017-2018-2019. *Part des sols artificialisés selon les les départements en 2018*. 2018. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3_TERUTI.pdf.

Beck, Michael W., Kenneth L. Heck, Kenneth W. Able, Daniel L. Childers, David B. Eggleston, Bronwyn M. Gillanders, Benjamin Halpern, et al. « The Identification, Conservation, and Management of Estuarine and Marine Nurseries for Fish and Invertebrates ». *BioScience* 51, nº 8 (2001): 633. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0633:TICAMO]2.0.CO;2.

Bilan DRIVER ReFish. « Projet pilote : Port de Bormes-les-Mimosas ». 2018. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjTto62nND3AhXqgc4BHUziBT0QFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FFabrice_Javel%2Fproject%2FArtificial-nurseries-in-Mediterranean-marinas%2Fattachment%2F5b192063b53d2f63c3d044ad%2FAS%3A634857986199553%4015283733477776%2Fdownload%2F20180503_ReFISH_bilan_DRIVER.pdf%3Fcontext%3DProjectUpdatesLog&usg=AOvVaw2IsMCxnkhYv7zQgCh_1YfV.

———. *Projet pilote : Port de Bormes-les-Mimosas*. 2018. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjTto62nND3AhXqgc4BHUziBT0QFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FFabrice_Javel%2Fproject%2FArtificial-nurseries-in-Mediterranean-marinas%2Fattachment%2F5b192063b53d2f63c3d044ad%2FAS%3A634857986199553%4015283733477776%2Fdownload%2F20180503_ReFISH_bilan_DRIVER.pdf%3Fcontext%3DProjectUpdatesLog&usg=AOvVaw2IsMCxnkhYv7zQgCh_1YfV.

Bormes-les-Mimosas. « Office de tourisme de Bormes-les-Mimosas ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.bormeslesmimosas.com/fr.

———. « Ville de Bormes-les-Mimosas ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.ville-bormes.fr/fr.

Centre de ressources Genie Ecologique. « Centre de ressources Genie Ecologique ». Consulté le 17 mai 2022. https://www.genieecologique.fr/reference-biblio/restauration-ecologique-des-nurseries-des-petits-fonds-cotiers-de-mediterranee-0.

Dubas, Rémy. *Photos des gammes de Biohut®*. Consulté le 6 mai 2022. https://www.nappex.fr/le-procede-biohut/la-gamme-biohut/.

Ecocean. « Ecocean ». Consulté le 10 mai 2022. https://www.ecocean.fr.

———. « Ecocean - Sensibilisation ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.ecocean.fr/sensibilisation/.

———. « Ecocean - Sensibilisation Vidéo ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.ecocean.fr/realisation-dune-video-pour-frejus/.

———. « Page Instagram - Ecocean ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.instagram.com/ecoceanfrance/.

———. « Rapport Biohut® Cap d'Ail ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.portdecapdail.fr/wp-content/uploads/2021/11/2020_NAPPEX_Cap-d-Ail_rapport-intermediaire_corrige.pdf.

———. « Rapport Biohut® Port Camille Rayon ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.portcamillerayon.net/wp-content/uploads/2021/10/2021_NAPPEX_Camille_Rayon_rapport-intermediaire.pdf.

———. « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2019 2018.

———. « Rapport d'activité intermédiaire port de Fréjus », 2021 2020.

Fédérico, C. *Cycle de vie de poissons côtiers - Habitat naturel*. Consulté le 6 mai 2022. http://www.genie-ecologique.fr/ecocean-fete-ses-15-ans-au-service-des-petits-poissons/.

———. *Cycle de vie de poissons côtiers - Infrastructures côtières*. Consulté le 6 mai 2022. http://www.genie-ecologique.fr/ecocean-fete-ses-15-ans-au-service-des-petits-poissons/.

———. *Cycle de vie de poissons côtiers - Infrastructures côtières + Biohut®*. Consulté le 6 mai 2022. http://www.genie-ecologique.fr/ecocean-fete-ses-15-ans-au-service-des-petits-poissons/.

Géoportail. « Bormes-les-Mimosas ». Consulté le 2 mai 2022. https://www.geoportail.gouv.fr/carte.

———. « Fréjus ». Consulté le 2 mai 2022. https://www.geoportail.gouv.fr/carte.

———. « Port Camargue ». Consulté le 2 mai 2022. https://www.geoportail.gouv.fr/carte.

Grau du Roi. « Grau du Roi - Facebook ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.facebook.com/stationdugrauduroiportcamargue/.

———. « Grau du Roi - Instagram ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.instagram.com/legrauduroiportcamargue/.

———. « Grau du Roi - YouTube ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.youtube.com/channel/UCSgk8LakKtYYHO8Js-WdF0w/videos.

———. « Office de tourisme du Grau du Roi ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.letsgrau.com.

———. « Ville du Grau du Roi ». Consulté le 9 mai 2022. https://ville-legrauduroi.fr/?s=seaboost.

Le service public d'information sur le milieu marin. « L'artificialisation du littoral ». Consulté le 2 mai 2022. https://www.milieumarinfrance.fr/Nos-rubriques/Activites-et-usages/Artificialisation-du-littoral.

Lenfant, Philippe, et Anais Goudefin. *Le cycle de vie des poissons côtiers*. avril 2015.

Lenfant, Philippe, Anais Gudefin, et Sébastien Fonbonne. « Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée - orientations et principes », avril 2015.

merlittoral2030.gouv. « Restauration Ecologique ». Consulté le 3 mai 2022. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwji7-_s4sL3AhUjxYUKHfGrBS0QFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.merlittoral2030.gouv.fr%2Ffile%2F1764%2Fdownload%3Ftoken%3DQUkD7YkT&usg=AOvVaw1LRVA8Hqul1m0qoOm2O1Cn.

NAPPEX. « La gamme Biohut® ». Consulté le 6 mai 2022. https://www.nappex.fr/le-procede-biohut/la-gamme-biohut/.

———. « NAPPEX ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.nappex.fr.

———. « NAPPEX - Port de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.nappex.fr/project/frejus/.

NaturDive. *Nurserie*. Consulté le 5 mai 2022. https://naturdive.com/actions/la-nurserie-une-creche-pour-bebes-poissons/.

———. « Nurserie ». Consulté le 6 mai 2022. https://naturdive.com/actions/la-nurserie-une-creche-pour-bebes-poissons/.

Office de Tourisme de Fréjus. « Office de Tourisme de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://frejus.fr.

Port Camargue. « Port Camargue - Environnement ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.portcamargue.com/port-propre.html.

Port de Bormes-les-Mimosas. « Page Facebook du Port de Bormes-les-Mimosas ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.facebook.com/portdebormes/photos/pcb.1332413867171258/1332405313838780/.

———. « Page Instagram du Port de Bormes-les-Mimosas ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.instagram.com/port_de_bormes/.

———. « Port de Bormes-les-Mimosas - Projet ReFish ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.portdebormes.com/fr/refishseaboost.htm.

Port de Fréjus. « Les nurseries artificielles Biohut® dans le port de Fréjus ». Consulté le 6 mai 2022. https://www.portfrejus.fr/biohut/.

———. « Page Facebook du Port de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.facebook.com/photo.php?fbid=284409943696293&set=pb.100063818690011.-2207520000..&type=3.

———. « Page YouTube Port de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.youtube.com/channel/UC_saq0pR6tKA7saU4GuSEow/videos.

———. « Port de Fréjus ». Consulté le 10 mai 2022. https://www.portfrejus.fr.

———. « Post Instagram de l'installation de Biohut® au Port de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.instagram.com/p/CRD__LHo0ld/.

———. « Post Instagram de l'installation de panneaux explicatifs au Port de Fréjus ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.instagram.com/p/CWneNMPIqlH/.

Sauvons l'eau. *Structure ReFish*. Consulté le 8 mai 2022. https://www.sauvonsleau.fr/jcms/e_16260/la-restauration-ecologique-du-port-de-bormes-les-mimosas-83--refish-un-projet-innovant-de-nurserie-cotiere.

Seaboost. *Emplacement des différents modules*. Consulté le 6 mai 2022. https://www.seaboost.fr/actualites/recolag-nurseries-lagune-connectivite/.

———. *Nurseries artificielles Seaboost*. Consulté le 8 mai 2022. https://www.seaboost.fr/wp-content/uploads/2017/10/Fiche-technique-solution-Seaboost-module-connectivite.pdf.

———. *Nurseries artificielles Seaboost*. Consulté le 8 mai 2022. https://www.seaboost.fr/solution-ecologique-marine/#habitats-artificiels.

———. « Projet RECOLAG - Seaboost ». Consulté le 6 mai 2022. https://www.seaboost.fr/actualites/recolag-nurseries-lagune-connectivite/.

———. « Seaboost - Instagram ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.instagram.com/stories/highlights/18098956411153941/.

———. « Seaboost - Nos Projets ». Consulté le 10 mai 2022. https://www.seaboost.fr/nos-projets/.

Society of Ecological Restauration (SER). « Society of Ecological Restauration (SER) », 2004. https://www.ser.org.

Suez. « Page Instagram - Suez ». Consulté le 9 mai 2022. https://www.instagram.com/suez_group/.

Ville de Fréjus. « Ville de Fréjus - Environnement ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.ville-frejus.fr/decouvrir/environnement/.

———. « Ville de Fréjus Biohut® ». Consulté le 8 mai 2022. https://www.ville-frejus.fr/ma-ville/actualites/2020/01/le-1er-prix-de-linnovation-pour-le-port-de-frejus/.

Annexe 10

La gestion d'une espèce exotique envahissante (EEE) dans un processus de restauration écologique à partir du cas du crabe bleu dans les lagunes méditerranéennes

Par Margot DENTAN

Margot Dentan

D.U. Restauration écologique des petits fonds marins côtiers

De la lutte contre une espèce invasive marine à sa valorisation marchande : controverse sociotechnique autour d'un enjeu de restauration écologique

Le cas du crabe bleu en Méditerranée française

NE PAS DIFFUSER

Mai 2022

Sommaire

Introduction

1. Le crabe bleu : la constitution d'un problème public en Méditerranée française

A) Impacts néfastes de la prolifération du crabe bleu en Méditerranée française

B) Objectifs institutionnels pour la restauration du « bon état écologique » des milieux envahis

2. De la lutte contre l'introduction d'une espèce invasive marine à sa valorisation marchande

A) La lutte contre les introductions d'espèces invasives marines : principe de non-dégradation des milieux et mesures préventives

B) La lutte contre les espèces invasives marines introduites : la valorisation marchande comme outil de restauration écologique des milieux envahis

Conclusion

Introduction

À l'heure de l'Anthropocène[1], les littoraux méditerranéens, et tout particulièrement les territoires lagunaires, sont confrontés à de multiples perturbations écologiques liées aux pressions anthropiques qui pèsent sur les communautés et les interactions interspécifiques. Originaires des côtes atlantiques américaines, et probablement arrivées en Europe par l'intermédiaire des eaux de ballast des navires, la récente augmentation des populations de crabe bleu (*Callinectes sapidus*) en Méditerranée française déstabilise le fonctionnement socio-écosystémique des lagunes côtières. S'il apparait essentiel d'étudier comment les espèces invasives marines s'adaptent à de nouveaux environnements (Boudouresque & Verlaque, 2012) et comment les espèces autochtones s'adaptent aux invasions, il importe également de comprendre la manière dont les êtres humains perçoivent et s'adaptent aux espèces invasives (Tsing, 2022). En particulier, la prolifération du crabe bleu en Méditerranée interroge la gouvernance polycentrique de ressources naturelles considérées comme biens communs (Ostrom, 1990). La gestion du crabe bleu intervient dans un contexte dit de « reconquête écologique » des lagunes et des milieux côtiers impulsée par les directives européennes sur l'eau (DCE), sur les habitats, la faune et la flore (DHFF), et surtout par le suivi des espèces non-indigènes marines prévu par la Directive-cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM)[2]. Pour autant, les pratiques nationale et locale de gestion du crabe bleu dans un objectif commun de restauration du « bon état écologique », selon l'expression consacrée, ne semblent pas suivre une trajectoire linéaire et homogène. La variété de fonctionnement des lagunes méditerranéennes (De Wit, 2011), et l'absence de consensus sur la manière de faire face à une invasion biologique, en font des territoires hydrosociaux à l'origine de pratiques de gestion originales et multi-acteurs. De la lutte contre une espèce invasive à sa valorisation marchande, le présent dossier interrogera les controverses sociotechniques qui peuvent se poser pour la restauration écologique des milieux envahis. Une première partie présentera les impacts néfastes du crabe bleu sur les milieux méditerranéens et les objectifs institutionnels de restauration écologique liés ; puis il sera question des différentes méthodes et stratégies de restauration des milieux confrontés à l'invasion biologique.

1. Le crabe bleu : la constitution d'un problème public en Méditerranée française

A) Impacts néfastes de la prolifération du crabe bleu en Méditerranée française

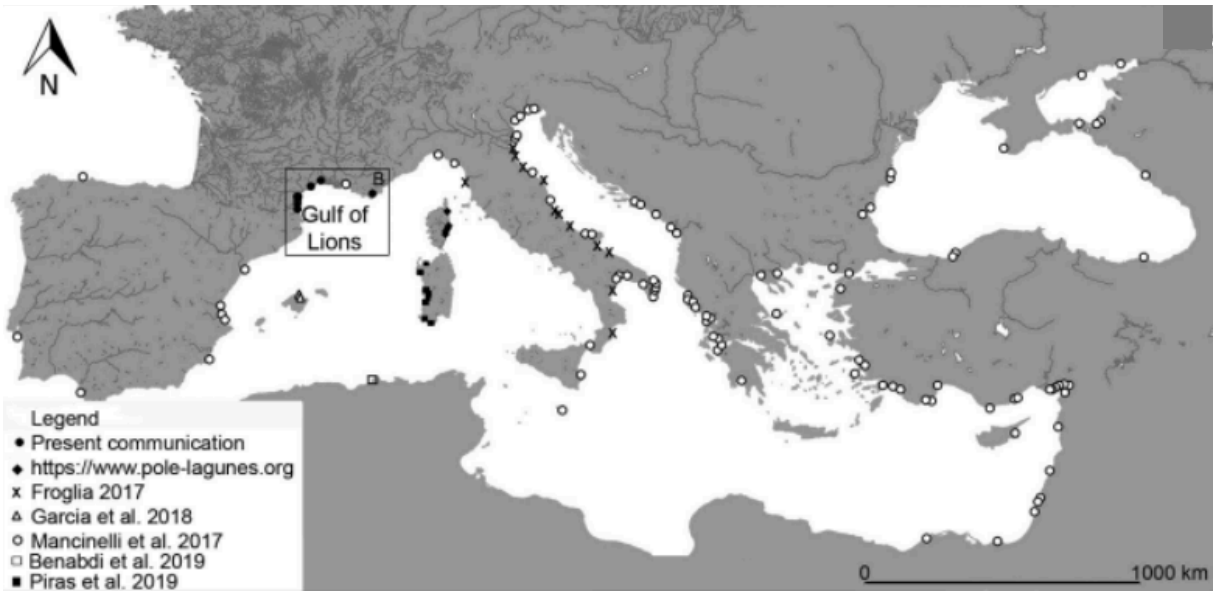
Les espèces exotiques envahissantes figurent parmi les cinq principaux facteurs d'érosion de la biodiversité (IPBES, 2019), tandis que la Méditerranée est l'une des régions du monde les plus touchées par les invasions biologiques (Zenetos & Galanidi, 2020). Selon l'UICN, la Convention sur la diversité biologique, le Parlement européen et le Conseil de l'Europe, une espèce invasive ou espèce exotique envahissante désigne « une espèce introduite par l'homme

[1] De récents travaux (Artaud, Chlous et al., 2021) développent la notion de « mers anthropocéniques » pour décrire les phases de dégradation du milieu marin et d'extinction des espèces désormais imputables à la seule espèce humaine.

[2] DCE 2000/60/CE ; DHFF 92/43/CE ; DCSMM 2008/56/CE.

en dehors de son aire de répartition naturelle (volontairement ou fortuitement) et dont l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques et/ou économiques et/ou sanitaires négatives. » (especes-exotiques-envahissantes.fr). En particulier, le crabe bleu est connu pour être un grand destructeur et l'une des espèces les plus invasives de Méditerranée. Les populations augmentent significativement depuis les années 2010 : l'espèce a été observée sur les côtes de la quasi-totalité des pays méditerranéens, et a déjà colonisé plusieurs lagunes depuis le premier signalement de son expansion sur les côtes méditerranéennes françaises en 2016 (Veyssiere et al., 2022 ; Carte 1).

Carte 1. Répartition de *Callinectes Sapidus* en Méditerranée



Source : Labrune et al., 2019 ; données actualisées par Veyssiere et al., 2022, p.20

Les impacts, tant écologiques que socio-économiques, de la prolifération du crabe bleu en Méditerranée française sont encore mal connus. D'abord, du point de vue écologique, si beaucoup de travaux existent sur la morphologie, la biologie et l'écologie de cette espèce lorsqu'elle évolue dans son environnement natif (Encadré 1), de nombreux angles morts et zones d'ombres demeurent quant à son adaptation et ses impacts en milieu méditerranéen.

Encadré 1. Bref descriptif de *Callinectes sapidus* par Pierre Noël (2017, p.1)

« Chez le crabe bleu américain, les téguments sont fortement calcifiés. La carapace est deux fois plus large que longue, avec 2 dents frontales et 9 dents antérolatérales pointues, la dernière étant très longue et dirigée latéralement. Les pinces sont fortes, presque égales. La dernière patte se termine par un article aplati ; elle est utilisée pour la nage et l'enfouissement dans le sédiment. Ce grand crabe atteint 23 cm de large et un poids de plus de 500 g. La carapace est grise, brune ou bleu-vert ; les épines sont plus ou moins rouges. Les pinces sont bleues chez les mâles, et plutôt rouges avec l'extrémité pourpre chez les femelles. Ce crabe se déplace sur le côté ou à reculons et peut parcourir 15 km en une journée. Il peut sortir de l'eau la nuit. Il est

omnivore et consomme des petits mollusques, des crustacés, des poissons et des plantes. La maturité sexuelle est atteinte un peu après un an et la reproduction a lieu en eau saumâtre. La femelle pond jusqu'à 2 millions d'œufs qui sont incubés 2 semaines. Il y a 7 stades larvaires marins. Le développement larvaire dure 1 à 2 mois selon la température de l'eau. Ce crabe présente une mue terminale liée à la régression de sa glande de mue. La longévité n'excède pas 3 à 4 ans. Les poissons et les oiseaux côtiers sont ses principaux prédateurs. Ce crabe est parasité par des vers (trématodes, sangsues), des crustacés et divers micro-organismes. L'espèce vit en eau saumâtre dans des habitats variés jusqu'à -35m de profondeur. Elle est tolérante à la pollution. Ce crabe se rencontre du sud du Canada au nord de l'Argentine. »

Photographie 1. *Callinectes sapidus*, femelle

Source : Children Museum of Indianapolis ; Veyssiere et al., 2022, p.4

Certaines des caractéristiques morphologiques, biologiques et écologiques du crabe bleu semblent faciliter sa prolifération rapide au sein des lagunes méditerranéennes ; il s'agit notamment des capacités de déplacement évaluées à 15km/jour à la nage, d'un nombre d'œufs par ponte compris entre 700 000 et 2 100 000, d'une tolérance à la pollution et aux faibles teneurs en O2, d'une tolérance aux variations de température (de 3 à 35°C) et aux variations de salinité (de 2 à 48 grammes par litre). Au-delà de ces quelques éléments, Pascal Romans, chercheur à l'Observatoire océanologique de Banyuls sur Mer, estime que les connaissances sur la prolifération de *Callinectes Sapidus* en Méditerranée demeurent lacunaires et ne permettent pas encore de qualifier avec précision les impacts écologiques néfastes de l'espèce invasive sur les lagunes et les milieux méditerranéens (Figure 1).

Figure 1. Éléments de biologie et d'écologie du crabe bleu présentés par Pascal Romans (Journée Plan régional d'action crabe bleu, 28 janvier 2021, présentation powerpoint, slide 9)

De nombreuses interrogations et questions demeurent…

-Quel est le cycle biologique de l'espèce dans les eaux méditerranéennes ?

-Comment repérer/capturer des juvéniles et évaluer leurs densités ? Où se trouvent-ils ?

-Quel est l'impact des juvéniles mais aussi des stades larvaires sur les espèces méditerranéennes ?

-Quelle est la période de reproduction en Méditerranée ? La reproduction est-elle liée à une migration ?

-Quels sont les prédateurs de l'espèce en Méditerranée ?

-Quelles sont les proies des adultes et des juvéniles en Méditerranée ?

-Quelle est la dynamique de la population durant l'hiver ?

-Quel est le taux de croissance et la taille de première maturité sexuelle en Méditerranée ?

-L'espèce peut-elle être vectrice de pathogènes associés transmissibles aux espèces locales ?

-Comment suivre les déplacements des adultes (marquages ?) – D'où viennent les crabes capturés aujourd'hui ?

Ensuite, c'est sans doute du point de vue socio-économique que les impacts néfastes de la prolifération du crabe bleu ont été les plus directement visibles, bien que ces impacts n'aient été que tardivement et partiellement pris en compte par les gestionnaires et les scientifiques, et qu'ils demeurent encore difficilement quantifiables. Des méthodes d'évaluation des coûts économiques des invasions biologiques se développent peu à peu à large échelle (Diagne et al., 2021), notamment sur le crabe bleu (programme euro-méditerranéen Bleu-Adapt). Mais pour l'heure, en France, seuls des témoignages disparates et localisés sont recensés, et sont parfois relayés par la presse. Par exemple, en 2021, la presse locale a fait état d'une invasion spectaculaire du crabe bleu dans l'Étang de Canet-Saint-Nazaire (environ 10 tonnes) (Figure 2), alors que seulement quelques individus avaient été observés en 2017 (Veyssiere et al., 2022, p.18).

Figure 2. Extrait d'un article du média local France Bleu Roussillon faisant état de l'invasion du crabe bleu dans l'Étang de Canet-Saint-Nazaire (Pyrénées-Orientales) en 2021

Agriculture - Pêche

Le crabe bleu envahit l'étang de Canet et menace la pêche

Mercredi 18 août 2021 à 17:24 - Par Suzanne Shojaei, France Bleu Roussillon

Canet-en-Roussillon

Le crabe bleu, venu d'Amérique, a colonisé l'étang de Canet-en-Roussillon (Pyrénées-Orientales) en quelques mois. Cette espèce, résistante et redoutable, dévore les poissons que les pêcheurs trouvent habituellement. D'autres étangs de Méditerranée sont menacés.

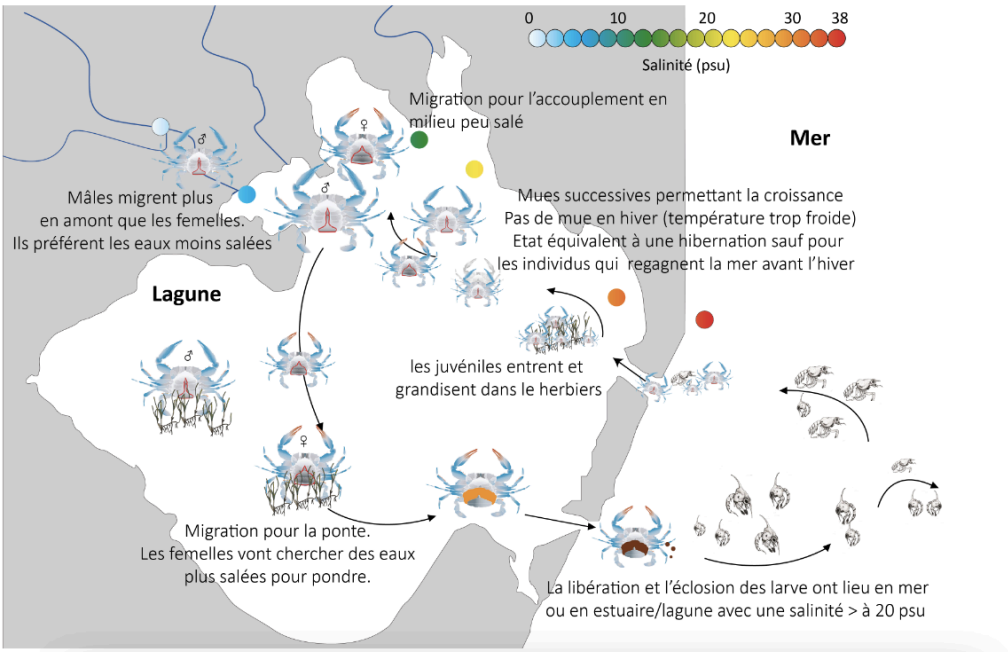
Les pêcheurs de l'étang de Canet récupèrent entre 500 et 2.000 crabes bleus par jour. © Radio France - Suzanne Shojaei

Les pêcheurs, qui voient leurs filets détruits par le crabe bleu et leurs prises d'anguilles diminuer, se retrouvent au-devant d'une lutte socio-environnementale pour assurer leurs moyens de subsistance (Martinez Alier, 2014). Depuis lors, ils effectuent « un véritable travail de sentinelle »[3] et sont devenus des acteurs à part entière de la gestion du crabe bleu et de la restauration des milieux envahis.

B) Objectifs institutionnels pour la restauration du « bon état écologique » des milieux envahis

On suppose que les méthodes de gestion du crabe bleu, et de restauration du « bon état écologique » des milieux envahis, s'opèrent selon une logique biogéographique de répartition et de migration de l'espèce sensible au continuum mer-lagune (Figure 3).

Figure 3. Lien entre les migrations de *Callinectes sapidus* et les phases de son développement

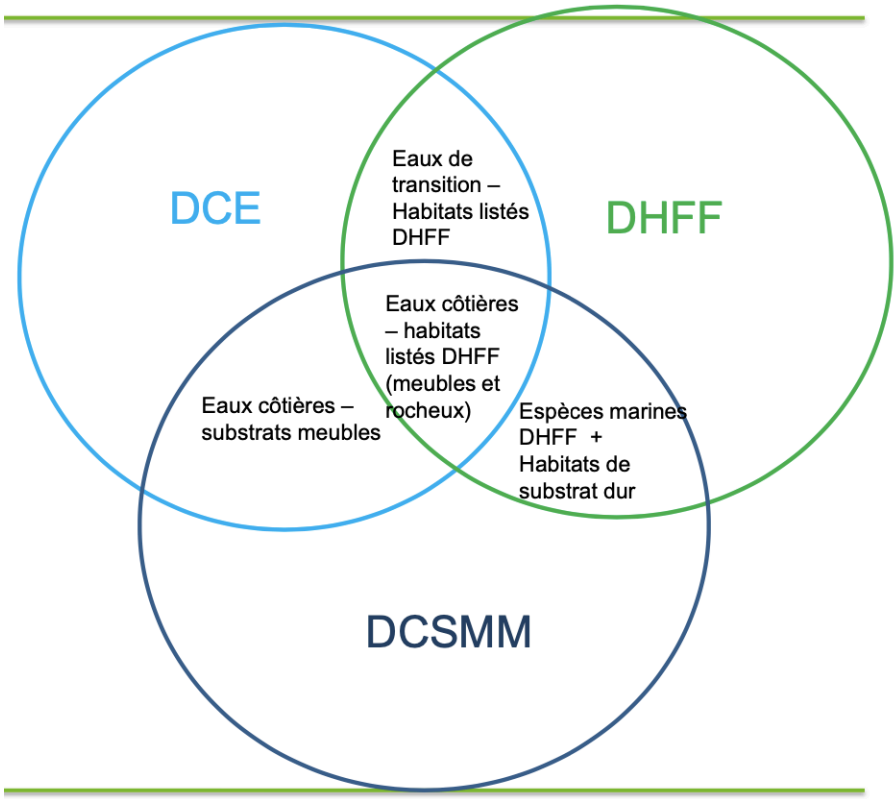


Source : Figure réalisée par M. Garrido ; dans Veyssière et al., 2022, p. 26

[3] Interview de l'ambassadeur du Pacte européen pour le climat, août 2021.

Pour autant, l'approche écologique ne semble pas pouvoir être pensée indépendamment des facteurs institutionnels qui peuvent la favoriser ou au contraire lui faire obstacle. Alors que les interactions terre-lagune-mer témoignent d'un milieu lagunaire interconnecté, la règlementation, les pratiques de gestion et les savoirs scientifiques sont le plus souvent morcelés entre les cours d'eau, la lagune, le littoral et la mer (9ème rencontres Bioterre, 2022). Dans le cas des lagunes méditerranéennes françaises, deux hypothèses limitantes peuvent être formulées. D'abord, il existe une inégale et complexe juxtaposition des référentiels de « bon état écologique » et de « bon état de conservation » prévus par les directives européennes marines et terrestres (DCSMM, DHFF, DCE) (Figure 4).

Figure 4. La co-implémentation des directives européennes (DCE, DHFF, DCSMM) pour la restauration écologique de milieux lagunaires à l'interface de la terre et de la mer



Source : professionnels.ofb.fr

Ensuite, il semble y avoir un tropisme politique et scientifique d'accumulation des savoirs sur le continuum terre-lagune (notamment pour répondre à l'objectif de gestion raisonnée du bassin-versant impulsé par la DCE). Si de récents travaux ont montré la faible prise en compte d'autres aspects tels que l'hydrogéologie lagunaire (Erostate et al., 2020) ou les lagunes dites temporaires (Latron et al., à paraître), la caractérisation des zones d'ombre institutionnelles et des angles morts en termes de suivi des lagunes mériterait d'être approfondie dans sa dimension proprement maritime. De futures recherches pourraient, par exemple, se demander comment le suivi d'une espèce invasive marine s'institutionnalise au sein de lagunes classées sites Natura

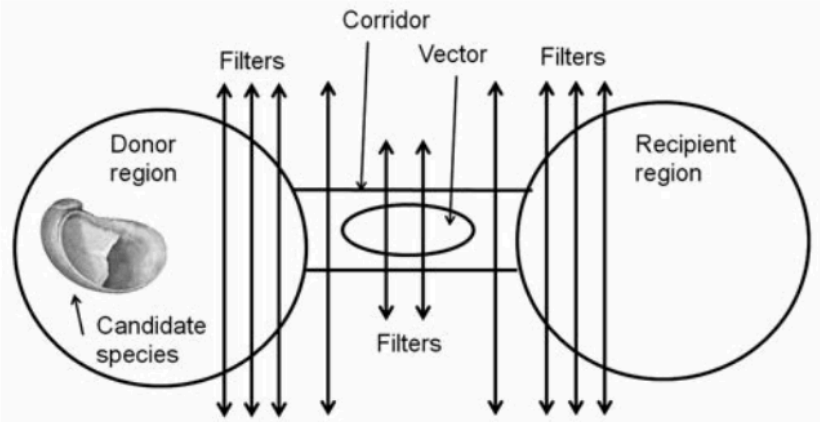
2000 (DHFF) longtemps considérées et administrées de manière séparée de la mer[4]. Ainsi la gestion du crabe bleu dans un objectif de restauration écologique semble-t-elle poser défi aux représentations traditionnelles des interactions espèce-espace (jusqu'alors dominées par le paradigme terrestre) au sein d'habitats lagunaires hétérogènes à l'interface de la terre et de la mer.

2. De la lutte contre l'introduction d'une espèce invasive marine à sa valorisation marchande

A) La lutte contre les introductions d'espèces invasives marines : principe de non-dégradation des milieux et mesures préventives

Les processus d'introduction d'espèces et d'invasion des habitats marins et des lagunes côtières impliquent une région donneuse, un vecteur, un corridor, une région receveuse, une espèce candidate et un certain nombre de filtres qui s'opposent à ce processus (Boudouresque et Verlaque, 2012 ; Figure 5).

Figure 5. Processus impliqués dans une introduction d'espèce : la région donneuse, le vecteur, le corridor, les filtres, la région receveuse et l'espèce candidate



Source : Boudouresque & Verlaque, 2012, p.310

Boudouresque et Verlaque soulignent les spécificités des processus des invasions en milieu marin : « certaines caractéristiques de la région receveuse, telles que la faible diversité spécifique, les perturbations et le réchauffement climatique, qui sont souvent considérées comme facilitant les introductions en milieu continental, pourraient être de bien moindre importance en milieu marin. Inversement, le rôle du vecteur et du corridor ont peut-être été sous-estimés. » En ce sens, limiter les vecteurs et corridors d'introduction constituerait un élément central pour anticiper et réduire les risques d'invasions biologiques marines. Il est aujourd'hui admis que la restauration écologique n'est pertinente et efficace seulement lorsqu'elle s'accompagne d'une réduction des pressions sur les milieux concernés, dans un

[4] Cet apparent paradoxe doit être nuancé par les requalifications récentes des lagunes, notamment en termes de suivi du continuum lagune-mer, portées par le projet Life Marha (DHFF) et la mise en application de la DCSMM.

principe de non-dégradation. Dans le cas de l'introduction du crabe bleu en Europe au début du XXème siècle, le rôle des vecteurs et des corridors reste mal connu, mais les eaux de ballast des navires sont considérées comme étant le vecteur le plus probable d'introduction de l'espèce (Nehring, 2011). Il s'agit d'ailleurs de l'une des principales voies d'introduction involontaire d'espèces invasives (Figure 6).

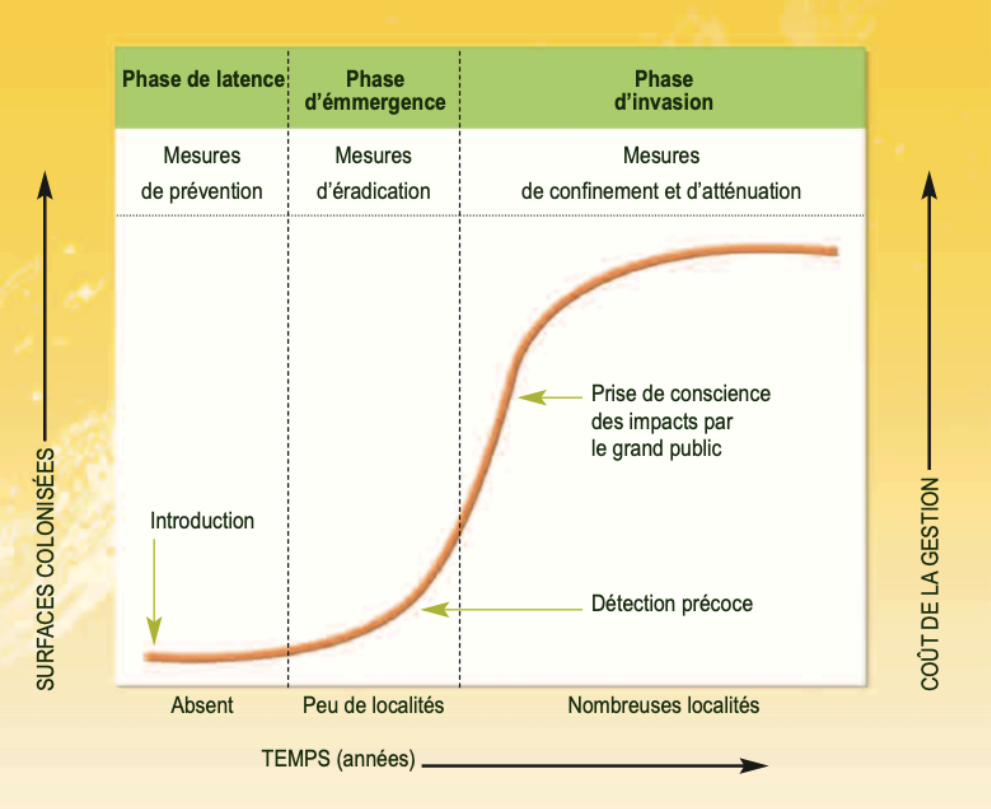
Figure 6. Principales voies d'introduction d'espèces invasives

INTRODUCTIONS VOLONTAIRES		INTRODUCTIONS INVOLONTAIRES
Introductions directes dans l'environnement	**Introductions après culture ou captivité**	
Agriculture	Évasions de jardins botaniques	Fret maritime et aérien
Foresterie	Jardins privés	Eaux de ballast
Horticulture	Jardineries	Coques des navires
Élevage	Zoos	Véhicules personnels
Lâcher de poissons	Élevages d'animaux	Engins de transport et de construction
Lâcher de mammifères	Apiculture	Denrées agricoles
Chasse	Aquaculture	Semences
Contrôle biologique	Aquariums	Matériaux de construction (terre, gravier, sable...)
Amélioration des sols	Nouveaux animaux de compagnie	Bois
Développement agricole	Unités de recherche	Matériaux d'emballage
		Déchets

Source : Sarat et al., 2015 ; especes-exotiques-envahissantes.fr

Les outils règlementaires visant à empêcher les introductions d'espèces invasives, et donc à réduire les pressions sur les milieux, constituent une mesure préventive désormais incontournable. On peut notamment citer la Convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires, adoptée en 2004, ratifiée par la France en 2008, et entrée en application en 2017. Outre la règlementation, lutter contre les introductions d'espèces invasives marines passe également par des mesures de détection précoce. Par exemple, un outil de détection précoce du crabe bleu par ADN environnemental (ADNe) est actuellement en cours de développement à l'UMR CEFE de Montpellier, en collaboration avec l'UMR Marbec et les gestionnaires de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) d'Occitanie (occitanie.developpement-durable.gouv.fr). En effet, seule la détection précoce d'une espèce invasive pendant sa phase d'émergence peut permettre son éradication (Figure 7).

Figure 7. Différents stades de l'invasion et objectifs de gestion à mettre en œuvre



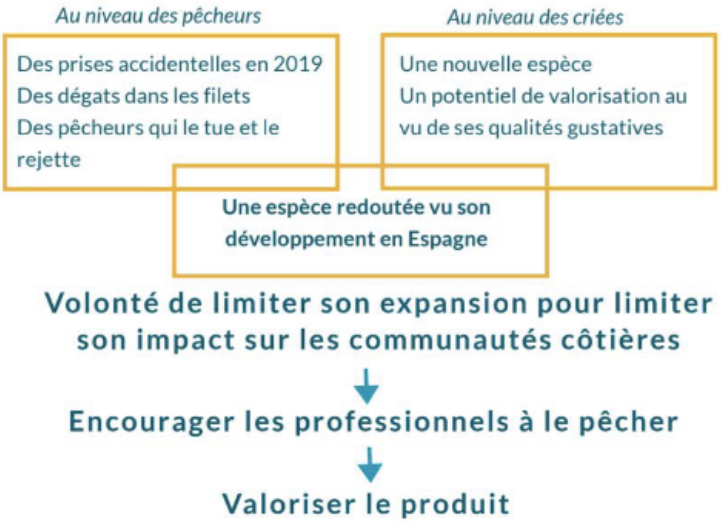
Source : Branquart, 2010 ; Adapté par UICN France, 2018, p.5

B) La lutte contre les espèces invasives marines introduites : la valorisation marchande comme outil de restauration écologique des milieux envahis

Dans le cas des espèces invasives déjà introduites, la valorisation marchande peut constituer un outil de restauration écologique au titre de l'Article 19 du Règlement européen n°1143/201 : *« L'utilisation commerciale d'espèces exotiques envahissantes déjà implantées peut être temporairement autorisée dans le cadre des mesures de gestion visant à leur éradication, au contrôle de leur population ou à leur confinement, pour autant que cela soit strictement justifié et que tous les contrôles appropriés soient mis en place pour éviter toute poursuite de leur propagation. »* (Parlement européen & Conseil de l'Europe, 2014). Officiellement, le crabe bleu n'est pour le moment pas soumis à ce règlement : l'espèce a été proposée pour être inscrite dans la liste des EEE de niveau 1 à l'échelle nationale. Seul le classement en niveau 2 rendrait toute exploitation commerciale impossible sauf après demande d'autorisation ministérielle (Veyssière et al., 2022, p.34). Malgré cette absence de coercition, la marchandisation du crabe bleu en France demeure envisagée selon la conception du « bon état écologique » des milieux marins prônée par l'Union européenne, et qui pose comme objectif que « les espèces non-indigènes introduites par le biais des activités humaines [soient] à des niveaux qui ne perturbent pas les écosystèmes » (descripteur de pression D2 de la DCSMM). Autrement dit, à l'heure actuelle, les gestionnaires français semblent se tourner vers une stratégie de pêche temporaire dans le but de réguler les populations de crabe bleu, et n'envisagent pas de transformer l'espèce en une ressource durable. Trois initiatives ont pu être identifiées. On recense actuellement deux projets de valorisation commerciale du crabe bleu portés par des organismes pour l'un privé

(OP du Sud) et pour l'autre public (PNR de la Narbonnaise). On recense également un projet de développement de techniques de pêche au crabe bleu porté par le Comité régional des pêches maritimes et des élevages marins (CRPMEM) d'Occitanie. Nous détaillerons ici brièvement l'initiative portée par l'OP du Sud. L'analyse du contexte telle que réalisée par les porteurs du projet SCRABBLEU (Solutions de valorisation du CRABe Bleu) confirme que la valorisation marchande du crabe bleu est perçue comme un outil de restauration écologique des milieux envahis (Figure 8).

Figure 8. Analyse du contexte par les porteurs du projet SCRABBLEU de l'OP du Sud en 2021



L'étude de marché du projet SCRABBLEU se montre plutôt optimiste quant au potentiel de valorisation commerciale de l'espèce (Encadré 3). Le crabe bleu (étymologiquement « Bon nageur savoureux », de la traduction anglaise « *savory graceful swimmer* ») est d'ailleurs consommé dans de nombreux pays à travers le monde, et en particulier aux États-Unis.

Encadré 3. Quelques résultats présentés dans l'étude de marché SCRABBLEU de l'OP du Sud en 2021

« Potentiel du crabe bleu sur différents marchés : Le crabe bleu pourrait se substituer au tourteau, qui représente 75% des parts de marché de crabe en France. Sa notoriété est à développer, et il devrait être placé à des prix de vente très légèrement en-dessous de ceux du tourteau. Selon l'étude, plusieurs produits issus de la pêche du crabe bleu peuvent trouver leur place sur le marché français :

Présentation	Vivant	Cuit	Pinces cuites	Soupe
Circuit de commercialisation	Classique	Via mareyeur ou cuiseur	Via cuiseur	Via conserverie
Calibre	200-300 g			tout
Prix de vente au client final	8-12 €/kg	10-15 €/kg	20-35 €/kg	0,8-1 €/kg achat
Promotion	Pêche locale / méditerranéenne / française			
Cible	Arc méditerranéen et touristes			Idem crabe vert
Volumes	Jusqu'à 200-250 T	20-100 T	n.d.	Quelques tonnes
Concurrence	Tourteau vivant	Tourteau cuit ou pasteurisé	Pinces de tourteau	Crabe vert

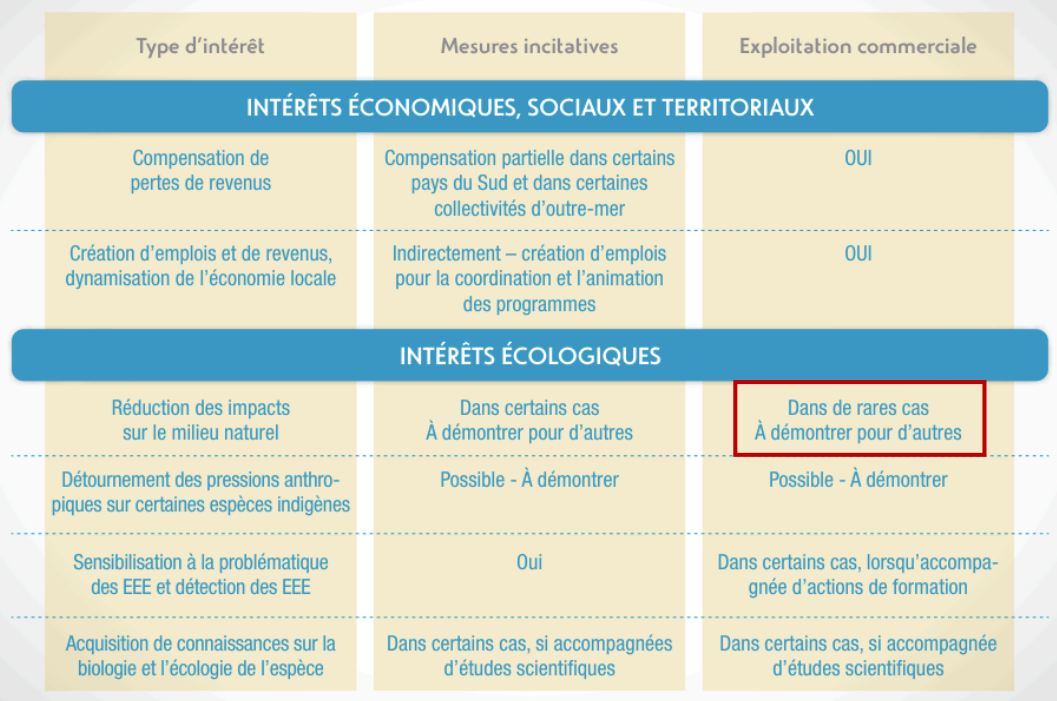
Concernant le proche export, le crabe bleu est présent sur les marchés de gros italiens et espagnols. Il s'est implanté en restauration (paëllas, pâtes) et en poissonnerie. Depuis quelques années, une augmentation de la part des marchés chinois et USA est observée dans les exportations de ces deux pays. Par exemple, l'Espagne exporte près de 100 T/an de crabe surgelé à destination des USA pour un prix moyen de 3,3 €/kg. L'existence de marchés pour distribuer des volumes de crabe bleu est une des principales conclusions de l'étude. Ces marchés sont répartis sur plusieurs périmètres :
- Le marché régional sur le pourtour méditerranéen, avec des atouts indéniables pour concurrencer le tourteau ;
- Le marché du proche export en Espagne et en Italie, où des distributeurs semblent ouverts à la discussion ;
- Le marché du crabe cuit sur la façade atlantique française ;
- Le marché du grand export aux USA et en Chine.

<u>Perception du produit</u> : Les retours de la part des clients potentiels ont été plutôt positifs : chair fine, qui se positionne entre celle du tourteau et de l'araignée, texture fondante. Le crabe bleu plait par sa couleur chatoyante et les personnes interrogées jugent le décorticage relativement simple dans des conditions de cuisson adéquates. Des essais de soupe se sont révélés concluants : les résultats organoleptiques sont satisfaisants, le goût est plus prononcé qu'avec le crabe vert. »

* On interprètera les résultats de l'étude SCRABBLEU avec prudence, et en particulier l'estimation des prix de vente, du fait de la difficile prédiction de l'élasticité-prix.

Si nous manquons encore de recul pour le crabe bleu, l'intérêt de la valorisation commerciale d'une espèce invasive pour la restauration du « bon état écologique » des milieux envahis tend à être nuancée dans de nombreux autres cas (Figure 9), notamment car les effets d'hystérésis sur le milieu sont difficilement prédictibles. On pense par exemple aux cas de surcompensation écologique : *« les études scientifiques sur la valorisation commerciale des carpes asiatiques dans le Nord des États-Unis ont par exemple montré que les efforts de prélèvement concentrés uniquement sur les poissons de grande taille ne parviendraient pas à faire diminuer les populations, et que toutes les classes d'âge devaient être prélevées pour y parvenir (Garvey et al., 2012). Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Tsehaye et al. (2013), qui ont estimé que, pour être efficace, plus de 70 % de la population doit être prélevée annuellement, que les prélèvements doivent concerner toutes les classes de populations et être plus intensifs pour la Carpe argentée, espèce présentant un taux de reproduction et des populations plus importantes que la Carpe à grosse tête. »* Mais les effets pervers peuvent également venir de pratiques humaines inadaptées : peut être cité *« le cas de l'écrevisse du Pacifique en Suède, qui après sa commercialisation à vue son nombre d'introduction illégale augmentée afin de permettre à d'autres pêcheurs d'exploiter cette ressource (Edsman, 2015 in UICN France, 2018). »* (Veyssière et al., 2022, p.35).

Figure 9. Récapitulatif des cas d'études recensés en France et à l'étranger

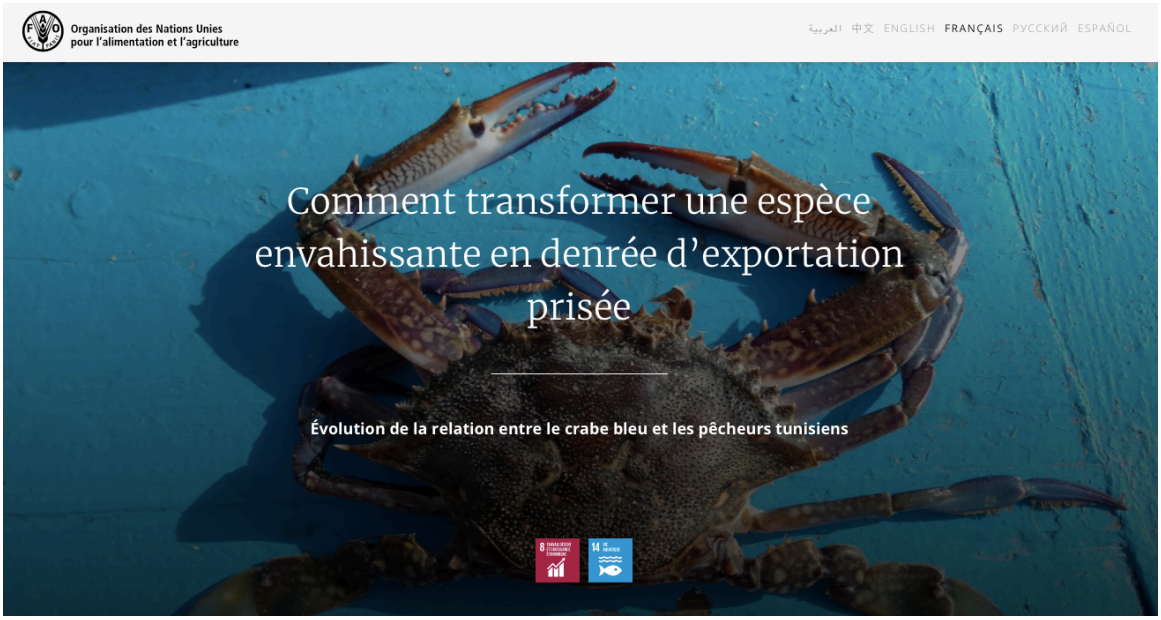


Type d'intérêt	Mesures incitatives	Exploitation commerciale
INTÉRÊTS ÉCONOMIQUES, SOCIAUX ET TERRITORIAUX		
Compensation de pertes de revenus	Compensation partielle dans certains pays du Sud et dans certaines collectivités d'outre-mer	OUI
Création d'emplois et de revenus, dynamisation de l'économie locale	Indirectement – création d'emplois pour la coordination et l'animation des programmes	OUI
INTÉRÊTS ÉCOLOGIQUES		
Réduction des impacts sur le milieu naturel	Dans certains cas À démontrer pour d'autres	Dans de rares cas À démontrer pour d'autres
Détournement des pressions anthropiques sur certaines espèces indigènes	Possible - À démontrer	Possible - À démontrer
Sensibilisation à la problématique des EEE et détection des EEE	Oui	Dans certains cas, lorsqu'accompagnée d'actions de formation
Acquisition de connaissances sur la biologie et l'écologie de l'espèce	Dans certains cas, si accompagnées d'études scientifiques	Dans certains cas, si accompagnée d'études scientifiques

Source : UICN, 2018, p.29.

En somme, il semblerait que la valorisation marchande des espèces invasives oscille entre stratégie de restauration (intérêts écologiques) et stratégie de réaffectation (intérêts économiques) des milieux envahis. Par exemple, tandis que la France opte plutôt pour une stratégie de restauration-réhabilitation (commercialisation temporaire du crabe bleu dans l'objectif de réguler l'espèce), la Tunisie semble s'orienter vers une stratégie de réaffectation (transformation du crabe bleu en source de revenus pérenne, quitte à modifier l'écosystème de manière permanente). Le gouvernement tunisien, confronté depuis 2014 à l'invasion de deux espèces de crabe bleu (*Portunus segnis* et *Callinectes sapidus*), a cherché, en lien avec l'Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), à « transformer une espèce envahissante en denrée d'exportation prisée » (fao.org, 2021 ; Figure 10), qui doit apporter une source de revenus pérenne aux pêcheurs locaux.

Figure 10. En Tunisie, la réaffectation plutôt que la restauration des milieux



Source : fao.org

Conclusion

Le présent dossier a voulu présenter quelques éléments et pistes de réflexion autour de la gestion des espèces invasives dans un objectif de restauration du « bon état écologique » des milieux. Le cas de la gestion du crabe bleu en Méditerranée s'avère complexe et est soumis à débat, tant sur le choix des méthodes (comment lutter?) que sur les stratégies déployées (faut-il lutter?). La diversité de fonctionnement écologique des milieux se conjugue à la complexité des systèmes socioéconomiques qui leur sont liés, mais aussi à la mise sur agenda de priorités d'ordre écologique ou économique souvent envisagées de manière duale. Les tentatives de valorisation marchande des espèces invasives sont une bonne illustration de ces enjeux. En somme, le manque de recul et de connaissances inhérent à toute apparition d'espèce hors de son milieu natif contraste avec la rapidité nécessaire à la mise en place de mesures d'éradication. Les politiques de *lutte* contre les espèces invasives semblent, dans les faits, et malgré les objectifs institutionnels auxquels elles doivent répondre, bien souvent être des mesures d'*adaptation* à l'invasion biologique.

Références

Artaud H., Chlous F., Mariat-Roy E. (2021), « Des mers anthropocéniques? Un colloque au Muséum national d'histoire naturelle », *Natures Sciences Sociétés*, 29, 198-205.

Boudouresque C., Verlaque M. (2012), « An Overview of Species Introduction and Invasion Processes in Marine and Coastal Lagoon Habitats », *Cahiers de biologie marine*, 53, 309-317.

De Wit R. (2011), « Biodiversity of Coastal Lagoon Ecosystems and Their Vulnerability to Global Change », dans : Grillo O. (dir.), *Ecosystems Biodiversity*, Londres, IntechOpen.

Diagne C., Leroy B., Vaissière C. et al. (2021), « High and Rising Costs of Biological Invasions Worldwide », *Nature*, 592, 571-585.

Nehring S. (2011), « Invasion History and Success of the American Blue Crab Callinectes sapidus Rathbun in European Coastal Waters », dans Galil B., Clark P. (dir.), *The Wrong Place: Alien Marine Crustaceans Distribution, Biology and Impacts*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, series in Invasion Ecology, Invading Nature, 6, 607-624.

Noël P. (2017), « Le Crabe bleu américain Callinectes sapidus (Rathbun, 1896) », Muséum national d'Histoire naturelle [Ed.], Inventaire national du Patrimoine naturel.

Latron M., Allies A., Argagnon O. et al. (à paraître), « Mediterranean Temporary Lagoon: Proposal for a Definition of this Endangered Habitat to Improve its Conservation », *Journal for Nature Conservation*.

Martinez Alier J. (2014), *L'écologisme des pauvres. Une étude des conflits environnementaux dans le monde*, Paris, Les petits matins.

Ostrom E. (1990), *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, New York, Cambridge University Press.

Tsing A. (2022), *Proliférations*, Marseille, Wildproject.

UICN France (2018), *La valorisation socio-économique des espèces exotiques envahissantes établies en milieux naturels : un moyen de régulation adapté ? Première analyse et identification de points de vigilance*, 84p.

Veyssiere D., Garrido M., Massé C. et al. (2022), « État des connaissances sur le Crabe bleu, *Callinectes Sapidus* (Rathbun, 1986). Focus sur la Méditerranée française et la Corse », Rapp. Office de l'environnement de la Corse.

Zenetos A., Galanidi M. (2020), « Mediterranean Non Indigenous Species at the Start of the 2020s: Recent Changes », *Marine Biodiversity Records*, 13(10).

Annexe 11

Restauration de gorgonaires : analyse des méthodes et efficacité (anglais)

Par Bruna GIORDANO

Faculté des sciences de l'université de Montpellier

Diplôme d'Université (DU) :
« Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »
Année : 2022

Coral restoration: a preliminary analysis of success and methods in Mediterranean Sea

Auteur: Bruna Giordano

Tutor: Fabrice Bernard

Summary

Abstract 2

1 Introduction 2

1.1 Restoration practices in current changing word 2

1.2 Mediterranean Marine Animal Forest 4

1.3 Coral's restoration practices 5

2 Literature research 6

3 Overview of literature 7

3.1 Restoration methods 9

3.2 Transplantation Methods 10

3.3 Spatial scale 11

3.4 Temporal scale 11

3.5 Success 12

3.6 The role of local communities 13

4 Conclusions and considerations 14

5 References 16

Abstract

Restoration ecology, intended as the totality of initiatives aiming at achieving the recovery of the structure and functioning of affected ecosystems, is a recent discipline that is greatly developing in the last years, due to the urgent necessity of inverting the current trajectory of habitat degradation and loss. In this context, marine restoration, even if a young discipline compared to its terrestrial counterpart, is gaining space and importance, and the restoration of engineer species such as corals, seagrass, or mangroves is earning importance. As shown by several reviews, the northern hemisphere is more engaged in developing these kinds of actions, both because of political stability and socio-economical possibilities. The Mediterranean Sea appears as one of the restoration hotspots on the planet. Nevertheless, restoration programs of important structuring species like coral, which are widely developed in tropical habitats, are often under-evaluated in temperate areas. The present analysis aim at evaluating the current state of the art in coral restoration science in the context of the Mediterranean sea. To this aim, I reviewed the literature to compare and analyze the techniques currently employed in the restoration of coralligenous habitats. It emerged that transplantation is the most widespread technique. Additionally, the small scale of performed actions and disharmony of the protocols employed show as we are still dealing with experimentation and pilot studies and not yet managing actual restoration goals. If restoration aims to meet future challenges to marine ecosystems, it is crucial to drive restoration efforts to substantial scale-up of actions, and the development of new technologies, that are not yet available.

1 Introduction

1.1 Restoration practices in current changing word

During the last years, there has been increasing evidence of heavy changes in marine ecosystems due to direct or indirect human-induced disturbances, which are dramatically reducing biodiversity, biomass, and potential recovery of natural communities (Barnosky et al., 2011; Ceballos et al., 2010, 2015). The impacts of climate change and human activities have exceeded the adaptation capacity of many organisms due to their highly rapid onset. Animals and plants can adapt to environmental changes or acclimatize to specific situations, but rarely in the history of our planet environmental conditions have been changing so fast(Crutzen, 2002; Steffen et al., 2007). Seas and oceans represent the largest biomes and life-support systems on planet earth. They absorb excess heat and CO2, store carbon; produce oxygen; nurture biodiversity; and directly support human wellbeing by supplying food, energy, and mineral resources to protect coastal areas from flooding and erosion (Barbier, 2012; Halpern et al., 2012). The ocean also provides cultural and recreational services enjoyed by many. Because of the growing population density, the increasing pressure on littoral areas has determined widespread deterioration of coastal ecosystems caused by increased inputs of exogenous materials (such as nutrients, organic matter, and sediments), physical disturbance through the shoreline and offshore constructions; and overexploitation of biological resources

through the fishery industry (Duarte et al., 2015). Hence, marine ecosystems are changing, degrading, fragmenting, and disappearing, and the value of Marine ecosystem services is quickly decreasing, determining consequential increased costs to humanity (Abelson et al., 2016; Barbier, 2012; Danovaro et al., 2021) . All these evidence and concerns about environmental degradation, biodiversity loss, and depletion of ecosystem goods and services have encouraged national and international efforts to manage, recover and restore endangered and degraded ecosystems to the greatest possible extent. Examples of these policies in Europe include the European Water Framework Directive (WFD, 2000/60/EC), the Marine Strategy Framework Directive (MSFD, 2008/56/EC), and the Habitats Directive (92/43/EEC) (Casoli et al., 2021; Duarte et al., 2015).

Natural recovery, intended as the process by which an ecosystem returns to a previous state following the cessation of some impact or alteration, is mainly attempted by biodiversity conservation and natural resource management (e.g., Gaines et al., 2010).These measures include agreements aiming at reducing pollution, laws to protect threatened species, rules to regulate resource extraction (e.g., offshore oil wells or seafloor mining), fisheries regulations, and the establishment of Marine protected Areas (MPAs) (e.g., De'ath et al., 2012) Nevertheless, natural recovery is often a slow process that can take decades or even centuries (Dobson et al., 1997; Lotze et al., 2011) and depends on both intrinsic (e.g., ecosystem recoverability, resilience, and adaptation) and extrinsic (e.g., type, duration, and magnitude of disturbance) factors(Elliott et al., 2007). Despite increasing efforts to conserve marine coastal ecosystems, global analysis shows an unprecedented rate of loss and change at all levels of biological diversity(Butchart et al., 2010; Cardinale et al., 2012). Natural recovery alone could be an inadequate strategy in a reasonable time frame (DDebson 1997; Letze 2006), and current conservation initiatives can be insufficient to reverse trajectories of changes (Fraschetti et al., 2021; Lindegren et al., 2018; Perrow & Davy, 2002).

In this context active restoration, intended as *the process of actively assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged, or destroyed (*Society for Ecological Restoration International Science Policy Working Group, 2004), could contribute to diversifying and improving current conservation and management actions. When natural recovery of ecosystems is precluded (Perring et al., 2015; Perrow & Davy, 2002) it needs to become an integral element of marine conservation, natural resource management, and sustainable development (Abelson et al., 2016; Suding, 2011). Ecological restoration includes different forms of intervention (e.g., restoration, rehabilitation, reclamation) aiming at restoring the structure and function of an ecosystem to its original state. These methods can differ in the way they affect the biota and/or physical conditions at the target site. The ideal aim of many ecological restoration projects is to return the system to its past natural state or to bring the target habitat to a healthier state (i.e., a "self-maintaining, vigorous, resilient state to externally imposed pressures, and able to sustain services to humans...")(Abelson et al., 2016; Dobson et al., 1997; Elliott et al., 2007). The concerted action of active restoration and suitable conservation practices offer a major tool to reverse this trend of environmental degradation and recover biodiversity along with human health and wellbeing.

Marine restoration is still a young discipline. Gaps still exist among current implementation methods, approaches and standards, and the supporting science (e.g., Duarte et al., 2015; Elliott et al., 2007; Fraschetti et al., 2021; Suding, 2011).. Abelson et al. (2016) have summarized that, in the marine context, this misalignment is exacerbated by three factors:
(Bekkby et al., 2020)(a) real or apparent inequalities between project cost and economic benefits and the consequent inability to scale-up projects (e.g., Adger et al. 2005, Mumby and Steneck 2008).
(b) treating symptoms rather than the causes (e.g., Mumby and Steneck 2008).
(c) confusing the semantics of restoration with inconsistent, conflicting, and sometimes overlapping terms (Elliott et al. 2007, Duarte et al. 2014). In general, achieving effective restoration actions requires historical baseline data as well as objectives, guidelines, and rules before any restoration attempt. A review of the literature and experiences gathered from ongoing restoration projects suggests the need to consider four factors to maximize the chances of success for marine restoration: (1) choice of appropriate donor sites (including cultured and assisted grow-out populations) whose physical conditions and biological characteristics are as similar as possible to that of the restoration site or development of culture and grow-out methods to develop donor populations of key taxa; (2) identification of the best restoration protocols for the recovery target species/habitat; (3) influence of positive species interactions (some species improve the survival of other species by providing habitat or refuge), which may expedite recovery, and, in the longer term; (4) understanding of the drivers, feedback effects, and critical thresholds, including positive and negative interactions among species and local/ global stressors (Bekkby et al., 2020).
So, following point 3, one of the most relevant features influencing the restoration potential of selected habitats is the structural complexity of the target species. It was observed that, while in open marine systems there is a limited opportunity for restoration (Elliott et al., 2007), structural species and ecosystem engineers (e.g., kelps, corals, biogenic reefs) represent the exception because once restored allow the recovery of the remainder of the system.

1.2 Mediterranean Marine Animal Forest

The term Marine Animal Forest (MAF; Rossi et al., 2017) refers to megabenthic communities dominated by sessile suspension feeders such as sponges, corals, and bivalves that form complex three-dimensional structures in marine ecosystems (Fig. 1). This term has been introduced to highlight the similarity between these communities and their terrestrial counterparts. Forest and megabenthic communities play a similar ecological role both functionally and structurally. They are constituted by living eco-engineering-organisms that, giving high three-dimensional complexity to the environment, can support high biodiversity, providing structure, food, and shelter (e.g. nursery areas) for a wide range of associated organisms . Coral reefs, the marine animal forest par excellence, constitute the largest living structures in the world, occupying a wide spectrum of environments, ranging from shallow temperate water to the deep sea (Jones et al., 1994; Rossi et al., 2017).

Coralligenous reefs are the Mediterranean counterparty of the tropical ones. These are temperate bio construction mainly formed by coralline algae growing at low light levels and, secondarily, by diverse sessile invertebrates such as corals, sponges, and bryozoans (Ballesteros 2006; Ingrosso et al., 2018). One of the main epibenthic components of this sciophilous habitat is sea fans like gorgonians. Gorgonians (Anthozoa, Octocorallia) are corals that provide complex tridimensional habitats that increase spatial heterogeneity and support high biodiversity (Bramanti et al., 2016; Ponti et al., 2018). These have a crucial role in the functioning of the coralligenous ecosystem, both conveying organic matter from the water column through benthic-pelagic coupling processes and by sequestering carbon in the benthic habitat (Coppari et al., 2019; Gili & Coma, 1998). Gorgonian species are vulnerable to climate change (Garrabou et al., 2001), and human pressures, such as boat anchoring, SCUBA diving, and recreational or commercial fishing (Angiolillo & Fortibuoni, 2020). Aware of the crucial structural and functional role fulfilled by octocorals in the ecosystem, restoring coralligenous reefs may prevent at the same time a) the loss of ecosystem complexity and b) biodiversity decrease (Ponti et al., 2014; Verdura et al., 2019). Research efforts on Mediterranean octocoral restoration techniques increased during the past decade. These have mainly focused on transplantation methods [40–43] and aimed to define the best approach and the most relevant factors affecting restoration output.

Fig. 1 Mediterranean Marine Animal Forest. Credits Andromède Océanologie

1.3 Coral's restoration practices

Research in temperate habitats rest on the results obtained by restoration techniques developed in tropical areas to support degraded and damaged coral reefs(Linares et al., 2008; Rinkevich, 1995). Transplantation techniques are probably the most used and are related to two approaches: asexual or sexual propagation. The rehabilitation of coral reefs using asexual propagation is simple and less labor-intensive than sexual

reproduction-based techniques. These techniques are mainly based on the transplantation of coral fragments from intact to degraded areas by affixing coral cuttings, trimmed from donor colonies directly to the substrate, or transplanting nursery-grown coral pieces after letting them grow to a threshold size in a nursery. The success of coral transplantation varies greatly depending on the species, method, and site of transplantation(Omori, 2011; Rinkevich, 1995). The use of asexual recruits is a relatively simple and rapid process but does not contribute to the genetic diversity of a population. For that purpose, the use of sexual propagation is more favorable, although more labor-intensive and expensive than the asexual propagation approach (Barton et al., 2017; Boström-Einarsson et al., 2020; Rinkevich, 1995) This technique provides cultivation of corals from eggs either by using larvae collected from surface aggregates (slicks) after spawning or by laboratory fertilization on artificial, suitable substrates (concrete, ceramic, or terracotta tiles). The embryos and larvae are then bred in the laboratory or floating in situ ponds until larvae (planulae) can settle to the bottom (Okamoto et al., 2008; Omori, 2011). Cultured planulae are then employed in two main ways: (1) they may be released directly onto the seabed of degraded reefs or artificial reefs at very high densities and settle naturally, or (2) they may be settled onto artificial substrates and reared in aquaria or situ nurseries until they are ready to be transplanted to degraded reefs. An alternative sexual propagation technique, which does not require the cultivation of larvae, is to allow coral larvae to settle naturally onto specially designed portable coral settlement substrates deployed in areas just before coral mass spawning. The substrata that receive high recruit densities are reared in that spot or transplanted onto degraded reefs (Okamoto et al., 2008).

In the light of all this information, the present study aims to summarize, through a systematic literature review, the restoration techniques mainly employed in the Mediterranean sea to restore important engineers species such as Gorgonians. Coralligenous reefs are indeed considered, together with Posidonia oceanica meadows, habitat of community interest (Habitat Directive 92/43/CE, Annex I). The Mediterranean sea, like other semi-closed basins such as the Black Sea, is especially concerned by human pressure because of climatic, cultural, and economic interests (Coll et al., 2010; Lotze et al., 2011). Restoring key habitats like Coralligenous outcrops seem crucial in this context, and the recovery of this environment needs to be achieved through complementary actions, allowing active restoration to support effective conservation and management measures. To contribute with some clues in future restoration decision making, here I will show: 1) which are the Gorgonians species included in restoration action or experimentation in the Mediterranean sea and 2) the extent of temporal and spatial scale of these actions 3) the current methods and restoration techniques employed in the Mediterranean 4) the success output of these actions.

2 Literature research

I conducted a systematic literature review to document active restoration practices (sensu Elliott et al., 2007) across strictly marine ecosystems in the Mediterranean Sea. Two databases (ISI Web of Science and Scopus) were searched using the terms ("Restor*" OR "Rehab*" OR "Transplant*") AND "Mediterranean*" AND

("Coral*" OR "Anthozoa*" OR "Octocoral*"). Over the 142 publications identified based on published articles and reviews, meetings, and congress proceedings, only 11 records were selected for further examination based on the following eligibility criteria, according to Fraschetti et al., 2021. Articles were not considered if they:

a. Were not related to the marine environment

b. Were not related to Gorgonians but other Antozhoa orders

c. were related to natural/spontaneous regeneration as a result of management approaches aimed to remove the impact of generic environmental stressors (e.g., passive recovery)

d. did not explicitly refer to the variety of abiotic (e.g., hydrological setting) and biotic interventions (e.g., species reintroduction) aimed at accelerating or altering the course of ecosystem recovery

e. did not include a specific case study for which the restoration technique was developed (e.g., the study was not carried out in the field)

f. mentioned the term restoration only for justification or discussion of results but did not provide any actual intervention of assisted regeneration or reconstruction (e.g., theoretical review, modeling, or entirely laboratory experiment/study)

g. the complete article was not available or was not written in English.

Reference list of reviews identified in the literature search, were checked for additional studies. From each article both contextual (geographic coordinates) and methodological information (type of human-mediated restoration action, spatial scale, temporal scale, target species, response variable, techniques) were extracted, and the restoration outcome was recorded.

3 Overview of literature

The literature research allowed us to identify 12 scientific peer-reviewed articles concerning Mediterranean corals. All articles, except for one which aimed at restoring shallow-water populations of the endemic exacoral *Astroides calicularis* (Terron-Sigler et al., 2018), focused on Gorgonian species. The most studied species are *E. Cavolini* (5 studies), *C. rubrum* (3 studies), *P.clavata* (3 studies), *E. singularis* (2 studies), *and E. verrucosa* (1 study), *E. paraplexauroides* (1 study).

Gray literature shows how experimentations, even if sporadic, have started since the end of the past century (Villechanoux et al., 2022). During the last decade, scientific production related to coral restoration in the Mediterranean Sea has significantly increased (Fig.. 2). The first peer review study appeared in 2008 (Linares et al., 2008), and, since this moment, the contribution to Mediterranean coral restoration actions has dramatically increased. Until 2018 just two more studies were published while, between 2018 and today, a

considerable increase of publications occurred. Furthermore, it is interesting to remark from fig 2 how the country most involved in coral restoration experiences are Italy and Spain (Fig. 3)

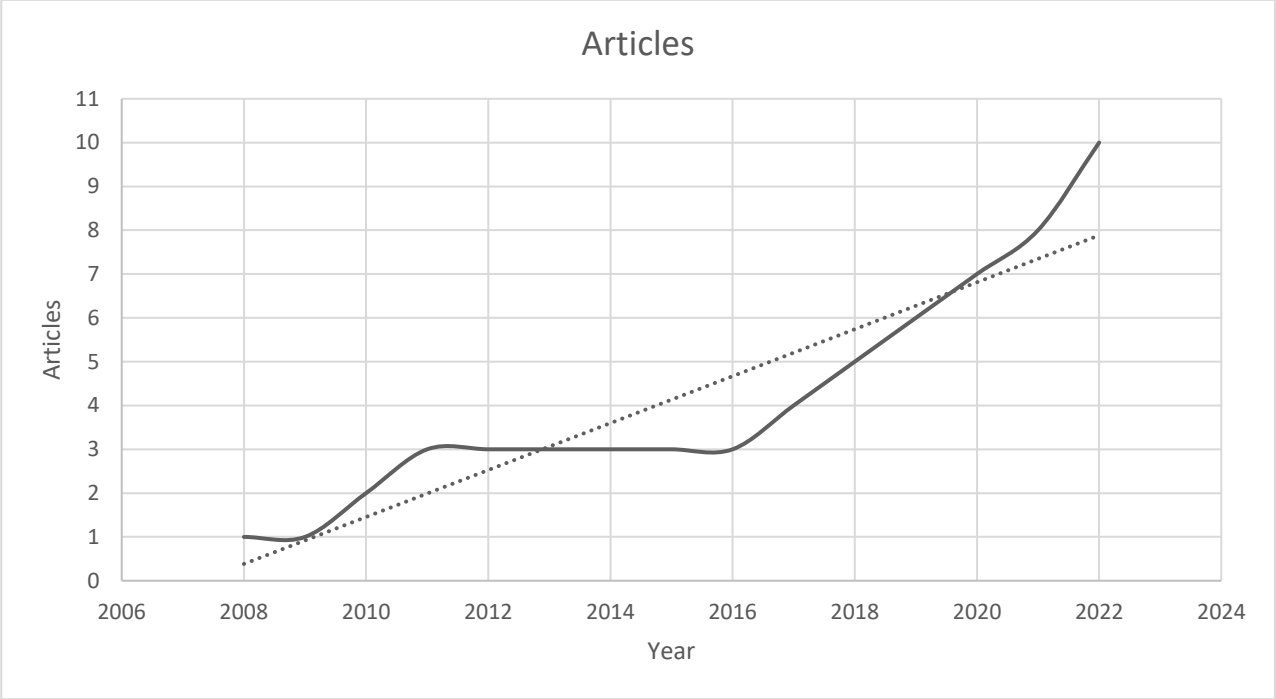


Fig. 2. Annual increase of scientific production about coral restoration in Mediterranean Sea**.**

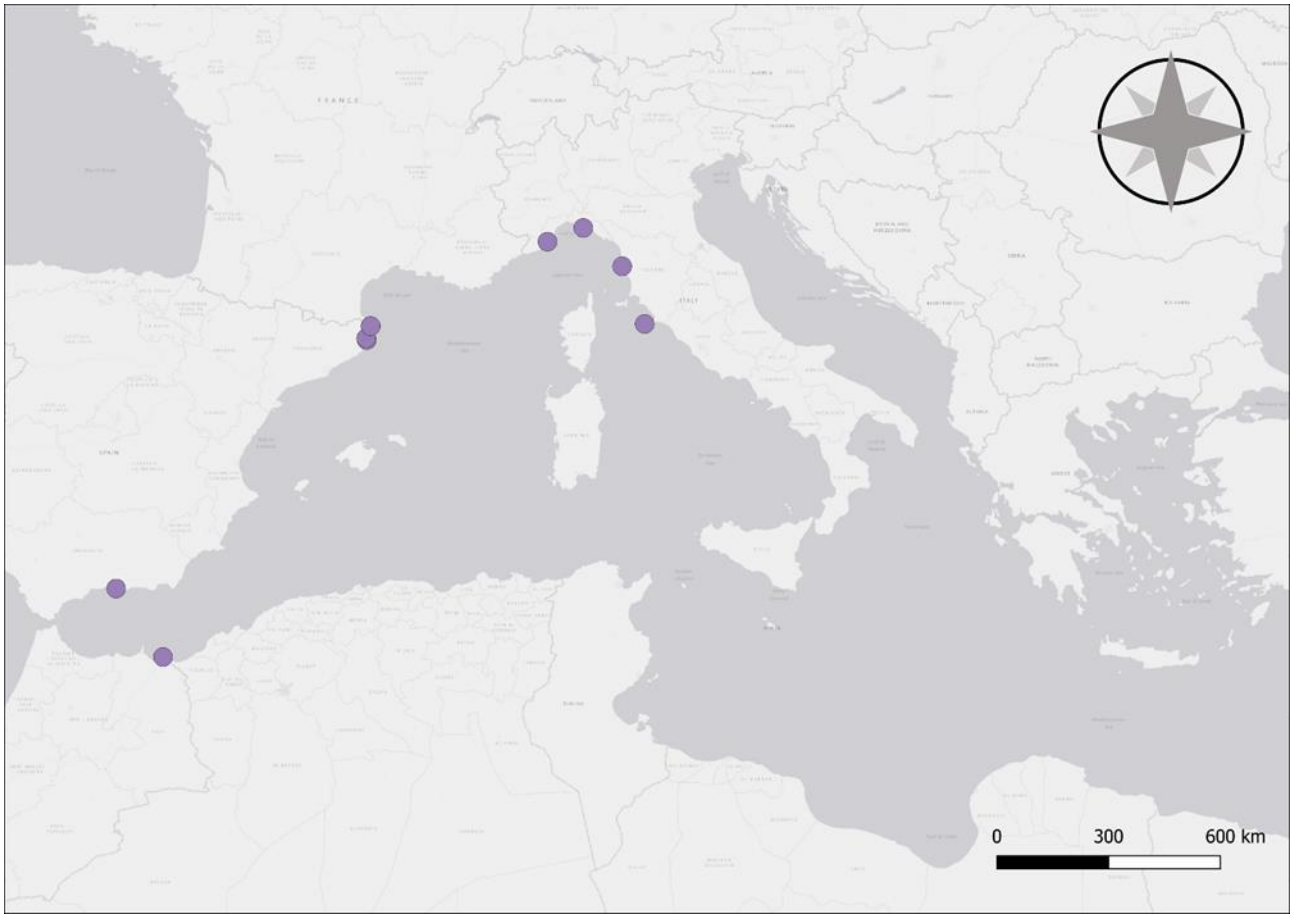


Fig. 3 Geographic distribution of the experimentation performed in the field of Mediterranean coral restoration

3.1 Restoration methods

Over the eleven studies concerning Mediterranean Gorgonians, nine focused on transplanting methods, one on pruning methods, and another on enhancing settlement success (Benedetti et al., 2011).

The last two mentioned techniques will be analyzed firstly, to consecrate a deeper successive analysis of transplantation techniques.

Benedetti and colleagues studied larval settlement of *Corallium rubrum* on three different CaCO3 substrata, viz. lithogenic (marble), electro-accreted calcium carbonate in the presence and the absence of cathodic polarisation. The last two substrates consisted of stainless steel plates galvanically coupled with Zn anodes. The electrochemical characterization of the settlement device was studied to investigate correlations between cathodic parameters and larval settlement. The results obtained in the natural habitat showed that settlement was five times lower on the electro-accreted aragonite in the presence of low cathodic current densities compared to both other substrates in the absence of polarisation. These last two substrata showed similar settlement values, furnishing some clues for restoration. Marble tiles are a proper, but expensive, settlement device (Bramanti et al., 2007) This study suggests a new and cheaper method for producing suitable settlement surfaces, compared to previously suggested marble tiles.

Although this is the only study entirely focused on the recruitment stage between the considered work, recently Villechanoux et al., (2022) tried to evaluate six different restoration techniques, where one concerns recruitment and juvenile stages. They transplanted PVC plates, previously colonized by one C. rubrum cohort, from shallow water (30 mt) to deeper outcrop (70 m) to test the plasticity of this species to different environmental conditions. The survival rate of the recruits ranged from 30% to 50%. In this context, I warn the reader in evaluating, in the same way, the restoration success of adults' transplant compared to recruits'/juveniles' transplants. Indeed, it is crucial to keep in mind the different demographic trajectories of corals at different life stages. Recruits, differently from adult colonies, can settle at a high density but are naturally subjected to 1) a self-thinning process that naturally determines a decrease in population density in the function of time and colony age (Cau et al., 2016) and 2) natural mortality that could depend on diverse processes like natural selection, competition, predation, or others environmental factors (Bramanti et al., 2005). In light of this consideration, in the framework of restoration actions, we must interpret the survival rate of recruits differently from adult transplants.

A promising original method has been tested by Sanchez-Tocino et al. (2017) on Ellisella paraplexauroides (Stiasny, 1936), a large species, up to 2 m in height, distributed in the Western Mediterranean Sea and the neighboring Atlantic Ocean at depths of between 50 and 150 m. The work aimed to test a restoration action through pruning colonies affected by epibiosis. The results showed a substantial improvement in the colony's health status (growth and production of new branches, a general increase in the health status of the colonies), and the employment of this technique has been recommended for the future conservation of this species in the Chafarinas Islands.

In recent years, on a global scale, much effort has been spent improving corals' transplantation techniques, including the transplantation of gorgonians (e.g., Linares et al., 2008).The results presented in this work confirm what was previously stated about the techniques used in the context of coral restoration. Over the eleven selected papers, nine relied on transplantation techniques. This data confirms the wide use of this approach, which represents the earliest and most common method of coral restoration, involving the direct transplantation of entire coral or fragments from a donor to a recipient environment (Boström-Einarsson et al., 2020). Nowadays, there is still no concerted accordance in transplanting protocols, including attaching techniques, donor choice, transplantation depths, spatial scale, monitoring time and parameters, and definition of success.

3.2 Transplantation Methods

During these years, different transplantation techniques have been tested. From the present literature review, it arises that over the eight considered transplantation studies, an overall of ten attaching techniques has been employed. Firstly, selecting an appropriate adhesion material is a crucial step for the success of transplantation, and it can depend both on the different substrates and coral species (Dizon et al., 2008). The presented studies all used bicomponent epoxy for sticking purposes. Nevertheless, these differed in using peculiar support to aid the successful output (e.g., plastic tube, plastic stick, plastic grid, PVC plate, cobbles). It is sadly remarkable that almost 70% of techniques that take advantage of supporting material besides epoxy employed artificial devices (i.e., PVC-clamps and PVC racks) which, further than pollution produced, have been demonstrated as ineffective (Weinberg,1979).

In the Mediterranean sea, the use of bicomponent epoxy to attach the colony or the fragment directly to the substrate appears the most used (40% of the studies) and successful (between 30% and 99% of transplant survival) approach (Villechanoux et al., 2022).

The transplantation failure, often intended as mortality of transplant, is frequently due to methodological issues, like detachment of coral fragments, which especially occurs during the first months after the transplantation (Casoli et al., 2021; Linares et al., 2008; Villechanoux et al., 2022). Some authors have argued that the causes of restoration failure are likely underreported and can depend on inadequate site selection(Montseny et al., 2021), stochastic events (e.g., heatwave; Fava 2010), or human disturbance (Bayraktarov et al., 2016; Boström-Einarsson et al., 2020; Suding, 2011). In general, unsuitable sites were characterized by altered hydrological conditions, high wave and flow energy, and inadequate substrate. Historical reports on the presence of an ecosystem may guide whether the site is suitable for restoration (Precht & Robbart, 2006; van Katwijk et al., 2009). Before starting any restoration action, the abiotic conditions, and whether these could support the marine-coastal ecosystem must be known and well understood (Laegdsgaard, 2006; Precht & Robbart, 2006).

As previously mentioned, donor colonies for coral transplantation into a damaged site are generally available from two sources: 1) planulae-larvae grown in situ or in the laboratory (Rinkevich, 1995), or 2) adult colonies taken from existing undamaged populations(Barton et al., 2017; Boström-Einarsson et al., 2020).Usually, removing colonies from a non-damaged reef area for transplantation to a damaged site may

result in no net gain (Edwards & Clark, 1999). An alternative source of donor colonies for transplantation into damaged sites is “corals of opportunity,” which are defined as corals detached from the reef through natural or anthropogenic processes (Monty et al., 2006; Musco et al., 2017). 75% of the considered studies used corals of opportunities, rescued from fishing gear, illegal poaching, or detached because of diving activities, while the remaining 25% used colonies from healthy donor populations. Restoration based on bycatch gorgonians would minimize damage to other colonies or populations (Casoli et al., 2021; Montseny et al., 2021). Nevertheless, to be effective, these restoration actions should be accompanied by a reduction of fishing impacts in the restored areas, partial closures, or regulation of diving activities (Casoli et al., 2021; Linares et al., 2008).

Most of the experimentations were performed by transplanting fragments (78,5%) instead of entire colonies (21,5%). The optimal dimension of the corals' fragments can depend on several factors, like the protocol (Linares et al., 2008; Montseny et al., 2020) or the ecology and the life history traits of the species (Montero-Serra et al., 2018). Their dimension range from 2-6 cm (C.rubrum, Villechanoux et al., 2022) to >31 cm (*E. cavolini*, Casoli et al., 2021).

3.3 Spatial scale

One of the primary aims of marine coastal restoration is to restore a natural range of ecosystem composition, structure, and dynamics (Falk et al., 2006; Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004). In this sense, and given that the scales of anthropogenic degradation are in the order of 10–1000000 ha (Edwards and Gomez 2007), it is a foremost challenge to develop effective methods for upscaling ecological restoration actions (Aronson & Alexander, 2013; Perring et al., 2018). For most marine coastal ecosystems, only small-scale restoration projects have been reported. In 2006, the first study by Zimmer et al. (2006) found that restoration research on coral reefs had been focused on the development of techniques rather than on assessing the application of established methodologies in large-scale restoration projects. More than ten years later, Bayraktarov et al., (2016) and Fraschetti et al., (2021) showed that little has changed. Nowadays, restoration projects still need to be run and succeed over larger spatial scales to be perceived as an effective tool for conservation to match the scale of anthropogenic degradation.

In the Mediterranean Sea, the operational scale of restoration action is often not communicated (37,5%) or covers a reduced scale (25%), with just 37,5% of the studies covering an area > 1000 m2. This result underlines how Mediterranean coral restoration practices are still in their infancy, so far focusing on the development of technics rather than scaling up proper restoration actions.

3.4 Temporal scale

On a global scale, most marine restoration projects last from one to two years, corresponding to the lifetime of development projects, research grants, or academic theses. Although, because of the long recovery time needed by some ecosystems, research and monitoring of restored sites over prolonged periods are necessary to assess the long-term success of restoration projects(Bayraktarov et al., 2016; Clewell & Aronson, 2012;

Montero-Serra et al., 2018). The short project duration of marine coastal restoration projects has been criticized to be unsuitable for assessing the recovery of ecosystem functioning (Kaly & Jones, 1998). In addition, the outcome of restoration (success or failure) is directly related to the period of observation (e.g., Bell, 2014), so the diffused bad practice of short monitoring creates a bias in the report of restoration outcome. Long-term monitoring (15–20 years) is paramount in properly evaluating the success of restoration actions in shallow waters (Bayraktarov et al., 2016). This is even more crucial for slow-growing species such as Mediterranean gorgonians because of their slow population dynamics(Bennecke et al., 2016; Roberts & Hirshfield, 2004). In the Mediterranean sea, the trend of monitoring time is in line with what was previously observed (Bayraktarov et al., 2016; Fraschetti et al., 2021) the minimum monitoring period was 3-months, and it never exceeded 4-years.

3.5 Success

The great methodological and conceptual difficulties in outlining restoration outputs (success or failure) have often led to vague and unstandardized descriptive parameters of "restoration success".

I show here that for the selected studies, transplant survival was the most used parameter (100% of the studies), followed by growth (50% of the studies) and other health status indexes (37,5%; e.g., fecundity potential, necrosis or epibiosis).

As shown for the Mediterranean context, Bayraktarov et al., 2016 previously established that, where criteria for success were stated explicitly, they typically aimed for simple metrics, such as survival rate or a particular level of biomass or coverage, and rarely focused on the recovery of ecosystem function or services.

Elliott et al., (2007) and Fonesca et al., (2002) agreed on the need of deriving appropriate metrics to indicate restoration success, not merely related to an item-based approach such as survival estimation. These are needed to determine in quantitative terms the trajectory of recovery, hence the need to compare with controls either in space or time, and to provide better information on the time taken to achieve a recovered, functioning ecosystem (Ruiz-Jaen and Aide, 2005)

The Society of Ecological Restoration (2004) listed nine ecosystem attributes to be achieved under successful restoration that are most often ignored in the marine context. While success in terrestrial ecosystems was mainly assessed by measurement of the diversity, vegetation structure, or ecological processes (Ruiz-Jaen and Aide, 2005), success in the restoration of marine-coastal ecosystems was mostly assessed as short-term survival rates.

Furthermore, to define success, it is crucial to establish a reference site for comparison (Aronson et al., 2017; McDonald et al., s.d.). This site should ideally be nearby, undamaged, analogous, and pristine (or near pristine) and serve to evaluate the success of the performed restoration action over time. Monitoring actions and comparison with reference habitats are necessary to establish the long-term survival, growth, health

status, and recruitment rates of the transplanted organisms to quantify the abundance and diversity of the associated fauna for assessing the long-term viability of restored populations and the recovery of their full functionality (Bayraktarov et al., 2016). In Mediterranean context just 60% of the studies reported a reference state to compare the success of the restoration intervention.

3.6 The role of local communities

Behind the ecological success, socio-cultural and economic outcomes are crucial elements to be assessed as part of coral restoration objectives, such as whether coral restoration can promote alternative livelihoods or encourage local conservation stewardship (Young et al., 2012) Adequate stakeholder involvement in the planning and implementation of restoration efforts might significantly influence project outcomes (Ammar, 2009; Ferse et al., 2010). It confirms local ownership (e.g., identification with and stewardship of restoration projects) to ensure that the restoration efforts accord with local objectives and that the restored habitat can flourish after active interventions have ceased. Indeed, from the local actors' point of view, taking part in restoration activities can offer an opportunity to participate in the sustainable management of the habitats that guarantees their current and future source of income and resources, while promoting personal growth by achieving the satisfaction of making a difference (Miles et al., 1998.). Hence the active participation of local actors and stakeholders in ecological restoration actions plays a decisive role in their successful development (Yap, 2000) and may play a crucial role in assessing the success of the long-term application. Furthermore, the direct benefits of using citizen scientists for restoration are enhanced when the educational opportunities offered by these expeditions are considered. Over the eight transplantation studies presented here, 75% of these used, for restoration purposes, gorgonians obtained as fishing bycatch (Casoli et al., 2021; Montseny et al., 2019, 2021) casual detachment (Casoli et al., 2021; Linares et al., 2008) or rescue from illegal poaching activities (C.rubrum, Montero-Serra et al., 2018). These actions involved both fishermen, who were engaged in rescuing gorgonians from a fishing net, and diving centers who aid in picking up detached gorgonians from the bottom. As proposed by the authors, it is possible to gain a double advantage from this approach. On the one hand, avoiding additional impact to healthy donor coral gardens while a viable output for those gorgonians already fished/detached is provided. On the other hand, directly involving professional fishers or diving center in restoration actions allows the increase in the awareness of local society about the need for the protection of cold-water coral gardens and facilitate the application of this methodology which is crucial for the restoration success . Furthermore, the cooperation of local fishers or diving center is a great opportunity to enhance the effectiveness of restoration actions through their knowledge of the area (Hull & Gobster, 2000; Yap, 2000). Restoration actions involving local actors (fishers and stakeholders) could also be an advantage for connecting society with the natural environment, even if the authors highlited how building trust between scientists and fishers is not an easy task and it requires a lot of dedication and the establishment of objectives and methodologies agreed upon

4 Conclusions and considerations

The ultimate goal of restoration initiatives should be to achieve the recovery of the structure and functioning of affected ecosystems (McDonald et al., 2016; SER, 2004). These goals are achieved by following several steps, which encompass (1) the removal of the disturbances causing the habitat loss, which should be the first and mandatory management action to achieve the recovery goals through time (Hawkins et al. 1999) (2) the choice and management of the intervention site, (3) the active intervention and monitoring procedures, and (4) the participation of local communities and stakeholders, directly in restoration actions or through educational programs.

interesting

When dealing with engineering species, marine-coastal restoration is particularly effective because of the key role that they fulfill in habitat functioning and structuring. Restoration of sessile engineering species - like gorgonians- not only provides habitat structure but also enhances the recovery of associated biodiversity and positively influences ecosystem functioning (Geist & Hawkins, 2016).

As previously analyzed, behind methodological issues, the two main problems in the conceptual framework of marine-costal restoration concern the definition of successful output and the scale-up of the projects.

A shared agreement about what success means in restoration output is crucial to compare the outcome of different projects/protocols and hence necessary to progress our knowledge and capability of restoring damaged ecosystems.

Compared to the terrestrial one, the definition of successful output in the marine environment implied evident working limitations. These restrictions often involve difficulties in monitoring programs and methodologies employed to assess restoration results. Even if SER recommended the use of structural and functional ecosystem attributes to rate successful restoration, in marine restoration the employment of item-based parameters, such as survival, is still predominant. Nowadays, it is crucial to derive appropriate metrics commonly agreed upon to assess restoration success and to compare different restoration actions in terms of effectiveness and achieved goals.

As previously stated, we are far from the point of scaling up coral restoration techniques in the Mediterranean sea. The largest restoration action reached a restored area of 0.23 ha (Montseny et al., 2021) and, even if promising, is still far from tackling the scale of anthropogenic degradation of ecosystems (10–1,000,000 ha) (Bayraktarov et al., 2016). To succeed in scaling up restoration actions, a deep knowledge of the considered species is essential, firstly, to plan a proper monitoring plan adapted to the life history traits of the species and, secondly, to predict a probable trajectory of mortality patterns (Bekkby et al., 2020; Montero-Serra et al., 2018) Indeed, anticipating mortality patterns after transplantation is central to the design of any restoration action as it may define the initial attaching effort required to achieve specific conservation goals. A better understanding of both the intrinsic and extrinsic drivers of mortality patterns after transplantation would be ideal and could lead to the implementation of more successful restoration

designs since this combined approach can better define both anticipated periods for restoration and also the relative benefits of direct transplantation effort.

Lastly, from the present analysis, it comes to light that the currently employed techniques in the Mediterranean Sea, especially concerning transplantation protocol, do not always seem satisfying and successful. Here I propose some clues for future restoration experimentation.

Reduce the use of plastic.

From this analysis, it is clear how several transplantation protocols include a wide use of artificial materials.Boström-Einarsson et al., (2020) found that a substantial number of projects (~60%) use plastics to attach coral fragments to the substrate, primarily in the form of epoxy putty or cable ties. The results here present are even more discouraging. Except for prunings methods, all others introduce extraneous materials in the natural environment, and 75% use plastic or steel in addition to epoxy. Here I propose to minimize or substitute the use of plastic with other more suitable and natural materials to not further contribute to marine pollution.

Minimize the employment of donor-healthy colonies for restoration purposes.

Collecting entire colonies or fragments from a healthy population could have negative effects (especially in slow-growing species such as Mediterranean Gorgonians) that are often under-reported because of the lack of records and monitoring programs on donor sites. Taking into account the risque of coral's loss following translocation, it seems clear that these kinds of actions are not always worthy. For these reasons, I suggest minimizing the translocation of corals to perform transplantation, recommending the development of other promising techniques such as the badminton method or the use of sexual propagules.

Include local communities.

As previously argued, the inclusion of local communities could have a beneficial effect in terms of the socio-economical output of restoration measures. I suggest including educational actions and scientific communication as a focal point in restoration programs as sensibilization and literacy can be seen as a part of the mitigation process needed as a background for any restoration actions.

Deepen in new techniques

Furthermore, I propose the development of new techniques still scarcely experimented with in the Mediterranean Sea as the use of sexual propagules for coral restoration.

(Boström-Einarsson et al., 2020) showed that the current coral restoration techniques have low potential to be scaled up beyond a hectare of restored coral reef. They proposed that the most suitable scalable methods could be represented by techniques based on sexually derived propagules as a source for restored coral populations. These techniques can be cost-effective and guarantee genetic diversity favoring long-term adaptation to a changing environment, even if requiring a longer time for recovering target species.

To conclude, It is crucial to underline that the possibility of recovering and restoring habitat does not have to be used as a pretext for destruction, as in the context of coastal development projects (e.g., expansion of existing harbors and marinas, land reclamation). As proposed by Boudouresque et al.,(2021) mitigation, or

compensatory measures, should only be envisaged as an attempt at restoring what has already been destroyed in the past, not as a justification for future destruction based on hypothetical compensation. Restoration strategies can only attenuate anthropic pressure on ecosystems, being a supplementary management approach in addition to other conservation measures (e.g., fishing regulation or the creation of Marine Protected Ares). In this sense, the first management strategy to reduce damage to ecosystems should be prevention through promoting good ecologically sustainable practices, avoiding habitat degradation, and encouraging environmental education.

5 References

Abelson, A., Halpern, B. S., Reed, D. C., Orth, R. J., Kendrick, G. A., Beck, M. W., Belmaker, J., Krause, G., Edgar, G. J., Airoldi, L., Brokovich, E., France, R., Shashar, N., de Blaeij, A., Stambler, N., Salameh, P., Shechter, M., & Nelson, P. A. (2016). Upgrading Marine Ecosystem Restoration Using Ecological-Social Concepts. *BioScience*, *66*(2), 156–163. https://doi.org/10.1093/biosci/biv171

Ammar, M. S. A. (2009). Coral Reef Restoration and Artificial Reef Management, Future and Economic. *The Open Environmental Engineering Journal*, *2*(1). https://benthamopen.com/ABSTRACT/TOENVIEJ-2-37

Angiolillo, M., & Fortibuoni, T. (2020). Impacts of Marine Litter on Mediterranean Reef Systems: From Shallow to Deep Waters. *Frontiers in Marine Science*, *7*. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2020.581966

Aronson, J., & Alexander, S. (2013). Ecosystem Restoration is Now a Global Priority: Time to Roll up our Sleeves. *Restoration Ecology*, *21*(3), 293–296. https://doi.org/10.1111/rec.12011

Aronson, J., Blignaut, J. N., & Aronson, T. B. (2017). Conceptual Frameworks and References for Landscape-scale Restoration: Reflecting Back and Looking Forward1,2. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *102*(2), 188–200. https://doi.org/10.3417/2017003

Ballesteros E (2006) Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 44:123–195

Barbier, E. B. (2012). Progress and Challenges in Valuing Coastal and Marine Ecosystem Services. *Review of Environmental Economics and Policy*, *6*(1), 1–19. https://doi.org/10.1093/reep/rer017

Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B., Marshall, C., McGuire, J. L., Lindsey, E. L., Maguire, K. C., Mersey, B., & Ferrer, E. A. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, *471*(7336), 51–57. https://doi.org/10.1038/nature09678

Barton, J. A., Willis, B. L., & Hutson, K. S. (2017). Coral propagation: A review of techniques for ornamental trade and reef restoration. *REVIEWS IN AQUACULTURE*, *9*(3), 238–256. https://doi.org/10.1111/raq.12135

Bayraktarov, E., Saunders, M. I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H. P., Mumby, P. J., & Lovelock, C. E. (2016). The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, *26*(4), 1055–1074. https://doi.org/10.1890/15-1077

Bekkby, T., Papadopoulou, N., Fiorentino, D., McOwen, C. J., Rinde, E., Boström, C., Carreiro-Silva, M., Linares, C., Andersen, G. S., Bengil, E. G. T., Bilan, M., Cebrian, E., Cerrano, C., Danovaro, R., Fagerli, C. W., Fraschetti, S., Gagnon, K., Gambi, C., Gundersen, H., … Smith, C. J. (2020). Habitat Features and Their Influence on the Restoration Potential of Marine Habitats in Europe. *Frontiers in Marine Science*, *7*. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00184

Bell, J. (2014). *Legal Frameworks for Unique Ecosystems – How Can the EPBC Act Offsets Policy Address the Impact of Development on Seagrass?* (SSRN Scholarly Paper N. 2408925). Social Science Research Network. https://papers.ssrn.com/abstract=2408925

Benedetti, A., Bramanti, L., Tsounis, G., Faimali, M., Pavanello, G., Rossi, S., Gili, J. M., & Santangelo, G. (2011). Applying cathodically polarised substrata to the restoration of a high value coral. *Biofouling*, *27*(7), 799–809. https://doi.org/10.1080/08927014.2011.604870

Bennecke, S., Kwasnitschka, T., Metaxas, A., & Dullo, W.-C. (2016). In situ growth rates of deep-water octocorals determined from 3D photogrammetric reconstructions. *Coral Reefs*, *35*(4), 1227–1239. https://doi.org/10.1007/s00338-016-1471-7

Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P. J., Vardi, T., & McLeod, I. M. (2020). Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLOS ONE*, *15*(1), e0226631. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631

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*(8), 1034. https://doi.org/10.3390/w13081034

Bramanti, L., Benedetti, M. C., Cupido, R., Cocito, S., Priori, C., Erra, F., Iannelli, M., & Santangelo, G. (2016). *Demography of Animal Forests: The Example of Mediterranean Gorgonians* (pagg. 1–20). https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_13-1

Bramanti, L., Magagnini, G., De Maio, L., & Santangelo, G. (2005). Recruitment, early survival and growth of the Mediterranean red coral Corallium rubrum (L 1758), a 4-year study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *314*(1), 69–78. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.08.029

Bramanti, L., Rossi, S., Tsounis, G., Gili, J. M., & Santangelo, G. (2007). Settlement and early survival of red coral on artificial substrates in different geographic areas: Some clues for demography and restoration. *Hydrobiologia*, *580*(1), 219–224. https://doi.org/10.1007/s10750-006-0452-1

Butchart, S. H. M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J. P. W., Almond, R. E. A., Baillie, J. E. M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K. E., Carr, G. M., Chanson, J., Chenery, A. M., Csirke, J., Davidson, N. C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., … Watson, R. (2010). Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, *328*(5982), 1164–1168. https://doi.org/10.1126/science.1187512

Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, *486*(7401), 59–67. https://doi.org/10.1038/nature11148

Casoli, E., Ventura, D., Mancini, G., Cardone, S., Farina, F., Donnini, L., Pace, D. S., Shaul, R., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2021). Rehabilitation of Mediterranean animal forests using gorgonians from fisheries by-catch. *Restoration Ecology*, *n/a*(n/a), e13465. https://doi.org/10.1111/rec.13465

Cau, A., Bramanti, L., Cannas, R., Follesa, M. C., Angiolillo, M., Canese, S., Bo, M., Cuccu, D., & Guizien, K. (2016). Habitat constraints and self-thinning shape Mediterranean red coral deep population structure: Implications for conservation practice. *Scientific Reports*, *6*(1), 23322. https://doi.org/10.1038/srep23322

Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, *1*(5), e1400253. https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253

Ceballos, G., Garcia, A., & Ehrlich, P. (2010). The sixth extinction crisis. *J. Cosmol.*, *8*, 180–185.

Clewell, A. F., & Aronson, J. (2012). *Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession*. Island Press.

Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Lasram, F. B. R., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Bianchi, C. N., Corbera, J., Dailianis, T., Danovaro, R., Estrada, M., Froglia, C., Galil, B. S., Gasol, J. M., Gertwagen, R., Gil, J., Guilhaumon, F., Kesner-Reyes, K., … Voultsiadou, E. (2010). The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PLOS ONE*, *5*(8), e11842. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842

Coppari, M., Zanella, C., & Rossi, S. (2019). The importance of coastal gorgonians in the blue carbon budget. *Scientific Reports*, *9*(1), 13550. https://doi.org/10.1038/s41598-019-49797-4

Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, *415*(6867), 23–23. https://doi.org/10.1038/415023a

Danovaro, R., Aronson, J., Cimino, R., Gambi, C., Snelgrove, P. V. R., & Van Dover, C. (2021). Marine ecosystem restoration in a changing ocean. *Restoration Ecology*, *29*(S2), e13432. https://doi.org/10.1111/rec.13432

De'ath, G., Fabricius, K. E., Sweatman, H., & Puotinen, M. (2012). The 27–year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(44), 17995–17999. https://doi.org/10.1073/pnas.1208909109

Dobson, A. P., Bradshaw, A. D., & Baker, A. J. M. (1997). Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science*, *277*(5325), 515–522. https://doi.org/10.1126/science.277.5325.515

Duarte, C. M., Borja, A., Carstensen, J., Elliott, M., Krause-Jensen, D., & Marbà, N. (2015). Paradigms in the Recovery of Estuarine and Coastal Ecosystems. *Estuaries and Coasts*, *38*(4), 1202–1212. https://doi.org/10.1007/s12237-013-9750-9

Edwards, A. J., & Clark, S. (1999). Coral Transplantation: A Useful Management Tool or Misguided Meddling? *Marine Pollution Bulletin*, *37*(8–12), 474–487. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00145-9

Edwards, A. J. & Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. (2010). *Reef rehabilitation manual*. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program.

Edwards, A., and E. D. Gomez. 2007. Reef restoration concepts and guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Programme, St Lucia, Australia.

Elliott, M., Burdon, D., Hemingway, K. L., & Apitz, S. E. (2007). Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: Confusing management and science – A revision of concepts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *74*(3), 349–366. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.034

Ferse, S. C. A., Costa, M. M., Máñez, K. S., Adhuri, D. S., & Glaser, M. (2010). Allies, not aliens: Increasing the role of local communities in marine protected area implementation. *Environmental Conservation*, *37*(1), 23–34. https://doi.org/10.1017/S0376892910000172

Fonseca, M.S., Judson Kenworthy, W., Julius, B.E., Shutler, S., Fluke, S., 2002. Seagrasses. In: Perrow, M.R., Davy, A.J. (Eds.), Handbook of Ecological Restoration. Restoration in Practice, vol. 2. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 149e170.

Fraschetti, S., McOwen, C., Papa, L., Papadopoulou, N., Bilan, M., Boström, C., Capdevila, P., Carreiro-Silva, M., Carugati, L., Cebrian, E., Coll, M., Dailianis, T., Danovaro, R., De Leo, F., Fiorentino, D., Gagnon, K., Gambi, C., Garrabou, J., Gerovasileiou, V., … Guarnieri, G. (2021). Where Is More Important Than How in Coastal and Marine Ecosystems Restoration. *Frontiers in Marine Science*, *8*. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2021.626843

Gaines, S. D., White, C., Carr, M. H., & Palumbi, S. R. (2010). Designing marine reserve networks for both conservation and fisheries management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(43), 18286–18293. https://doi.org/10.1073/pnas.0906473107

Garrabou, J., Perez, T., Sartoretto, S., & Harmelin, J. (2001). Mass mortality event in red coral Corallium rubrum populations in the Provence region (France, NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series*, *217*, 263–272. https://doi.org/10.3354/meps217263

Geist, J., & Hawkins, S. J. (2016). Habitat recovery and restoration in aquatic ecosystems: Current progress and future challenges. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 26, 942–962. https://doi.org/10.1002/aqc.2702

Gili, J.-M., & Coma, R. (1998). Benthic suspension feeders: Their paramount role in littoral marine food webs. *Trends in Ecology & Evolution*, *13*(8), 316–321. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01365-2

Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K. L., Samhouri, J. F., Katona, S. K., Kleisner, K., Lester, S. E., O'Leary, J., Ranelletti, M., Rosenberg, A. A., Scarborough, C., Selig, E. R., Best, B. D., Brumbaugh, D. R., Chapin, F. S., Crowder, L. B., Daly, K. L., Doney, S. C., … Zeller, D. (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, *488*(7413), 615–620. https://doi.org/10.1038/nature11397

Hull, R. B., & Gobster, P. H. (2000). Restoring Forest Ecosystems: The Human Dimension. *Journal of Forestry*, *98*(8), 32–36. https://doi.org/10.1093/jof/98.8.32

Ingrosso, G., Abbiati, M., Badalamenti, F., Bavestrello, G., Belmonte, G., Cannas, R., Benedetti-Cecchi, L., Bertolino, M., Bevilacqua, S., Bianchi, C. N., Bo, M., Boscari, E., Cardone, F., Cattaneo-Vietti, R., Cau, A., Cerrano, C., Chemello, R., Chimienti, G., Congiu, L., … Boero, F. (2018). Chapter Three—Mediterranean Bioconstructions Along the Italian Coast. In C. Sheppard (A c. Di), *Advances in Marine Biology* (Vol. 79, pagg. 61–136). Academic Press. https://doi.org/10.1016/bs.amb.2018.05.001

Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, *69*(3), 373. https://doi.org/10.2307/3545850

Kaly, U. L., & Jones, G. P. (1998). Mangrove Restoration: A Potential Tool for Coastal Management in Tropical Developing Countries. *Ambio*, *27*(8), 656–661.

Laegdsgaard, P. (2006). Ecology, disturbance and restoration of coastal saltmarsh in Australia: A review. *Wetlands Ecology and Management*, *14*(5), 379–399. https://doi.org/10.1007/s11273-005-8827-z

Linares, C., Coma, R., & Zabala, M. (2008). Restoration of threatened red gorgonian populations: An experimental and modelling approach. *Biological Conservation*, *141*(2), 427–437. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.10.012

Lindegren, M., Holt, B. G., MacKenzie, B. R., & Rahbek, C. (2018). A global mismatch in the protection of multiple marine biodiversity components and ecosystem services. *Scientific Reports*, *8*(1), 4099. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22419-1

Lotze, H. K., Coll, M., Magera, A. M., Ward-Paige, C., & Airoldi, L. (2011). Recovery of marine animal populations and ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, *26*(11), 595–605. https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.07.008

McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., & Dixon, K. W. (s.d.). *INTERNATIONAL STANDARDS FOR THE PRACTICE OF ECOLOGICAL RESTORATION – INCLUDING PRINCIPLES AND KEY CONCEPTS*. 48.

McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., Dixon, K. W., Aronson, J., Decleer, K., Hallett, J., Keenleyside, K., Nelson, C., Walder, B., & Wickwire, L. (2016). *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts.* https://pureportal.inbo.be/en/publications/international-standards-for-the-practice-of-ecological-restoratio

Miles, I., Sullivan, W. C., & Kuo, F. E. (s.d.). *Ecological restoration volunteers: The benefits of participation*. 15.

Montero-Serra, I., Garrabou, J., Doak, D. F., Figuerola, L., Hereu, B., Ledoux, J.-B., & Linares, C. (2018). Accounting for Life-History Strategies and Timescales in Marine Restoration. *Conservation Letters*, *11*(1), e12341. https://doi.org/10.1111/conl.12341

Montseny, M., Linares, C., Carreiro-Silva, M., Henry, L.-A., Billett, D., Cordes, E. E., Smith, C. J., Papadopoulou, N., Bilan, M., Girard, F., Burdett, H. L., Larsson, A., Strömberg, S., Viladrich, N., Barry, J. P., Baena, P., Godinho, A., Grinyó, J., Santín, A., … Gori, A. (2021). Active Ecological Restoration of Cold-Water Corals: Techniques, Challenges, Costs and Future Directions. *Frontiers in Marine Science*, *8*, 1309. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.621151

Montseny, M., Linares, C., Viladrich, N., Capdevila, P., Ambroso, S., Díaz, D., Gili, J.-M., & Gori, A. (2020). A new large-scale and cost-effective restoration method for cold-water coral gardens. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *30*(5), 977–987. https://doi.org/10.1002/aqc.3303

Montseny, M., Linares, C., Viladrich, N., Olariaga, A., Carreras, M., Palomeras, N., Gracias, N., Istenič, K., Garcia, R., Ambroso, S., Santín, A., Grinyó, J., Gili, J.-M., & Gori, A. (2019). First attempts towards the restoration of

gorgonian populations on the Mediterranean continental shelf. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *29*(8), 1278–1284. https://doi.org/10.1002/aqc.3118

Monty, J., Gilliam, D., Banks, K., Stout, D., & Dodge, R. (2006). Coral of Opportunity Survivorship and the Use of Coral Nurseries in Coral Reef Restoration. *Marine & Environmental Sciences Faculty Proceedings, Presentations, Speeches, Lectures*. https://nsuworks.nova.edu/occ_facpresentations/31

Musco, L., Prada, F., D'Anna, G., Galasso, N. M., Pipitone, C., Vega Fernandez, T., & Badalamenti, F. (2017). Turning casualty into opportunity: Fragmenting dislodged colonies is effective for restoring reefs of a Mediterranean endemic coral. *ECOLOGICAL ENGINEERING*, *98*, 206–212. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.075

Okamoto, M., Nojima, S., Fujiwara, S., & Furushima, Y. (2008). Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using *in situ* sexual reproduction of corals. *Fisheries Science*, *74*(6), 1245–1253. https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2008.01649.x

Omori, M. (2011). Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa, Japan. *Marine Biology Research*, *7*(1), 3–12. https://doi.org/10.1080/17451001003642317

Orejas, C., Jim´enez, C., 2019. Mediterranean cold-water corals : past , present and future. In: Understanding the Deep-Sea Realms of Coral. Springer. https://doi.org/10.1007/ 978-3-319-91608-8.

Perring, M. P., Erickson, T. E., & Brancalion, P. H. S. (2018). Rocketing restoration: Enabling the upscaling of ecological restoration in the Anthropocene. *Restoration Ecology*, *26*(6), 1017–1023. https://doi.org/10.1111/rec.12871

Perring, M. P., Standish, R. J., Price, J. N., Craig, M. D., Erickson, T. E., Ruthrof, K. X., Whiteley, A. S., Valentine, L. E., & Hobbs, R. J. (2015). Advances in restoration ecology: Rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere*, *6*(8), art131. https://doi.org/10.1890/ES15-00121.1

Perrow, M. R., & Davy, A. J. (A c. Di). (2002). *Handbook of Ecological Restoration: Volume 1: Principles of Restoration* (Vol. 1). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511549984

Ponti, M., Perlini, R. A., Ventra, V., Grech, D., Abbiati, M., & Cerrano, C. (2014). Ecological Shifts in Mediterranean Coralligenous Assemblages Related to Gorgonian Forest Loss. *PLOS ONE*, *9*(7), e102782. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102782

Ponti, M., Turicchia, E., Ferro, F., Cerrano, C., & Abbiati, M. (2018). The understorey of gorgonian forests in mesophotic temperate reefs. *AQUATIC CONSERVATION-MARINE AND FRESHWATER ECOSYSTEMS*, *28*(5), 1153–1166. https://doi.org/10.1002/aqc.2928

Precht, W., & Robbart, M. (2006). *Coral Reef Restoration* (pagg. 1–24). https://doi.org/10.1201/9781420003796.ch1

Rinkevich, B. (1995). Restoration Strategies for Coral Reefs Damaged by Recreational Activities: The Use of Sexual and Asexual Recruits. *Restoration Ecology*, *3*(4), 241–251. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00091.x

Roberts, S., & Hirshfield, M. (2004). Deep-sea corals: Out of sight, but no longer out of mind. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *2*(3), 123–130. https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0123:DCOOSB]2.0.CO;2

Rossi, S., Bramanti, L., Gori, A., & Orejas, C. (2017). An Overview of the Animal Forests of the World. In S. Rossi, L. Bramanti, A. Gori, & C. Orejas (A c. Di), *Marine Animal Forests* (pagg. 1–26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_1-1

Ruiz-Jaen, M. C., and T. M. Aide. 2005. Restoration success: How is it being measured? Restoration Ecology 13:569577.

Sanchez-Tocino, L., de la Linde Rubio, A., Lizana Rosas, M. S., Perez Guerra, T., & Tierno de Figueroa, J. M. (2017). Pruning treatment: A possible method for improving the conservation status of a Ellisella paraplexauroides Stiasny, 1936 (Anthozoa, Alcyonacea) population in the Chafarinas Islands? *MEDITERRANEAN MARINE SCIENCE*, *18*(3), 479–485.

SER [Society for Ecological Restoration]. 2012. USA: New York: Bar Beach salt marsh restoration. Society for Ecological Restoration, Hempstead Harbor, New York, USA.

Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, *36*(8), 614–621. https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2

Suding, K. N. (2011). Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *42*(1), 465–487. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115

Terron-Sigler, A., Leon-Muez, D., Penalver-Duque, P., & Torre, F. E. (2018). A method for increasing the survival of shallow-water populations of the endemic coral Astroides calycularis. *JOURNAL OF THE MARINE BIOLOGICAL ASSOCIATION OF THE UNITED KINGDOM*, *98*(4), 811–818. https://doi.org/10.1017/S0025315416001806

van Katwijk, M. M., Bos, A. R., de Jonge, V. N., Hanssen, L. S. A. M., Hermus, D. C. R., & de Jong, D. J. (2009). Guidelines for seagrass restoration: Importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. *Marine Pollution Bulletin*, *58*(2), 179–188. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.09.028

Verdura, J., Linares, C., Ballesteros, E., Coma, R., Uriz, M. J., Bensoussan, N., & Cebrian, E. (2019). Biodiversity loss in a Mediterranean ecosystem due to an extreme warming event unveils the role of an engineering gorgonian species. *Scientific Reports*, *9*(1), 5911. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41929-0

Villechanoux, J., Bierwirth, J., Mantas, T. P., & Cerrano, C. (2022). Testing Transplantation Techniques for the Red Coral Corallium rubrum. *Water*, *14*(7), 1071. https://doi.org/10.3390/w14071071

Yap, H. T. (2000). The case for restoration of tropical coastal ecosystems. *Ocean & Coastal Management*, *43*(8), 841–851. https://doi.org/10.1016/S0964-5691(00)00061-2

Young, C., Schopmeyer, S., & Lirman, D. (2012). A Review of Reef Restoration and Coral Propagation Using the Threatened Genus Acropora in the Caribbean and Western Atlantic. *Bulletin of Marine Science*, *88*(4), 1075–1098. https://doi.org/10.5343/bms.2011.1143

Zimmer, B. 2006. Coral reef restoration: an overview. Pages 39–59 in W. F. Precht, editor. Coral reef restoration handbook. CRC Press, Boca Raton.

Annex I Table of data extraction

Reference	Year	Spatial scale (extent)	Temporal scale (duration)	Target species or assemblage	Technique	Transplanting tecniques	Origin of the donor colony	Number of transplant	Transplant size	Transplant deep	Response variables	Survival rate	Reference state	Restoration outcome
Benedetti, A., Bramanti, L., Tsounis, G., Faimali, M., Pavanello, G., Rossi, S., ... & Santangelo, G. (2011). Applying cathodically polarised substrata to the restoration of a high value coral. Biofouling, 27(7), 799-809.	2011	< 1 m2	6-12 months	*C. rubrum*	Artificial reefs or structures	-	-	-	-	35	Recruitment	-	yes	Partial Success
Casoli, E., Ventura, D., Mancini, G., Cardone, S., Farina, F., Donnini, L., ... & Ardizzone, G. (2022). Rehabilitation of Mediterranean animal forests using gorgonians from fisheries by-catch. *Restoration Ecology*, *30*(1), e13465.	2022	20,000 m2	2.5 years	*E. cavolini, E. singularis, P. clavata*	Transplanting	Raw (epoxy)	Fishery	135	small (≤15 cm, n = 15), medium (16–30 cm, n = 35), and large (≥31 cm, n = 10)	20-35	Survival, Growth, Health status	82,1%, major declines in the first 2 months	yes	Success
Fava, F., Bavestrello, G., Valisano, L, & Cerrano, C. (2010). Survival, growth and regeneration in explants of four temperate gorgonian species in the Mediterranean Sea. Italian Journal of Zoology, 77(1), 44-52.	2010	NA	1 year	*E. cavolini, E. singularis, E. verrucosa, P. clavata*	Transplanting	Tube (silicon)+Frame	Cuttings	160	8-10 cm P.clavata e *E. singularis*; 4-5 cm *E.cavolini* e E. *verrucosa*	25	Survival, Growth	2,5% *P.clavata*, 35% *E. singularis*; 30% *E.cavolini*; 30% *E. verrucosa*	no	Partial Success
Linares, C., Coma, R., & Zabala, M. (2008). Restoration of threatened red gorgonian populations: an experimental and modelling approach. *Biological conservation*, *141*(2), 427-437.	2008	10-100's ha	2-4 years	*P. clavata*	Transplanting	Stick, Tube, Raw (epoxy)	Coral of opportunity	180	small (3–10 cm) and large (10–20 cm)	20-25	Survival, Growth	"stick"70%, ''tube''50%,''raw'' 30%	yes	Success
Montero-Serra, I., Garrabou, J., Doak, D. F., Figuerola, L., Hereu, B., Ledoux, J. B., & Linares, C. (2018). Accounting for life-history strategies and timescales in marine restoration. *Conservation Letters*, *11*(1), e12341.	2018	NA	4 years	*C. rubrum*	Transplanting	Raw (epoxy)	Poaching	300	entire colony	15-17	Survival, Reproductive potential	99%	yes	Success
Montseny, M., Linares, C., Viladrich, N., Biel, M., Gracias, N., Baena, P., ... & Gori, A. (2021). Involving fishers in scaling up the restoration of cold-water coral gardens on the Mediterranean continental shelf. *Biological Conservation*, *262*, 109301.	2021	0.23 ha	2 years	*E. cavolini*	Transplanting	Badminton transplanting	Fishery	864	16 cm	80-90	Survival	87,5%	yes	Success
Montseny, M., Linares, C., Viladrich, N., Capdevila, P., Ambroso, S., Díaz, D., ... & Gori, A. (2020). A new large-scale and cost-effective restoration method for cold-water coral gardens. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *30*(5), 977-987.	2020	60 m2	3 months	*E. cavolini*	Transplanting	Badminton transplanting	Fishery	70	big (10-17 cm), small (5-10 cm)	5-30	Health status (necrosis)	-	no	Success
Montseny, M., Linares, C., Viladrich, N., Olariaga, A., Carreras, M., Palomeras, N., ... & Gori, A. (2019). First attempts towards the restoration of gorgonian populations on the Mediterranean continental shelf. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *29*(8), 1278-1284.	2019	< 10 m2	1 year	*E. cavolini*	Transplanting	Artificial structure	Fishery	120	entire colony (ranging from 6.7 cm to 22.4 cm)	85	Survival	87.5 ± 9.0% (mean ± SD)	no	Success
Sanchez-Tocino, L., RUBIO, A. D. L. L., ROSAS, M. S. L., GUERRA, T. P., & DE FIGUEROA, J. M. T. (2017). Pruning treatment: A possible method for improving the conservation status of a Ellisella paraplexauroides Stiasny, 1936 (Anthozoa, Alcyonacea) population in the Chafarinas Islands?. *Mediterranean Marine Science*, *18*(3), 479-485.	2017	NA	4 years	*E. paraplexauroides*	Pruning	-	-	-	-	23-26	Growth	-	yes	Success
Villechanoux, J., Bierwirth, J., Mantas, T. P., & Cerrano, C. (2022). Testing Transplantation Techniques for the Red Coral Corallium rubrum. Water, 14(7), 1071.	2022	NA	2-4 years	*C. rubrum*	Transplanting, Sexual restoration	Raw (epoxy), Plastic grid, Polystyrene method	Cuttings	98	59 fragments 2-6 cm+ 39 entire colonies	30 m and 70 m	Survival, Growth	polystyrene method 30%, deeper waters 82%, grid under crevices method 32%, epoxy putty on rocks 33%, grid on rocks 60%, PVC 40%	no	Partial Success

Annexe 12

Comment utiliser les ports pour la restauration de fonctions écologiques ?

Par Marin JULLIAND

COMMENT UTILISER LES PORTS POUR LA RESTAURATION DE FONCTIONS ECOLOGIQUES ?

MARIN JULLIAND
DIPLOME UNIVERSITAIRE DE RESTAURATION ECOLOGIQUE DES PETITS FONDS MARINS COTIER
2022

Table des matières

Table des figures 2
Introduction 3
Les enjeux 4
Pression et impact 4
Pression liée au taux d'occupation anthropique des petits fonds côtiers 4
Les pressions issues des activités humaines. 6
La biodiversité des petits fonds côtier 6
Cadre réglementaire au niveau international, européen et français. 7
International : La convention de Barcelone 7
Europe : Directive Cadre Stratégique sur le Milieu Marin 8
France : Loi littorale et Plan d'Action pour le milieu Marin. 8
DCE : Le bon état des eaux côtières 8
Les moyens et solutions disponibles de restauration de fonction écologiques dans les ports. 11
Solutions de restauration en zone portuaire 11
SUBLIMO : Mise au point des solutions de restauration 11
GIREL : Expérimentation à grande échelle 12
RESPIRE : Un réseau de surveillance 13
Développement d'une filière de compétence spécifique de restauration marine 13
BioRestore : Une solution de repeuplement complète 13
Différents types de nurserie artificielles 14
Schéma territorial de restauration écologique (STERE) 17
Limites à la restauration 17
Raison écologique 17
Raison économique 18
Compensation 18
Premier bilan d'action de restauration écologique dans les ports 19
En France 19
A l'Etranger 19
Expansion du label Nappex 19
Autres projets de restauration à l'étranger 20
Retour d'expérience scientifique 21
Bilan des actions de restauration 21
Perspectives 22
Conclusion 23
Webographie 24

Table des figures

Figure 1; Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement (guide NAPPEX) 3
Figure 2 Taux d'artificialisation du trait de côte (Source MEDAM) 4
Figure 3: Exemple d'accumulation de sédiments contre un port. 6
Figure 4: types de pression sur le milieu côtier (Source Guide DRIVER 2016) 6
Figure 5: Illustration des différents cycles de vie des poissons (source : Guide Drivers) 7
Figure 6: Etat écologique des eaux côtières (Agence de l'eau) 9
Figure 7:Etat chimique des eaux côtières en France (Source Agence de l'eau) 10
Figure 8 : Relâchement des juvéniles 12
Figure 9: Elevage 12
Figure 10: Capture de Post-Larve 12
Figure 11: Projet de restauration porté par ECOCEAN 14
Figure 12 : Module Oursin (source : seaboost) 15
Figure 13: module Roselière (Source: seaboost) 16
Figure 14 : Habitats Totem et TIPSEK (Source: Architetihis) 16
Figure 15 Schéma d'installation des nurseries ReFISH 17
Figure 16: Ports NAPPEX en 2022 (Source Ecocean) 20
Figure 17 : Schéma d'implantation de « Tide pool » dans une digue 20
Figure 18: Panneau en béton Seawall (source Seawall) 21

Introduction

Les littoraux et les petits fonds côtiers sont des lieux très importants pour la biodiversité des océans. Ils représentent 9 % de la biodiversité marine mondiale pour 0.8 % de la surface marine globale. 10 % des récifs coralliens mondiaux (57 557 km) se situent dans les petits fonds côtiers. Les littoraux sont aussi des lieux à fort enjeux anthropique. Un quart de l'humanité vit à moins de 50 km des côtes et la moitié de l'humanité est directement dépendante de la biodiversité côtière pour son alimentation et ses revenus.

Les petits fonds côtiers recouvrant lagunes et littoral, typiquement dans une zone de 0 à 20 mètres, sont essentiels pour le renouvellement des populations d'organismes marins, particulièrement des poissons. Les eaux peu profondes du littoral sont des lieux très importants pour la biodiversité qui servent de cadre à plusieurs fonctions écologiques telles que la reproduction dans les frayères, de refuge et de nourricerie des juvéniles.

Le cycle de vie des poissons côtiers se partage en deux parties : une phase de migration et une phase de colonisation. La phase de migration commence par la ponte au large, des poissons adultes. Après l'éclosion, les post-larves migrent en direction des petits fonds côtiers à la recherche d'un habitat sécurisé de refuge pour grandir. Cette migration est accompagnée d'un fort taux de mortalité : pour 1 million d'œufs pondus, 100 atteignent la côte. Seul un œuf sur 1 million deviendra adulte et se reproduira.

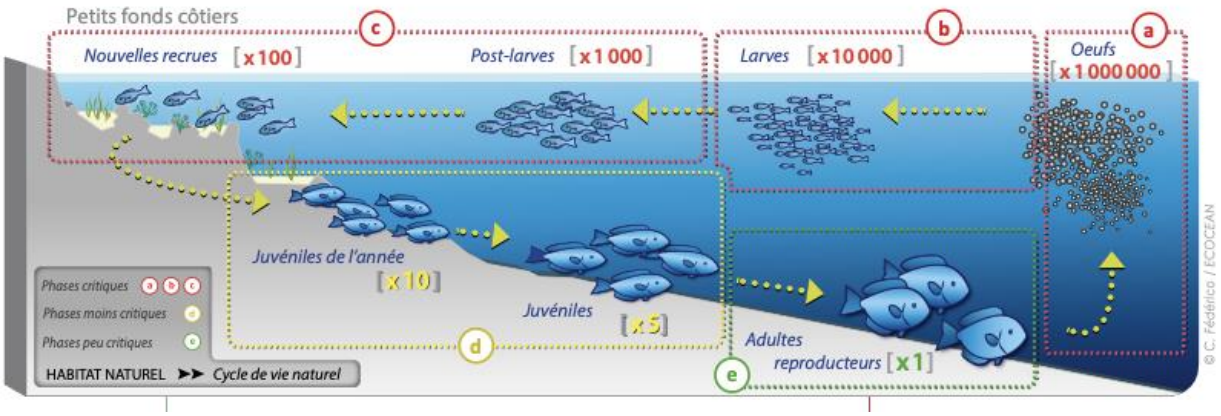


Figure 1; Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement (guide NAPPEX)

L'habitat nurserie dans les petits fonds côtiers répond plusieurs fonctions :

- Il offre une nourriture variée et adaptée aux espèces présentes sur le site.
- C'est un habitat favorable à l'installation des post-larves en période juvénile en les protégeant des prédateurs et des pressions jusqu'à ce qu'elles atteignent la taille refuge.
- Les nurseries proposent un environnement où les juvéniles grandissent plus vite et ont un meilleur taux de survie qu'ailleurs.

La disparition des nurseries déstabilise le cycle de vie des poissons et se répercute sur l'ensemble de la biologie marine. Sur le littoral français, on dénombre 500 ports. Les ports sont nécessaires pour l'activité économique, néanmoins leur conception n'a pas pris en compte leurs impacts écologiques sur le milieu marin. La construction des ports nécessite le dragage des fonds qui augmente la profondeur et remplace les habitats complexes des petits fonds côtiers par des paysages lisses en béton. Ces ouvrages semi fermés perturbent également les flux d'eau et favorisent les accumulations des sédiments qui dégradent les petits fonds côtiers environnent. De plus, en concentrant les

pollutions issues des activités humaines, les ports dégradent la qualité de l'eau. Enfin, les ports ont un impact sur la circulation des juvéniles d'un habitat à un autre.

Afin de limiter la baisse de biodiversité dans les petits fonds côtiers, des programmes spécifiques de restauration écologique dans les zones portuaires ont été développés. On entend par programme de restauration une « action directe de l'Homme sur l'habitat marin, la faune ou la flore permettant d'améliorer leur état, dans une zone côtière où la qualité de l'eau est bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation ont disparu ou sont maitrisées ».

Ce présent rapport a pour objet de faire un état des lieux de la restauration écologique dans les ports du littoral méditerranéen mais aussi des expériences qui ont pu être tentées sur la façade atlantique où à l'étranger.

Les enjeux

Les littoraux sont des lieux de concentration des populations et des activités qui en découlent. Ces activités croissantes peuvent avoir des effets néfastes si la dimension de la protection des écosystèmes n'est pas prise en compte. Depuis le début de ce siècle, la lutte contre les pollutions domestiques et industrielles sur terre et sur le littoral a permis d'améliorer significativement la qualité de l'eau en méditerranée. Cette évolution a été possible grâce à la mise en place de cadres réglementaires européens et nationaux. Une prise de conscience collective a été opérée dans le même temps pour disposer d'une eau de qualité avec un refus des rejets de déchets à la mer pour préserver l'état de santé de l'écosystème marin.

Pression et impact

Les pressions exercées sur les petits fonds côtiers sont des événements ponctuels ou prolongés qui impliquent un changement d'état de l'écosystème. Les impacts sont le changement d'état de l'écosystème, il peut s'agir d'une perte ou un gain selon les cas.

Pression liée au taux d'occupation anthropique des petits fonds côtiers

Le littoral est partagé entre différentes configurations avec des zones naturelles comme les côtes rocheuses et des zones artificialisées telles que des plages, des zones urbaines et aussi de zones portuaires qui sont plus exposées aux méfaits de l'activité humaine.

Afin de mesurer l'impacts de l'homme sur les petits fonds côtiers, un indicateur a été mis en place : le taux d'artificialisation du trait de côte. Il s'agit du ratio entre la longueur du littoral marqué par des constructions humaines et celle du trait de côte initial (avant de considérer toute construction sur la mer). Il est mesuré sur des cartes au 1/10 000. Le taux d'artificialisation du trait de côte est de 11 % pour la côte française, soit de l'ordre de 250 km) et de 89 % pour Monaco.

Pays	Artificialisation totale (%)
FRANCE	10,84
PRINCIPAUTE de MONACO	88,96

Figure 2 Taux d'artificialisation du trait de côte (Source MEDAM)

Il est à noter que le MEDAM produit cet indicateur avec un niveau de détail lié aux aménagements.

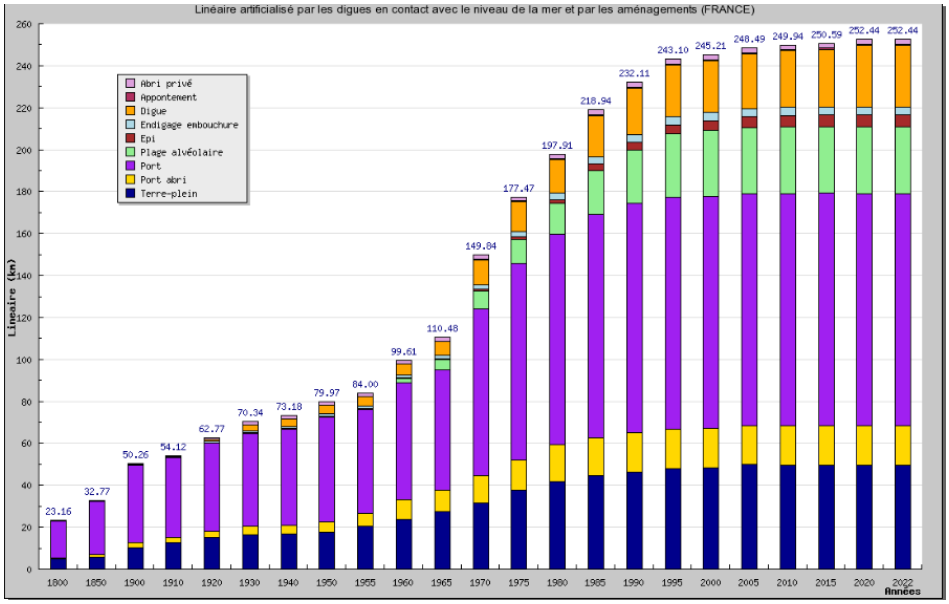


Figure 3 : Artificialisation du trait de côte par les digues et aménagements (source MEDAM)

Les ports français représentent plus de la moitié du linéaire artificialisé, d'où l'importance du rôle qu'ils jouent dans la modification des écosystèmes. Les ports génèrent par leur empreinte plusieurs types d'impacts physiques, du fait des surfaces couvertes et des zones enclavées.

La figure ci-dessous du Port de Vallauris-Golfe-Juan illustre cet aspect.

Figure 4 : Port de Vallauris-Golfe-Juan.. (Source MEDAM)

La délimitation du port s'effectue par des digues, des quais ou des enrochements. Les digues peuvent aussi engendrer des accumulations de sédiments par modification de l'hydrodynamisme local qui contribuent à accroître le taux d'occupation des petits fond côtiers.

Figure 3: Exemple d'accumulation de sédiments contre un port.

Les ports sont des lieux d'échange qui concentrent à la fois les rejets des activités humaines amont que l'on retrouve à l'embouchure de fleuves ou de rivières, et l'urbanisation du littoral, du commerce international et de la plaisance.

Les zones portuaires ont chacune leurs particularités et leurs enjeux. Afin de mieux définir le rôle possible des ports dans la restauration écologique, cette première partie définira les pressions et les impacts de l'activité humaine liées aux zones portuaires.

Les pressions issues des activités humaines.

Sur cette représentation tirée du guide Driver nous trouvons un aperçu des différents types de pression sur le milieu côtier et une liste des pressions plus spécifiques aux zones portuaires.

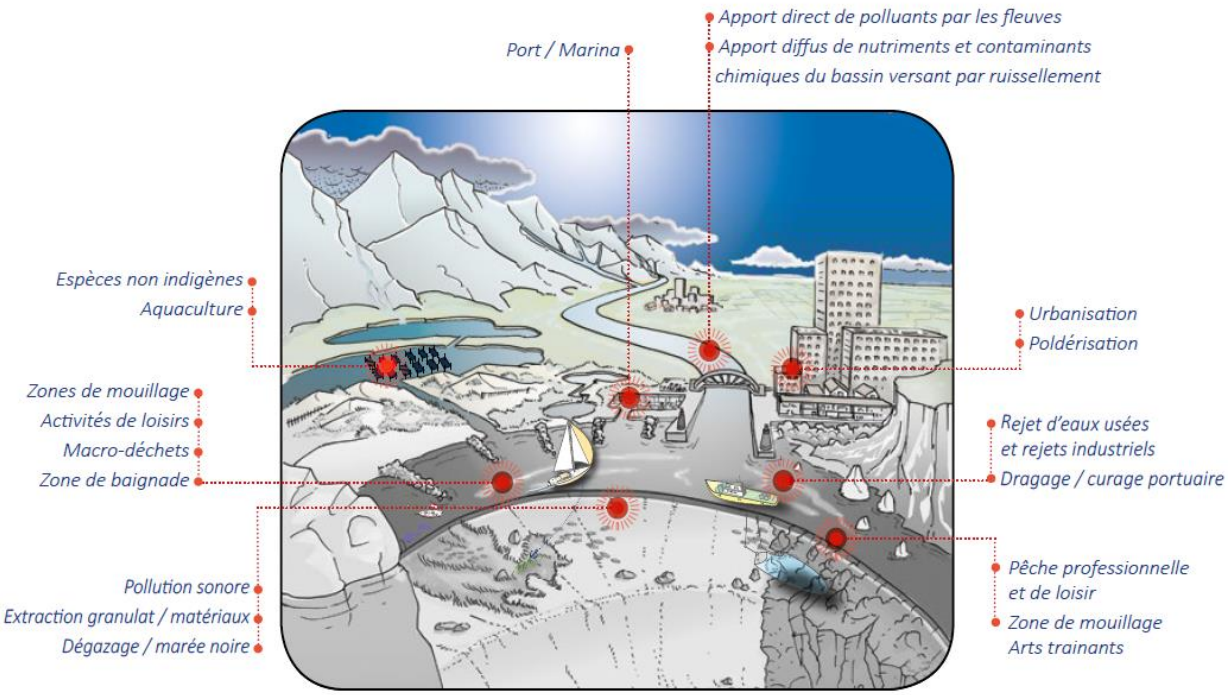


Figure 4: types de pression sur le milieu côtier (Source Guide DRIVER 2016)

La biodiversité des petits fonds côtier.

La biodiversité des petits fonds côtiers est dépendante du comportement des espèces de poissons. Les espèces de poissons se partagent en 3 schémas type de cycle de vie qui peuvent être représentés par des boucles.

Description des boucles :

- La boucle « a » définit les espèces dites « benthiques ou necto-benthiques (ex : Gobiidés, Sparidés, …) ». Tout leur cycle est localisé dans la bande littorale.
- La boucle « b » correspond aux espèces de type amphihaline. On y retrouve des espèces telles que l'anguille européenne qui suit un parcourt de migration.
- La boucle « c » regroupe les espèces côtières qui passent une partie de leur cycle de vie sur des zones éloignées des côtes, en profondeur, dans des tombants ou des canyons sous-marins. C'est le cas par exemple du merlu.

Le guide DRIVER propose la représentation graphique suivante pour illustrer le comportement des différentes espèces. Les fonctions de « reproduction » sont localisées en rouge, les habitats « nurseries » en jaune, les aires de « repos » en vert et l'habitat « alimentation » en bleu. Les flèches rouges indiquent les corridors écologiques qui permettent la connection entre différentes fonctions.

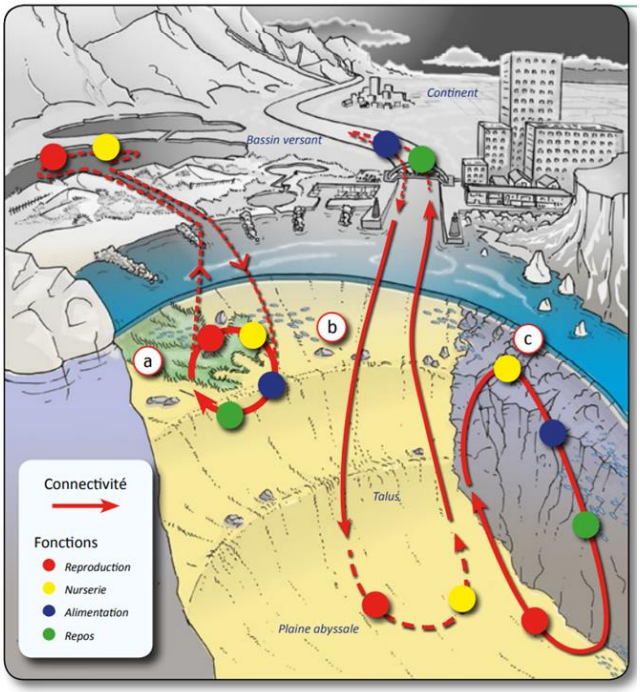


Figure 5: Illustration des différents cycles de vie des poissons (source : Guide Drivers)

Au stade juvénile, les espèces se répartissent sur les petits fonds côtiers permettant à chacun de grandir convenablement tout en limitant la notion de compétition ; ce qui est commun aux 3 boucles. Les petits fonds côtiers sont donc essentiels au cycle de vie des poissons et au maintien de la biodiversité dans les océans.

Cadre réglementaire au niveau international, européen et français.

L'état de « santé » et de bon fonctionnement du milieu marin préoccupe non seulement de plus en plus les experts, mais a un impact direct au niveau économique sur les secteurs de l'aquiculture, la pêche, le tourisme. Les volontés pour gérer harmonieusement les activités anthropiques et la biodiversité s'impose et sont de plus en plus nombreuses.

International : La convention de Barcelone

L'un des éléments les plus structurant de portée internationale pour la protection du milieu marin est la « Convention de Barcelone » entrée en vigueur en 1978. Cette convention met en place sept Protocoles pour lutter contre la pollution marine dont notamment :

- « Le Protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique en Méditerranée grâce à la création d'aires spécialement protégées (ASP) ou d'aires spécialement protégées d'importance méditerranéenne (ASPIM). Elles permettent de protéger les espèces animales et végétales menacées ou en voie de disparition.
- Le Protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières de la Méditerranée permet de garantir la pérennité d'une zone côtière tout en adaptant l'économie côtière et maritime en posant un cadre juridique pour la gestion de manière durable. » (Source : UN environnement programme).

Europe : Directive Cadre Stratégique sur le Milieu Marin

Au niveau européen, La Directive Cadre Stratégique sur le Milieu Marin (DCSMM) datant de 2008 intègre un ensemble de textes réglementaires européens concernant le milieu marin :

- Directive Cadre sur l'Eau (DCE),
- Directive habitat-faune-flore (DHFF),
- Directive oiseaux (DO),
- Politique commune des pêches (PCP)…

La DCSMM entreprend une démarche qui vise à maintenir ou restaurer un bon fonctionnement des écosystèmes marins qui est porté par un Plan d'Action pour le Milieu Marin « PAMM » révisé tous les 6 ans. Ce plan d'action est basé sur l'analyse économique et sociale de l'utilisation des eaux marines (AES) déclinée en 23 secteurs d'activité économique en interaction avec le milieu marin.

France : Loi littorale et Plan d'Action pour le milieu Marin.

En France, les cadres réglementaires les plus significatifs sont la Loi Littoral de 1986 et le PAMM.

- La Loi Littoral a pour objectif d'encadrer les aménagements nouveaux sur le littoral, en particulier en sanctuarisant une borne de 100 m de profondeur sur le trait de côte. Elle vise à concilier « la préservation et le développement des activités économiques liées à la proximité de l'eau, telles que la pêche, les cultures marines, les activités portuaires, la construction et la réparation navales et les transports maritimes » avec « la protection des équilibres biologiques et écologiques » (source : *Legifrance*).
- Le PAMM concerne plus particulièrement les petits fonds côtiers dans deux types de démarche :
  - Des actions limitant l'impact des ancres sur des habitats sensibles.
  - La planification et la réalisation d'actions de restauration écologique des petits fonds côtiers.

DCE : Le bon état des eaux côtières

Afin d'évaluer la qualité de l'eau des zones côtière, la directive cadre sur l'eau (DCE) fixe des objectifs et des méthodes. Il y a deux critères de notation : l'état écologique et l'état chimique de l'eau. Les critères de notation sont basés sur des mesures périodiques qui prennent en compte plusieurs centaines de paramètres.

L'état écologique se décline en cinq classes de qualité (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais). L'état chimique se compose de deux classes de qualité (bon ou mauvais). La DCE définit le statut de "bon état" d'une masse d'eau de surface lorsque l'état écologique est « bon » ou « très bon » et l'état chimique est « bon ».

L'état écologique

L'état écologique des eaux côtières est mesuré par rapport à des paramètres comparés à une situation dite « de référence ». C'est une situation où l'influence des activités humaines serait nulle. L'écosystème est estimé en bon état écologique si et seulement si, l'écart des paramètres mesurés est faible par rapport à la situation « de référence ». A l'inverse si l'écart est grand, l'écosystème est considéré comme dégradé.

Trois types de paramètres sont mesurés :

- Les éléments de qualité biologique : la présence (ou l'absence) de certaines espèces telle que les invertébrés, les macro-algues (algues non microscopiques), le phytoplancton (algues unicellulaires).
- Les éléments de qualité physico-chimique : l'oxygène dissous, turbidité, température.
- Les éléments de qualité hydromorphologique de l'écosystème : morphologie de la côte, régime des marées.

En 2016, selon l'agence de l'eau, 51,4 % des masses d'eau côtières sont classé au moins en bon état écologique.

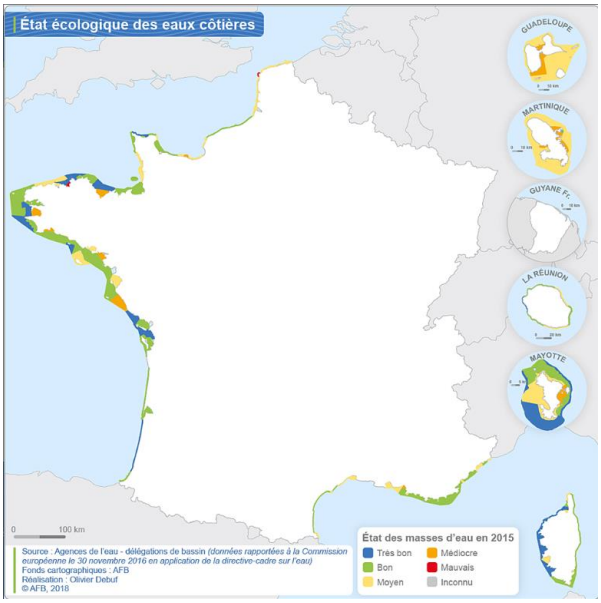


Figure 6: Etat écologique des eaux côtières (Agence de l'eau)

L'état chimique :

L'état chimique des petits fonds côtiers se mesure grâce à l'analyse des concentrations de substances, en particulier les pesticides, les métaux lourds et les hydrocarbures retrouvés dans l'eau. La concentration de référence de ses substances est donnée par les Normes de Qualité Environnementale (NQE).

En 2016, 72,6 % des masses d'eau côtières étaient considérées en bon état chimique.

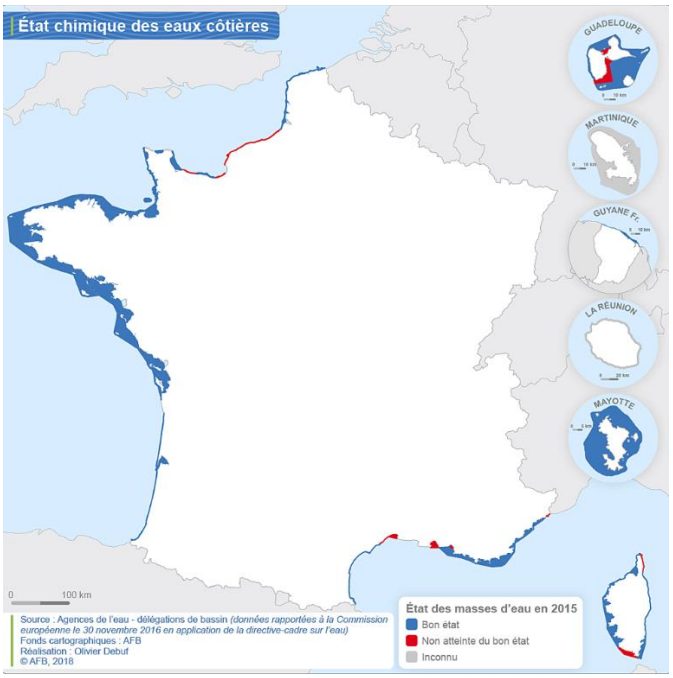


Figure 7:Etat chimique des eaux côtières en France (Source Agence de l'eau)

Les moyens et solutions disponibles de restauration de fonction écologiques dans les ports.

Les ports sont fortement responsables de l'artificialisation du littoral. L'artificialisation a un impact direct sur l'écosystème des petits fonds côtier en détruisant les fonctions vitales du cycle de vie des poissons. Cette perte de ces fonctions écologiques n'est pas irréversible. En effet, les ports sont des zones semi-fermées, calmes, protégées et souvent à forte production primaire. Ces caractéristiques physiques fournissent des conditions favorables à la survie et à la croissance des juvéniles.
Les ports sont devenus des lieux d'expérimentation pour des programmes de restauration. Des programmes d'installation de fonction de nurserie au sein d'infrastructures portuaires favorisent le développement et la survie des juvéniles et le maintien des populations adultes.

Solutions de restauration en zone portuaire

En milieu naturel, le taux de survie entre la phase larve et juvénile, dans le cycle de vie d'un poisson, est de 1/1000 (selon la figure 1).

Des programmes de restauration écologique en zone portuaire permettent d'augmenter le taux de survie et donc l'impact. Pour ce faire, il est possible de jouer sur deux étapes du cycle de vie des poissons :

- La migration des post-larves entre les eaux profondes et les petits fonds côtiers en les capturant, en les élevant dans un milieu sécurisé jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille suffisante pour résister à la prédation et en les relâchant sur habitats d'émancipation.
- Grâce à des habitats artificiels, l'installation des juvéniles est favorisé car il leur fournit un abri et de la nourriture.

Voici quelques programmes de restauration visant à remplir les deux objectifs :

SUBLIMO : Mise au point des solutions de restauration

SUBLIMO est un projet qui a été lancé en 2011 pour une durée de 4 ans. Il est piloté par le Maître de conférence Philippe Lenfant du CNRS Université de Perpignan. Il vise à réduire le taux de mortalité entre la phase larve et juvénile. SUBLIMO se concentre sur la phase larvaire et post larvaire. C'est un programme de type PCC (Post-larve Culture & Capture).

Le processus PCC se fait en trois étapes :

1) La capture des larves vivantes en pleine mer par les pécheurs à l'aide de pièges lumineux appelés CARE conçus par la société BIOCEAN.
2) L'élevage pendant plusieurs mois dans des WET LAB.
3) La relâche des juvéniles sur des micro-habitats spécifiques où ils trouveront refuge et nourriture.

Figure 10 : Capture de Post-Larve

Figure 9 : Elevage

Figure 8 : Relâchement des juvéniles

L'action de repeuplement permet de réduire la mortalité par 10 par rapport aux conditions du milieu naturel car les juvéniles sont plus à même d'éviter la forte prédation.

SUBLIMO a montré la pertinence de ce processus en trois étapes. Cela lui a valu d'être sollicitée pour l'accompagnement scientifique des installations portuaires de projets similaires. Ce programme a été repris notamment par société Ecocéan, société héraultaise au service de la biodiversité marine. Le programme SUBLIMO a permis de mettre en relation diffèrent acteurs français et européens afin de partager des données, notamment avec les Universités de Murcia en Espagne et de Cagliari en Sardaigne.

GIREL : Expérimentation à grande échelle

Les programme GIREL a pour objectif de combiner recherche fondamentale et développement expérimental afin d'apporter des solutions de restauration écologique innovantes sur le site du Grand Port Maritime de Marseille. Les solutions variées ont été proposées par des sociétés, et des PME dont les activités sont liées au domaine du génie écologique.
Le programme GIREL vise aussi à acquérir des connaissances dans le domaine de la restauration écologique en entreprenant des travaux originaux. Les données recueillies sont partagées entre ses partenaires afin de mettre au point de nouveaux produits, procédés, systèmes et services à moyens et longs termes.

Le programme GIREL a été scindé en 3 grandes phases :

2012, la première phase d'étude initiale avait pour objectif de vérifier la faisabilité et l'intérêt de différentes solutions pilotes retenues dans le cadre complexe et diversifié du Grand Port Maritime de Marseille.

Les pilotes :

- ECORECIFS : adjonction de dispositifs – habitats spécifiques aux digues (EGIS/Seaboost)
- BIORESTORE : Post Larve Capture and Culture et habitats d'émancipation (Lyonnaise des Eaux/ ECOCEAN - Cefrem Université de Perpignan) et revêtements de quai BioHut
- CYSTORE : Transplantation d'algues Cystoseira

Les résultats des phases d'étude initiale ont permis la validation de ces pilotes.

Une seconde phase a été lancée en 2013 en passant sur la fabrication et l'installation à petite échelle de prototypes étudiés dans la phase 1.

Une troisième phase échelonnée entre 2014 et une partie de 2015, a eu pour objet la fabrication et l'installation à plus grande échelle des démonstrateurs étudiés en tant que prototypes dans la phase 2, ainsi que leur suivi.

GIREL est devenu une référence dans le domaine du Génie Ecologique Côtier. Cette expérience sert de base à de nombreux projets dans des contextes divers (marinas, émissaires…) et a permis l'émergence d'une filière française du génie écologique côtier qui réunie des acteurs reconnus.

RESPIRE : Un réseau de surveillance

La thématique des nurseries en zone portuaire s'est démocratisée et devient une activité économique en plein essor avec le développement de société spécialisées ayant acquis un savoir-faire. Afin de disposer d'outils permettant de décider de la nécessité d'actions de restauration écologique et de mesurer les impacts, RESPIRE fournit une méthode d'observation standardisée sur des habitats artificiels propices à la protection des jeunes poissons.

Le projet RESPIRE est un réseau de surveillance qui vise à suivre l'évolution de 23 ports répartis entre Port -Vendres et Monaco, en passant par la Corse. Les ports sont suivis sur une période de 6 ans (2014-2020) plus ou moins fréquente, 3 fois/an (Basse Fréquence) dont certains jusqu'à 24 fois/an (Haute Fréquence).

Maître d'ouvrage : Ecocean
Partenaire : AERMC, CEFREM-CNRS-CREM, IFREMER, STARESO, Andromède Océanologie, Université de Rabat.

Développement d'une filière de compétence spécifique de restauration marine

BioRestore : Une solution de repeuplement complète

BioRestore est le prolongement de SUBLIMO porté par Lyonnaise des Eaux en co-traitance avec Ecocean. Il repose sur les mêmes techniques de repeuplement PCC (Post-larve Culture & Capture) que SUBLIMO. Lorsque les post-larves reviennent du large pour coloniser le littoral elles sont capturées par les pièges lumineux, sont élevées en bassin jusqu'à atteindre la taille refuge, puis sont réintroduites dans le milieu naturel. Ce qui est nouveau par rapport au programme SUBLIMO, c'est que les juvéniles sont relâchés sur des habitats d'émancipation de type BIOHUT développés par la société ECOCEAN.

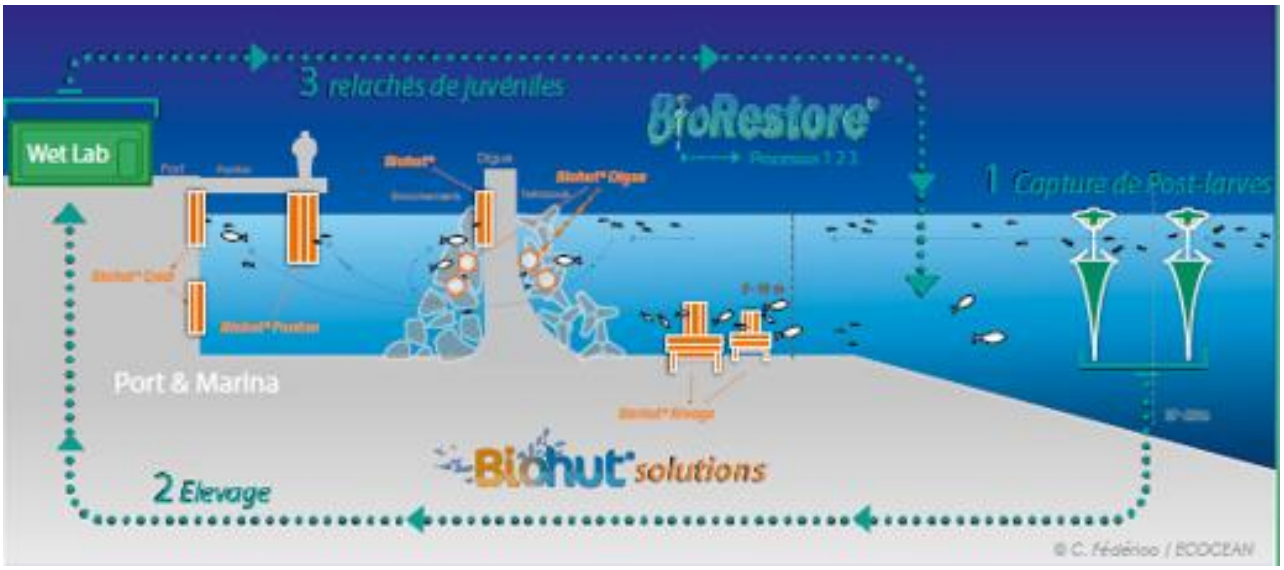


Figure 11: Projet de restauration porté par ECOCEAN

Différents types de nurserie artificielles

Les habitats BIOHUT

Les BIOHUT sont des nurseries artificielles conçues par la société ECOCEAN. Les BIOHUT sont en matériaux recyclables. Ils sont compatibles avec des applications liées aux écosystèmes marins et d'eau douce. Les nurseries artificielles ont pour objectif d'imiter les petits fonds côtiers naturels en rendant les infrastructures portuaires biocompatibles. Elles retrouvent des fonctions écologiques en fournissant un abri et de la nourriture pour les jeunes poissons.

Fiche technique Biohut Quai
Dimension :80 x 50x 24 cm
Maillage de la grille extérieur 5 x 5 cm
Maillage de la grille intérieur 2.5 x 2.5 cm
Matériaux : Fer et Coquille d'Huitre

Fiche technique Biohut Ponton
Dimension :80 x 50 x 36 cm
Maillage de la grille extérieur 5 x 5 cm
Maillage de la grille intérieur 2.5 x 2.5 cm
Matériaux : Fer et Coquille d'Huitre

Fiche technique Biohut Kelp
Dimension :98 x 40 x 41 cm
Matériaux : Fer, bois, fibre de noix de coco

Les habitats Egis-Seaboots

La société Egis-Seaboost, localisée à Montpellier, a développé deux types de modules d'habitat pour nurseries artificielles en se basant sur le biomimétisme de l'oursin et d'herbiers. Les deux modules ont été testés dans le programme GIREL.

Module « Oursin »

Les modules « Oursin » permettent de remplir les fonctionnalités écologiques de nurserie et d'habitat destinées aux espèces des petits fonds rocheux : offrir de nombreuses anfractuosités, apporter une protection contre la prédation, et assurer la nutrition via le fouling progressif. La durée de vie d'un module, qui est supérieure à 10 ans, ne demande aucun entretien, résiste aux UV, aux agressions chimiques et aux contextes hydrodynamiques exigeants.

Figure 12 : Module Oursin (source : seaboost)

Selon Seaboost, les modules « Oursin » ont pu démontrer leur efficacité, car « l'abondance de vie a été multipliée par 3 à 4 et la diversité des espèces a elle aussi été multipliée par 3 (Suivis scientifiques du projet GIREL réalisés par le GIS Posidonie) ».

Module « Roselière »

Le module « Roselière » est une solution biomimétique s'inspirant d'écosystèmes d'herbiers et d'algues. Il est composé de fibre de coco. Ils permettent de remplir principalement les fonctionnalités écologiques de nurserie et d'habitat, la plasticité du module permet d'apporter des propriétés d'atténuation douce de houle. Le module qui a une durée de vie supérieure à 5 ans, ne demande lui non plus aucun entretien, résiste aux agressions chimiques et aux contextes hydrodynamiques exigeants.

Figure 13: module Roselière (Source: seaboost)

Selon Seaboost, les modules « Roselière » ont pu démontrer leur efficacité par l'abondance de vie multipliée par un facteur variant de 8 à 17 et par la diversité des espèces multipliée par 3 à 4 (Suivis scientifiques du projet GIREL réalisés par le GIS Posidonie) »

Les habitats Architetihis

La société Architetihis, basée à Marseille, a développé des modules « TOTEM » destinés à être accrochés sur des digues et des modules « TIPESK » accrochés sur des quais. Ils permettent de remplir principalement les fonctionnalités écologiques de nurserie et d'habitat.

Sa base souple lui permet de s'adapter à la houle et aux tempêtes côtières, il se place sur les enrochements submergés des digues portuaires.

La structure grillagée agit comme une membrane de sélection des poissons en fonction de leur taille, afin d'exclure les poissons prédateurs les plus gros de la zone d'habitat.

Figure 14 : Habitats Totem et TIPSEK (Source: Architetihis)

Habitat Suez : Module « ReFISH »

Conçu, par SUEZ, le projet ReFISH consiste à concevoir et évaluer des nurseries artificielles qui imitent les herbiers de posidonies. Les nurseries sont composées de brins de plastique sur des panneaux qui sont repartis le long des quais. Ce projet de recherche (2017-2018) a permis l'installation de 25 m² de nurseries artificielles ReFISH dans le port de Bormes-les-Mimosas (83).

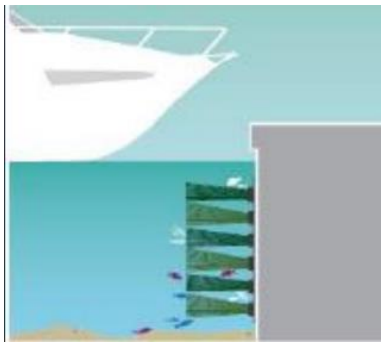


Figure 15 Schéma d'installation des nurseries ReFISH

Les premiers résultats montrent que les ReFISH permettent de multiplier par 3 à 8 l'abondance de juvéniles. De jeunes mérous bruns, espèce patrimoniale protégée par un moratoire, sont même observés régulièrement dans les structures.

Schéma territorial de restauration écologique (STERE)

En France, un outil STERE de programmation a été mis en place afin de mettre en œuvre des actions de restauration écologique et de non dégradation. Les STERE sont issus du PAMM et permettent une cohérence territoriale entre les actions de non dégradation et les actions de restauration. A ce jour 4 STERE ont été lancés en Méditerranée à Agde, Marseille, Massif des Maures et Nice.

Limites à la restauration

L'objectif de la restauration écologique est de réparer les composantes d'un milieu et de réinstaurer les fonctions naturelles afin de retrouver les services écosystémiques à partir du moment où les pressions nuisibles ont été supprimées. Dans le cas de la restauration dans les ports, retrouver la fonction nurserie n'est pas toujours faisable pour des raisons techniques évidentes mais aussi pour des raisons écologiques et économiques.

Raison écologique

L'une des premières raisons à la limite de la restauration est l'état de l'écosystème de la zone d'étude portuaire. L'écosystème en place est classé sur une échelle de 4 états :

- « Écosystème de référence »,
- « Écosystème perturbé »,
- « Écosystème dégradé »
- et « écosystème très dégradé ».

Réhabilitation et réaffectation

- Si les perturbations liées aux pressions sont de type « Écosystème de référence » ou « écosystème perturbé » alors la restauration reste possible. Au-delà, un programme de réhabilitation ou de réaffectation sera plus adapté.

- La réhabilitation se concentre seulement sur un certain nombre d'attributs et de services permettant de retrouver une ou des fonctions, un service particulier ou encore l'habitat de certaines espèces et permettre le renforcement de la population.
- La réaffectation est envisagée si la dégradation de l'écosystème est trop importante. Cette action n'a pas pour objectif de tendre vers un écosystème de référence, mais plutôt de l'utiliser à d'autres fins que celles prévues initialement.
- Si l'état écologique a dépassé le seuil d'irréversibilité, on le considère comme détruit.

Raison économique

Les projets de restauration sont coûteux pour les gestionnaires de port et peuvent se monter à plusieurs dizaines voire centaines de k€. Une partie du budget des programmes de restauration peut être subventionnée grâce à des financeurs tels que :

- Le département,
- La Région,
- L'Agence de l'eau,
- L'Office français pour la biodiversité.

Compensation

La compensation est un terme définissant le fait de réaliser une action ayant un impact sur la biodiversité. Afin de compenser les impacts sur l'écosystème et/ou sur des espèces associées dans un autre lieu résiduel, des mesures pour restaurer, créer, améliorer ou empêcher la perte de l'écosystème sont mises en place. La compensation n'entre pas dans un processus de restauration car elle autorise dans un premier temps des pressions sur l'écosystème tout en menant des actions pour améliorer l'état écologique d'un autre milieu.

Premier bilan d’action de restauration écologique dans les ports

En France

Depuis le début des années 2010, les projets SUBLIMO, GIREL, RESPIRE ont montré que les zones portuaires peuvent être des zones favorables à la restauration écologique. La restauration écologique est devenue au fur et à mesure, une filière économique et des entreprises privées du sud de la France telles que Ecocean, Architetihis, Egis-Seaboost, se sont spécialisées dans la restauration écologique en zone portuaire.

La restauration écologique devient aussi un enjeu sociétal par la prise de conscience des utilisateurs et des gestionnaires des ports de l’intérêt à participer à la gestion environnementale. La qualité des eaux ainsi que la gestion des déchets est de plus en plus surveillée avec parfois des résultats très encourageants. En effet, si les ports et la navigation de plaisance sont des sources de pollution ou de destruction potentielle de l’écosystème, les résidents et les touristes plaisanciers attendent un engagement plus durable des activités portuaires. Cette démarche fait maintenant l’objet de labels qui sont recherchés (et non imposés) par les gestionnaires de ports.

En Méditerranée française, le label « Ports Propres » fédère 90 % des ports de plaisance de PACA. Cette initiative propose un partenariat financier, une formation aux agents portuaires et une signalétique pour les ports équipés au titre de l’opération. C’est désormais une certification européenne qui a vocation à s’étendre à d’autres pays.

NAPPEX (Nurseries Artificielles Pour Ports Exemplaires) est aujourd’hui une appellation supplémentaire au label « Port Propres » qui identifie les ports exemplaires ayant comme engagement de favoriser la biodiversité dans leurs eaux par la mise en place d’habitats adaptés aux larves de poissons ainsi qu’à de nombreuses espèces marines. En 2022, 27 ports de France sont équipés de nurseries artificielles et font l’objet d’un label NAPPEX. Ce label est en passe de devenir un standard à l’échelle Européenne.

A l’Etranger

Expansion du label Nappex

La notion de restauration écologique se développe aussi à l’international. 13 ports étrangers ont déjà adhéré au projet NAPPEX en 2022, sur le littoral Européen notamment en Grande Bretagne, au Danemark, aux Pays bas, en Espagne, mais aussi au Maroc.

Figure 16: Ports NAPPEX en 2022 (Source Ecocean)

Autres projets de restauration à l'étranger

Tide pool à New York

Il existe un projet d'implantation de « Tide pool » sur les digues. Cette technologie se base sur la physique des marées. Elle a pour objectif « de reproduire des conditions de vie favorables aux différentes espèces d'algues, de poissons et de crustacés. Ils permettent ainsi le développement de la faune et de la flore à l'intérieur de ces blocs. Ils offrent au juvénile un lieu favorable pour se cacher et se nourrir ».

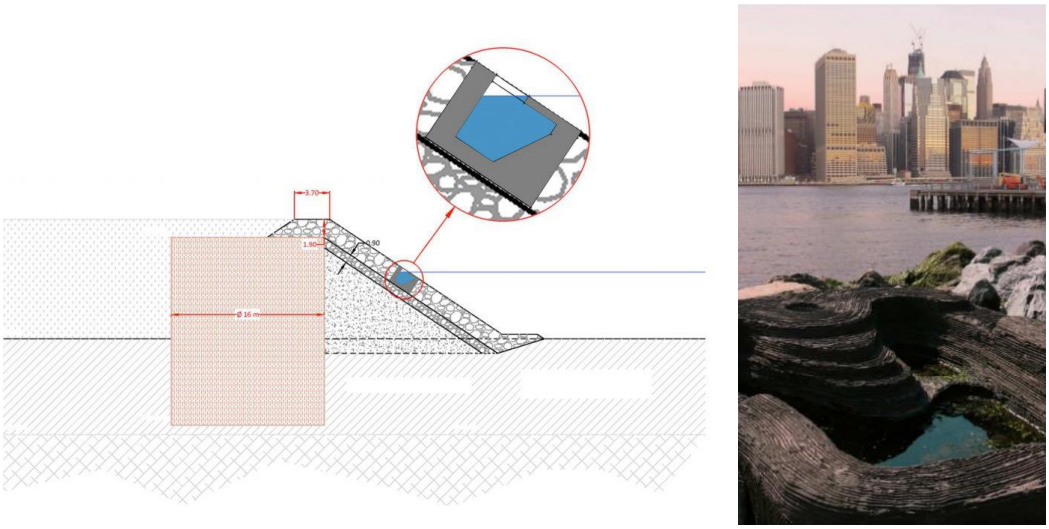


Figure 17 : Schéma d'implantation de « Tide pool » dans une digue

Cette méthode a été utilisé à l'international dans le port de New-York.

Living seawall en Australie

Projet initié par l'Institut des Sciences Marines de Sydney (SIMS). L'entreprise Living Seawalls implante le long de constructions nouvelles et existantes, des panneaux en béton ayant la

caractéristique d'imiter l'habitat des écosystèmes naturels, tels que les bassins rocheux et les crevasses.

Les surfaces complexes des panneaux sont conçues pour augmenter la superficie de l'habitat disponible pour la colonisation et favoriser la croissance des algues, des mollusques, des crustacés et d'autres espèces marines. Les panneaux sont conçus numériquement puis créés à l'aide de la technologie d'impression 3D. Cette méthode d'impression permet de recréer les détails fins afin d'imiter au mieux l'habitat naturel.

Figure 18: Panneau en béton Seawall (source Seawall)

Selon Living Seawall « Après 1 à 2 ans, les recherches scientifiques dans le port de Sydney ont montré que les digues équipées de panneau abritent 36 % d'espèces en plus que les digues plates et non modifiées ». « Les panneaux ont accueilli jusqu'à 85 espèces d'invertébrés, d'algues et de poissons vivants ». Actuellement, la solution Seawall est exportée notamment en Irlande, en Espagne et à Singapore.

Retour d'expérience scientifique

Les travaux scientifiques, notamment les thèses de Marc Bouchoucha 2017 et Manon Mercader 2018 ont permis de donner un bilan, les limites et des perspectives à ces actions de restauration.

Bilan des actions de restauration

Nous avons retenu les points suivants qui ressortent des conclusions de ces travaux :

- Le juvéniles de nombreuses espèces de poissons ont tendance à s'installer naturellement et à se développer jusqu'à l'âge adulte en zone rocheuse ou en zone portuaire sur les jetées et les enrochements. Il a été observé qu'à l'intérieur des ports, les populations de juvéniles pouvaient être comparables, voire supérieures, à celles des habitats naturels. Ainsi, les jetées et les enrochements peuvent être considérés comme des nurseries. Les ports sont des zones qui peuvent représenter, avec les digues et les enrochements en linéaire, « l'équivalent de la côte rocheuse naturelle, soit, une large proportion de paysages sous-marins. »
- Dans les ports, les quais et les pontons sont des lieux dont la complexité est quasi nulle. Ils recensent des densités beaucoup plus faibles. Il apparaît que les densités en juvéniles sont plus importantes sur les ouvrages portuaires équipés de petits habitats artificiels que sur leurs homologues de référence non équipés. Cette différence provient d'un taux de survie plus important des juvéniles dans les habitats complexes.

- Cependant, à l'échelle globale d'un port ou du trait de côte qui l'environne, l'effet de la restauration par l'implémentation de nurseries artificielles n'est pas forcément quantifiable. Cela peut provenir de plusieurs facteurs :
    - Les pontons équipés de nurseries montrent une densité plus élevée de juvéniles mais cela reflète peut-être un effet de prisme lié à la méthode de comptage. Une dilution plus globale dans un habitat de référence plus vaste est peut-être plus difficile à quantifier.
    - La méthodologie de comptage par échantillonnage au niveau des nurseries est chronophage et reste limitée à un niveau très local. Elle ne permet pas d'avoir une vision globale au niveau de l'écosystème du port ou du trait de côte environnant qui contient une multitude d'habitats environnants.
- Pour que les effets des nurseries deviennent quantifiables et puissent être considérés comme un bénéfice de production de poissons, les recommandations suivantes ont été faites :
    - La taille des nurseries artificielles doit être suffisamment conséquente. Des projets d'implémentation sous les pontons à grande échelle seraient favorables.
    - La durée d'installation doit être envisagée sur plusieurs années pour produire des effets et assurer un suivi.
    - Les types de nurseries peuvent être diversifiés sur un même site afin de convenir à de plus nombreuses espèces ou pour des tailles de poissons différentes. On pourrait envisager plusieurs solutions techniques de nurseries artificielles au sein du même port.
    - Les ports étant des « No take zones », ils pourraient proposer non seulement des fonctions de nurseries, d'habitats de juvéniles, mais aussi favoriser la connectivité entre les zones marines protégées.
    - Une analyse de la répartition des classes de tailles au sein du port permettrait d'obtenir non seulement des informations quant à la dynamique d'utilisation des habitats artificiels par les juvéniles mais aussi une quantification du taux de survie jusqu'à l'âge adulte. Mesurer ce taux de survie au niveau du port permettrait de mieux quantifier l'impact des initiatives de restauration sur le milieu environnant.

Perspectives

- Les zones portuaires sont un carrefour entre usagers de la mer, gestionnaires, scientifiques et décisionnaires. Selon l'expérience de Manon Mercader, disposer des habitats artificiels dans les ports et mener des actions de sensibilisation avec les scientifiques lors des suivis, génère auprès de nombreux plaisanciers une bienveillance et une appropriation « qui veillent à ce que leurs crèches à poissons ne soient pas dérangées ».
- Le maintien de la biodiversité marine et des stocks de poissons est une priorité à l''échelle internationale et des quotas de pêche ont pu être instauré, notamment sur des espèces telles que le thon de manière efficace. La pisciculture comme sur le saumon est aussi une voie qui s'est fortement développée avec des impacts sur les écosystèmes environnants de plus en plus raisonnés. Les ports pourraient devenir à terme aussi une source significative de maintien ou de production de la biodiversité et ainsi participer au repeuplement des petits fonds côtiers ce qui pourrait permettre le maintien d'une activité de pêche côtière raisonnée.
- Il serait nécessaire de mettre au point un protocole d'évaluation simplifié et standardisé utilisable directement par les gestionnaires de ports afin de pouvoir quantifier plus finement l'impact des nurseries artificielles sur l'écosystème environnant.

Conclusion

En conclusion, il apparaît que les pressions liées aux activités humaines ne sont pas réparties de manière homogène sur le littoral français. Il y a de fortes disparités. On assiste cependant à une stabilisation de l'artificialisation des côtes depuis le début des années 2000. Les petits fonds côtiers sont essentiels dans le cycle de reproduction de la biodiversité des océans car ils jouent le rôle de nurserie et refuge pour un très grand nombre d'espèces de poissons.

Un cadre réglementaire au niveau international, européen et national a été mis en place depuis les années 70 et est effectif à ce jour en France. Il permet de mesurer, grâce à des suivis environnementaux, l'impact des activités humaines sur les petits fonds côtiers et de fournir les outils réglementaires permettant d'envisager des actions de restauration, notamment dans les zones portuaires.

Le programme de repeuplement Sublimo est le premier programme français de restauration écologique dans une zone portuaire en se basant sur le cycle de vie des poissons. Il a permis aux scientifiques d'acquérir des connaissances sur le cycle de reproduction des poissons, mais aussi de mener ce programme en partenariat avec des pécheurs locaux. Grâce à la pertinence de ce projet, des actions expérimentales à plus grande échelle (GIREL) en zone portuaire ont pu être entreprises en incluant cette fois-ci des entreprises françaises se chargeant de développer des modules de nurseries artificielles. Ces programmes de restauration écologique ont donné lieu au lancement d'une filière française disposant d'un vrai savoir-faire grâce auquel de nombreux ports français et européens ont été équipés en nurseries artificielles.

En effet de plus en plus de gestionnaires et d'utilisateurs de ports sont sensibles à l'écologie marine. La création de labels comme NAPPEX et de certifications tels que Port Propre a eu pour conséquence un développement responsable des ports.

La restauration écologique demande des ressources techniques, financières et humaines notamment en termes de formation. Des organismes publics, comme l'agence de l'eau, apportent leur soutient aux projets de restauration écologique.

A l'étranger, la restauration écologique en zone portuaire intéresse de plus en plus d'acteurs et permet un partage de retour d'expériences.

Des pistes permettant d'augmenter l'impact des actions de restauration écologique dans les ports contribuent à assurer une action positive nette sur l'écosystème des petits fonds côtiers comme :

- Augmenter la taille des nurseries afin d'améliorer le taux de survie de Juvéniles.
- Varier les supports afin de cibler un plus grand nombre d'espèces.
- Penser la localisation des nurseries en tenant compte de la connectivité des zones marines protégées afin d'améliorer la diffusion des adultes hors des zones portuaires.
- Mettre en place des moyens de comptage globaux de juvéniles et d'adultes à l'échelle d'un port qui puissent être utilisés simplement par les gestionnaires de ports. Ces moyens de comptage permettraient de mesurer les impacts des actions de restauration écologiques, de pouvoir communiquer et de les partager plus facilement avec les différents acteurs du génie écologique.

Webographie

Le Schéma territorial de restauration écologique/13_blouet_jet_trame_marine_stere_0/2021

RESTAURATION DU MILIEUMARIN MEDITERRANEE Etat des travaux en cours et perspectives/2014

Remora © Oceanica Prod/ C. Blan Histoire d'une reconquête environnementale/ 2016

Ecocéan/ Opération de restauration écologique des fonctions de nurserie Rapport d'activité intermédiaire – Année 2019-2020

PAMM méditerrané environnementale /Document stratégique pour la restauration écologique en Méditerranée/ 2019

Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée/ Guide-DRIVER_version-française-corrigée-2016

Rôle des infrastructures portuaires dans le maintien des populations de poissons côtiers : apports de la restauration écologique/ These_Mercader_M_2018a

Ecocéan/ https://www.ecocean.fr/eau-douce/

Ecocéan/ https://www.ecocean.fr/2019/wp-content/uploads/2016/10/2017.06_FR_GIREL_RE.pdf

Seaboost/ https://www.seaboost.fr/projet/restauration-de-la-fonctionnalite-de-nurserie-sur-une-plateforme-de-reparation-navale-pour-mega-yachts/

Seaboost/ https://www.seaboost.fr/wp-content/uploads/2017/10/Fiche-technique-solution-Seaboost-module-oursin.pdf

Architeuthis/ https://www.recifartificiel.fr/recifs-artificiels

Architeuthis/ https://www.recifartificiel.fr/copie-de-panal-2

Pôle Mer Méditerranée/ https://www.polemermediterranee.com/Activites-Projets/Environnement-et-valorisation-du-littoral/GIREL

NAPPEX/ https://www.nappex.fr/contexte/ports-exemplaires/

Ministered de la Mer/ https://www.mer.gouv.fr/ports-de-plaisance-maritimes

UN Environement Programme/ https://www.unep.org/unepmap/fr/who-we-are/barcelona-convention-and-protocols

MEDAM/ http://www.medam.org/index.php/fr/medam-module-evolution

Port Propre/ https://www.ports-propres.org/ports-certifies/?_sft_port_certification=certifie-actif-en-biodiversite

PROGRAMME DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES PORTS « ECONCRETE »/ https://www.bing.com/search?q=PROGRAMME+DE+RESTAURATION+%C3%89COLOGIQUE+DES+PORTS+%C2%AB+ECONCRETE+%C2%BB&cvid=3300841a45484a69b3bcfc559a1ea52a&aqs=edge..69i57.1114j0j1&pglt=43&FORM=ANNTA1&PC=NMTS

Eau France/ https://www.eaufrance.fr/la-qualite-des-eaux-cotieres?msclkid=68e6307bcef611ec9eaf2afd37d3bfb8

Living SeaWall/ https://www.livingseawalls.com.au/

Annexe 13

Apport des actions de restauration en AMP

Par Juliette LANGLOIS

Faculté des sciences de l'université de Montpellier

Diplôme d'Université (DU) « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

-

Année 2022

Apport des actions de restauration écologique au sein d'aires marines protégées.

-

Juliette Langlois

Tuteur : Philippe Lenfant

Remerciements

Je remercie l'ensemble des intervenants du DU, plus particulièrement Philippe Lenfant, mon tuteur pour ce mémoire. Merci à Térence pour la relecture. Je remercie aussi toute la communauté qui développe des actions de restauration au sein d'aires marines protégées pour son travail qui a servi de support indispensable au mien, aussi humble et confidentiel soit-il.

Résumé

Face à au changement global et à l'accélération de la perte de biodiversité, le milieu marin est particulièrement menacé. Il joue pourtant un rôle capital dans la production de services écosystémiques de régulation (puit de carbone), de production (alimentation) et culturels (divertissement). Il est donc essentiel de veiller à ce que les écosystèmes marins restent en bon état de fonctionnement. Pour cela, deux façons de penser s'opposent : la protection des écosystèmes encore non dégradés et la restauration écologique de ceux qui le sont déjà. Cependant l'efficacité des aires marines protégées peut être freinée par des perturbations extérieures ou une longue résilience de l'écosystème concerné. En nous appuyant sur trois cas d'étude, nous allons montrer que la restauration écologique peut être incluse dans les plans de gestion des aires marines protégées et contribuer à atteindre les objectifs de conservation.

Sommaire

Table des figures *4*

Table des tableaux *4*

Introduction *5*

Cas d'étude *8*

Cas 1 : Récifs d'huîtres **8**

Cas 2 : Invasion de *Sargassum horneri* **10**

Cas 3 : Passer de barren ground à des forêts de macroalgues **12**

Discussion *15*

Conclusion *18*

Bibliographie *20*

Table des figures

Figure 1……7

Figure 2……9

Figure 3……11

Figure 4……14

Table des tableaux

Tableau 1……12

Tableau 2……17

Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique, la perte de biodiversité observée sur la planète est d'une rapidité sans précédent (Steffen et al. 2015). Couvrant 70 % de sa surface, le milieu marin est en effet soumis à de nombreuses perturbations anthropiques (pollution, surexploitation, dégradation d'habitats) qui bouleversent son fonctionnement (Halpern et al. 2008), alors même qu'il joue un rôle fondamental dans la régulation du climat (i.e. pompe physique et biologique du carbone, (Legendre et al. 2015).

Les services écosystémiques que remplit le milieu marin ne sont donc plus assurés correctement, que ce soient les services de régulation (e.g. puis de carbone, régulation du climat), les services matériels (e.g. alimentation) ou les services culturels (e.g. divertissement, inspiration, expérience esthétique) (IPBES 2019). L'une des manières de prévenir la dégradation des écosystèmes marins et des services qu'ils fournissent est de les protéger au moyen d'aires marines protégées (AMP). Face à au changement global et à l'accélération de la perte de biodiversité, il est impératif d'accentuer les efforts de connaissance et de sauvegarde de la nature et particulièrement du milieu marin.

L'union internationale pour la conservation de la nature (UICN), définit les aires protégées comme des espaces géographiques clairement définis, reconnus, consacrés et gérés, par tout moyen efficace, juridique ou autre, afin d'assurer à long terme la conservation de la nature ainsi que les services écosystémiques et les valeurs culturelles qui leur sont associées ». Cette définition assez large regroupe un large panel de réalités différentes : sept catégories d'aires protégées ont ainsi été définies

selon les restrictions et/ou plans de gestion mis en place (IUCN 2020). La mise en œuvre et la gestion d'AMPs doit encore être améliorée puisque les objectifs d'une protection de 10% des océans en 2020 préconisés par la convention sur la diversité biologique de 1992 n'ont pas été atteints (Carr et al. 2020).

Hors des zones protégées, pour rendre ses fonctions à un écosystème dégradé, des actions de restauration écologique sont mises en place, La restauration écologique consiste à, après avoir identifié et neutralisé (arrêté ou réduit au maximum) la/les perturbation(s) présente(s), remettre un écosystème dégradé, endommagé ou détruit de retrouver dans le même état qu'un état de référence ou au moins d'y tendre. L'état de référence peut être l'état de l'écosystème avant perturbation mais ce n'est pas toujours le cas (Figure 1). La finalité réelle de la restauration écologique est de permettre le rétablissement des fonctions et des services écosystémiques perdus ou dégradés. Par exemple les BioHuts, en fournissant des habitats pour juvéniles (majoritairement de poissons et crustacés), permettent de restaurer la fonction de nurserie des baies/côtes protégées transformées en zones portuaires (Lecaillon et al. 2011). La restauration peut être ciblée sur une plusieurs espèces (e.g. *Posidonia oceanica*, *Diplodus sargus*, récifs coralligène) ou sur une fonction particulière (e.g. fonction de nurserie, stock de poisson disponible pour la pêche, site de plongée sous-marine) de l'écosystème (Keenleyside et al. 2013). La restauration écologique prend ainsi différentes formes : l'immersion de récifs artificiels, la transplantation d'espèces, la mise en place d'habitats spécifiques à un stade de vie ou encore la réintroduction d'espèces. En milieu marin, ce concept, même s'il a pris de l'ampleur ces dix dernières années, particulièrement en Méditerranée française mais aussi ailleurs, en est à ses débuts. De nombreux projets mettant en œuvre des techniques différentes sont encore

en expérimentation (e.g. programme TRANSCOR, (Estaque 2021), différents designs de récifs artificiels dont ceux du programme “RECIF’LAB - Seaboost” n.d.) et ce parce que les contraintes et caractéristiques biologiques, écologiques, morphologiques et hydrologiques spécifiques à chaque écosystème doivent être prises en compte pour qu’une action de restauration soit pleinement efficace.

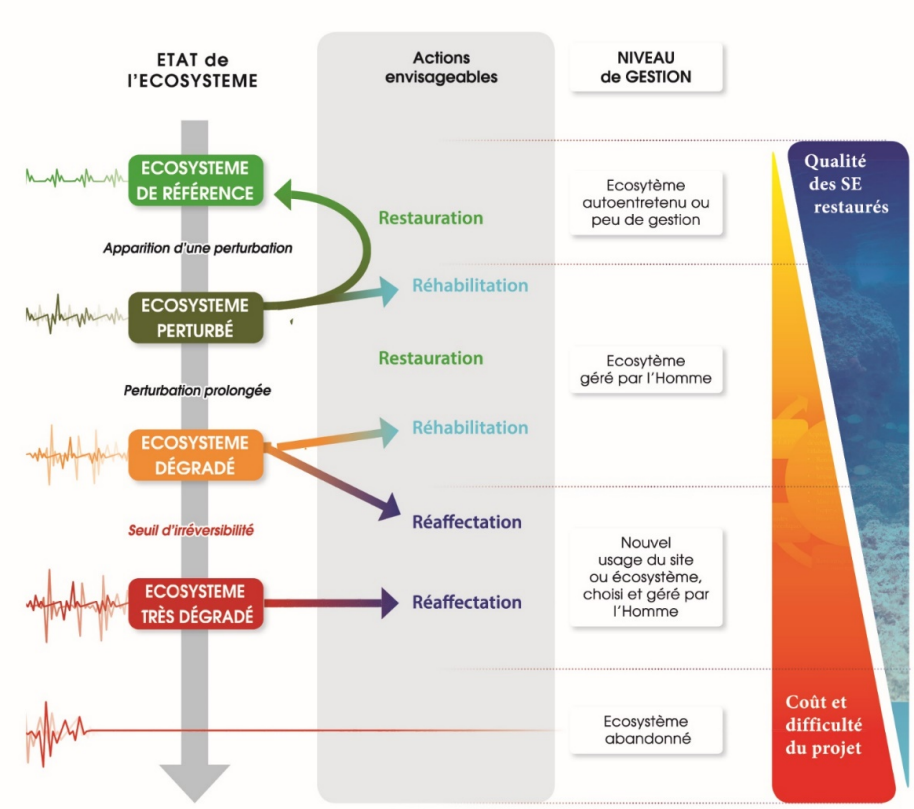


Figure 1 : Schéma récapitulatif des actions de restauration envisageables selon l'état de perturbation de l'écosystème. Chaque cas est associé à un niveau de gestion adapté. Plus l'écosystème est dégradé plus les services écosystémiques qu'il est capable de produire sont réduits et plus le cout et la difficulté de réalisation de l’action de restauration à mener seront importants. Source : Philippe Lenfant.

De nombreux organismes marins ont une croissance lente à l’instar des espèces constitutive du coralligène qui ne grandissent que de quelques centimètres

par an ((Ballesteros 2006). Ce taux de croissance très lent affecte la résilience des écosystèmes marins et peut ainsi, même si la perturbation initiale est terminée et que des mesures de protection efficaces sont appliquées, empêcher la restauration naturelle de l'écosystème. C'est le cas par exemple de l'herbier à Posidonie (*Posidonia oceanica*) qui est principalement menacé par l'ancrage (Holon et al. 2015).

Lorsqu'il s'agit de gérer une AMP, les dégradations antérieures à sa mise en place, le temps de résilience possiblement long des écosystème marins ainsi que les pressions anthropiques extérieures rendent nécessaire la mise en place d'actions complémentaires pour remplir ses objectifs de protection et *in fine* assurer le bon fonctionnement de l'écosystème. Ainsi plutôt que d'opposer protection d'écosystèmes intacts et restauration d'écosystèmes dégradés, ce qui est fréquent lorsqu'il est question de gestion du milieu marin (Bouchoucha n.d.), la restauration écologique peut s'inscrire dans le processus de gestion d'une AMP. Cela a déjà été fait à plusieurs reprises et nous allons nous appuyer sur trois exemples concrets pour identifier ce qu'une action de restauration écologique menée au sein d'une AMP peut apporter à celle-ci. Les exemples que nous utiliserons concernent différents types de restauration écologique et ont été menés dans des AMP de catégories différentes.

Cas d'étude

Cas 1 : Récifs d'huîtres

Le premier cas de restauration écologique au sein d'une AMP auquel nous allons nous intéresser est celui des récifs d'huîtres (*Crassostrea virginica*) de la baie de Pamlico en Caroline du Nord, USA (Figure 2, Peters et al. 2017). Dans cette étude

trois types de récifs d'huîtres sont comparés : des récifs naturels soumis à la pression de pêche, des récifs restaurés soumis à la pression de pêche et des récifs restaurés en réserve intégrale ou aucune pêche n'est autorisée (Puckett and Eggleston 2012).

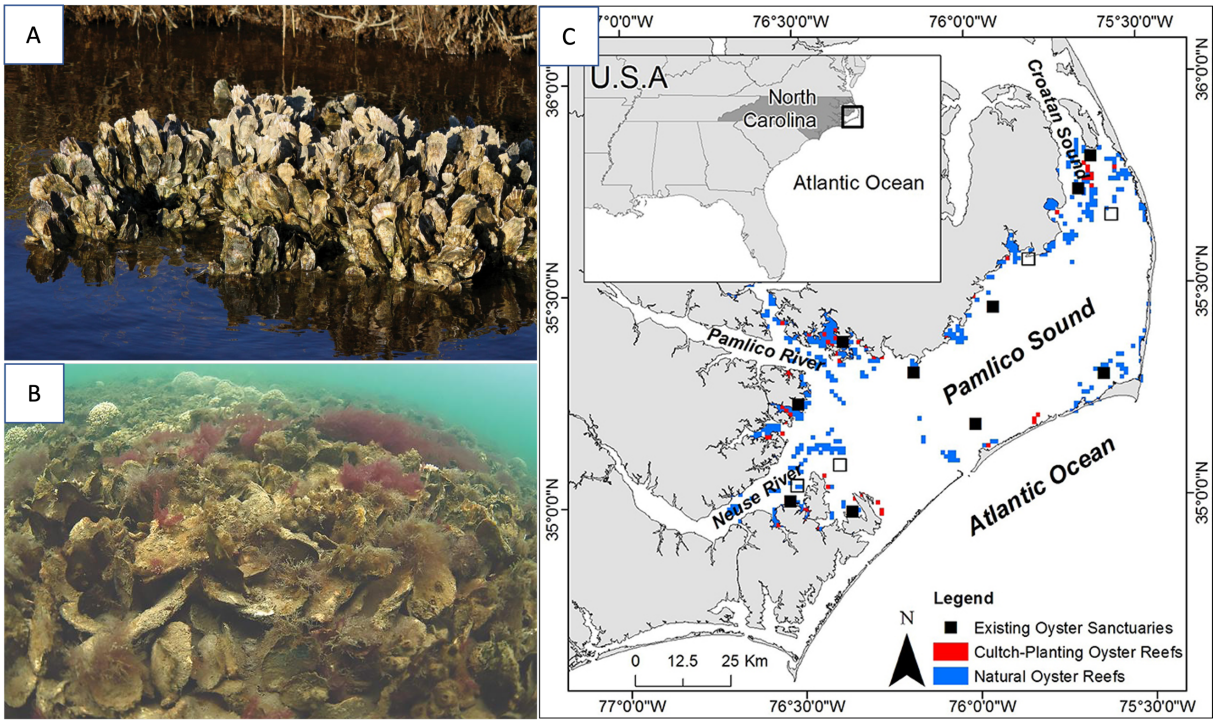


Figure 2 : A – Illustration d'un récif d'huitres affleurant à la surface en Caroline du nord. Source https://ncoysters.org/oysters/ B – illustration d'un récif d'huitres. Source NOOA Fisheries. C – Localisation de la zone d'étude. Les carrés noirs représentent les zones de non-prélèvement, les points rouges les récifs d'huitres restaurés et les points bleus représentent les récifs naturels. Source Peters et al., 2017

La restauration des récifs consiste à recréer un substrat où les huîtres puissent se fixer. Ces récifs artificiels sont constitués d'un mélange de coquilles (huîtres et autres bivalves), de béton et de calcaire. D'une part, entre 1996 et 2008 la North Carolina Division of Marine Fisheries (NCDMF) a restauré 10 récifs d'huîtres dans des zones de non-prélèvement. D'autre part la NCDMF restaure chaque année des récifs d'huîtres destinés à être pêchés. Chaque récif a une durée de vie d'entre cinq et sept

ans. L'objectif de l'étude de Peters et al. (2017) est d'évaluer les bénéfices de la restauration et de la protection contre la pêche sur la démographie des huîtres dans cette zone.

Cette étude montre que sur les récifs restaurés pêchés, la densité de population et le taux de reproduction des huîtres est plus important que sur les récifs naturels pêchés. De plus, les récifs restaurés et protégés, malgré leur couverture spatiale plus réduite, présentent la plus forte densité de population, le plus fort taux de reproduction et donc de production de larves.

Les auteurs concluent que la combinaison de la restauration des récifs d'huîtres et leur protection est indéniablement favorable à la reproduction et la production de larves qui pourront être recrutées sur les récifs alentour protégés ou non. Ils nuancent leurs propos en disant que de grandes surfaces de récifs restaurés et pêchés pourraient avoir un impact aussi important que des surfaces limitées de récifs restaurés et protégés.

Cas 2 : Invasion de *Sargassum horneri*

Pour le deuxième cas, nous allons nous appuyer sur l'article de Caselle et al. (2018) qui s'est intéressé à l'installation, ou non, de l'algue invasive *Sargassum horneri* autour de l'île d'Anacapa en Californie. Caselle et al. (2018) ont évalué la densité et la biomasse de *S. horneri* à plusieurs endroits autour de l'ile d'Anacapa : dans deux zones de non-prélèvement instaurées respectivement depuis 1978 (old SMR) et 2003 (new SMR), dans une zone règlementée ou la pêche récréative est autorisée (SMCA) et dans une zone de référence non protégée au sud de l'île (Figure 3).

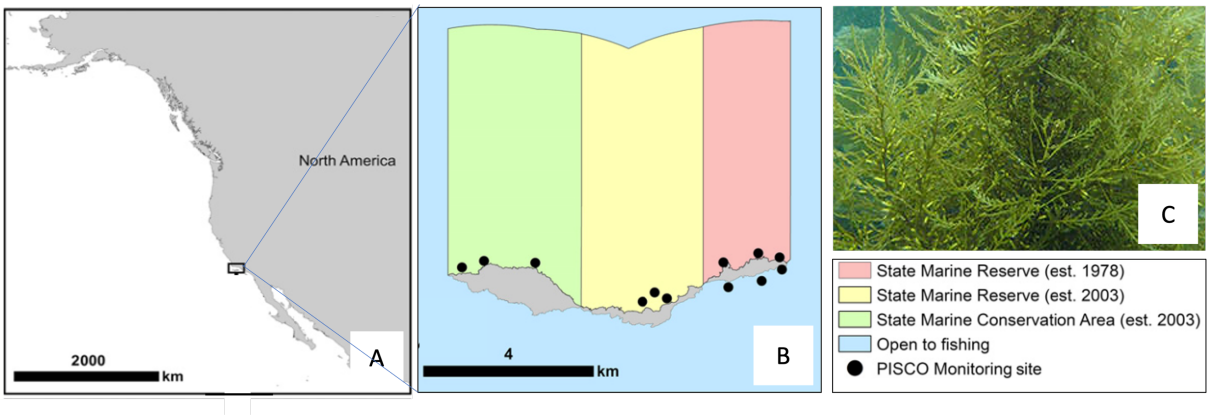


Figure 3 : A et B Localisation de la zone d'étude de Caselle et al., 2017. La zone rose est la zone de non-prélèvement instaurée en 1978, dite « old SMR », la zone jaune est la zone de non-prélèvement instaurée en 2003, dite « new SMR », la zone verte est la zone règlementée, dite « SMCA », la zone bleue n'est pas protégée ni règlementée. Les sites d'étude sont symbolisés par les points noirs. C – illustration de l'espèce Sargassum horneri, invasive en Californie.

Les mesures ont été faites une première fois avant l'invasion en 2010-2013 et une seconde fois, après que l'abondance de *S. horneri* ait augmenté en 2014-2016. La densité et la biomasse d'algues endémiques concurrentes, d'oursins et de leurs prédateurs ont également été mesurées. Un résumé des densités et abondances est présenté dans le Tableau 1.

La répartition spatiale observée de l'espèce invasive *S. horneri* ne suit pas les niveaux de protection. En effet, la résistance à l'invasion de *S. horneri* (i.e. cases les plus claires de la dernière ligne du Tableau 1) est observé dans deux cas distincts et répond donc à deux mécanismes différents. Dans un premier cas, celui de la zone « old SMR », la forêt de kelp (i.e. algues natives rouges et brunes érigées) est bien développée, les prédateurs des oursins présents en grand nombre.

Tableau 1 : Représentation de la biomasse et/ou de la densité des espèces prises en compte dans l'étude de Caselle et al., 2017. Plus la couleur d'une case est foncée plus la/les espèces de la ligne sont présentes dans les sites de la colonne. Ainsi les prédateurs d'oursins sont très présents sur les sites de la zone « old SMR » (i.e. la zone de non-prélèvement instaurée en 2003) et très peu sur ceux de référence.

	Old SMR	New SMR	SMCA	Sites de référence
Prédateurs d'oursins (labres californiens et langoustes)				
Oursins				
Algues natives rouges et brunes érigées				
Algues corallines encroutântes				
S. horneri				

L'invasion de *S. horneri* a été empêchée par la compétition avec l'espèce déjà en place pour la place et la lumière. Le deuxième cas où *S. horneri* n'a pas pu s'installer est celui des zones de référence ou les prédateurs des oursins sont pêchés et la densité des brouteurs plus importante qu'ailleurs. Dans les cas des zones « new SMR » et « SMCA » ou la densité d'oursins et d'algues natives sont toutes deux intermédiaires, ni la pression de broutage ni la compétition inter-espèces pour les mêmes ressources n'ont été suffisante pour empêcher *S. horneri* de s'installer.

Cas 3 : Passer de barren ground à des forêts de macroalgues

Le troisième cas de restauration au sein d'une AMP est celui de la restauration de *Treptacantha elegans* (une algue brune) dans et à proximité du parc naturel du Montgrì, des Iles Medes et de Baix Ter (MIMBT) en Espagne (Medrano et al. 2020).

Dans cette étude, l'objectif était de mesurer l'efficacité d'une re-végétalisation de *T. elegans,* une cystoseire endémique de Méditerranée qui peut former des forêts entre la surface et la zone circalittorale*,* à l'intérieur et à l'extérieur du cœur du parc. Le cœur de parc est une zone de non-prélèvement : toutes les activités de pêche y sont interdites et l'abondance des prédateurs d'oursins y est plus importante qu'en dehors. *T. elegans* est présente dans et hors de la zone de non-prélèvement du MIMBT. L'autre écosystème prédominant dans le MIMBT est le « barren ground », des zones où la pression de broutage par les oursins ne permet plus aux macroalgues de reconstituer les forêts. Pour passer des barren grounds, peu productifs ni structurés aux forêts de *T. elegans* plus productives et diversifiées. Medrano et al. (2020) ont travaillé sur 10 sites du MIMBT : 5 sites à l'intérieur de la zone de non-prélèvement et 5 en dehors (Figure 4). Dans la réserve une restauration active en deux étapes et combinée à la protection (appelée dans cette étude « restauration passive ») : d'abord l'éradication manuelle des oursins par des plongeurs puis la re-végétalisation. La re-végétalisation consiste à réintroduire des graines de *T.elegans* et à favoriser le recrutement de ces graines avec des supports adaptés. Plusieurs techniques ont été expérimentés préalablement par Medrano et al. (2020). Les populations d'oursins et de macroalgues ont été mesurées sur chaque site une première fois avant intervention puis une deuxième fois un an après.

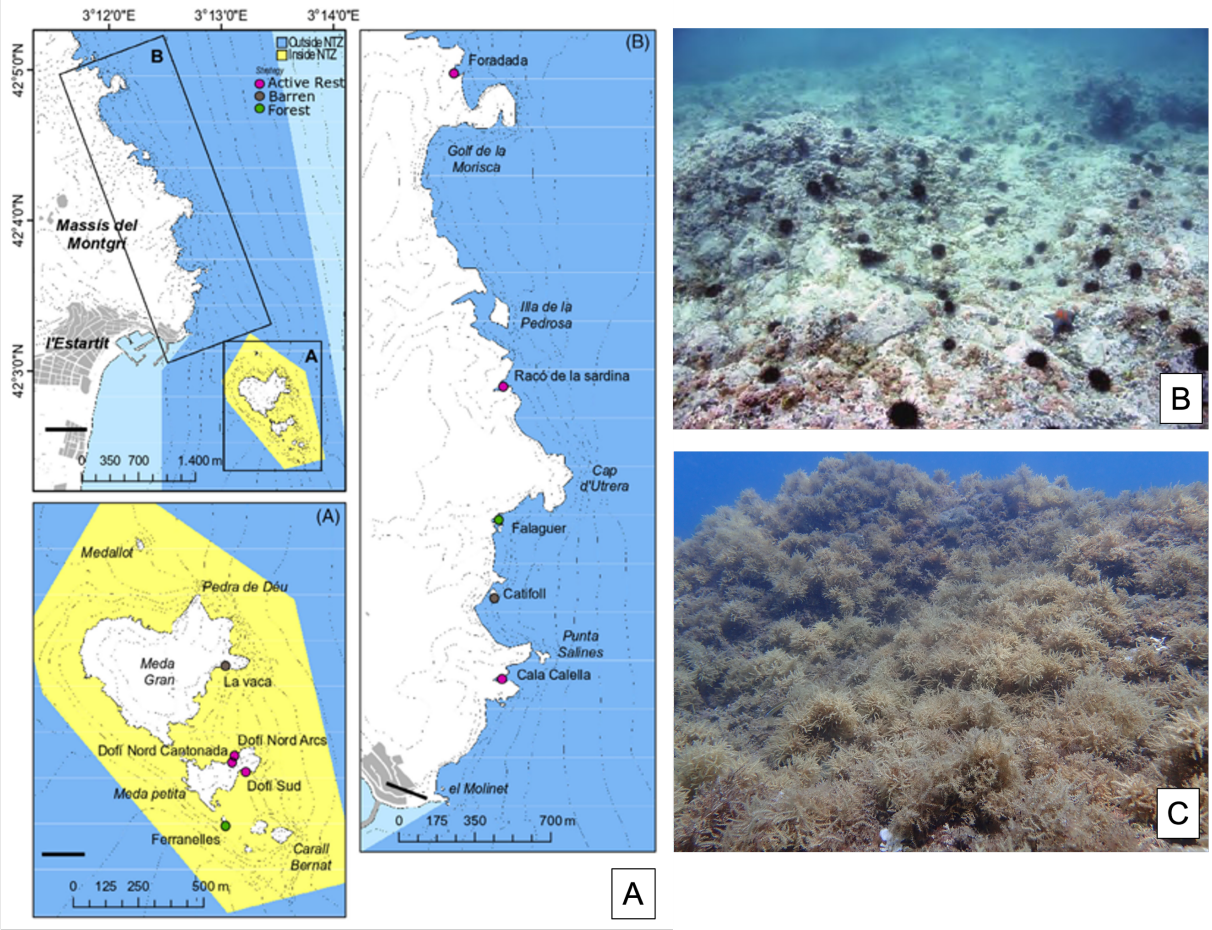


Figure 4 : A – Localisation des 10 sites d'étude. 5 sont dans le cœur du parc naturel de Montgrì, Iles Medes et Baix Ter (A), et 5 en dehors (B). A chaque fois, 3 sites sont des barren grounds à re-végétaliser, un site est un barren ground de référence et un site est une forêt de *Treptacantha elegans* de référence. B – Photo d'un barren ground dominé par des oursins prise par Kazuhiro Takahashi. C – Photo d'une forêt de T. elegans prise par Alba Medrano.

L'éradication active des oursins a fonctionnée hors et dans la zone de non-prélèvement. En effet, un an après l'intervention, les oursins sont moins abondants qu'avant l'intervention et ceux présents sont de taille plus réduite. Les auteurs en concluent que la prédation par les poissons n'est pas suffisante pour contrôler les populations d'oursins. Pour une densité d'oursins similaire, la re-végétalisation a eu plus de succès (i.e. densité de recouvrement, nombre d'individus, longueur maximale)

à l'intérieur de la zone de non-prélèvement qu'en dehors, ce qui implique un effet non négligeable du statut de protection sur la réussite de la restauration.

Discussion

Chacune des trois études détaillées précédemment et résumées en Tableau 2, possède ses propres limitations mais toutes donnent des pistes différentes sur les bénéfices d'actions de restauration au sein d'aires marines protégées. Elles sont à dessein dans des zones géographiques différentes et indépendantes les unes des autres.

La première étude présentée ici, celle de Peters et al., 2017, compare les populations d'huitres sur des récifs naturels soumis à la pression de pêche, des récifs artificiels soumis à la pression de pêche et des récifs artificiels non soumis à la pression de pêche i.e. en zone de non-prélèvement. Ce dispositif permet d'évaluer l'effet de la restauration seul et l'effet de la restauration combinée à la protection mais pas celui de la protection seule sur la dynamique de population des huitres. Néanmoins cette étude permet d'évaluer l'apport de la restauration écologique au sein d'AMPs En effet, ce sont les récifs restaurés et protégés qui montrent la densité d'huîtres, le taux de reproduction ainsi que le taux de production de larves les plus élevées. L'action de restauration au sein de cette réserve va donc permettre le recrutement d'huitres juvéniles aux alentours et contribuer au peuplement des récifs hors de la zone de non-prélèvement (i.e. par effet de *spillover*) et *in fine* profiter à l'activité de pêche. Dans l'étude de Caselle et al., 2018, deux situations ont permis d'empêcher l'établissement de l'algue invasive *Sargassum horneri* : (i) un milieu

dégradé dominé par les oursins et (ii) une forêt de kelp endémique en bonne santé et protégée depuis plusieurs décennies hébergeant des espèces qui participent à son maintien (e.g. labres californiens et langoustes prédateurs d'oursins).

Dans le cas d'une aire protégée plus récente, la forêt de kelp n'était pas assez en bon état pour rivaliser avec l'espèce invasive. *S. horneri* a en effet un taux de croissance extrêmement haut : 10% par jour (Jouanno et al. 2021) alors que *Macrocystis pyrifera*, la kelp géante, une des espèces endémiques de Caroline du Nord qui fait pourtant partie des espèces qui grandissent le plus vite au monde a un taux de croissance de 0.22% par jour (Jackson 1987). Ainsi, dans une aire marine protégée récemment mise en place qui comporte un herbier ou une forêt dégradée, en plus des mesures de gestion par exemple sur la pollution, la pêche ou la plaisance, une action de restauration pourra permettre de prévenir l'invasion par une espèce allochtone. En effet, Plusieurs techniques de repiquage ou de transplantation de végétaux marins ont déjà été expérimentés et validés par de précédents travaux (e.g. programme REPIC d'Andromède Océanologie pour *Posidonia oceanica,* Orth et al. (2020) pour *Zostera marina*). Néanmoins il parait encore plus judicieux d'agir en amont pour ne pas introduire de telles espèces invasives.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des trois cas d'étude : les types d'action de restauration dont il est question, les espèces ou les fonctions ciblées, la localisation de l'étude et le contexte de protection.

Cas	Référence	Type d'action	Espèce ou fonction visée	Localisation	Aire Marine Protégée
1	Peter et al., 2017	Support d'installation artificiels	Huitres (*Crassostrea virginica*)	Caroline du Nord, USA	Comparaison entre des récifs naturels non protégés, des récifs artificiels non protégés et des récifs artificiels protégés
2	Caselle et al., 2018	aucune	Empêcher l'installation de l'algue invasive *Sargassum horneri*	ile d'Anacap, Californie, USA	Comparaison de sites non protégés, protégés par une zone règlementée récente, une zone de non-prélèvement récente et une zone de non-prélèvement plus ancienne
3	Medrano et al., 2020	Éradication d'oursins et favorisation du recrutement de *Treptacantha elegans*	Évolution de barren ground en forêt de macroalgues	Parc naturel du Montgrì, des Iles Medes et de Baix Ter, Espagne	Comparaison des mêmes actions menées dans le cœur du parc MIMBT, zone de non-prélèvement et hors de cette zone

La troisième étude, celle de Medrano et al. (2020) fait aussi appel aux techniques de re-végétalisation mais pour atteindre un autre objectif : celui de remplacer des barren grounds par des forêts de cystoseire. Il n'est pas précisé dans l'article si les barren grounds où les actions de restauration sont menées était auparavant occupés par des macroalgues. Cependant, si aucun suivi scientifique n'a été réalisé, il est parfois difficile voire impossible de trouver ce type d'informations dans la littérature grise ou la mémoire collective. Comme des forêts de taille réduite sont présentes à proximité, on peut supposer comme l'ont fait Medrano2020, que les barren grounds résultent d'une dégradation des forêts de cystoseire, très probablement à cause du broutage par les oursins. La méthodologie mise en œuvre peut être découpée en deux actions de restauration active : d'abord l'éradication d'une espèce puis la réintroduction d'une autre. Dans le cas présent, l'efficacité de l'éradication est discutable puisque l'année suivante les oursins sont à nouveau présents. Néanmoins, elle a permis le succès de la réintroduction de *T. elegans*. Cette action de restauration permet, au bout d'un certain temps, que l'écosystème retrouve l'équilibre qu'il avait perdu et qu'il remplisse, par exemple, à nouveau la fonction d'habitat pour les poissons. La re-végétalisation peut également permettre de rétablir ou d'améliorer la connectivité au sein de l'AMP ou entre l'AMP et l'extérieur (e.g. patches de *P. oceanica* séparés par des zones de mate morte).

Conclusion

Ce travail de synthèse a permis de mettre en évidence certains des effets bénéfiques que peuvent avoir des actions de restauration écologique pour les aires

marines protégées où elles sont menées. Ainsi, il peut être envisageable de restaurer activement certaines parties d'une AMP plutôt que de compter sur la résilience seule de l'écosystème. Cela peut permettre d'améliorer la résistance aux perturbations (mesure de protection supplémentaire), d'améliorer la connectivité et d'intensifier l'effet réserve. En plus de participer aux objectifs de protection du milieu, la restauration écologique peut renforcer les services écosystémiques de production, de divertissement et d'expérience esthétique, contribuant *in fine* à l'acceptabilité de l'aire marine protégée.

Bibliographie

Ballesteros, E. 2006. Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge. Oceanography and Marine Biology 44:123–195.

Bouchoucha, M. (n.d.). RESTAURATION ÉCOLOGIQUE : ENGAGER LES PROCHAINES ANNÉES SOUS LE SIGNE D'UNE ÉVALUATION RIGOUREUSE DE L'EFFICACITÉ DES OPÉRATIONS RESTAURATION ÉCOLOGIQUE, QUELQUES DÉFINITIONS 2.2.

Carr, H., M. Abas, L. Boutahar, O. N. Caretti, W. Y. Chan, A. S. A. Chapman, S. N. De Mendonça, A. Engleman, F. Ferrario, K. R. Simmons, J. Verdura, and A. Zivian. 2020. The Aichi Biodiversity Targets: Achievements for marine conservation and priorities beyond 2020. PeerJ 8:e9743.

Caselle, J. E., K. Davis, and L. M. Marks. 2018. Marine management affects the invasion success of a non-native species in a temperate reef system in California, USA. Ecology Letters 21:43–53.

Estaque, T. 2021. Étude de la survie de transplants de Corallium rubrum et de Paramuricea clavata dans le cadre d'un programme expérimental de transplantation sur sites naturels (projet TRANSCOR).

Halpern, B. S., S. Walbridge, K. A. Selkoe, C. V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J. F. Bruno, K. S. Casey, C. Ebert, H. E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H. S. Lenihan, E. M. P. Madin, M. T. Perry, E. R. Selig, M. Spalding, R. Steneck, and R. Watson. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. Science 319:948–952.

Holon, F., N. Mouquet, P. Boissery, M. Bouchoucha, G. Delaruelle, A. S. Tribot, and J.

Deter. 2015. Fine-scale cartography of human impacts along French Mediterranean coasts: A relevant map for the management of marine ecosystems. PLoS ONE 10:e0135473.

IPBES. 2019. Nature's dangerous decline unprecedented; species extinction rates accelerating. https://www.ipbes.net/event/ipbes-7-plenary.

IUCN. 2020. Protected Area Categories | IUCN. https://www.iucn.org/theme/protected-areas/about/protected-area-categories.

Jackson, G. A. 1987. Modelling the growth and harvest yield of the giant kelp Macrocystis pyrifera. Marine Biology 95:611–624.

Jouanno, J., R. Benshila, L. Berline, A. Soulié, M. H. Radenac, G. Morvan, J. Sheinbaum, C. Chevalier, T. Thibaut, T. Changeux, F. Menard, S. Berthet, O. Aumont, C. Ethé, P. Nabat, and M. Mallet. 2021. A NEMO-based model of Sargassum distribution in the tropical Atlantic: Description of the model and sensitivity analysis (NEMO-Sarg1.0). Geoscientific Model Development 14:4069–4086.

Keenleyside, K., N. Dudley, S. Cairns, C. Hall, and S. Stolton. 2013. Ecological restoration for protected areas: Principles, guidelines and best practices. Page Best Practice Protected Area Guidelines Series. Gland, Switzerland.

Lecaillon, G., E. Blin, P. Lenfant, M. Murenu, F. Felix-Hackradt, Garcia-Charton, and José. 2011. Des solutions opérationnelles et innovantes de restauration des populations de poissons marins côtiers associés à des aménagements littoraux. Pages 65–70 Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime EDITION. TANGER, MAROC.

Legendre, L., R. B. Rivkin, M. G. Weinbauer, L. Guidi, and J. Uitz. 2015. The microbial

carbon pump concept: Potential biogeochemical significance in the globally changing ocean. Progress in Oceanography 134:432–450.

Medrano, A., B. Hereu, M. Cleminson, M. Pagès-Escolà, G. Rovira, J. Solà, and C. Linares. 2020. From marine deserts to algal beds: Treptacantha elegans revegetation to reverse stable degraded ecosystems inside and outside a No-Take marine reserve. Restoration Ecology 28:632–644.

Orth, R. J., J. S. Lefcheck, K. S. McGlathery, L. Aoki, M. W. Luckenbach, K. A. Moore, M. P. J. Oreska, R. Snyder, D. J. Wilcox, and B. Lusk. 2020. Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services. Science Advances 6.

Peters, J. W., D. B. Eggleston, B. J. Puckett, and S. J. Theuerkauf. 2017. Oyster demographics in harvested reefs vs. No-Take reserves: Implications for larval spillover and restoration success. Frontiers in Marine Science 4.

Puckett, B. J., and D. B. Eggleston. 2012. Oyster Demographics in a Network of No-Take Reserves: Recruitment, Growth, Survival, and Density Dependence. Marine and Coastal Fisheries 4:605–627.

RECIF'LAB - Seaboost. (n.d.). . https://www.seaboost.fr/projet/reciflab/.

Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, and C. Ludwig. 2015, April 16. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. SAGE PublicationsSage UK: London, England.

Annexe 14

Utiliser le port pour coupler éducation et restauration des petits fonds marins côtiers

Par Philippe MANON

Philippe MANON
Maître de port principal
Responsable environnement
et évènementiel

SEM de Gestion de Le port de Fréjus
Capitainerie
55 Passage des Caryatides
83606 Fréjus CEDEX

Tél. : 04 94 82 63 02
Gsm : 06 51 60 07 23

Courriel :
philippe.manon@portfrejus.fr

Site Web :
www.portfrejus.fr/sentiers/

Faculté des sciences de
l'université de Montpellier

Diplôme d'université (DU) « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Utiliser le port pour coupler éducation et restauration des petits fonds côtiers

Rapport de Philippe MANON

Tuteur : Gilles LECAILLON

2022

REMERCIEMENTS

A NOS PARTENAIRES POUR LEUR AIDE POUR LA REALISATION DE NOTRE PROGRAMME DE « RESTAURATION ECOLOGIQUE ET EDUCATION DES GENERATIONS FUTURES » MISE EN PLACE PAR LA SEM DE PORT-FREJUS

Merci à ECOCEAN

Cette société travaille depuis plus de 19 ans sur le stade post-larvaire des poissons. Ecocean propose différentes solutions dédiées à la préservation des jeunes stades de vie des poissons, dont les habitats Biohut spécifiquement conçus pour les infrastructures portuaires (quai, ponton, digue etc…).
Gilles LECAILLON est Directeur d'Ecocean et également mon tuteur sur ce mémoire. Merci pour son aide précieuse et pleine de bon sens.

Nos remerciements les plus sincères à Sabrina Palmieri, responsable de la communication et en charge du programme éducation d'ECOCEAN, pour sa gentillesse, son investissement et son aide précieuse dans notre démarche d'investigation.

Merci à PLANETE NUDGE

1er cabinet de conseil en France spécialisé dans les Green Nudges (Nudges Verts), Planète nudge propose une expertise forte sur les changements de comportements environnementaux autour des thématiques des déchets, de l'éco-tourisme, des économies d'énergies et de la préservation de la biodiversité. Cette société a été fondé par Sébastien MÉRIGOUT qui a réalisé un excellent travail sur le Sentier du Mérou terrestre.

Merci à L'UPACA

L'Union des Ports de Plaisance Provence Alpes Côte d'Azur et Monaco, est la représentation, dans notre Région, des gestionnaires de port de plaisance auprès de l'État, des collectivités territoriales et des diverses institutions. Regroupant 95% des ports de plaisance de la région et les ports de la principauté de Monaco, l'Upaca fédère les ports à gestion publique et à gestion privée et leur apporte des conseils, de l'assistance technique et juridique dans tous les domaines relatifs à la gestion portuaire; collabore au développement économique, touristique et social de la région sud et de la principauté de Monaco, dans le domaine portuaire et nautique; participe à la mise en place de tous programmes et actions concernant l'amélioration, l'extension des installations et la protection de l'environnement.

Merci à NOS AUTRES PARTENAIRES :

ESTEREL COTE D'AZUR AGGLO, ECOLE DES GOBELINS, ÉDUCATION NATIONALE, SMIDDEV, ADEE, L'AMICALE DES PECHEURS PLAISANCIERS DE PORT-FREJUS, ÉCOTANK, FRANCE STATION NAUTIQUE FREJUS, OFFICE DU TOURISME DE FREJUS et toutes les autres structures qui nous ont aidés sur nos différentes actions environnementales.

REMERCIEMENT SPECIAL : *J'adresse tout particulièrement mes remerciements à mon directeur, Glenn Fauchon, qui a su me faire confiance dans notre démarche d'éducation à l'environnement. Par la création d'outils de sensibilisation innovants dont il a été l'instigateur, Port-Fréjus est devenu un port tourné vers l'avenir et fort d'une empreinte environnementale ambitieuse tout particulièrement grâce à la création « des Sentiers du Mérou ». Je ne doute pas que Port-Fréjus, sous sa direction, aura le plus bel avenir éco-responsable.*

RÉSUMÉ

Une démarche **ÉCO-CITOYENNE** couplée à un objectif de **RESTAURATION ÉCOLOGIQUE**

Les ports sont des lieux idéaux pour sensibiliser les publics à la protection des écosystèmes marins et montrer qu'ils ne sont pas seulement des parkings à bateau. Ils constituent en effet un écosystème à part entière et une source de biodiversité qu'il faut préserver.

Le port de Fréjus a une démarche novatrice dans ce sens et en est un précurseur dans ce domaine en installant des nurseries artificielles « Biohut » ainsi qu'un sentier sous-marin artificiel aux fonctions de corridor écologique dans un programme de restauration des fonds marins du port pour dynamiser la biodiversité marine portuaire.

La capitainerie complète cet aménagement en mettant en place un programme d'éducation à l'environnement ambitieux destiné à sensibiliser les scolaires et le public au respect du milieu marin. Depuis les quais ou la plage, ces abris « Biohut » invitent le passant à s'interroger sur la présence de la vie sous-marine. Ainsi écoliers, promeneurs, plaisanciers, pêcheurs et autres usagers découvrent, que les marinas abritent les juvéniles de nombreuses espèces qui, avant de rejoindre le large, doivent grandir dans des eaux sûres.

Nos enfants sont l'avenir de la planète. Pour qu'ils apprennent à l'aimer et à la protéger, il est primordial de leur inculquer ces bonnes valeurs que sont le respect de la nature et la compréhension du monde qui les entoure. C'est dans ce but que nous avons créé deux parcours pédagogiques, un terrestre constitué de modules de sensibilisation selon la théorie du Nudge abordant différentes thématiques comme la vie sous-marine, les déchets, l'équilibre de la biodiversité, l'oxygène, la surpêche… et un second, le « Biohut trail », un sentier sous la mer artificiel devant la digue extérieure du port qui se visitera en nageant en surface muni d'un masque, d'un tuba et de palmes.

Ainsi, le dispositif d'éducation mis en place par la capitainerie autour de son projet de nurserie artificielle est vraiment exhaustif et permet de toucher les scolaires et le tout public sur le rôle et l'importance des fonds côtiers dans l'écosystème marin.

Sensibilisation d'une école primaire

SOMMAIRE DU RAPPORT

1. INTRODUCTION **1**

2. COMMENT ATTEINDRE CET OBJECTIF ? **1**

3. PRESENTATION DE PORT-FREJUS **2**

a. Historique du port *2*

b. 2000 ans plus tard … Le port de Fréjus *2*

c. La qualité environnementale : priorité de notre projet *2*

d. L'innovation au cœur de l'environnement *2*

4. NOTRE PROGRAMME DE RESTAURATION ECOLOGIQUE DES FONDS MARINS DU PORT **3**

a. Implantation de nurseries de poissons *3*

b. Création du Sentier sous la mer « Biohut trail » *8*

5. L'ECHO DU CACHALOT : NOTRE PROGRAMME D'ACTIONS EDUCATIVES **12**

a. Appel à projet « Nurseries de poissons » avec l'Education Nationale *12*

b. Mise en place d'une AME (Aire Marine Educative) sur le périmètre du port *13*

c. Création d'un outil d'éducation novateur : « Les sentiers du Mérou » *14*

d. La campagne estivale de sensibilisation des plaisanciers *19*

e. Les autres publics visés *20*

6. CONCLUSION **20**

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **21**

Utiliser le port pour coupler éducation et restauration des petits fonds côtiers

1. INTRODUCTION

« La restauration écologique est une action sur l'habitat marin, la faune ou la flore permettant d'améliorer l'état ou bien le fonctionnement écologique, dans une zone littorale ou portuaire où la qualité de l'eau est bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation ont disparu ou sont maitrisées. »

Pourquoi coupler la restauration écologique des petits fonds marins côtiers à la sensibilisation des scolaires au respect des milieux marins ?

Nos jeunes enfants seront sans nul doute la génération qui saura dynamiser en eux une attitude éco-citoyenne plus responsable de notre environnement. Restaurer écologiquement les sites portuaires ou côtiers est à mon avis insuffisant si nous ne restaurons pas les consciences de l'être humain. C'est pourquoi la sensibilisation de nos enfants et nos petits enfants est essentielle.

Si la jeune génération peut se reposer sur une actuelle prise de conscience collective qui permet de lui octroyer une éducation environnementale respectueuse à l'école ou dans les centres aérés, les générations précédentes comme la mienne n'ont pas reçu cette éducation. En effet, ni nos parents ni la société ne privilégiaient à l'époque l'écologie mais plutôt la surproduction ou la consommation. Nos générations n'ont pas su préserver la richesse de notre terre, de nos mers et de nos océans, laissant à la nouvelle génération un patrimoine naturel en souffrance.

Sommes-nous responsables de cette transmission ? Certainement, il ne faut pas se voiler la face. Pouvons-nous rectifier nos erreurs et restaurer la nature par notre changement de comportement et ainsi transmettre à nos enfants une planète en meilleure état ? Oui, je le crois et je l'espère mais c'est maintenant que nous devons œuvrer car le temps presse, en espérant qu'il ne soit pas trop tard...

La démarche de la capitainerie est de faire du port de Fréjus un lieu pédagogique accessible à tous les publics.

Faire passer le message de la préservation de notre environnement est notre priorité.

2. COMMENT ATTEINDRE CET OBJECTIF ?

Pour le réaliser, la Capitainerie de Port Fréjus a décidé de développer son projet selon 5 axes :

- ✓ Implantation de 56 nurseries de poissons « BIOHUT » dans le port pour protéger les post-larves et les jeunes poissons de la prédation.

- ✓ Mise en place d'un Programme d'éducation des scolaires en partenariat avec l'Education Nationale, mettant en valeur la richesse du milieu marin : l'opération « ECHO DU CACHALOT ».

- ✓ Création des « SENTIERS DU MEROU » sur les quais du port en août 2020, un des deux parcours pédagogiques sur la biodiversité marine selon la théorie innovante du Nudge pour inciter les visiteurs à un comportement éco-responsable. En 2021, 7 nouveaux modules ont été rajoutés.

- ✓ Création d'une Aire Marine Educative (AME) sur le périmètre de Port-Fréjus pour permettre à des élèves et leur enseignant de gérer de manière participative une zone maritime littorale de petite taille. Cette démarche pédagogique et éco-citoyenne a pour but de sensibiliser le jeune public à la protection du milieu marin mais également de découvrir ses acteurs.

- ✓ Installation du « BIOHUT TRAIL », un sentier sous-marin artificiel original le long de la digue Est du port destiné à faire découvrir au public la beauté de la faune et de la flore méditerranéenne et à renforcer la biodiversité marine portuaire et de la baie (inauguration prévue le 30 juin 2022). Ce projet est réalisé en continuité écologique avec la présence de « BIOHUT » au sein du port.

3. PRESENTATION DE PORT-FREJUS

a. Historique du port

Fréjus est le 1er port militaire construit par les Romains au 4ème siècle avant JC. C'est à Jules César que la cité doit son nom de *Forum Julii*. Malgré le temps et ses ravages, malgré l'ensablement et l'abandon, l'antique port est resté présent dans l'esprit des Fréjussiens comme s'il devait attendre son heure pour rendre un jour à la ville et ses habitants leur destin commun : la mer.

b. 2000 ans plus tard … Le port de Fréjus

Et c'est le 12 juillet 1989 que le port de Fréjus redonne à sa ville sa vocation maritime grâce à son maire de l'époque Monsieur François Léotard. Construit à l'intérieur des terres, aujourd'hui, le port de Fréjus est un port dynamique, convivial, résolument moderne tout en gardant sa couleur provençale.

c. La qualité environnementale : priorité de notre projet

Situé au pied du massif de l'Esterel entre Cannes et Saint-Tropez et au cœur du sanctuaire marin Pelagos, le port de Fréjus est une escale appréciée des plaisanciers et des visiteurs. Le port de Fréjus est la vitrine de la ville. Depuis sa création, la Capitainerie a toujours eu deux objectifs : la qualité d'accueil et la mise en place d'une démarche environnementale basée sur la protection du milieu marin et la sensibilisation des usagers du port.

Avec la richesse de ses lieux remarquables, de la Base Nature François Léotard, des étangs de Villepey, du site Natura 2000 de l'embouchure de l'Argens, la ville de Fréjus bénéficie d'une excellente qualité environnementale.

d. L'innovation au cœur de l'environnement

Le port de Fréjus est l'acteur principal de la dynamique nautique de la commune, le berceau des activités nautiques Fréjussien et un des garants des qualités environnementales de son littoral.

Labellisé Pavillon bleu depuis 1993, certifié Ports-Propres depuis 2012 et Ports-Propres actifs en biodiversité en 2018, lauréat du Grand Prix National de l'innovation à l'environnement France Station Nautique en 2019, le port de Fréjus est équipé de toutes les infrastructures nécessaires à la protection de l'environnement : points propres, blocs sanitaires répartis autour du bassin, collecte sélective (OM, emballage et verre) devant chaque ponton, maîtrise des énergies eau et électricité, chantier naval propre…).

Nous avons créé, il y a une quinzaine d'années, une opération de sensibilisation environnementale appelée « L'écho du cachalot » avec des outils essentiels comme la mise en place de sentiers pédagogiques de biodiversité marine, l'élaboration d'un programme d'éducation au développement durable ambitieux avec des scolaires, des personnes en situation de handicap, des plaisanciers et usagers du port. Cette orientation est sans nul doute une clé de voute pour contribuer efficacement à la sauvegarde du milieu marin.

Le port de Fréjus est géré pour le compte de la ville par la SEM de gestion du port de Fréjus, société d'économie mixte où j'occupe le poste de Maître de port principal responsable de l'environnement et de l'animation. Pour moi, Le port de Fréjus, c'est comme un frère avec qui j'ai grandi, que j'accompagne depuis plus de trente-trois ans. J'ai eu la joie de participer à son évolution et fier d'avoir posé avec la direction de ma société un cap résolument tourné vers l'excellence environnementale. Nous avons mis en place un axe fort pour transmettre des valeurs éco-citoyenne. Le personnel d'accueil et les agents portuaires de la capitainerie sont régulièrement formés dans ce sens grâce aux formations « Ports-Propres » de l'UPACA (Union des ports de plaisance de la région Provence Alpes Côte d'Azur et Monaco). Ils sont des interlocuteurs privilégiés auprès de nos plaisanciers.

Toutes ces initiatives sont le fruit d'un travail d'équipe avec les différents directeurs et notamment Glenn Fauchon, une personne visionnaire au grand cœur avec lequel nous partageons la même démarche environnementale. Nous avons un soutien total de la municipalité de Fréjus. Ainsi, tout devient facile et nous pouvons mettre en place des outils et des aménagements pour soutenir nos objectifs. A ma connaissance, une telle démarche portuaire éco-citoyenne de cette envergure n'a jamais été réalisée à ce jour en France et en Europe !

Le port de Fréjus est devenu une référence en France en matière d'environnement.

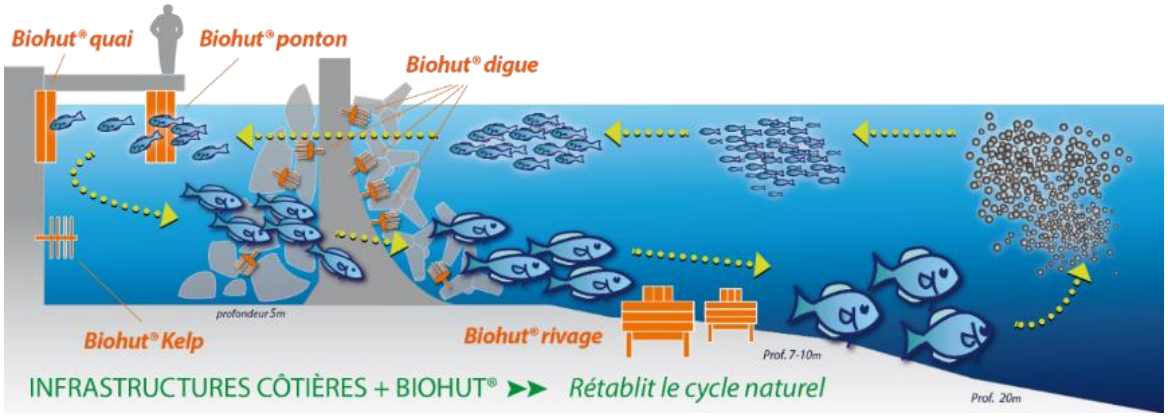
4. NOTRE PROGRAMME DE RESTAURATION ECOLOGIQUE DES FONDS MARINS DU PORT

a. Implantation de nurseries de poissons

La capitainerie, soucieuse d'améliorer la biodiversité marine du port, a fait le choix d'implanter dans le bassin portuaire des abris artificiels destinés à protéger les post-larves et les nouvelles recrues de la prédation.

LE CHOIX DU PRESTATAIRE : ECOCEAN :

Nous avons confié cette réalisation à Ecocean qui réalise des dispositifs de restauration écologique pour les ports de plaisance. Cette société travaille depuis une quinzaine d'années sur le stade larvaire des poissons et propose plusieurs solutions pour la préservation des jeunes stades de vie des poissons dont une très adaptée aux ports de plaisance : les nurseries « BIOHUT ».



L'ETAT DE L'ECOSYSTEME PORTUAIRE :

La faune marine est relativement abondante dans le port surtout en gros sujets avec la présence de loup, muge, dorade royale et commune, sar royal et commun, sparaillon, saupe, gobi, serran, blennie pendant une grande partie de l'année, et de liche, barracuda selon les périodes. On observe également des céphalopodes comme le poulpe, sèche et calamar. Etant donné la densité présente de gros poissons, les post larves et autres alevins sont rares et subsistent très peu. La flore est peu abondante mais bien ancrée sur les enrochements des deux digues. Des herbiers de cymodocées sont présents à l'entrée du port dans le prolongement de la digue Ouest. Le bassin portuaire est fréquenté toute l'année par de nombreuses espèces d'oiseaux et notamment les cormorans et les cygnes quasiment toute l'année, les goélands, sternes, mouettes, pigeons et étourneaux par milliers à partir de l'automne jusqu'au début du printemps ; une prédation supplémentaire sur les juvéniles. L'écosystème terrestre n'est pas significatif car Le port de Fréjus est un port entièrement urbanisé et plutôt minéral avec peu de végétation.

L'ETUDE DU SITE :

Le port de Fréjus a été construit à l'intérieur des terres sur une zone marécageuse. Le fond marin est un substrat meuble constitué de sable recouvert d'une fine pellicule de vase. Hormis les enrochements des deux digues d'entrée du port et le pourtour de l'îlot central également constitué de blocs rocheux, les caches pour les postes-larves sont rares.

Le port de Fréjus est un quartier très urbanisé sur l'ensemble du périmètre du port y compris sur le canal creusé sur une longueur de 800 mètres sur le site de l'ancien port romain « FORUM JULII ».

Un diagnostic avant étude a été réalisée par Ecocean pour localiser les pressions (repérage des exutoires d'eaux pluviales, concentration de macro déchets sur le plan d'eau et inspection de la zone d'avitaillement), présence d'éventuelle post-larves, distribution des habitats artificiels sur les quais, pontons, digue et îlot central.

UN SITE SOUS PRESSION(S) :

Les juvéniles subissent de fortes pressions anthropiques :

- Provenant du bassin versant par les déversements des réseaux pluviaux dans le port,
- Par des problèmes de pollutions d'eaux usées ou croupies provoquées par les réseaux d'assainissement défectueux ou non entretenus des nombreuses résidences ceinturant le port et par les bateaux amarrés suite au manque de civisme des plaisanciers (utilisation des toilettes du bateau au lieu d'un des 4 sanitaires du port),
- Par une force motrice estivale importante : les visiteurs, les usagers du port, les plaisanciers, les nombreux commerces sur le port, la pollution sonore liée aux animations musicales ou aux moteurs de bateaux, la présence d'un marché nocturne estival sur les places principales du port apportant régulièrement des déchets sur le bassin (sacs plastique, canettes, bouteilles de verre …),
- Par la prédation des nombreux gros sujets présents ne permettant pas aux post-larves de survivre dans un habitat inadapté car dépourvu de caches et de reliefs,
- Par des pollutions d'hydrocarbures ou de fluides provenant de la station d'avitaillement du chantier naval et des pompes de cale des bateaux,
- Par les activités nautiques et notamment certaines comme les scooters de mer mis à l'eau sur la cale du port.

Nous sommes donc en présence d'un écosystème artificiel perturbé. Pour retrouver un écosystème de référence, nous avons pris des décisions très importantes pour résorber ces pressions.

ACTIONS DE REDUCTION ACTIVE DES PRESSIONS :

En tant que référent environnement du port, je m'évertue de réduire au mieux ces pressions par des actions quotidiennes et une vigilance de tous les instants.

De nombreuses initiatives ont été mises en place par la direction du port comme l'obligation à tous plaisanciers à partir de 2022 d'équiper leurs bateaux d'une cuve de rétention à eaux noires. Un service gratuit de pompage financé par la Capitainerie et confié à la société Ecotank est à la disposition de notre clientèle.

Nous rencontrons très régulièrement les plaisanciers à bord de leurs bateaux pour les sensibiliser et les aider à adopter une attitude éco citoyenne respectueuse à quai (utilisation à bord de produits écolabel de nettoyage, d'entretien et de lutte anti-pollution comme des buvards absorbants d'hydrocarbure pour les cales de leurs bateaux).

Nous mettons une pression auprès des syndics des résidences par l'envoi de courrier exigeant un contrôle annuel de leurs canalisations et vides sanitaires par une entreprise spécialisée.

Nous procédons de juillet à septembre à des analyses d'eaux par un laboratoire spécialisé pour contrôler la qualité des eaux du port. Nos actions portent leurs fruits : elle est en général de bonne qualité.

Nous intervenons régulièrement auprès du gestionnaire du chantier naval pour le remettre « sur le bon chemin » quand sa méthode de travail n'est pas en accord avec notre démarche environnementale.

Nous exigeons des organisateurs du marché nocturne l'enlèvement systématique de tous les déchets après le départ des exposants.

LES BESOINS EN RESTAURATION ECOLOGIQUE :

Dans le port, pas d'abri, pas de cache, le sort des post-larves à leur arrivée à la côte est déjà scellé. La présence de nombreux prédateurs (loup, barracuda, dorade, serran…) ne donne aucune perspective de survie à ces jeunes recrues.

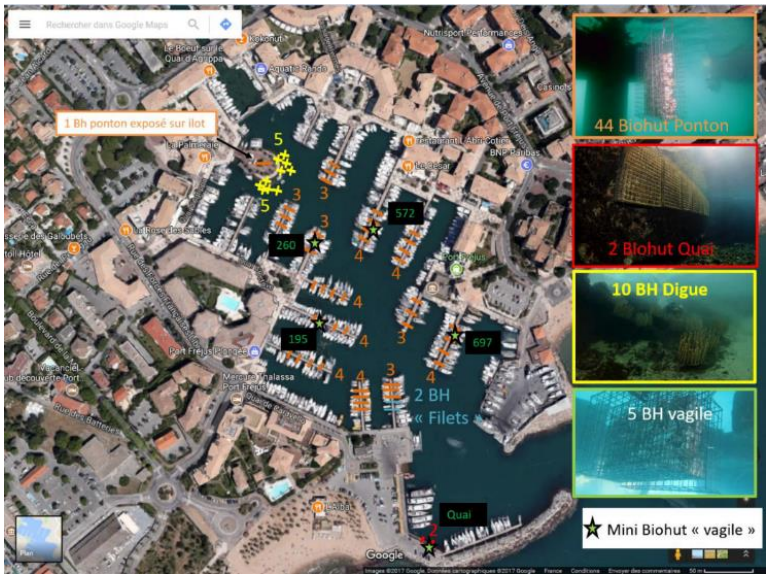
Dans la mesure où les pressions sont largement réduites voir éliminées, la mise en place d'une restauration écologique est donc évidente et bien fondée.

LA SOLUTION RETENUE : LES NURSERIES DE POISSONS « BIOHUT » :

Après une étude au préalable de choix d'emplacements (sous les pontons, autour de l'îlot du port, le long de la digue et du quai d'escale), Ecocean nous a préconisé la pose dans le bassin portuaire de 56 nurseries de poissons « Biohut » en privilégiant les pontons.

La répartition des modules est la suivante :

- 2 modules Quai ont été installés sur les renforts en béton de la buse située quai Caravello à l'entrée du port,
- 44 modules Ponton sont positionnés sous les appontements centraux du port,
- 10 modules Digue autour de l'îlot du port complètent l'installation en fournissant une fonction d'habitat et de corridor pour les juvéniles de poissons.



Le port de Fréjus : Plan de situation des Biohut

Ces « Biohut » contribuent à la sauvegarde des populations de poissons en protégeant les post-larves vulnérables face aux prédateurs très nombreux dans le milieu marin. Il s'agit d'un habitat artificiel destiné à préserver nos fonds marins. Composé d'une cage en acier remplie de coquilles d'huîtres (cage nourriture) associée à une ou deux cages vides (cage de protection, protège les jeunes recrues facilement agressées par les prédateurs), ces « huttes de biodiversité » proposent simultanément protection et nourriture aux jeunes poissons et autres crustacés. Leur vocation est de redynamiser les cycles de vie et la biodiversité dans le bassin portuaire.

Serranus hepatus @L. Bérenger, Biotope

Si l'efficacité et l'intérêt écologique des solutions Biohut ont été démontrés dans 3 publications scientifiques (dont *Bouchoucha_etal_2016_MEPS Ifremer*), elles constituent de surcroit un outil de communication remarquable pour un port de plaisance.

Elles permettent de :

- Se positionner comme un port de plaisance responsable,
- Fédérer le personnel de la capitainerie autour d'un projet environnemental innovant et positif,
- Sensibiliser les usagers du port (plaisanciers, habitants, commerçants) aux enjeux environnementaux,
- Valoriser la biodiversité du port auprès des publics fréquentant notre port. Les parcours pédagogiques de biodiversité marine « Les Sentiers du mérou » en sont le parfait complément.

« ICI COMMENCE LA MER » : En 2021, une nouvelle « Biohut » Ecocean a été installée au milieu du ponton flottant de l'îlot de Port-Fréjus. Les aménagements réalisés sur cette extension artificielle de 100m² permettent d'apercevoir la vie sous la surface de l'eau de Port Fréjus. Cette installation est une réalisation Rina Design dans le cadre du partenariat Rina/Ecocean. Ce nouvel espace permet aux spectateurs d'apprécier au mieux le concept de « Biohut » tout en les sensibilisant à la protection de la faune marine.

Biohut « mouillage »

LES FINANCEMENTS :

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse participe à hauteur de 50% à cette opération globale d'un coût de 71 680€, comprenant l'installation des habitats artificiels, les opérations de suivi écologique sur 3 années et les opérations de communication et de sensibilisation pédagogique. Les 50% restant sont pris en charge par la SEM de Le port de Fréjus, le gestionnaire du port.

LES DEMARCHES D'AUTORISATION :

Etant donné que la SEM de Le port de Fréjus est gestionnaire et a autorité sur le port, aucune démarche d'autorisation administrative n'est nécessaire car les nurseries sont implantées dans le périmètre d'exploitation du port.

DUREE ET POURSUITE :

La durée de vie des nurseries de poissons est de 4 ans. Le parc sera renouvelé en 2023 par des « Biohut » 100% recyclés. Un suivi scientifique de comptage des espèces présentes est réalisé chaque année par des plongeurs expérimentés.

LA MISE EN PLACE :

Ces nurseries de poissons ont ainsi été installées les 20 et 21 juin 2018 par la société Ecocean au niveau des quais, des pontons et des digues, afin d'accroître la biodiversité et le nombre d'individus au sein du port. L'inauguration officielle des Nurseries à poissons s'est déroulée le vendredi 29 juin 2018.

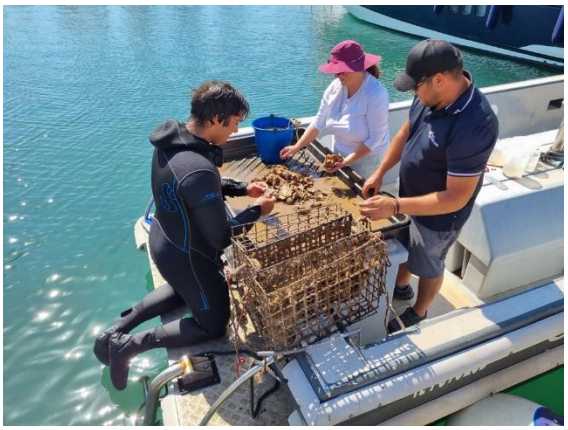
LE SUIVI ECOLOGIQUE :

Dans le cadre de cette implantation et afin d'améliorer les connaissances concernant la biodiversité et notamment le recrutement larvaire dans le port, 3 suivis annuels sont effectués à cheval sur deux années calendaires, en octobre/novembre, avril/mai et juin/juillet.

Les suivis permettent de recenser différents groupes d'espèces :

- Les poissons et principalement les post-larves et juvéniles,
- La faune dite vagile, présente à l'intérieur des Biohut, dans les coquilles d'huîtres.

Les poissons sont expertisés en palmes-masque-tuba ou en plongée en fonction des contraintes. Lors du suivi des juvéniles de poissons, les paramètres suivants sont relevés : les espèces, l'abondance pour chaque espèce et la taille de chaque individu. Pour rappel, dans chaque zone préalablement définie, trois Biohut ont été expertisés, trois fois par an.



Le suivi de la faune vagile nécessite de sortir un « Biohut » de l'eau, afin d'inventorier la faune cachée à l'intérieur. Ce suivi étant plus complexe, il n'est réalisé qu'une seule fois par an, pendant la période la plus favorable. Afin de faciliter la sortie de l'eau ces modules, des mini-Biohut (représentant le volume d'un demi-Biohut) ont été installées spécifiquement pour l'étude de la faune vagile, à raison d'un module par zone représentative. Les données sont ensuite rapportées à un Biohut entier. A l'issue de ce suivi, un rapport d'activités « Opération de restauration écologique des fonctions de nurserie dans le port de Fréjus » nous est transmis par Ecocean chaque année.

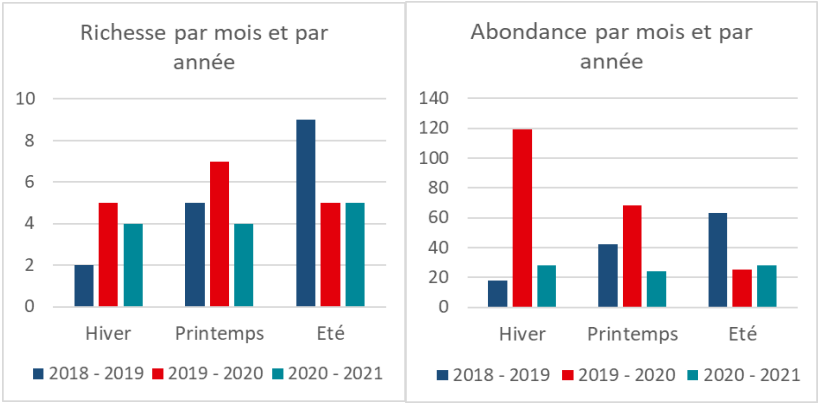
Exemple de synthèse du dernier rapport 2021 :

- **Suivi des juvéniles de poissons** : seulement 7 espèces ont été recensées en 2020-2021, contre 10 la première année et 9 la deuxième année. Seules 4 espèces sont communes aux trois suivis : les sparaillons (*D. annularis*), les sars à museau pointu (*D. puntazzo*), les sars communs (*D. sargus*) et les sars à têtes noires (*D. vulgaris*).

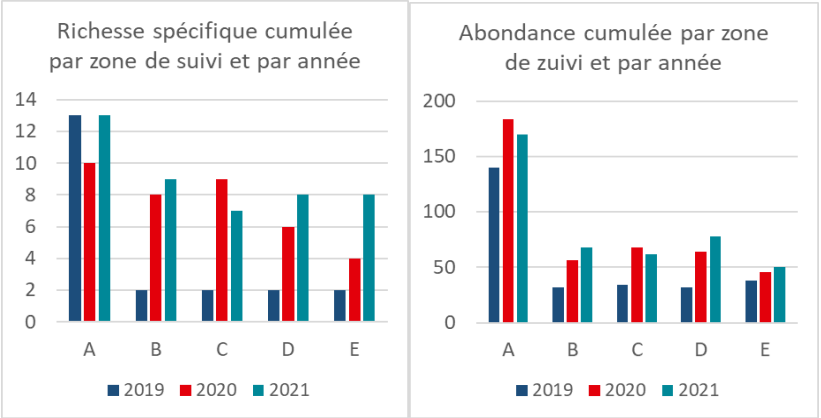
Concernant l'abondance, on note cette année peu d'observations par rapport à l'année précédente : 80 individus contre 212 en 2019-2020, et 123 en 2018-2019. Cette baisse des observations est cohérente avec les résultats d'autres observations réalisées cette année, à la fois dans d'autres ports NAPPEX mais également dans le réseau de surveillance RESPIRE, qui ont montré un faible recrutement en 2021.

- **Suivi de la faune vagile** : elle continue quant à elle d'augmenter, notamment en nombre d'espèces recensées, avec 428 individus de 21 espèces cette année.

Poissons : répartition du nombre d'espèces et de l'abondance en fonction de la zone de suivi



Faune vagile : répartition du nombre d'espèces et de l'abondance en fonction de la zone de suivi



b. Création du Sentier sous la mer « Biohut trail »

Après avoir implanté nos nurseries de poissons dans les fonds marins du port, nous avons poursuivi notre collaboration avec Ecocean sur un projet pilote appelé « BIOHUT TRAIL ».

Un concept innovant et éducatif : au départ de la plage, le sentier sous-marin se visitera en nageant en surface muni d'un masque, d'un tuba et de palmes. Le long d'un parcours balisé, et dans quelques mètres d'eau, les visiteurs exploreront les habitats artificiels immergés et la vie qui s'y colonise.

Ce projet se matérialise sous la forme d'un sentier sous-marin artificiel comprenant 6 modules artistiques qui seront installés à Fréjus plage le long des enrochements de la digue Est à l'entrée du port. Ce parcours pédagogique a pour but de montrer sous l'eau et au plus grand nombre ces mini écosystèmes artificiels habités par la vie, tout en alliant la fonctionnalité de corridor écologique entre le milieu artificialisé du port équipé de « Biohut » et le milieu naturel.

Ces modules artistiques représentent des animaux marins comme l'étoile de mer, la méduse, le crabe, le poisson, le serpent de mer mais aussi la planète et ses continents. Ces œuvres artistiques sont construites selon le même principe écologique que les « Biohut » : une zone de nourriture avec des coquilles d'huître et des zones vide de refuge. Elles sont d'une envergure d'1m80 et constitués de fer à béton, complétés d'anneaux de levage, de renforts structurels, de poignées permettant aux apnéistes de se tenir au module sans l'abîmer, sur lesquels le nageur ou le plongeur pourra découvrir une faune et une flore variée.

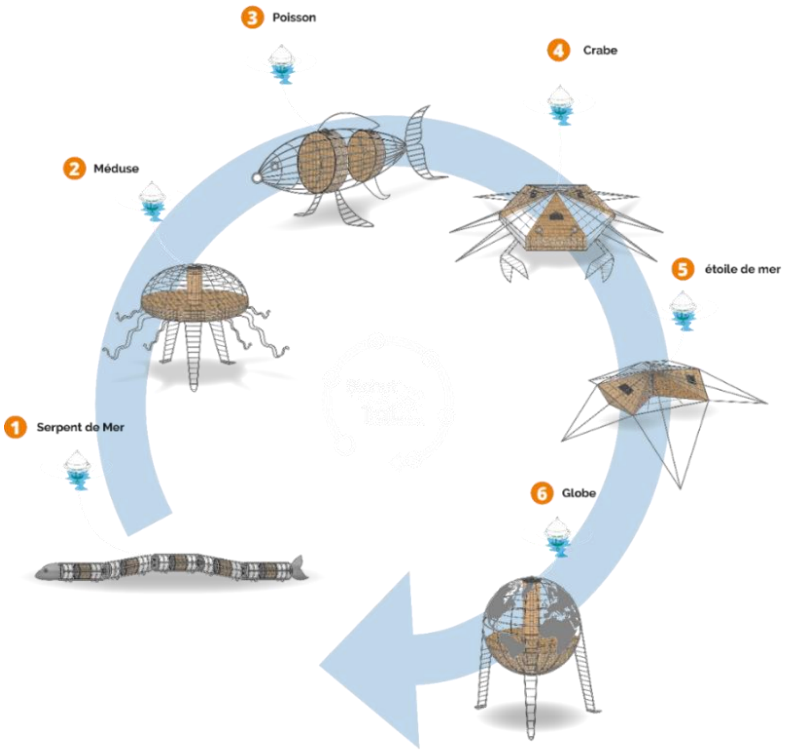
Ces sculptures répondent à une représentation simplifiée de la vie marine où se développera des éponges, des gorgones, ainsi que différents stades de vie de poissons, crustacés et mollusques.

Chaque module sera fixé au sol grâce à des ancres-à-vis et des sangles kevlar. Ce système permettra de déplacer en plongée les sculptures à l'intérieur du port sans les sortir de l'eau pour palier à la forte houle due aux tempêtes hivernales.

Chaque module sera relié à une bouée d'information pédagogique en surface à laquelle les nageurs pourront se tenir en toute sécurité, tout en lisant des explications spécifiques sur le site, sur l'habitat décrit, le comportement biologique ou sur une problématique particulière. Des informations scientifiques seront présentées, mais aussi des petits jeux et des questions. Le nageur sera alors stimulé et en proie à la découverte.

Le volet pédagogique est un des points forts du projet. Le sentier captera l'attention des plus jeunes tout en présentant les points clés de la biodiversité aux plus grands tout en faisant passer des messages.

Le port de Fréjus est fier d'être port pilote de ce beau projet !!!



Plan du sentier sous-marin

EXPERT TECHNIQUE ET EQUIPE RESTAURATION ECOLOGIQUE :

Ecocean est le maître d'ouvrage de ce projet. Il conçoit et met en œuvre le projet pendant 2 années. Ensuite, Le port de Fréjus devient propriétaire et gestionnaire du sentier et pourra organiser les maintenances selon ses décisions. Pour renforcer l'équipe des plongeurs d'Ecocean, l'équipe des plongeurs de la capitainerie aidera à l'installation des modules fin mai 2022 et à leurs déplacements sur une zone plus sécurisée à l'abri des coups de mer hivernal.

BUDGET :

Le coût de ce projet pilote est estimé à environ 81 000€ en prenant en compte l'élaboration du projet administratif, technique et financier, la conception et la fabrication des modules, l'installation du sentier, la mise en place des outils de communication et de pédagogie associés, la création de deux journées d'animation et d'activités ludiques sur le sentier.

Dans le cadre du partenariat entre Ecocean et le port de Fréjus, Ecocean prend à sa charge 75% du coût total du pilote. 50% seront des subventions.

La SEM du port de Fréjus prend le reste à sa charge.

DESCRIPTION DU SITE D'IMPLANTATION :

La plage du Capitole (Fréjus plage) accueillera ce sentier sous-marin artificiel. Cette plage est située dans le prolongement du port de Fréjus coté Est. Le sentier sera implanté à proximité d'habitats naturels mais l'implantation proprement dite se fera sur un site dégradé afin d'apporter ce double objectif :

- De corridor écologique vers le bassin portuaire déjà équipé de dispositifs de restauration de type « Biohut »,
- De restauration écologique de la zone artificialisée.

Lieu d'implantation du sentier sous la mer

Le sentier partira du bord de la plage pour être accessible aux nageurs. Les modules du sentier seront installés sur des profondeurs allant de 2 à 5 mètres. Il sera incorporé au plan de balisage de la ville de Fréjus sous la forme d'une ZIEM (zone interdite aux engins motorisés). Le balisage de la zone sera effectué en même temps que le balisage des plages pour garantir la sécurité de la zone. Les balises seront espacées d'environ 50 mètres.

Le site sera équipé d'un panneau terrestre matérialisant le début du parcours et des bouées de repos matérialisant des points remarquables (les modules artistiques artificiels) et portant des informations sur la faune, la flore, les paysages ou l'environnement. Les modules seront espacés d'une dizaine de mètres les uns des autres environs.

HISTORIQUE DU SITE :

Des forts coups de houle sévissent parfois sur nos côtes et Fréjus plage est très exposée à ces conditions extrêmes. Des vagues de plusieurs mètres sont observées et les modules seraient irrémédiablement arrachés et projetés sur la plage ou perdus à cause du ressac.

Un site de repliement hivernal a donc été défini à l'intérieur du bassin portuaire. Ce site totalement à l'abri de la houle, permet de garantir que la vie présente dans les modules continue à se développer en toute quiétude.

Il s'agit là d'une originalité, car souvent les modules sont installés très profond pour éviter l'arrachement des grosses houles, mais cette profondeur est inadaptée pour les jeunes stades. Ici les modules sont installés sur des petits fonds côtiers et utile pendant les mois calme de l'année. En hiver, ils sont déplacés. C'est une innovation en soi.

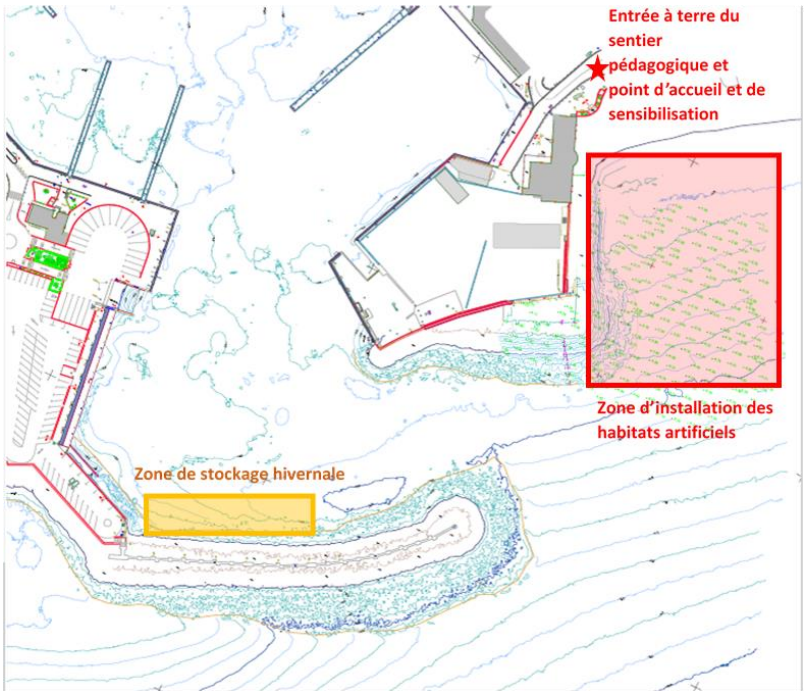
COORDINATION AVEC LES SERVICES DE L'ETAT :

Notre projet « Biohut Trail » de création d'un corridor écologique à proximité de l'avant-port n'est pas soumis à une étude d'impact en application à la section première du chapitre II du titre II du livre premier du code de l'environnement. Il concerne la création temporaire d'un récif artificiel dont les objectifs sont la restauration écologique d'un milieu et l'accompagnement pédagogique du public pour découvrir ce récif dans le cadre de la création de l'Aire Marine Educative de Port-Fréjus.

Ce projet est soumis aux procédures suivantes :

- Examen au cas par cas préalable à la réalisation éventuelle d'une évaluation environnementale (Art. R122-2 du code de l'environnement),
- Evaluation simplifiée des incidences Natura 2000 (Article L414-4 du code de l'environnement)
- Modification du plan de balisage des plages de la commune de Fréjus, approuvé par arrêté préfectoral.

Par contre, il n'est pas soumis ni à autorisation / déclarant au titre de la loi sur l'eau car le montage financier des installations était inférieur au seuil de 160000 € HT, ni même à l'obtention d'un titre d'occupation du DPM en dehors des ports du fait qu'étant situé entièrement sur le domaine portuaire en concession. Un porter à connaissance a été néanmoins transmis aux services de la DDTM du Var.



Zones d'installation du sentier Biohut trail

La relation avec les services de l'état s'est avérée très compliquée. Dans un premier temps, les services de la DDTM ont rejeté notre projet.

Après avoir retravaillé le dossier, nous avons donc pris attache avec la DREAL auquel nous l'avons transmis. Après étude, il a été accepté. 2 ans se sont écoulées entre la présentation du « Biohut Trail » et son acceptation par les services de l'état.

Ce projet pilote est planifié sur 3 années. Sa durée totale est de 37 mois (du 1er mars 2021 au 31 mars 2024). La DDTM sera destinataire de son suivi scientifique sur l'efficacité écologique de ce corridor.

COMMUNICATION / PARTICIPATION DU PUBLIC :

Un film de présentation du sentier sous-marin sera réalisé par Ecocean et disponible en septembre 2022. Il sera un outil de communication et de promotion idéal.

LA MISE EN PLACE DU SENTIER :

Tous les modules du « Biohut trail » seront immergés sur le site de Fréjus plage par deux plongeurs d'Ecocean et deux plongeurs de la capitainerie. Cette installation correspondra à la date de mise en place par la ville du balisage des plages.

Son inauguration est prévue le 30 juin 2022. A cette occasion, une journée de sensibilisation en présence de plusieurs classes Fréjussiennes est prévue avec au programme des visites guidées du sentier sous-marin et des animations pédagogiques ludiques animées par Ecocean, l'école de la mer et la capitainerie.

Module de poisson en phase test

SUIVI ECOLOGIQUE ET ETUDE DE LA FREQUENTATION :

Afin d'évaluer le potentiel de corridor écologique du sentier entre le port restauré et le milieu ouvert, 2 suivis écologiques par an seront programmés le 20 juin et courant octobre. Les résultats seront comparés avec les suivis écologiques des « Biohut » du port et des suivis de la digue. Il ne saurait y avoir de pratique sans suivi de fréquentation. Nous mettrons en place plusieurs types de suivi :

- Un suivi quantitatif et qualitatif de la fréquentation des visites guidées animées par un club de plongée mis en place par la Capitainerie (4 fois par semaine pendant la saison estivale). Les visites individuelles ne seront pas comptabilisées car le sentier est en accès libre.
- Un suivi de satisfaction du public, de sa compréhension et de son engagement, ponctuel ou systématique, à l'aide d'un questionnaire.

Signalétique pédagogique des bouées

5. L'ECHO DU CACHALOT : NOTRE PROGRAMME D'ACTIONS EDUCATIVES

a. Appel à projet « Nurseries de poissons » avec l'Education Nationale

La capitainerie de Port-Fréjus, soucieuse de préserver la biodiversité marine portuaire, a implanté sous les pontons, le long de la digue et autour de l'îlot du port, 56 nurseries de poissons destinées à protéger la faune marine.

Dans le cadre de cette implantation, nous avons développé un partenariat avec l'éducation nationale avec la mise en place d'un appel à projet « NURSERIE DE POISSONS avec le port de Fréjus ». Le programme d'éducation s'articule de Septembre à juin. Une douzaine de classes de la Communauté d'Agglomération (Fréjus, Saint-Raphaël, Les Adrets, Roquebrune sur Argens) participent à ce beau projet, j'en suis l'animateur agréé par l'éducation nationale.

L'équipe d'Ecocean propose également une fois par an des séances EDD (Education au Développement Durable) spécifiques. A cette occasion, une « Biohut » est sortie de l'eau par un plongeur et le contenu est inspecté en détail. Les enfants peuvent ainsi découvrir les animaux et invertébrés présents.

Public concerné :

Les classes de cycle 3 des écoles de Fréjus (CE2, CM1 et CM2)

Modalité d'organisation :

Le projet s'organise en deux séances.

- *Une séance 1 en classe* : situation déclenchante (environ 1h30). J'interviens avec une mini « Biohut » pour présenter l'objet mystère (aucune information le concernant n'est communiqué aux élèves avant la séance)
- *Une séance 2* : visite du port et de son sentier du mérou. Cette séance permet notamment de valider ou d'invalider certaines hypothèses des élèves par une observation des « Biohut » et d'enrichir leurs connaissances sur des sujets préoccupant pour le milieu marin comme la surpêche, les déchets, les diverses pollutions, l'arrachage de la posidonie …).

A l'issue de la visite du port, nous offrons à chaque enfant un jeu de société « Mr Barracuda » sur les espèces à protéger le long de notre littoral, créé à l'initiative de l'UPACA, en partenariat avec Ecocean. L'enfant peut ainsi pérenniser en lui sa connaissance de la vie marine.

Texte de présentation aux écoles de l'appel à projet de l'éducation nationale :

« La lutte contre le réchauffement climatique ainsi que la protection de l'environnement et de la biodiversité constituent un enjeu majeur des prochaines décennies. La circulaire demande qu'une action pérenne en faveur de la biodiversité soit menée, au sein de chaque école au cours de l'année scolaire. L'éducation au développement durable passe par l'expérience concrète de la protection de l'environnement. Les élèves doivent être pleinement associés à ces démarches et leur mise en œuvre doit intervenir en lien avec les collectivités locales. L'EDD est une éducation transversale. Elle doit permettre aux élèves de s'approprier les enjeux de la préservation de la biodiversité de façon scientifique, pédagogique et civique. Elle permet d'appréhender l'ensemble des dimensions environnementales, sociales, économiques et civiques du développement durable. Elle constitue un élément important de l'enseignement moral et civique et de l'éducation à la citoyenneté.
Au cycle 3 : sciences et technologie : les êtres vivants dans leur environnement, il est demandé d'identifier des enjeux liés à l'environnement, en travaillant la biodiversité, et en identifiant la nature des interactions entre les êtres vivants et leur importance dans le peuplement des milieux. L'aménagement de l'espace par les humains et les impacts sur l'environnement sont également abordés. »

En 2019-2020, nous avons travaillés avec 231 élèves de 8 classes ; en 2020-2021, 318 élèves de 12 classes et en 2021-2022, 319 élèves de 14 classes.

Soit en tout 850 élèves sensibilisés de 34 classes.

Une classe de CM1

La dynamique équipe d'Ecocean intervient sur le port de Fréjus une fois par an en proposant à une ou deux classes de Fréjus des jeux différents et évolutifs sur tableaux magnétiques, sur des plateaux géants ou encore des quiz sur leurs connaissances en milieu marin. En complément, un « Biohut » est sorti de l'eau par un plongeur pour faire le tri des espèces présentes avec les enfants. Un atelier vivant, l'émotion envahit les élèves qui se rendent compte de la biodiversité présente dans les nurseries. Avec les animateurs, ils trient et comptent les espèces. Les enfants se transforment en petits scientifiques et adorent ça ! Les Biohut utilisés sont des « Biohut » uniquement dédiés à ces manipulations.

Atelier BioObs avec Sabrina d'Ecocean (ouverture d'une Biohut)

b. Mise en place d'une AME (Aire Marine Educative) sur le périmètre du port

Une « Aire Marine Educative » est une zone maritime littorale de petite taille qui est gérée de manière participative par des élèves allant de CM1 à la 6ème. Ils y développent, avec leur enseignement et moi-même référent du site, un projet de connaissance et de protection du milieu marin. En devenant « AME », les classes peuvent se lancer dans cette démarche de sensibilisation de manière plus durable, avec notamment la mise en place d'un conseil des enfants pour la mer.

La ville de Fréjus a adopté début 2021 une délibération visant à créer une « Aire Marine Educative ». J'ai mis en place ce projet sur le port de Fréjus à la rentrée 2021-2022 avec deux classes CM2 de l'école Hippolyte Fabre à Fréjus plage.

Les Objectifs : A travers l'engagement d'école, du port, de la commune et des acteurs accompagnateurs impliqués, le réseau AME donne l'opportunité aux plus jeunes de développer leur connaissance et leur capacité d'agir pour la protection de la biodiversité marine.

En 2021-2022, 52 élèves se sont impliqués dans notre Aire Marine Educative.

c. Création d'un outil d'éducation novateur : « Les sentiers du Mérou »

A LA DECOUVERTE DU SENTIER DU MEROU TERRESTRE DE BIODIVERSITE MARINE

« Bienvenue sur le Sentier du Mérou ! En empruntant ce chemin vous découvrirez un parcours ludique qui vous invitera à une réflexion autour de la protection de la biodiversité marine. »

Les 12 modules du sentier pédestre

Pourquoi ce sentier ?

Après la mise en place de nos nurseries de poissons « Biohut », présentes un peu partout dans le port, nous avons été désireux d'en faire plus. C'est à partir de ce constat qu'est née l'idée de créer un cheminement piéton et maritime ayant pour objectif de sensibiliser les visiteurs et les scolaires à la préservation de notre environnement.

Grace à ce Sentier, nous espérons les inciter à être le plus respectueux possible de notre milieu marin et mettre entre leurs mains les clés du changement. En offrant des nurseries aux poissons, nous avons fait de Port-Fréjus une zone d'habitat leur appartenant pour leur permettre d'atteindre l'âge adulte. Nous veillons chaque jour à ce que leur croissance se passe dans les meilleures conditions en invitant nos plaisanciers à préserver la qualité de l'eau de notre port. Mais face à l'enjeu capital que représente le respect de la biodiversité marine, nous avons voulu mettre en place un sentier innovant, unique en son genre.

C'est ainsi qu'est née l'idée de créer ce SENTIER TERRESTRE ayant pour objectif d'expliquer pourquoi la préservation de notre environnement marin nous est vitale. Avec le sentier sous-marin « Biohut trail », nous les avons baptisés **« Les Sentiers du Mérou »**.

Grace à ces sentiers nous espérons mettre entre les mains de nos visiteurs les clés pour veiller au respect du milieu marin qui nous entoure et qui est indispensable à notre survie.

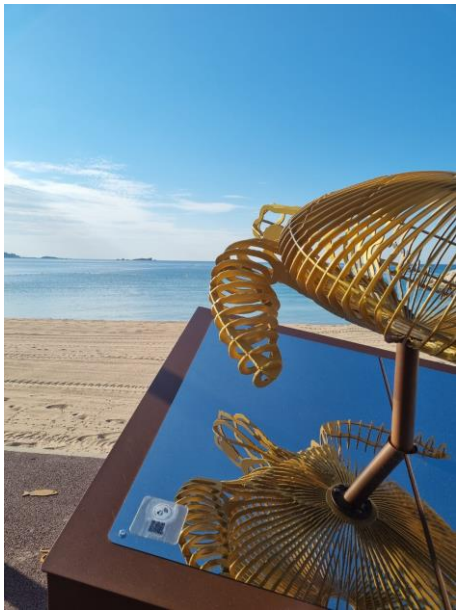
Comment s'articule ce sentier pédestre ?

Ce projet est réalisé selon la théorie du Nudge* et se présente ainsi : aux points clés d'entrée du port sont mises en place des arches signifiant que les visiteurs entrent dans une ZHAP « zone d'habitat des poissons ». Un balisage au sol oriente le public vers des modules de sensibilisation abordant différentes thématiques :

- La vie sous-marine et le cycle de vie des poissons,
- Les Aires Marines Protégées,
- La biodiversité marine en danger,
- Les déchets et le plastique,
- La surpêche,
- Le sanctuaire Pelagos et ses mammifères,
- La posidonie, oxygène de Méditerranée,
- Les requins,
- La pollution sonore,
- La restauration écologique portuaire et les « Biohut »,
- Les tortues marines en danger.

Chaque module est ludique, conçu par la société Planète Nudge sous forme de jeu et délivre un message fort. Pour compléter cette information et trouver des réponses à ce questionnement les visiteurs peuvent se rendre sur une page dédiée sur le site Internet du port www.portfrejus.fr/sentiers/ à l'aide d'un flash code scanné avec leur téléphone.

Quatre sculptures de Steve Chaudanson intégrées aux nouveaux modules du « Sentier du Mérou » terrestre, ont pris place sur le port : le **Requin**, la **Tortue marine**, le **Cachalot** et l'**Hippocampe**. Cette dernière, une œuvre en acier se trouve aujourd'hui à l'entrée de la Capitainerie. Toutes les copies de ces œuvres « marines » sont par ailleurs destinées à la vente au public, et 15% de la valeur de ces sculptures sont reversées pour contribuer au repeuplement des fonds marins via l'opération CasCioMar pilotée par Ecocean. Ce projet, basé sur la pêche de post-larves, permet leur élevage jusqu'au stade de juvénile et leur réimplantation en mer.



Un plan de communication est également prévu pour sensibiliser les plaisanciers. Des stickers sont apposés dans les douches des quatre sanitaires dans le but de limiter la consommation d'eau et sur les bornes d'alimentation électriques des pontons pour inciter le plaisancier à équiper son bateau d'une cuve à eaux noires.

** Nudge, ou « coup de coude » en français, est une technique d'incitation douce afin d'amener des personnes ou une population ciblée à changer leurs comportements ou à faire certains choix sans être sous contrainte ni obligations.*

QUALIMEROU : le poisson déchets

LES SENTIERS DU MEROU : quelques exemples de modules

Nouveaux modules 2021

Les sentiers du mérou

L'oxygène et la posidonie

7ème module :
LE GRAPH DES PROFONDEURS

PORT FRÉJUS

La Posidonie, le poumon de la Méditerranée

Si la Posidonie n'avait pas existé, la côte Méditerranéenne serait-elle composée d'autant de petits ports de pêches? La plongée avec un simple masque et un tuba serait-elle aussi spectaculaire? On peut se poser la question !

Quand la Posidonie est apparue sur Terre, il y a plusieurs millions d'années, ce n'était pas dans le but de rendre des services à l'Homme. Ceci-dit, nous profitons clairement de son existence.

C'est, pour nous, une plante "multi-service", qui permet entre autres : la production de matières premières et de nourriture, la protection du littoral contre l'érosion, la purification de l'eau, le piégeage du carbone jusqu'au maintien de la pêche, du tourisme, des loisirs, de l'éducation et de la recherche (Vassallo et al., 2013). D'où l'intérêt, vous l'aurez compris, d'en prendre le plus grand soin.

Nouveaux modules 2021

Les sentiers du mérou

Les requins

9ème module :
SCULPTURE DU REQUIN MENACÉ

PORT FRÉJUS

Protéger les requins, une urgence pour les mers et les océans

Alors qu'ils seraient présents sur notre planète depuis plus de 400 millions d'années, il aura fallu seulement 60 ans pour voir 90 % de la population de requins disparaître, dans un silence complet.

Les conséquences sont multiples mais il n'existe qu'une seule cause : l'homme.

Nouveaux modules 2021

Les sentiers du mérou

La ponte des tortues de mers

8ème module :
SCULPTURE TORTUE

PORT FRÉJUS

Fréjus, lieu de ponte des tortues marines

Il semblerait que les tortues marines aient un petit faible pour les plages de sable de Fréjus ! Par deux fois en pendant l'été 2020, deux tortues sont venues pondre sur les côtes de la station balnéaire, l'une aux Sablettes, l'autre à Saint-Aygulf, plus éloignée du centre-ville. Une situation qui s'était déjà produite en 2016, due grandement à l'augmentation de la température de surface en Méditerranée.

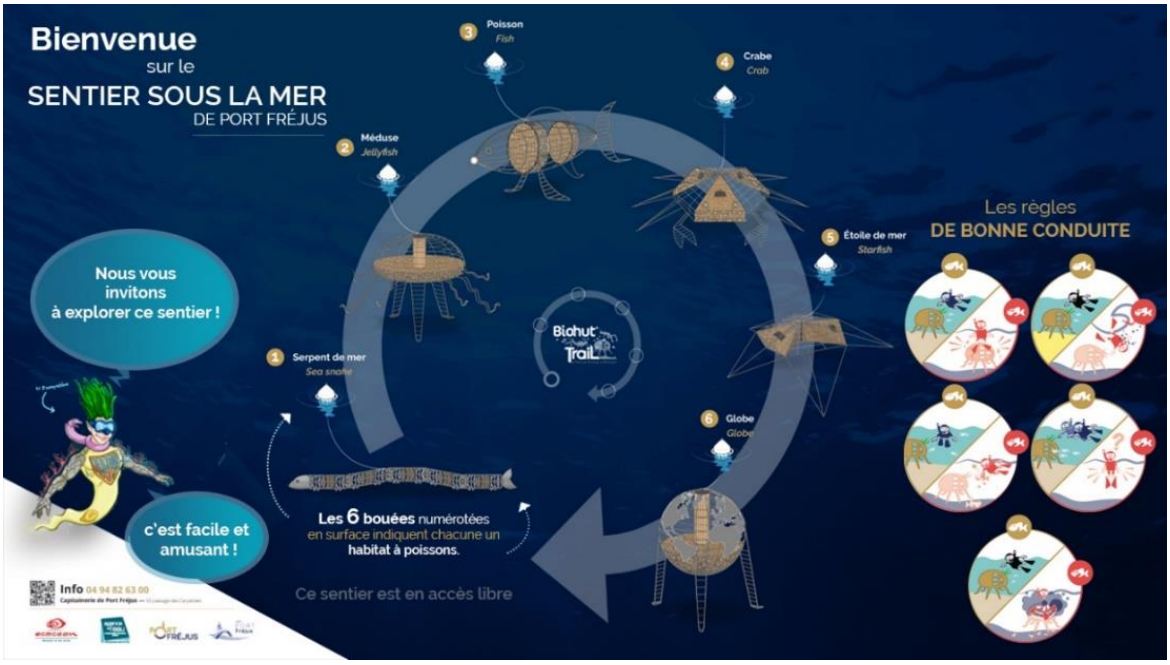
LES PANNEAUX SONT REALISES SELON LE PRINCIPE SUIVANT :

EN QUOI CELA ME CONCERNE ? QU'EST-CE QUI PROVOQUE CELA ? QU'EST-CE QUE JE PEUX FAIRE ?

En voici un exemple :

VISITES GUIDEES SUR LE SENTIER DU MEROU SOUS MARIN « BIOHUT TRAIL »

La Capitainerie mettra en place début Juillet 2022 4 visites guidées pédagogiques hebdomadaires d'une heure et demie réalisées en Palme Masque et Tuba, et animées par un club de plongée pendant toute la saison estivale. Les réservations s'effectueront auprès de l'Office du Tourisme. Ce sentier pourra également être visité en individuel ou en famille.



Panneau d'entrée du sentier

d. La campagne estivale de sensibilisation des plaisanciers

Cette opération de sensibilisation des usagers du port de Fréjus est menée par la capitainerie. Cette initiative a pour objectif d'éduquer les plaisanciers et professionnels du nautisme à adopter un comportement éco-citoyen afin de limiter l'impact humain sur l'environnement portuaire.

Différents thèmes sont abordés avec les plaisanciers comme par exemple :

- Information sur l'utilisation des produits antipollution dans le port,
- Le recyclage de vos feux de détresse périmés,
- L'eau est une ressource précieuse, sachons la préserver,
- L'utilisation de produits biodégradables à bord des bateaux,
- Sanitaires du port ou cuve à eaux noires à bord du bateau ? il faut choisir !
- Etc…

Moyens mis à disposition pour l'opération :

2 équipes de 2 à 3 personnes chaque saison estivale deux fois par mois de 9h à 11h. Les équipes, des ambassadeurs de « L'écho du cachalot » composés d'éducateurs qualifiés de la Capitainerie, du Smiddev (Collecte sélective de l'Est Varois), de la Communauté d'Agglomération et de l'Adee (éco gestes) vont à la rencontre des plaisanciers sur les quais.

Pour cette campagne de sensibilisation, seuls deux thèmes principaux sont abordés car cela permet notamment de ne pas se disperser dans la transmission de l'information. Dans l'ensemble, les clients du port se montrent réceptifs et intéressés. Nous recevons le plus souvent un excellent accueil des plaisanciers. Au fil des années, la clientèle de Port-Fréjus a évolué vers une attitude davantage responsable et respectueuse des milieux marin et portuaire.

Bon nombre d'entre eux ont réellement la fibre environnementale et utilisent à bord du bateau des produits d'entretien biodégradables ou labélisés. Parfois, nos communications s'orientent naturellement vers d'autres thèmes environnementaux comme la problématique des déchets en mer ou l'importance de préserver la biodiversité marine.

447 plaisanciers ont été sensibilisés en 2019, 2020 et 2021.

Sensibilisation à quai des plaisanciers

e. Les autres publics visés

Le public en situation de handicap :

Aider les autres, notamment ceux qui sont plus particulièrement touchés par leur handicap ou leurs difficultés à gérer leur vie au quotidien, est une des actions d'éducation au développement durable de la SEM de gestion du port de Fréjus. En leur proposant un mode original de réinsertion et d'affirmation de soi par des sujets liés à la mer, l'enfant ou l'adulte découvrent un univers méconnu mais tellement passionnant. Malgré leurs difficultés de communication, ils explorent ce nouveau domaine avec intérêt et parfois, avec passion, même si leurs capacités d'attention restent limitées. Le public en situation de handicap ou en difficultés relationnelles est toujours le bienvenu sur le port de Fréjus. Nous accueillons régulièrement plusieurs structures et notamment le Foyer de vie de la Croix Rouge et le CMPP (Centre médico psycho pédagogique). Des ateliers sur les thèmes des nurseries et du cycle de vie des poissons leurs sont régulièrement proposés. Depuis 3 ans, nous avons accueilli 33 personnes représentant 4 structures liées au handicap.

Le personnel des ports de plaisance :

Le port de Fréjus, lieu d'accueil de formation accueille dans ses locaux des sessions de formations « Ports-propres » et « Ports-propres actifs en biodiversité » destinées au personnel des ports de plaisance et mise en place par l'UPACA (Union des ports de plaisance de Provence Côte d'Azur et Monaco) avec l'appui de la région Sud. Une visite des sentiers du mérou et des infrastructures portuaires est toujours au programme de ces formations.

6. CONCLUSION

Le plan de restauration écologique des fonds marins du port est très porteur et permet de booster la biodiversité marine, les rapports de suivi écologique le démontre. Si la démarche environnementale du port de Fréjus est justifiée, ce plan déployé est un aménagement qui ne se voit pas du tout public. Difficile de cerner l'avancée des progrès liés à la restauration sachant que les jeunes recrues (alevins) regagneront d'autres zones côtières en grandissant et quitteront les habitats « Biohut ». Coupler restauration et éducation est donc primordial en développant une pédagogie pertinente et adaptée à la compréhension de tous les publics. Dans notre monde moderne, pédagogie rythme avec ludicité. En utilisant des outils modernes pour toucher les plus jeunes, l'objectif est d'éduquer ce public pour l'amener à toucher ses parents et son environnement relationnel sur la richesse du milieu marin et la notion de sauvegarde de la biodiversité. Un port est un espace artificiel fréquenté par un large public : plaisanciers, visiteurs, scolaires, usagers du port mais c'est le lieu de relation entre la ville et la mer donc pour porter une telle démarche dans notre avancée de transmission aux générations futures, la priorité est d'ouvrir les consciences à l'éco-citoyenneté.

Quels sont les fruits d'une telle démarche pour un port ?

Un port est un lieu de rencontre entre les usagers terrestres et maritimes. Ce partage permet d'éduquer la clientèle de demain pour l'inciter à s'orienter vers des activités nautiques les moins impactantes tout en portant en eux une attitude respectueuse du milieu. Pour le port, ce type d'action permet de valoriser son image et sa commune. Cet objectif favorise les financements de projets et facilite emprunts, crédits et subventions, et sensibilise les scolaires qui seront les usagers de demain…

Le citoyen est de plus en plus sensible aux enjeux environnementaux (réchauffement climatique, suppression des énergies fossiles et du plastique, préservation de la biodiversité et de l'eau, le tri et le recyclage des déchets...). Le choix de cette clientèle potentielle se porte résolument aujourd'hui vers les ports éco-responsables. Les démarches environnementales nécessitent un engagement financier, c'est une certitude, mais cet enjeu est sans aucun doute la bonne voie du port de demain résolument moderne, engagé, conjuguant efficacement écologie, éducation et qualité de vie. Aujourd'hui, les uns ne vont plus sans l'autre et chacun doit en prendre conscience. S'engager dans cette direction est donc un choix volontaire conséquence d'une sensibilité écologique des directeurs et des maires. En réduisant les pressions sur le milieu, le port offre ainsi une belle opportunité à la biodiversité marine de se reconstituer et aux usagers de la mer d'exprimer leurs passions au travers d'une éthique environnementale.

L'action innovante « RESTAURER ET EDUQUER » du port de Fréjus a incitée d'autres gestionnaires de port comme Narbonne et Canet plage à suivre notre exemple. Le côté précurseur de notre démarche est un bel exemple d'intégration de la nature en ville.

Une démarche RSE dans l'entreprise

Intégrer une stratégie RSE (Responsabilité, Social et Entreprise) à la stratégie globale de la gestion de nos ports de plaisance est le lien parfait pour suivre une telle démarche. Elle doit être portée par les dirigeants mais également par l'ensemble du personnel des ports de plaisance, afin qu'ils intègrent au quotidien les enjeux du développement durable à leurs métiers.

Plusieurs exemples peuvent être mis en place : créer un service gratuit de pompage des eaux noires et des eaux de cale des bateaux, afficher une politique responsable de réduction des déchets et des énergies (eau, électricité), définir un programme de sensibilisation des usagers très poussé porté par une association ou mieux en impliquant le personnel du port, poser une meilleure gestion des pressions provenant des activités nautiques, touristiques et issue du bassin versant impactant la biodiversité marine portuaire, restaurer les fonds marins de son port avec des nurseries de poissons, développer une synergie efficace avec la communauté d'agglomération ou les municipalités en travaillant en étroite collaboration dans les recherches de pollutions et sur l'implantation d'aménagements environnementaux.

Chaque prise de décision et chaque plan d'action doivent inclure des objectifs liés au développement durable et faire l'objet d'une mesure des impacts sur l'environnement et sur nos entreprises.

Le port de demain intègrera à l'activité commerciale l'écologie et l'éducation.

Et demain se prépare dès aujourd'hui !

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Recherche biblio sur :

- Définition Restauration écologique : Pierre Boissery (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse)
- Sentier sous-marin : https://www.ecocean.fr/
- RSE entreprise : https://www.greenly.earth/blog-fr/politique-rse-entreprise
- Aire Marine Educative : https://www.ofb.gouv.fr

PORT-FREJUS, des certifications et des prix
qui matérialisent une exigence constante et croissante

- Labellisé **PAVILLON BLEU** depuis 1993
- Certifié **PORTS-PROPRES** depuis 2011
- Certifié **PORTS-PROPRES ACTIFS EN BIODIVERSITE** depuis 2018
- Prix national de l'innovation à l'environnement **FRANCE STATION NAUTIQUE** depuis 2019
- Lauréat du concours **CIRCULAR PORT 2021**

Contact : Philippe MANON

Maître de port principal, responsable environnement et évènementiel

Capitainerie de Port Fréjus
55 Passage des Caryatides
CS 80 084
83606 Fréjus CEDEX

Tél. : 04 94 82 63 02
Gsm : 06 51 60 07 23

Courriel : philippe.manon@portfrejus.fr

PORT-FREJUS

Lauréat du Prix National 2019
de l'innovation à l'environnement

Annexe 15

Démarche scientifique ou empirique : quels gains pour les herbiers de Zostères de l'étang de Berre ?

Par Ken NOVELLAS

Démarche scientifique ou empirique : quels gains pour les herbiers de zostères de l'étang de Berre ?

Photo d'une Zostera marina au cœur d'un herbier de Zostera noltii
(Plantation militante de 2019 – Photo de Pascal Bazile de Février 2021)

Par Ken Novellas

D.U. Restauration des petits fonds côtiers (Promotion 2022)
Université des Sciences de Montpellier

SOMMAIRE

Résumé ……..…….p1

1. Introduction ……..……p1

2. L'étang de Berre : la complexité d'un milieu ……p2
2.1 Présentation d'un site d'étude hors norme ……..p2
2.1.1 L'étang de Berre ou la lagune de Berre ?
2.1.2 Un vaste bassin versant
2.1.3 L'instabilité d'un milieu sous pressions

2.2 Les herbiers de zostères dans l'étang de Berre ……p5
2.2.1 Les zostères, des « ingénieurs d'écosystème »
2.2.2 L'évolution de la répartition des Zostères dans l'étang de Berre
2.2.3 La crise de 2018 : eutrophisation et anoxie

3. Analyse des projets de restauration des herbiers de zostères ……p8
3.1 Présentation succincte des projets ……p8
3.1.1 Résumé du projet du GIPREB
3.1.2 Résumé du projet de l'association « 8 vies pour la planète »

3.2 Sélection des des critères de comparaison des projets ……p8
3.2.1 Sélection des sources bibliographiques et sitographiques de chaque projet
3.2.2 Choix des critères de comparaison des projets

3.3 Comparaison des projets de restauration des herbiers de zostères ……p13
3.3.1 Comparaison des phases préparatoires de chaque projet
3.3.2 Comparaison des choix de mise en œuvre
3.3.3 Comparaison des suivis des transplants

4. Conclusion ……...p19

Table des figures ……p20

Table des tableaux ……..p21

Bibliographie ……..p21

Résumé
L'étang de Berre est une vaste étendue d'eau saumâtre, subissant les rejets d'eau douce et de limons duranciens de la centrale EDF de Saint-Chamas. Ces rejets ont grandement détérioré les herbiers de zostères présent dans l'étang. Le GIPREB (Gestion Intégrée Prospective et Restauration de l'Etang de Berre) et l'association « 8 vies pour la planète » ont engagé respectivement des projets de restauration des herbiers en 2009 et 2021. Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier les démarches, d'un côté scientifique et de l'autre empirique, de ces deux organismes pour en comprendre les objectifs, les différences et complémentarités.

Mots clés
Etang de Berre / herbiers de zostères / restauration écologique / démarche scientifique / démarche empirique / centrale EDF

Introduction

D'une superficie de 15 000 ha et d'une profondeur de 6 m en moyenne, l'étang de Berre est une étendue d'eau présentant un volume d'environ 980 millions de m^3 d'eau. Bordé par une dizaine de communes du département des Bouches-du-Rhône, il est relié avec la mer Méditerranée par le canal de Caronte. Les différentes périodes d'urbanisation et d'industrialisation de ses rives durant l'histoire ont participé à son instabilité écologique, au point qu'une poignée de pêcheurs se mobilisent dans les années 70 et déposent auprès de l'Europe une plainte. La Commission Européenne avait donné suite à celle-ci, estimant que la France n'avait notamment : *« pas pris toutes les mesures appropriées pour prévenir, réduire et combattre la pollution massive et prolongée de l'étang de Berre »* (Keller 2006). La France devient ainsi le seul pays condamné lors de la convention de Barcelone en 1977 pour l'état écologique désastreux de l'étang.

Depuis 2000, le GIPREB (Groupe d'Intérêt Public pour la Réhabilitation de l'Etang de Berre en 2000 devenu Syndicat mixte Gestion Intégrée Prospective et Restauration de l'Etang de Berre en 2012) travaille sur des mesures d'amélioration de l'état écologique de l'étang, tout en réalisant son suivi scientifique. L'un des projets du GIPREB est évidemment la restauration des herbiers de zostères caractéristiques des lagunes méditerranéennes. La superficie des herbiers de zostères a largement régressé depuis la création de la centrale hydro-électrique de Saint-Chamas en 1966, passant de 6000 hectares à quelques dizaines d'hectares actuellement (Mayot, Faure, et Grisel 2019). Si des mesures étatiques ont progressivement réduits les quotas de rejets d'eau douce et de limons duranciens dans l'étang, ces réductions n'ont pas permis de restaurer une superficie conséquente des herbiers, l'objectif de la Directive Cadre sur l'Eau étant de 1500 ha d'herbier pour 2027 (GIPREB Syndicat Mixte 2022c). En 2009, le GIPREB a tenté des réimplantations expérimentales de zostères (*Zostera marin*a et *Zostera noltii*) (Bernard et al. 2011). Malgré l'appui d'experts scientifiques et un suivi scientifique fin durant près de trois ans, les résultats modestes de survie n'ont pas amené le GIPREB a relancé une expérimentation comme prévu (Bernard et al. 2011). Pourtant, aujourd'hui, l'association « 8 vies pour la planète » basée à Saint-Chamas souhaitent retenter l'expérience : le projet ZoRRO 1 s'est déroulé en juin 2021, présentant des résultats comparables (Bazile 2022). S'inspirant de projets citoyens à travers le monde, l'association souhaite travailler dans le temps, étalant l'expérimentation sur dix années. Le projet ZoRRO 2 doit ainsi se dérouler en ce mois de juin 2022 dans l'étang de Berre (Bazile 2021c).

Ce mémoire questionne ainsi les méthodologies et démarches de ces deux organismes ayant travaillé sur la réimplantation de zostères dans l'étang de Berre. Entre une démarche scientifique du GIPREB à une démarche empirique de l'association « 8 vies pour la planète », peut-on observer des objectifs, des techniques ou des méthodologies de suivi des transplants différents ? Quels gains peut-on en déduire ou observer pour la restauration des herbiers de zostères ? Traitant des démarches de transplantations des zostères dans l'étang de Berre, empirique d'une part par l'association « 8 vies pour la planète » et scientifique d'autre part par le GIPREB, la question sous-jacente à ce mémoire pourrait être formulée de la manière suivante : l'échec d'une mesure de restauration doit-elle uniquement conduire à l'objectif d'une réduction des pressions sur le milieu ? Autrement dit, les difficultés rencontrées par le GIPREB quant à la reprise des transplants de zostères doivent-elles n'amener qu'à l'arrêt des expérimentations ? L'apprentissage par l'erreur ne porte-elle pas des enseignements nécessaires à l'amélioration de choix techniques ou scientifiques, mais aussi intégrer une mission de sensibilisation et de mobilisation citoyenne, indispensable dans notre société actuelle ?

Dans une première partie, nous verrons les enjeux liés à l'étang de Berre, ses principales caractéristiques et les pressions qu'il subit engendrant une détérioration des herbiers de zostères. Par la suite, nous présenterons les différents projets et déterminerons les critères de comparaison entre les deux démarches. Nous ferons enfin l'analyse de ces projets, l'un scientifique l'autre empirique, au travers des critères préalablement choisis. Enfin, nous verrons pourquoi une collaboration de ces deux organismes paraît nécessaire dans un futur proche.

2. L'étang de Berre : la complexité d'un milieu

2.1 Présentation d'un site d'étude hors norme

2.1.1 L'étang de Berre ou la lagune de Berre ?

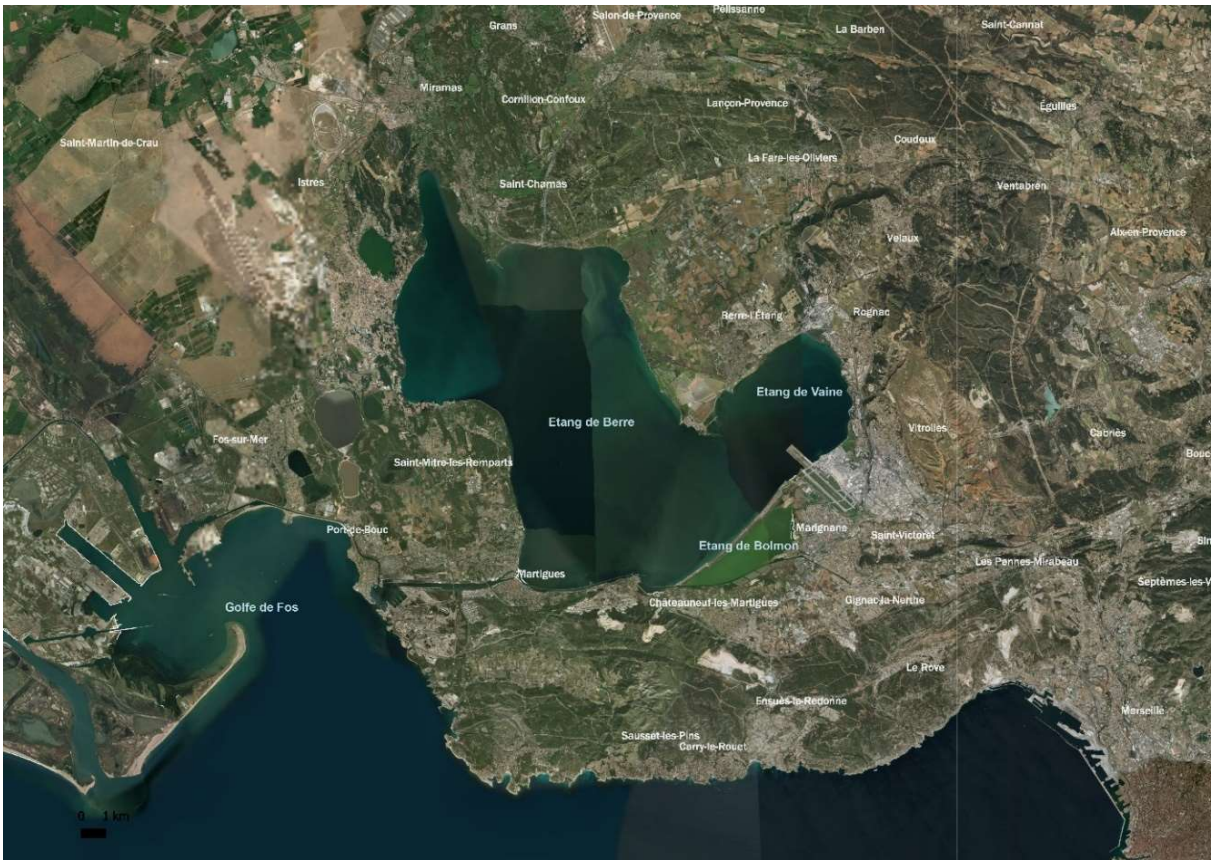


Figure 1. Carte de l'étang de Berre (Production QGIS - Orthophoto et BDtopo 2017)

Situé au nord-ouest de Marseille, l'étang de Berre est une étendue d'eau d'une surface de 155 km², présentant un littoral de 75 de long et réparti sur dix communes : Martigues, Chateauneuf-lès-Martigues, Marignane, Vitrolles, Rognac, Berre-l'étang, Saint-Chamas, Miramas, Istres et Saint-Mitre-les-remparts. L'étang de Berre se compose de ce que l'on appelle le grand étang (la partie centrale de l'étang de Berre), de l'étang de Vaïne à l'est (bordant les communes de Berre-l'étang, Rognac, Vitrolles et Marignane) et de l'étang de Bolmon. Ce dernier est une véritable petite lagune au sud-est de l'étang de Berre, séparée de celui-ci par le cordon dunaire du Jaï. L'étang de Berre est aussi bordé par plusieurs petits étangs, comme l'étang de l'olivier à Istres ou encore l'étang de citis et l'étang du pourra à Saint-Mitre-les remparts (Figure 1).

L'étang de Berre est relié à la Méditerranée et au golfe de Fos par le chenal de Caronte. La dite « chenalisation » de cet ancien étang a été souhaité par les négociants marseillais au cours du XIXe siècle, souhaitant faire de l'étang de Berre une banlieue industrielle du port de Marseille (Daumalin 2003), l'étang offrant une situation abritée pour les bateaux commerciaux et une proximité avec le Rhône. Cette « chenalisation » a donc ensuite été complété par la création du canal d'Arles à Bouc (engendrant la création de la commune de Port-de-Bouc par la suite) et du tunnel du Rove au début du XXe siècle. Ce dernier est un canal navigable traversant le massif de la Nerthe sur une dizaine de kilomètres, reliant le port de Marseille à l'étang de Berre, sans passer par la Méditerranée. Si l'étang de Berre présentait déjà une liaison avec la mer via l'étang de Caronte auparavant, sa faible bathymétrie au XVIIIe siècle (entre 1 et 2m) induit des apports maritimes moindres qu'actuellement. La vaste « marinisation » (expression utilisée par le GIPREB) de l'étang de Berre, lui conférant un régime hydrographique de lagune, est liée à cette « chenalisation » de l'étang de Caronte évoquée précédemment. Pourtant, géologiquement, ce n'est pas une lagune, puisque non séparée de la mer par un lido ou tombolo.

2.1.2 Un vaste bassin versant

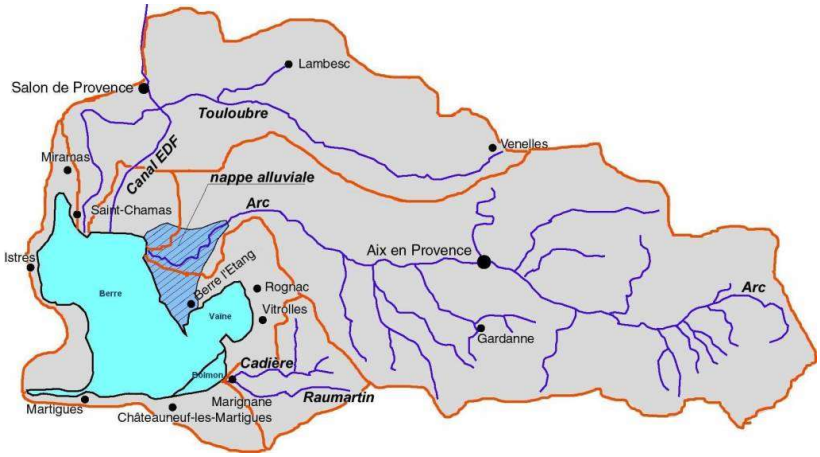


Figure 2. Bassin versant naturel de l'étang de Berre (source : GIPREB)

L'étang de Berre présente deux bassins versants : l'un que l'on peut qualifier de « naturel », l'autre « d'artificiel ». Le bassin versant dit « naturel » (Figure 2) de l'étang de Berre se dessine par le tracé des cours d'eau de la Touloubre, de l'Arc et indirectement, de la Cadière (ce dernier se jetant dans l'étang de Bolmon).

Ce bassin versant naturel a la particularité d'être vaste puisque l'Arc prend sa source dans le département du Var, présentant une superficie de 1700 km² (GIPREB Syndicat Mixte 2022a).

Figure 3. Bassin versant artificiel de l'étang de Berre (source : GIPREB)

Depuis 1966, l'étang de Berre reçoit les eaux douces turbinées de la centrale hydraulique de Saint-Chamas, point final de la chaîne Durance-Verdon. Celle-ci produit une grande quantité d'énergie grâce à une multitude d'aménagements hydrauliques le long du canal EDF, lui-même alimenté par les eaux de la Durance (SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils 2004). Ceci a pour conséquences le rejet annuel de centaines de millions de mètres cubes d'eau dans l'étang de Berre, maintes fois réduit par des mesures étatiques depuis la mise en service de la centrale (GIPREB Syndicat Mixte 2022b). Le bassin versant « artificiel » de l'étang présente ainsi une superficie d'environ 13 000 km² (Figure 3), portant le bassin total de l'étang à une valeur de 14 600 km² (GIPREB Syndicat Mixte 2022a). On pourrait ajouter à ce vaste bassin versant les apports, bien moindres, des canaux agricoles se jetant dans l'étang de Berre à l'ouest, comme ceux du canal Boisgelin à Istres.

2.1.3 L'instabilité d'un milieu sous pressions

Si l'implantation industrielle dès le début XIXe siècle a généré de nombreux rejets polluants dans l'étang de Berre (Bartolotti 2020), la création de la centrale de Saint-Chamas dans les années 60 a engendré de conséquents rejets d'eau douce et de limons duranciens dans l'étang de Berre. Ces limons duranciens ont stabilisé, au fond de l'étang, les pollutions évoquées précédemment, mais ils ont aussi changé radicalement la nature des fonds : *« Avant 1966 les fonds de l'étang sont déjà décrits comme des fonds vaseux. A partir de 1966, les apports de la centrale ont enrichi l'étang en particules fines. Après la mise en place du bassin de délimonage de Cadarache en 1980, seul le matériel le plus fin atteint l'étang (Arnoux, 1977). Ces limons duranciens constituent à présent une grande partie des dépôts récents de l'étang de Berre. La proportion d'éléments fins est plus importante dans le nord que dans le sud de l'étang, résultat de l'influence décroissante des apports du canal (Roux et al, 1993 in GIPREB, 2002) »* (SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils 2004).

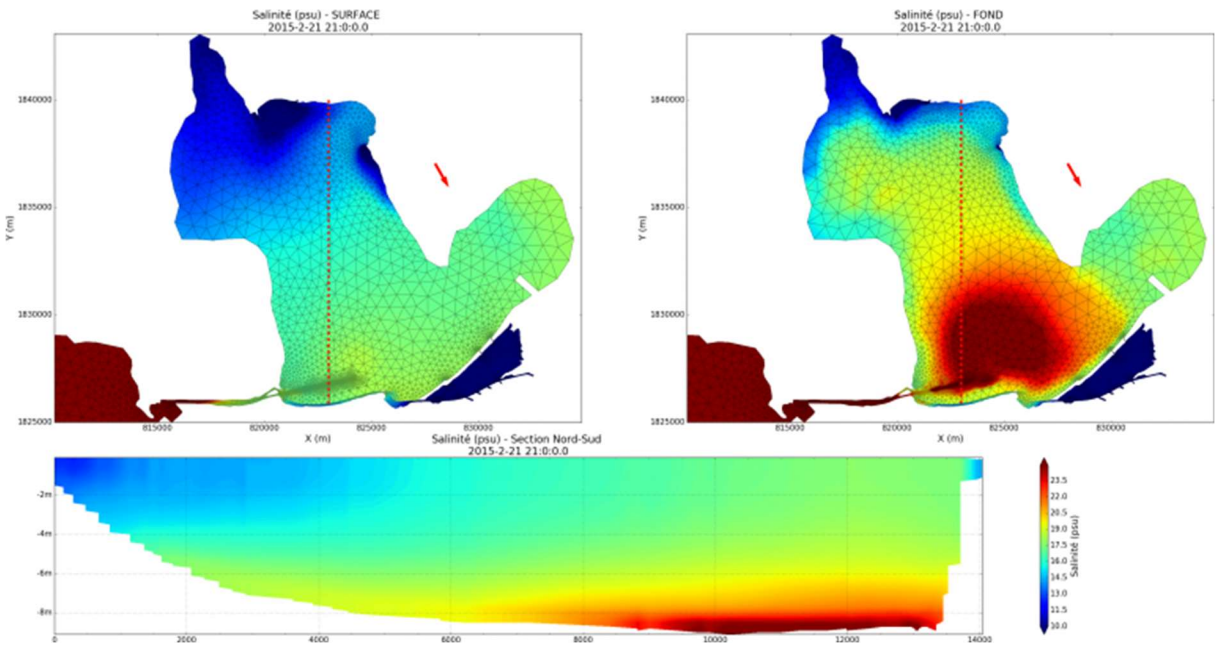


Figure 4. La stratification des eaux de l'étang de Berre (source : GIPREB)

Ces apports de limons s'accompagnent aussi d'apports de nutriments, mais surtout d'eau douce conséquents, entrainant une stratification des eaux avec les eaux salées, du nord au sud, mais aussi verticalement dans la colonne d'eau, de la surface jusqu'au fond de l'étang (Figure 4) (SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils 2004). L'irrégularité de ces rejets conséquents, l'hydrodynamisme engendré par ceux-ci et lors de forts mistrals, les fortes chaleurs estivales et l'apport de nutriment par la centrale favorise les phénomènes d'anoxie et d'eutrophisation de l'étang de Berre, comme lors de la crise de 2018 (Faure 2018). Comme nous allons le voir par la suite, ceci a logiquement une incidence sur les herbiers de zostères de l'étang de Berre.

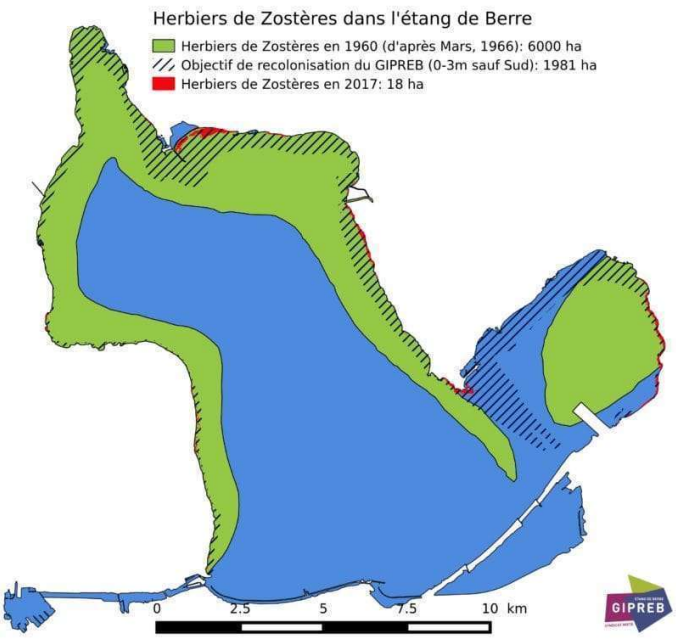
2.2 Les herbiers de zostères dans l'étang de Berre

2.2.1 Les zostères, des « ingénieurs d'écosystème »

Les zostères sont des phanérogames marines vivant notamment dans les lagunes côtières méditerranéennes. Les herbiers de zostères sont particulièrement importants puisqu'ils sont considérés comme des « ingénieurs d'écosystèmes », favorable à la réserve de ressources utilisables pour de nombreux organismes marins. En cela, ils sont de véritables habitats porteurs d'une riche biodiversité : *« Ecosystem engineers are organims that directly or indirectly modulate the availability of ressources (other than themselves) to other species, by causing physical state changes in biotic or abiotic materials. In so doing they modify, maintain and/or create habitats »*(Jones, Lawton, et Shachak 1994). Si les herbiers de zostères ont ainsi un intérêt écologique, il en découle un intérêt économique puisque *« ces habitants servent de zone de reproduction, de nurseries et de nourissage pour des espèces d'intérêt économiques »* (Dandine 2013). Les services écosystémiques produits par les zostères seraient estimés à *« 580 000 euros par hectare par an »* (GIPREB syndicat Mixte 2021).

2.2.2 L'évolution de la répartition des Zostères dans l'étang de Berre

La répartition des zostères dans l'étang de Berre a largement évolué depuis la création de la centrale hydroélectrique de Saint-Chamas en 1966. D'une superficie de 6000 ha dans les années 60, les herbiers ont progressivement régressé jusqu'à atteindre seulement quelques hectares autour des années 2000. En 2017, la superficie recouverte par les zostères est d'environs 18ha, ce qui est à ce jour, la plus grande superficie connue atteinte par les herbiers dans l'étang de Berre au XXIème siècle. Après la crise de 2018, le GIPREB estime la dégradation entre 40 et



60% des herbiers (Faure 2018). Nous sommes actuellement à environs 8-9 ha de zostères colonisant les rives de l'étang. Les problèmes causés par la centrale de Saint-Chamas ont mené à de progressives restrictions décidées par l'Etat quant à la quantité d'eau douce et de limons à rejeter dans l'étang (tableau 1).

Figure 5. Evolution de la répartition des herbiers de zostères (représentés par les ronds verts) entre 1966 et 2017 dans l'Etang de Berre (Source : GIPREB).

Tableau 1. Historique des mesures de restrictions des apports EDF (Eau douce et limons) de 1966 à Aujourd'hui (Production Excel - Données des rapports du GIPREB et du rapport parlementaire)

	Année	Limites autorisés d'apport en eau d'EDF (en millions de m3)	Limites autorisés d'apport en limons d'EDF (en tonnes)
Historique des limitations des rejets EDF	1966	3600 (à la création de la centrale)	800 000 (à la création de la centrale)
	1980	3600	400 000 (bassin de délimonage)
	1994	environs 3000 (baisse de 15%)	200 000
	1995	2100	200 000
	1999	2100	100 000 (rejets dans la Durance à Mallemort)
	2006	1200	60 000
Moyenne des rejets	2006-2020	Environs 900	Environs 50 000
Demande de réduction actuel	**Aujourd'hui**	**600**	**pas de restriction demandée**

2.2.3 La crise de 2018 : eutrophisation et anoxie

Tableau 2. Tableau de comparaison annuel entre superficie d'herbiers de zostères, apports d'eau douce par la centrale et apports de limons par la centrale EDF (Production Excel - Chiffres des rapports du GIPREB et rapport parlementaire)

	Année	Superficie d'herbiers de zostères (en hectares)	Apports en Eau douce par EDF (en millions de m3)	Apports en limons par EDF (en tonnes)
Historique	1966	6000	3600 (à la création de la centrale)	800 000 (à la création de la centrale)
	2006	Non disponible	788,2	45 632,0
	2007	Non disponible	841,4	40 756,0
	2008	Non disponible	665,6	57 011,0
	2009	1,2	1 057,8	43 740,0
	2010	Non disponible	951,1	57 229,0
	2011	Non disponible	1 035,9	45 458,0
	2012	Non disponible	780,1	59 505,0
	2013	4,4	1 035	57 918,8
	2014	Non disponible	959,6	33 653,3
	2015	Non disponible	985,5	57 751,6
	2016	Non disponible	1 185,4	54 759,2
	2017	17,93	1036,0	34 070,3
	2018	Non disponible	1 198,2	49 782
	2019	Entre 7,2 et 13	840,2	30 019,3
	2020	8,2	1493,5	40079,0
Moyenne depuis 2006	-	8,4	934,1	47157,2
Objectif DCE	2027	1500	pas d'objectif	pas d'objectif
Négociation de l'objectif	**2027 --> 2035**	**1500**	**pas d'objectif**	**pas d'objectif**

Si les apports massifs de la centrale EDF ont radicalement bouleversé et modifié la faune et la flore marine de l'étang de Berre, on peut remarquer dans le tableau ci-joint (Tableau 2) que la progression des herbiers de zostères était conséquente depuis 2013, et ceci, malgré les apports d'eau et de limons conséquents d'EDF. L'eutrophie et l'anoxie de l'étang en 2018 est lié à un « effets cocktails » de différents effets de forçages (Faure 2018) : les rejets d'eau douce d'EDF, mais aussi les apports d'eau pluviaux élevés en 2018, les très fortes chaleurs estivales, le manque de vents favorisant la stratification des eaux … L'eutrophisation est liée à l'accumulation de nutriments dans le milieu, d'azote, de phosphore et autres. Lors de phénomènes d'eutrophisations, certaines espèces végétales, comme les algues prolifèrent démesurément. Leur décomposition va consommer l'oxygène présent dans l'eau, générant une anoxie de l'étang et donc la mort des espèces présentes. On remarque ainsi que la perte des zostères a été conséquente, entre 40 et 60% comme dit précédemment, sans oublier les préjudices économiques liés à la pêche et aux activités touristiques sur le littoral. Mais cette crise a aussi accéléré la dynamique positive dans laquelle était l'étang de Berre depuis quelques temps, les collectivités locales s'engageant auprès de l'Etat, quelquesoit les clivages politiques, pour la réhabilitation de l'étang de Berre (Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre 2020).

Conclusion

L'étang de Berre présente une telle complexité qu'il apparaît comme un milieu hybride, dépassant la simple dissociation entre espace naturel et espace artificiel. Cette présentation succincte laisse entrevoir de fortes pressions liées à son industrialisation passée et actuelle sur la faune et la flore, et notamment sur les herbiers de zostères qui nous intéressent particulièrement dans le cadre de ce mémoire.
Si l'étang de Berre a été conséquemment bouleversé par les rejets divers de la centrale EDF, la présence d'herbiers de zostères dits « reliques » porte l'espoir d'un renouveau. Les nombreux services écosystèmiques rendus par les zostères et la richesse faunistique et floristique marine qu'ils abritent conduisent le GIPREB à suivre leurs progressions. On notera d'ailleurs le projet HYPERBERRE de cartographie des herbiers par image hyperspectrale en 2017-2018 (GIPREB Syndicat Mixte 2022d), poursuivi par un projet de cartographie des herbiers via images satellite Pleiades en 2019 (Mayot, Faure, et Grisel 2019). L'année 2017 est sans doute celle qui a présenté la plus grande superficie de zostères, la crise anoxique et eutrophique de 2018 a généré près de 50% de perte. Une plus grande superficie de zostères pourrait aider à stabiliser l'état écologique de l'étang. Rappelons que la France a été condamnée en 1977 pour l'état écologique de l'étang de Berre lors de la convention de Barcelone, à la suite d'une plainte de pêcheurs locaux. Rappelons aussi que la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) vise une colonisation des herbiers de zostères à hauteur de 1500ha pour 2027 (Tableau 2), échéance que les députés locaux tentent de repousser à 2035 (Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre 2020).
Ces actualités et le projet de classification de l'étang de Berre au Patrimoine mondial de l'UNESCO par M.G.Charroux (Rossi 2017), maire de Martigues, mettent un coup de projecteur sur la question des zostères et de la stabilité écologique de l'étang de Berre à l'échelle nationale. Parallèlement à cela, le GIPREB et l'association « 8 vies pour la planète » se mobilisent respectivement pour tenter d'agrandir la superficie des herbiers de zostères. Entre démarche scientifique et empirique, nous allons voir la teneur de ces deux projets de restauration écologique, leurs différences et leurs résultats.

3. Analyse des projets de restauration des herbiers de zostères

3.1 Présentation succincte des projets

3.1.1 Résumé du projet du GIPREB

En 2009, le GIPREB a débuté un projet de restauration des herbiers de zostères dans l'étang de Berre. Les transplants de *Zostera noltii* et de *Zostera marina*, prélevés à 5m de profondeur dans l'anse de Carteau, ont été transplantés sur six sites, tout autour de l'étang de Berre. Plantés en mottes ou en boutures, les transplants conditionnés en pots en fibre végétale biodégradable (Fertilpots) ont été réparti sur différents transects, parallèle au rivage. Ceci permet un suivi précis des transplants, réalisé sur une durée de 3 ans. L'objectif du suivi était aussi de comprendre les paramètres et conditions du milieu dans lequel les transplants ont évolué, notamment sur deux sites où le taux de survie des transplants est intéressant.

3.1.2 Résumé du projet de l'association « 8 vies pour la planète »

Pascal Bazile, référent du projet ZoRRO à l'association « 8 vies pour la planète » avait déjà déposé deux demandes d'autorisation en 2018 avec une autre association nommée « l'étang nouveau ». Les demandes de dérogation furent refusées par le Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel (CSRPN). La demande d'autorisation de 2021 avec l'association « 8 vies pour la planète » a été validé pour le motif suivant : *« Par rapport aux projets précédents, ce projet a été profondément revu et amélioré au regard des observations émises par des scientifiques de la région mais également en consultant un spécialiste américain du sujet ayant une expertise théorique et pratique reconnue sur le sujet »* (Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel 2021). En 2021, le projet ZoRRO propose une restauration de l'herbier de zostères par semis de graines de *Zostera marina* récupérés dans l'anse de Carteau. La découverte de rhizomes-épaves dérivant sur le site de prélèvement a encouragé une transplantation à l'aide d'agraffe métal pour une bonne tenue du transplant face à l'hydrodynamisme. Le projet propose l'idée d'un suivi par un organisme scientifique partenaire (GIPREB, Tour du Valat), mais cela n'est pas le cas, à ce jour. Ainsi, il est évoqué qu'il sera effectué *« 10 photos sous-marine « représentatives » de chaque parcelle tous les 2 mois"*(Bazile 2021a).

3.2 Sélection des des critères de comparaison des projets

3.2.1 Sélection des sources bibliographiques et sitographiques de chaque projet

La sélection des sources bibliographiques et sitographiques permettant de mieux comprendre le projet du GIPREB ne présente que peu de références :

- Les actes du colloque « LAGUN'R » comprenait une présentation par le GIPREB, l'université de Nice Sophia Antipolis, mais aussi les entreprises sélectionnées pour le projet de transplantations de zostères (Morancy conseil, P2A Développement, SAFEGE).
- Le mémoire de Master « Environnement Marin » (Aix-Marseille Université/ Mediterranean Institute of Oceanography) de Florian Dandine sur les « Transplantations de zostères : un outil clé pour l'interprétation écologique des herbiers de l'Etang de Berre).
- A cela s'ajoute les commentaires présents dans les bilans annuels du GIPREB de 2010 à 2014, pour notamment connaître certaines conclusions du suivi scientifiques.

Assez complets, ces documents abordent l'entièreté des éléments recherchés. Le peu de documents ne remet pas en cause leurs qualités. Il était aussi difficile d'intégrer plus de références dans le temps imparti.

La sélection des sources bibliographiques et sitographiques, permettant de mieux comprendre les projets ZORRO 1 et ZORRO 2 par l'association « 8 vies pour la planète », regroupe deux types de documents :

- Les rapports de présentation de projet et de suivi fait par Pascal Bazile, membre de l'association. On note la présence d'un rapport de présentation antérieur au projet ZoRRO 1, puisque P.Bazile avait déjà réalisé des demandes d'autorisation pour travailler sur les herbiers de zostères avec une autre association militant pour la réhabilitation de l'étang de Berre.
- Les autorisations juridiques et avis des experts concernant le projet ZoRRO 1 (DDTM, CSRPN).

3.2.2 Choix des critères de comparaison des projets

Après lecture des sources bibliographiques et sitographiques, il a été possible de déterminer les différents critères de comparaison entre les deux démarches (Tableau 3). Les critères choisis ont ensuite été classé en trois temps ou phase du projet :

- Phase préparatoire : La préparation correspond à la définition du cadre préalable de l'action de restauration, comprenant la philosophie du projet, les objectifs, la définition de l'état de référence ou encore les autres projets références, ayant inspiré l'action de restauration à mener,
- Phase de mise en œuvre : La mise en œuvre de la mesure de restauration correspond à l'élaboration des méthodologies de réalisation (process), les choix techniques de transplantation, de matériaux, d'espèces, de la période de réalisation ou encore des sites choisis pour la transplantation,
- Phase de suivi : Les études et suivis des transplants intègrent à la fois les choix scientifiques de suivi, mais aussi les résultats de ses suivis.
-

Après réalisation de ce tableau (Tableau 3), la présence, la précision et la variabilité des données trouvées ont permis de sélectionner six critères de comparaison : deux critères par temps du projet. La durée courte pour réaliser ce mémoire a aussi influencé le nombre de critères de comparaison choisi. Le choix s'est donc porté sur six critères (deux critères par phase :

- Les objectifs des actions de restauration à entreprendre,
- Les autres projets, les références inspirant les actions de restauration,
- Les choix techniques des actions de restauration,
- Les espèces ciblées et prélevées pour transplantation,
- Le type de suivi effectué sur les transplants,
- Le taux de survie des transplants,

Si on ne tient pas compte de certains critères où l'on observe un manque de données, trois critères sont pourtant écartés. Nous les abordons brièvement maintenant :

- Le nombre d'expérimentation prévu dans chaque projet semble difficile à évaluer, notamment parce que toutes les expérimentations n'ont pas encore été réalisés par l'association « 8 vies pour la planète ». L'association prévoyait une expérimentation par an, durant 20 ans (Bazile 2021a). Chaque année, l'objectif est d'affiner la technique utilisée l'année passée, en fonction des observations relevées. Pour ZoRRO 1, le semis manuel de graines de *Zostera marina* s'est montré peu efficace (graine emportée par le courant, échouée sur la plage ou ingérée par des animaux). Pour le projet ZoRRO 2, une technique alternative inspirée d'une expérimentation au Pays-de-Galles doit être testée : *« le « Project Seagrass », issu du monde universitaire, est très intéressant pour son début opérationnel très récent. Les graines ont été placées dans de petits sacs de jute accrochés tous les mètres à une corde immergée (pour éviter leur dispersion dans une zone très soumise aux courants). Nous souhaitons tester cette méthode pour ZoRRO2 »* (Bazile 2021c). Ce projet ZoRRO 2 n'entre pas dans l'analyse comparative, n'ayant pas encore été réalisé.

Dans le cas du GIPREB, l'expérimentation devait être renouvelée une deuxième fois, mais le suivi des conditions du milieu a mené à la conclusion suivante : *« Ces résultats confirment le fait que l'Etang de Berre présente des caractéristiques d'un milieu encore trop perturbé pour garantir le succès de nouvelles transplantations. Ainsi, avant d'imaginer pouvoir utiliser les réimplantations comme outil de restauration de l'herbier à grande échelle au sein de l'étang, les conditions environnementales doivent s'améliorer »* (Dandine 2013).

- Les sites de prélèvement sont les mêmes. Le GIPREB et l'association « 8 vies pour la planète » ont récupéré des graines, des mottes et/ou rhizomes dans l'Anse de Carteau situé à l'ouest du golfe de Fos

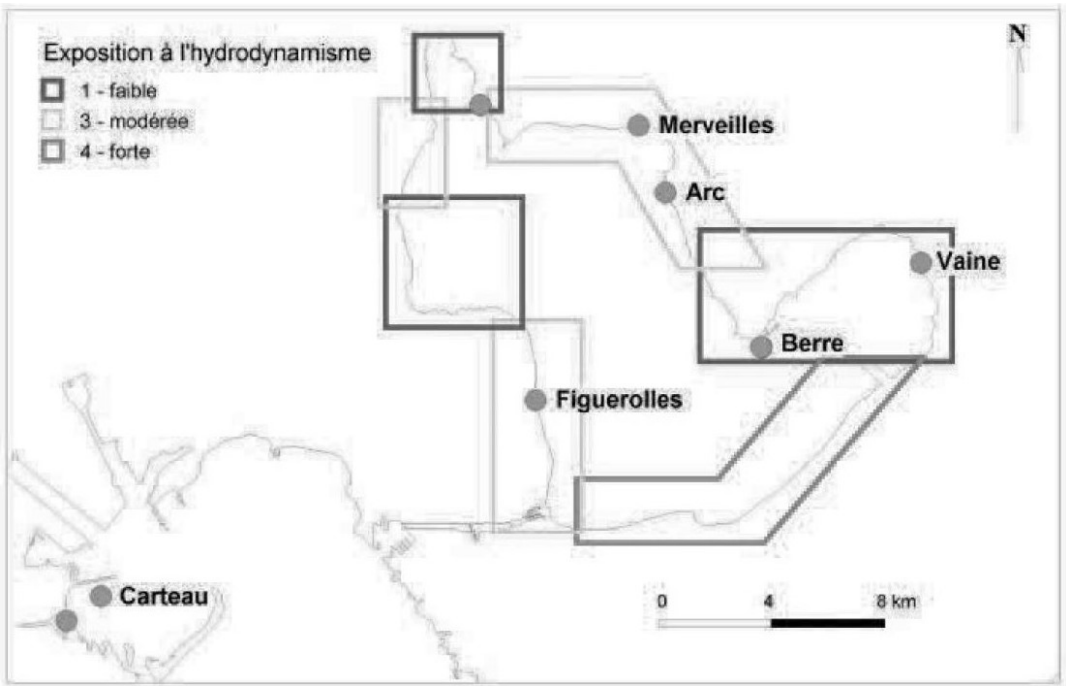


Figure 6. Représentation des niveaux d'exposition du rivage à l'action des vagues de vent (redessiné d'après Bernard, 2007) pour les 6 sites de réimplantation. Localisation du site donneur, anse de Carteau (Source : Actes du Colloque LAGUN'R).

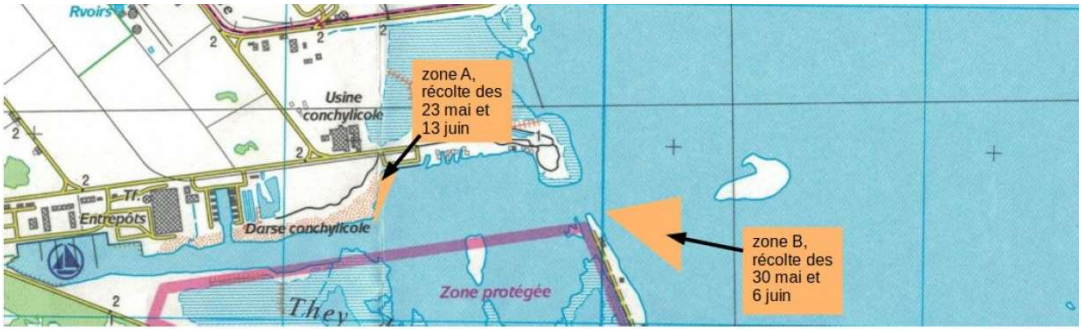


Figure 7. Lieu de ramassage des graines dans l'anse de Carteau - Zone A & B (Source : Rapport à l'issue de la campagne 2021 - Association "8 vies pour la planète")

- Les périodes de prélèvement des zostères dans l'anse de Carteau sont difficilement comparables entre les deux organismes, allant du 03 au 15 juin pour le GIPREB, du 23 mai au 22 juin pour l'association « 8 vies pour la planète ». Il en est de même pour les périodes de transplantations, étant effectué le jour même du prélèvement autant par le GIPREB que par l'association « 8 vies pour la planète ». N'étant pas biologiste marin, les effets de ces décalages de quelques jours, voire quasiment identiques, semblent difficiles à évaluer.

- Le nombre et choix des sites de transplantations sont différents dans les deux projets. Si ce critère est réellement intéressant, cela mériterait de réaliser des études physico-chimiques pour être réellement aboutir à une analyse constructive. On peut noter que l'association « 8 vies pour la planète » prévoyaient au départ simplement un semis sur un site (Bazile 2021a), la découverte de rhizomes-épaves ayant mené à des transplantations militantes (Figure 8). Pour définir les sites de réimplantation, le GIPREB réalise une analyse du milieu : l'hydrodynamisme, la topographie, les usages du littoral et enfin la présence, actuelle et passée, d'herbiers de zostères sont des facteurs déterminants dans la sélection des sites de réimplantation de zostères (Bernard et al. 2011). Les 6 sites choisis sur le littoral sont : l'embouchure de l'Arc à Berre-l'étang, la Pointe de Berre-l'étang, l'anse de Saint-Chamas, l'anse des Merveilles à Saint-Chamas, le Parc de Figuerolles à Martigues et le littoral de Vaïne à Vitrolles. Ces sites sont ceux présentant les conditions les plus favorables pour la reprise des transplants dans le fond de l'étang de Berre, selon le GIPREB. Tout en restant ouverts aux propositions d'autres sites, l'association « 8 vies pour la planète » préconise le choix de 2 sites de réimplantation : le site de Beaurivage à Saint-Chamas et le parc de Figuerolles à Martigues (Bazile 2021a). Pour P.Bazile, le site de Saint-Chamas a des atouts particuliers : *« Ce site a été colonisé assez tôt (avant 2014) par les zostères naines, peut-être suite aux essais de 2009. Il a très bien traversé la crise dystrophique de 2018 (0% de pertes ?). Il n'est pas fréquenté par les baigneurs. Il relativement facile d'accès, surtout en bateau depuis Saint-Chamas ».* On retrouve ainsi à peu près les mêmes critères de sélection entre les 2 organismes, bien que la proximité avec Saint-Chamas, pour le GIPREB, ne soit logiquement pas pris en compte. L'hydronamisme n'est aussi logiquement pas mesuré par l'association (sûrement par manque de moyens), mais on note tout de même la qualité d'observation et la régularité de pratique sur site au travers des remarques émises. Ces capacités pourraient amener à un développement de projets de sciences participatives autour de la question des herbiers de zostères dans l'étang de Berre.

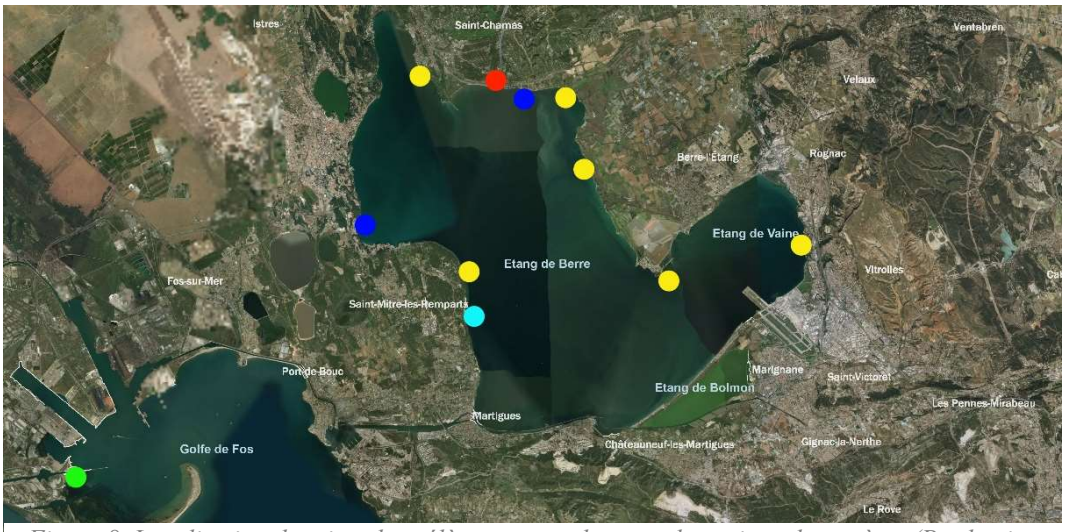


Figure 8. Localisation des sites de prélèvements et de transplantations de zostères (Production Photoshop - Source : Projet ZoRRO - Rapport à l'issue de la campagne/Rapport de suivi 2022). En vert : site de prélèvement du GIPREB et de « 8 vies pour la planète » - En jaune : sites de transplantation du GIPREB – En bleu clair : Site de semis des graines de zostères ZoRRO 1 – En bleu foncé : Site de transplantation militant des rhizomes-épaves par ancrage ZoRRO 1 – En rouge : Localisation des rejets de la centrale EDF

Tableau 3. Tableau des critères de comparaison des projets de restauration des herbiers de zostères
(Production Excel à partir des références bibliographiques et sitographiques)
En blanc : critères non sélectionnés / En jaune : données manquantes / En vert : critères sélectionnés

			GIPREB (Approche scientifique)		Association "8 vies pour la planète" (Approche empirique)			
			pas de nom		ZORRO 1		ZORRO 2	
Définition des critères de comparaison selon les phases du projet de restauration	Phase préparatoire	**Objectifs des actions**	*"Renforcer des populations qui subsistent à l'état relique en augmentant la diversité spécifique et génétique"* , mais aussi *"réintroduire les herbiers dans des secteurs où ils ont été présents par le passé et ont disparu du fait de l'action anthropique".*		*"Accélérer la restauration par rapport aux processus naturels",* notamment dans le cas des *Zostera marina* ou encore la nécessité d'expérimenter pour réajuster sa démarche : *"Que le résultat soit positif ou négatif, l'analyse renseigne sur l'importance relative des différents paramètres".*			
		Etat de référence choisi de l'étang de Berre	Entre 1925 et 1965 (juste avant la création de la centrale EDF en 1966)		Non précisé		Non précisé	
		Nombre d'expérimentations effectuées	Une expérimentation réalisée, non renouvelée		Une expérimentation réalisée, renouvelée chaque année durant 10 ans			
		Projets de références inspirant les actions de restauration	Projets scientifiques de restauration écologique		Projets scientifiques, mais aussi citoyens de restauration écologique avec des associations d'habitants, de pêcheurs ...			
	Phase de mise en œuvre	**Choix techniques de restauration des herbiers**	Transplantations par boutures et par mottes	Transplantations par boutures	Semis de graines à la volée	Ancrage de rhizomes-épaves (agraffes)	Semis de graines manuel et par petit sac biodégradable	Ancrage de rhizomes-épaves (agraffes)
		Espèces prélevés	*Zostera noltii*	*Zostera marina*	*Zostera marina*		*Zostera marina*	
		Sites de prélèvement	Anse de Carteau (Golfe de Fos)		Anse de Carteau (Golfe de Fos)		Prélèvement prévu dans l'anse de Carteau (Golfe de Fos)	
		Période de prélèvement	Du 03 au 15 juin 2009		Entre le 23 mai et le 22 juin 2021		Prélèvement prévu la première quizaine de juin 2022	Prélèvement prévu toute l'année 2022
		Sites de réimplantation	6 sites : Embouchure de l'Arc, Pointe de Berre, Anse de Saint-Chamas, Anse des Merveilles, Parc de Figuerolles, Littoral de Vaïne		2 sites : Anse de St-Chamas et pointe de Berre		Réimplantation prévu à la plage de Figuerolles, à la plage de Bouquet et dans l'Anse de St-Chamas	Réimplantation prévu dans le canal de Marseille au Rhône, le bassin de délimonage EDF, l'anse de Beaurivage et au Ranquet à Istres.
		Période de réimplantation	Du 03 au 15 juin 2009 (Au maximum, 6h entre la récolte et la dernière transplantation)		Entre le 23 mai et le 22 juin 2021 (transplantation le jour même)		Transplantation non réalisée, réimplantation prévue, au maximum, quelques heures après prélèvement	
		Sites témoins	Anse de Carteau (site de prélèvement) et Pointe de Berre (transplants prélevés sur site, replanté une dizaine de mètres plus loin).		pas de sites témoins		pas de sites témoins	
		Nombre de personnes mobilisées	Non précisé		Entre 2 et 13 personnes		Non précisé	
	Phase de suivi	**Type de suivi des transplants**	Suivi à la fois des transplants (croissance, densité qualité ...) et des conditions environnementales des sites de transplantations (lumière, substrats ...). La fréquence des différents suivis est variable, mais régulière.		Suivi photographique des transplants tous les deux mois		Suivi non réalisé	
		Taux de survie globale	9,00% après 2 ans	11,00% après 2 ans	0% après 1 an	20 % après 1 an		
		Nombre de personnes mobilisées	Non précisé		Non précisé			

3.3 Comparaison des projets de restauration des herbiers de zostères

3.3.1 Comparaison des phases préparatoires de chaque projet

Les projets de restauration des herbiers de zostères, du GIPREB et celui de l'association « 8 vies pour la planète », se différencient par leurs objectifs et leurs philosophies différentes. Le GIPREB est un organisme scientifique travaillant sur l'étang de Berre depuis les années 2000. La création par l'Etat de ce GIP (Groupement d'Intérêt Public) à cette même date, devenu syndicat mixte en 2010 (ce changement peut à la fois être vu comme un éloignement des services de l'Etat, mais aussi comme un rapprochement vers l'échelle locale, facilitant la collaboration avec les collectivités locales, les pêcheurs et les associations), est issue de mobilisations citoyennes dans les années 90 à la suite des nombreuses dégradations qu'avaient subi l'étang : « *Cette mobilisation est relayée par le Syndicat intercommunal pour la sauvegarde de l'étang de Berre et les collectivités territoriales, avec en particulier l'organisation d'un référendum d'initiative populaire en décembre 1991 et la création d'un collectif d'associations »* (GIPREB Syndicat Mixte 2019). Tiraillé entre l'Etat et les demandes locales, les contradictions et les revendications, le GIPREB doit mener sa difficile mission de suivi scientifique et de réhabilitation de l'étang de Berre (GIPREB Syndicat Mixte 2019). Dans ce contexte où la complexité est de mise, mais aussi où l'efficacité du GIPREB a parfois été remise en cause (concernant, par exemple, le projet de dérivation des rejets EDF vers la mer ou le Rhône (Cheinet 2020)) : *« Il a pris le plus fort de ses parents, l'exigence d'excellence et l'autorité de papa* (l'Etat), *la générosité et l'espérance de maman* (les collectivités locales)*... […] Puis, il revendique haut et fort qu'on cesse un peu de parler de lui, de sa santé fragile et de son caractère difficile, pour s'accorder sur le Projet, sur l'avenir, sur le désir. Finalement, contre-vents et marées, il va son chemin"* (GIPREB Syndicat Mixte 2019). La rigueur d'une démarche scientifique est ainsi gage de sérieux et de légitimité. Dans le contexte des années 2008, les herbiers de zostères présentent une tendance positive : *« les conditions actuelles du milieu semblent potentiellement aptes à permettre le développement de Zostera et des tâches reliques sont encore présentes sur les site de réimplantation »* (Bernard et al. 2011). Ainsi, le projet de transplantation des zostères du GIPREB s'appuie sur deux objectifs principaux : *« Renforcer des populations qui subsistent à l'état relique, en augmentant la diversité spécifique et génétique »,* tout en essayant de *« réintroduire les herbiers dans les secteurs où ils ont été présents par le passé et ont disparu du fait de l'action anthropique »* (Bernard et al. 2011). Au travers du suivi scientifique, l'intérêt sera de voir à la fois comment les transplants survivent ou se dégradent dans le temps, mais aussi d'étudier les conditions du milieu dans lequel les zostères sont transplantés (hydrodynamisme, salinité, luminosité …). Car la question de la possible réimplantation de zostères pose une question délicate : comment l'étang de Berre, décrié pour son mauvais état, pourrait-il conférer aux transplants de zostères de bonnes conditions pour leurs croissances ? On peut émettre l'hypothèse que l'une des questions sous-jacentes au projet est bien celle-ci, la longue durée du suivi des transplants et des conditions du milieu prévue appuyant cette idée. La multitude de projet de restauration cité par le GIPREB, aux Pays-Bas (Department of Environmental Studies, University of Nijmegenn), aux Etats-Unis (par la Virginia institute of Marine Science) et plus largement à travers l'Europe (Bernard et al. 2011), ne présente d'ailleurs que de cours suivi (d'une année généralement). A cette question de la viabilité des transplantations s'ajoute celle de l'état de référence : *« le site précis et le biotope de réimplantation ont été autrefois occupés par Zostera » et « […] des tâches reliques sont encore présentes sur les sites de réimplantation »* (Bernard et al. 2011). Pour le GIPREB, la période précédant la création de la centrale EDF est la meilleure : *« L'équilibre est donc atteint en 1964, l'écosystème fonctionne alors comme une lagune méditerranéenne marinisée, profonde et stable »* (SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils 2004). Ce point a été confirmer par l'une des grandes références sur la question, James Aronson, définissant un état de référence à la période 1925-1966 : *« en réunissant des indicateurs économiques, sociales et*

écologiques, la période 1925-1966 paraît judicieuse pour la construction d'un système de référence » (GIPREB Syndicat Mixte 2011). Dans une situation délicate, entre Etat et collectivités locales, le GIPREB a toujours dû avancer de front sur le sujet complexe de l'Etang de Berre. Si comme nous allons le voir après, une démarche scientifique est garante de résultats clairs et communicables, il est aussi question de garantir la pertinence et légitimité d'un organisme scientifique devant faire front face aux critiques et dans une situation plus que complexe. Ce besoin de légitimité naît aussi de son statut précaire de départ : prévu pour 6 ans, le GIPREB a ensuite poursuivi sa mission jusqu'en 2010, changé de statut en 2010 et il est aujourd'hui questionner par la loi NOTRE (chevauchement de compétences avec le GEMAPI de la métropole AMP) (GIPREB Syndicat Mixte 2019).

La démarche de l'association « 8 vies pour la planète » est différente, on peut la qualifier d'empirique et de participative. Il est intéressant de rappeler que l'initiative du projet ZoRRO 1 en 2021 naît de Pascal Bazile, ayant déjà tenté de lancer un tel projet de restauration écologique en 2018 avec l'association « l'Etang nouveau » (Bazile 2018). A cette époque, P.Bazile parle déjà d'une *« expérience d'ingénierie participative, c'est-à-dire l'association de bénévoles à des projets concrets d'ingénierie écologique »* et d'organisations similaires tel que « les jardiniers de la Mer » à Hyères ou encore « l'association pour le Reboisement et la Protection du Cengle Sainte-Victoire » à Aix-en-Provence (Bazile 2018). Pour le projet de 2021, la méthode choisie de récupération de graines à semer directement dans l'étang fait référence au projet participatif de la *Virginia Institute of Marine Science : « Une des clés du succès de l'expérience de Virginie semble avoir été la collaboration de scientifiques et de bénévoles »* (Bazile 2021a). L'association « 8 vies pour la planète » a d'ailleurs bénéficier de quelques conseils de la part de Robert Orth, membre de l'institut américaine. Face à l'intérêt que présente les herbiers, les objectifs de l'association sont donc *"d'accélérer la restauration par rapport aux processus naturels"*, notamment dans le cas des *Zostera marina* (Bazile 2018) en faisant récupérer et semer des graines à des bénévoles, des citoyens. Car c'est aussi par l'action que la sensibilisation s'effectue, que les questions sur notre société émergent : « *8 vies pour la planète est une association d'innovation technique au service de l'environnement. Au sein de notre laboratoire de développement, nous concevons des dispositifs de haute technicité pour la recherche scientifique. Notre objectif est aussi de placer cet univers à la portée de tous afin de voir émerger en chacun un esprit critique sur les enjeux du futur. Nous proposons aux participants de nos ateliers citoyens d'enrichir leurs connaissances sur les interactions entre l'humain et le monde qui nous entoure de façon ludique et artistique »* (8 vies pour la planète s. d.).
Un autre point à relever dans la démarche de l'association est l'importance d'apprendre par « le faire », par l'échec pour améliorer et ajuster sa démarche. : *"Du point de vue de la méthodologie générale, c'est fondamentalement le passage de la simple observation à une démarche expérimentale, laquelle est souvent plus riche d'enseignement. Que le résultat soit positif ou négatif, l'analyse renseigne sur l'importance relative des différents paramètres (substrat, courants ...)"* (Bazile 2018). Le long terme du projet prévu, s'étalant sur 20 années, permet ainsi d'apprendre progressivement des erreurs et des succès des techniques et méthodologies, des facilités et difficultés d'organisation, des limites et capacités du site de prélèvement comme des sites de réimplantation. Si elle s'inspire aussi de démarches scientifiques, l'association « 8 vies pour la planète » valorise une démarche de sensibilisation, valorisant le collectif et l'apprentissage par la répétition.

3.3.2 Comparaison des choix de mise en œuvre

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le choix des espèces de *Zostera* n'est pas le même, puisque que le GIPREB tente la transplantation de *Zostera noltii* et *Zostera marina,* l'association « 8 vies pour la planète » se concentrant uniquement sur *Zostera marina.* Cette dernière espèce bénéficie de protection à l'échelle régionale, nationale et européenne. Pour l'association, l'intérêt est de restaurer les herbiers de l'espèce considérée la plus sensible. Selon P.Bazile, la dynamique des *Zostera noltii* est positive dans l'étang de Berre, puisque malgré la violence de la crise 2018, *« on estime que 50 % des herbiers de zostères naines ont survécu, avec des disparités géographiques très importantes (0 à 100%)* (Bazile 2021a). En revanche, la progression des herbiers de *Zostera marina* est considérée plus lente, alors que plus importante pour la stabilité écologique de l'étang de Berre : *« D'un point de vue biologique, un grand herbier de zostère améliore la stabilité physico-chimique de la masse d'eau (production d'oxygène, consommation régulière des intrants qui limite les blooms planctoniques). Un herbier augmente aussi la biodiversité, de nombreuses espèces étant dépendantes de sa présence. Sur les deux aspects précédents, un herbier de zostères marines est supposé meilleur qu'un herbier de zostères naines ou de cymodocées »* (Bazile 2018). Comme nous l'avons précédemment, le but pour le GIPREB n'est pas le retour d'espèces rares ou disparues dans l'étang de Berre, mais à la fois de conforter celles présentes, tout en jugeant si la restauration d'herbier est possible face aux nombreuses pressions que subit l'étang de Berre (Bernard et al. 2011). Notons qu'à l'occasion des échanges lors des ateliers du GIPREB liés à la mission d'information parlementaire, il est ressorti que la transplantation de Zostera marina paraît difficile, car elle serait *« assez peu tolérante aux températures élevées »* (GIPREB syndicat Mixte 2021). Le suivi des transplants par le GIPREB indiquait d'ailleurs une forte variabilité des températures, allant de 5° jusqu'à 29°c (Bernard et al. 2011). On peut d'ailleurs se demander si l'augmentation des températures liée aux changements climatiques mondiales, comme prévue par les experts du GIEC (Groupe International d'Experts sur l'Evolution du Climat), n'amène-t-elle pas au pessimisme quant à l'existence des *Zostera marina* dans l'étang de Berre (Masson-Delmotte et al. 2019) ? Enfin, il est important de soumettre quelques réserves quant à la transplantation accidentelle de cymodocées, confondus avec certaines Zostères, ce qui peut poser quelques questions concernant la méthodologie inadéquate et malfaçons involontaires que cela peut engager. Pour autant, au vu de toutes les altérations, pollutions et transformations drastiques qu'à subit l'étang de Berre, il semble difficile de condamner ces approximations méthodologiques face aux complexités innombrables qu'elle devrait intégrer et qui pourrait aboutir à ne faire aucun choix et donc à ne pas engager d'action de transplantation de la part de la société civile.

En ce qui concerne les choix de mise en œuvre, qui sont différents entre les deux organismes, on note aussi qu'ils tentent respectivement de maximiser la tenue des transplants dans les fonds, devant faire face à l'hydrodynamisme de l'étang. Pour s'assurer d'un bon ancrage, le GIPREB choisit de conditionner les boutures en sachet de 20 à 30 boutures, tandis que les mottes ont été conditionnées dans des pots biodégradables (fertilpots) (Bernard et al. 2011), avant plantation. Sur chaque site, les transplants sont répartis sur 3 transects de 15 m (Figure 9), un transect de 30 boutures de *Zostera noltii*, un transect de 30 boutures de *Zostera marina* et un transect de 15 mottes de *Zostera noltii* (Figure 9) (Dandine 2013).

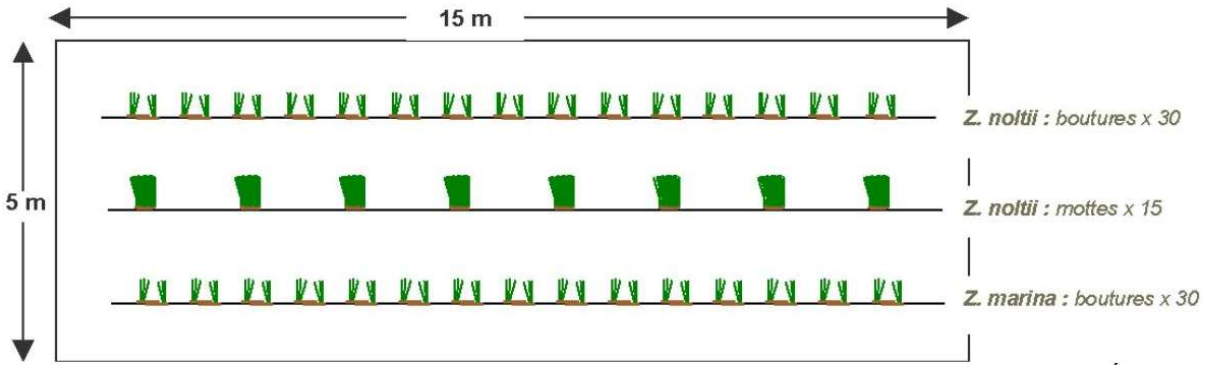


Figure 9. Schéma de répartition des transplants sur chaque site de transplantation de l'Etang de Berre (Source : Mémoire de F.Dandine sur la transplantation des zostères).

Du côté de l'association « 8 vies pour la planète », les rhizomes-épaves sont ancrés au fond vaseux de l'étang de Berre grâce à ficelles de toile de jute biodégradable, les liant à des fer tors pliés en « S ». Il peut y avoir de 1 à 5 rhizomes-épaves par ancrage de fer tors (Figure 8). Il n'y a pas de schéma d'implantation particulier, étant parfois groupés et parfois isolés. On peut émettre l'hypothèse de la dangerosité, pour les usagers de l'étang, de ce mode d'ancrage. L'avantage est évidemment son faible coût, tout comme la technique de simple récolte et semis de graines dans l'étang de Berre.

Figure 10. Photo d'un ancrage de fer tor (Source : Rapport de suivi de l'association « 8 vies pour la planète »).

Figure 11. Photo d'un épi de zostères, du plus au moins mature, de gauche à droite (Source : Rapport de suivi de l'association « 8 vies pour la planète »).

Ce dernier point est aussi un avantage non négligeable de la mise en œuvre pensée par l'association « 8 vies pour la planète ». L'opportunité d'utilisation des rhizomes-épaves en dérive, la récolte de graines (Figure 9), la proximité des sites d'implantation choisie, le caractère bénévole de la main d'œuvre et la facilité et le faible coût des matériaux de mise en œuvre des transplants rendent très intéressante et aisément réplicable la démarche de cette association.
Le coût financier de l'opération est d'ailleurs estimé à moins de 300 € par l'association (Bazile 2021b). Un bilan carbone est aussi calculé, mais il est difficile d'émettre un avis (465 kg Co^2) (Bazile 2021b). Nous n'avons pas d'indication concernant le montant de l'opération du GIPREB, mais il semble évident que ce coup est plus élevé, incluant notamment les coûts du maître d'œuvre sélectionné (Morancy Conseil) et du suivi scientifique réalisé par le GIPREB (matériels, déplacements, temps d'étude …).

3.3.3 Comparaison des suivis des transplants

Comme pour la mise en œuvre, on observe des méthodolog4ies de suivi des transplants radicalement différents entre le GIPREB et l'association « 8 vies pour la planète », dépendant logiquement de moyens et de compétences inégales. Dans la présentation de son projet, l'association « 8 vies pour la planète » prévoyait de déléguer le suivi scientifique des transplants au GIPREB : « *Pour le suivi, nous espérons qu'il sera pris en charge par le GIPREB, qui l'intégrerait logiquement à son suivi actuel des zostères de l'étang de Berre. Une autre structure scientifique, par ex La Tour du Valat ou une université, est évidemment également possible. En cas de refus de ces structures (dont le planning est déjà plein…), et pour les premières années, le suivi minimal prévu est de prendre 10 photos sous-marine « représentatives » de chaque parcelle tous les 2 mois »* (Bazile 2021a). Il semble en effet dommage que cette action ne soit pas suivie scientifiquement par le GIPREB ou un autre organisme cité. Pour le GIPREB, nous avons expliqué précédemment que le suivi scientifique s'attaché à mesurer à la fois la croissance des transplants et les conditions environnementales du milieu dans lequel ils évoluent. Voici une courte citation précisant chaque technique de mesure de ces paramètres : *« Le protocole réalisé pour le suivi des paramètres de vitalité des zostères est basé sur des méthodes standardisées réalisées dans le cadre du suivi des herbiers de Posidonia oceanica en Méditerranée et dans le cadre du suivi des herbiers de zostères sur la côte Atlantique. Ce protocole est appliqué par le GIPREB depuis 2005. Le suivi des paramètres phénologiques (densité de faisceaux, indice de surface foliaire, nombre total de feuilles, nombre de feuilles par faisceau, biomasse endogée, épigée et épiphytée) a été réalisé de mai à août 2013. […] Les principales variables hydrologiques font l'objet d'un suivi mensuel sur 10 stations dans l'étang de Berre, réalisé par le GIPREP. […] La mesure de la lumière incidente est réalisée depuis 2007 sur les sites de l'Arc et de Berre par des capteurs d'irradiance installés in situ de mai à août à 1m de profondeur, en limite inférieure des herbiers de Z.noltii. […] La variable vent est suivie par une station météo installée sur le toit des locaux du GIPREB depuis le mois de mai 2013»* (Dandine 2013).

L'analyse des résultats du GIPREB montre une chute soudaine de la survie des transplants sur les sites de l'étang de Vaïne, de l'anse des Merveilles et de Saint-Chamas dès les premiers mois, durant l'été. La période estivale est aussi synonyme de baisse sur les autres sites, mais présentant des chiffres moins conséquents. En ce qui concerne la croissance des transplants (sur les sites où certains ont survécus, soit à l'Arc, à Berre, à Figuerolles et aux Merveilles), le diamètre maximal moyen des Z.noltii croît jusqu'au 18ème mois est de 50 cm, pour ensuite régresser ou disparaître, saut sur le site de l'Arc où certains transplants atteignent jusqu'à 160 cm. Pour les Z.marina, on observe à peu près la même tendance. Le diamètre maximal des transplants augmente régulièrement jusqu'au 24ème mois, pour ensuite régresser, voir disparaître. A Figuerolles, la croissance est plus irrégulière jusqu'au 18ème mois jusqu'à mort des transplants (Dandine 2013).

Pour la luminosité, la valeur seuil de 10% est considérée dans la littérature scientifique comme *« limite en dessous de laquelle la croissance des zostères est menacée » (Dandine 2013).* On remarque ainsi que la valeur de 10% est souvent dépassé sur différents sites de réimplantation, notamment *« lorsque la température passe au-dessus de 25°c. La température est un indicateur de l'eutrophisation estivale en augmentant la quantité de chlorophylle a et la charge en MES d'origine biogène » (Dandine 2013).*

Pour ce qui est de l'impact du vent, on observe une corrélation entre journées de Mistral (Nord-Ouest) et baisse de la quantité de lumière, entraînant un effet instantané dans les mesures.

La comparaison des taux de survie des transplants est à peu près similaire entre les deux organismes au bout d'une année, arrivant respectivement à environs 10% pour les transplantations de Zostera noltii et 20% pour les transplantations de Zostera marina (Centre ressource « génie écologique » de l'OFB, 2018), (Bazile 2022). Pour le GIPREB, les plus fortes

pertes sont observées durant les trois premiers mois, entre printemps et été 2009 ou à la même période, en 2010. On remarque aussi ces taux de survie présentent une grande variabilité selon les sites de réimplantation, allant de 0 % à 53 %, notamment proche du delta de l'Arc à Berre-l'étang. On peut enfin simplement remarquer que les sites présentant un meilleur taux de survie des transplants ne sont pas forcément ceux les plus éloignés du point de rejets de la centrale EDF (Figure 8), ce qui conforte l'idée d'une grande instabilité et variabilité des conditions de l'étang de Berre. En ce sens, le GIPREB prône la nécessaire réduction des rejets dans l'étang de Berre avant de réitérer une restauration des herbiers, tandis que l'association « 8 vies pour la planète » souhaite saisir le temps long pour affiner ses techniques de transplantation et améliorer progressivement ces résultats.

Conclusion

Le projet du GIPREB brille par sa clarté et sa rigueur. La lisibilité de l'ensemble des données permet une analyse et une comparaison intéressante. Le GIPREB bénéficie logiquement de compétences et de moyens supérieurs. L'avantage du projet porté par Pascal Bazile et l'association "8 vies pour la planète" est de fédérer et sensibiliser la population locale aux questions d'environnement et plus précisément aux problèmes de l'étang de Berre. En plus d'être d'utilité public, ce travail de sensibilisation-concertation-formation à l'intérêt de mobiliser un certain nombre de personnes pour ce projet de restauration, mais aussi de générer l'engouement des populations vis-à-vis de ce type de projet. Il pourrait davantage être tourné vers le renforcement des herbiers de *Zostera noltii* restants dans l'étang, que dans l'expérimentation de transplantation de *Zostera marina* dans des sites où celle-ci s'est avérée infructueuse. Il semble important aussi de préciser que *Zostera noltii* est aussi plus adapté à l'augmentation des températures actuelles et prévues dans l'étang, du fait des changements climatiques.
Malgré leurs différences, le GIPREB et l'association « 8 vies pour la planète » partagent aussi des constats. Ils tentent, par exemple, de faire face à l'hydrodynamisme de l'étang par leurs choix techniques de transplantations.
Il est dommage que le projet de l'association « 8 vies pour la planète » ne bénéficie pas du même suivi scientifique que le projet du GIPREB, même si il est sûrement complexe d'intégrer cela dans un calendrier déjà chargé. Le suivi réalisé par ce dernier permettrait de mieux orienter les choix techniques fait par l'association, mais aussi de préciser d'autres problématiques écologiques du milieu. On note par exemple qu'une forte luminosité engendre une surproduction d'algues, augmentant le risque d'eutrophisation. A l'inverse, les épisodes venteux, se corrélant avec une baisse de la luminosité, génère une augmentation de l'hydrodynamisme dans l'étang de Berre, favorisant l'arrachage des transplants. Une baisse de luminosité élevé, en dessous de 10%, engendre la mort de zostères.
Ainsi, cette situation complexe dans l'étang amène le GIPREB a la conclusion d'une nécessaire réduction des pressions sur l'étang de Berre, avant de retenter une transplantation. Pour l'association « 8 vies pour la planète », le taux de survie des transplantations effectuées, à la hauteur des taux de suivie trouvés du projet du GIPREB en 2009, est encourageante. Elle souhaite réitérer l'opération chaque année, sur potentiellement d'autres espèces et en adaptant à chaque fois les choix techniques aux observations faites sur site.
Au vu des apports conséquents de ces deux organismes, il semble évident d'organiser, dans un futur proche, une collaboration. On pourrait, par exemple, voir émerger un projet de sciences participatives sur l'étang de Berre.

4. Conclusion

Si le GIPREB et l'association « 8 vies pour la planète » présentent des histoires et philosophies différentes, tous deux ont la volonté de convaincre : d'un côté le GIPREB souhaite convaincre les acteurs locaux par la nécessaire rigueur d'un cadre scientifique ; de l'autre l'association « 8 vies pour la planète » souhaite convaincre les habitants par la, toute aussi nécessaire, sensibilisation et mobilisation citoyenne sur le sujet de l'écologie de l'étang de Berre et de la restauration des zostères. Au-delà de ça, il y a des choix de mise en œuvre intéressants et qui prolonge cette dualité entre approche scientifique et empirique. Avec l'association « 8 vies pour la planète », on note l'assurance d'un projet économe et fédérateur. Le glanage de graines ou la réutilisation de rhizomes-épaves apparaît comme une solution très intéressante et déjà mentionné dans la littérature scientifique. Si le manque de moyens est sans doute la raison, on peut tout de même questionner l'utilisation des ancrages en fer à béton au fond de l'étang de Berre. La mobilisation citoyenne induit aussi un objectif de sensibilisation « par le faire » qui oblige à peu de moyens. Avec le GIPREB, on note l'assurance d'un projet abouti scientifiquement et suivi rigoureusement. Le choix d'une transplantation de zostères en mottes, conditionnés dans des fertilpots, répond au fort hydrodynamisme dans l'étang et à un risque réduit sur le milieu, comme sur les usagers. La définition d'un cadre scientifique clair permet la comparaison et participe aussi à d'autres projets qui peuvent s'en inspirer à travers le monde. La question du suivi des transplantations effectuées est logiquement davantage étudiée par le projet du GIPREB qui possède des moyens, connaissances et outils de mesures plus précis et appropriés que l'appréciation visuelle d'un bénévole, aussi utile et importante soit-elle. En ce sens, ces projets de transplantations de Zostères devrait être l'occasion d'un partenariat entre société civile et organisme scientifique, construisant un réseau d'acteurs favorables à une amélioration de l'état écologique de l'étang de Berre. Ainsi, si l'objectif des expérimentations du GIPREB visait à étudier les possibilités de restauration des herbiers de Zostera dans l'étang de Berre, mettant en avant les résultats peu encourageants sur la survie des transplants, l'objectif est davantage de chercher des solutions par "le faire", par une démarche empirique qui vise à ne pas se satisfaire des échecs, mais d'apprendre et de mobiliser des locaux par des opérations expérimentales et de sensibilisations.

Ce type de partenariat pourrait à la fois mobiliser plus de bénévoles, engager des opérations de restauration plus conséquentes, tout en assurant une mission de sensibilisation. Cela peut aussi encourager la demande de fonds alloués à ce type de mission. On peut espérait que ce type de projet voit le jour d'ici peu, le directeur du GIPREB Raphaël Grisel évoquait la possibilité du *« montage d'un projet local par le GIPREB incluant les acteurs locaux »* dont l'objectif serait la *« transplantation de manière intensive dans une anse test »* (GIPREB syndicat Mixte 2021).

Aussi apparait important la convergence de deux notions : la médiation scientifique (pour ne pas dire « vulgarisation »), qui pourrait être porté par le GIPREB, et l'encadrement de sciences participatives qui pourrait être porté par l'association « 8 vies pour la planètes », pour l'ensemble des vivants puisse profiter de la démarche de ces deux organismes.

Lors de la réalisation de ce mémoire et la lecture des sources mobilisées, plusieurs questions sont apparues, ouvrant le débat plus largement sur des sujets liés à la restauration écologique. Tout d'abord, on peut noter la question ambivalente de la définition d'un état ou d'une période de référence. La pertinence d'un état de référence de l'étang de Berre n'est pas une question prépondérante pour les acteurs locaux (Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre 2020). Pour rappel, la "marinisation" de l'étang de Berre est liée à la "chenalisation" de l'étang de Caronte au XXe siècle. Ceci a engendré une incursion d'eau salée conséquente dans un étang historiquement déjà saumâtre, du fait de sa connexion séculaire avec le cours d'eau de l'Arc et avec la mer via l'étang de Caronte. Ce dernier présentait une faible bathymétrie avant sa « chenalisation » (SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils 2004). La dite "marinisation" de

l'étang de Berre l'amène à être considéré aujourd'hui comme une lagune, notamment pour son fonctionnement hydrographique, bien que géologiquement ce n'en soit pas une (le plan d'eau n'est pas séparé de la mer par un cordon sableux). L'état de référence choisi est celui de la période 1925-1966, juste avant l'installation de la centrale hydroélectrique de Saint-Chamas (GIPREB Syndicat Mixte 2011). Pour les acteurs locaux, l'état de référence est celui qu'ils ont connus étant jeunes et correspond donc à cette période 1925-1966. Il est donc davantage guidé par la mélancolie et peut être appréhendé à l'échelle de la vie humaine. La non-existence de la centrale induit aussi moins d'inconvénients pour les activités touristiques, ce qui apparaît important pour eux (Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre 2020). Pour les chercheurs et experts scientifiques, la définition d'un état de référence est plus influencée par la présence de source bibliographique, que par le caractère originel d'un étang de Berre, avant toutes interventions humaines. On peut aussi se poser la question des critères qui permettent de la définir. James Aronson propose une alternative intéressante, mais il est important d'affirme que c'est un choix : l'humain doit à la fois prendre la mesure et assumer son impact, la définition d'un état de référence sous-entendant parfois des modifications du milieu non négligeables.

Un deuxième point important à évoquer serait la nécessaire prise en compte des acteurs du territoire étudié : de l'Etat à la région, du département aux collectivités locales, en intégrant les acteurs associatifs, les syndicats et collectifs habitants, le territoire de l'étang de Berre regorge d'un vaste un réseau d'acteurs conséquents et complexes. La multiplicité des acteurs et l'enchevêtrement entre partenariats et conflits d'intérêts n'aident pas à déterminer une direction claire et un projet global pour l'étang de Berre : *« L'absence de chef de file opérationnel pour la gestion de la qualité des eaux de l'étang de Berre pénalise fortement la réhabilitation de ce dernier. L'échec de la réouverture du tunnel du Rove à la courantologie en fournit une démonstration. Par ailleurs, la mobilisation de certains fonds, notamment européens, suppose que le projet financé soit porté par un chef de file bien identifié »* (Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre 2020). Car l'étang de Berre a longtemps souffert de guerres de clochers issus de clivages politiques ou idéologiques. A cela s'ajoute parfois la méconnaissance d'acteurs en présence, pourtant volontaires à s'engager dans un avenir meilleur pour ce territoire. Tout ceci met en lumière l'exercice complexe de médiation, d'orchestration d'un projet de territoire avec les acteurs en présence. Il est important de préciser que les faits vont dans le bon sens avec la mission parlementaire sur la réhabilitation de l'étang de Berre, portée par des élus de tous bords politiques, et le projet de classification au patrimoine mondial de l'UNESCO, fédérant le territoire.

Table des figures

Figure 1 Carte de l'étang de Berre ……..…….……..p2
Figure 2 Bassin versant naturel de l'étang de Berre …….……...…..p3
Figure 3 Bassin versant artificiel de l'étang de Berre …….…..p4
Figure 4 La stratification des eaux de l'étang de Berre …….……....p5
Figure 5 Evolution de la répartition des herbiers de zostères entre 1966 et 2017 ……p6
Figure 6 Représentation des niveaux d'exposition du rivage à l'action des vagues de vent…p10
Figure 7 Lieu de ramassage de graines dans l'anse de Carteau ……..p10
Figure 8 Localisation des sites de prélèvements et de transplantations de zostères ……p11
Figure 9 Schéma de répartition des transplants sur chaque site de transplantation de l'Etang de Berre ……..……..p16
Figure 10 Photo d'un ancrage en fer tor ……..p16
Figure 11 Photo d'un épi de zostère ……...p16

Table des tableaux

Tableau 1 Historique des mesures de restriction EDF ……..……....p6
Tableau 2 Tableau de comparaison annuel entre superficie d'herbiers de zostères, apports d'eau douce par la centrale et apports de limons par la centrale EDF ……..……...p6
Tableau 3 Tableau des critères de comparaison des projets de restauration des herbiers……p12

Bibliographie

8 vies pour la planète. « Qui sommes-nous ? » *8 vies pour la planète*. https://8vies.fr/?page_id=326 (19 mai 2022).

Bartolotti, Fabien. 2020. « Les autorités portuaires face aux pollutions pétrolières dans l'étang de Berre et le golfe de Fos (1945-1979) ». *Rives méditerranéennes* (61): 47-68.

Bazile, Pascal. 2018. *Projet de transplantation de zostères marines dans l'étang de Berre*. Saint-Chamas: Association L'Etang nouveau. Rapport de suivi printemps 2022 (après ZoRRO#1).

———. 2021a. *Projet de transfert de graines de zostères marines vers l'étang de Berre*. Saint-Chamas: 8 vies pour la planète.

———. 2021b. *Projet ZoRRO : Transfert de zostères marines vers l'étang de Berre*. Saint-Chamas: Association 8 vies pour la planète. Rapport à l'issue de la campagne 2021 (Année 1).

———. 2021c. *ZoRRO 2 : Transplantation de zostères marines et de cymodocées vers l'étang de Berre pour l'année 2022*. Saint-Chamas: Association 8 vies pour la planète. Dossier de demande de dérogation pour travailler avec des espèces protégées.

———. 2022. *Projet ZoRRO : Transfert de zostères marines vers l'étang de Berre*. Saint-Chamas: Association 8 vies pour la planète. Rapport de suivi printemps 2022 (après ZoRRO#1).

Bernard, Guillaume et al. 2011. « Etude des possibilités de restauration des herbiers de Zostera dans l'étang de Berre par des réimplantations expérimentales ». In *Rencontres scientifiques autour de l'étang de Berre*, Aix-en-Provence: GIPREB, 345-59.

Cheinet, Jean-Claude. 2020. *Des étangs du soleil à découvrir - Essai d'écologie pratique à partir des paradoxes de l'Etang de Berre et de ses rives*. Les Editions Emile Communication.

Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel. 2021. « Avis du Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel ».

Dandine, Florian. 2013. *Transplantations de zostères : un outil clé pour l'interprétation écologique des herbiers de l'Etang de Berre*. Marseille: Aix-Marseille Université (AMU).

Daumalin, Xavier. 2003. *Du sel au pétrole - l'industrie chimique de Marseille-Berre au XIXe siècle*. Paul Tacussel Editeur.

Faure, Vincent. 2018. *Crise anoxique et eutrophique de l'étang de Berre - Eté Automne 2018*. GIPREB.

GIPREB Syndicat Mixte. 2011. *Ecologie de la restauration appliquée à l'étang de Berre par James Aronson*. https://www.youtube.com/watch?v=wnHWKKbY6Jk (19 mai 2022).

———. 2019. « Historique : du Groupe d'Intérêt Public au Sydicat mixte ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/le-gipreb/historique/ (17 mai 2022).

GIPREB syndicat Mixte. 2021. « Les ateliers de l'étang de Berre - Atelier GIPREB du 17 mai 2021 - Compte rendu des échanges tenus en distanciel ».

GIPREB Syndicat Mixte. 2022a. « Aperçu géographique ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/decouvrir/geographie/ (18 mai 2022).

———. 2022b. « Caractérisation des rejets de la centrale hydroélectrique d'EDF ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/comprendre/generalites-sur-letang-de-berre/caracterisation-des-rejets-de-la-centrale-hydroelectrique-dedf/ (18 mai 2022).

———. 2022c. « La DCE sur l'étang ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/la-dce-sur-letang/ (18 mai 2022).

———. 2022d. « Projet HYPERBERRE : cartographie par imagerie hyperspectrale ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/comprendre/etudes-anterieures/projet-hyperberre-cartographie-par-imagerie-hyperspectrale/ (18 mai 2022).

Jones, Clive G., John H. Lawton, et Moshe Shachak. 1994. « Organisms as Ecosystem Engineers ». *Oikos* 69(3): 373-86.

Keller, Fabienne. 2006. *Les enjeux budgétaires liés au droit communautaire de l'environnement*. Paris: Sénat. Rapport d'infomation. https://www.senat.fr/rap/r05-342/r05-34227.html (18 mai 2022).

Masson-Delmotte, Valérie et al. 2019. *Réchauffement planétaire de 1,5 °C*. GIEC. https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/ (22 mai 2022).

Mayot, Nicolas, Vincent Faure, et Raphaël Grisel. 2019. *Cartographie des herbiers de zostères dans l'étang de Berre en 2019 (via satellites Pléiades)*. GIPREB.

Mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre. 2020. *Rapport d'information en conclusion des travaux d'une mission d'information sur la réhabilitation de l'étang de Berre*. Assemblée Nationale. Rapport d'infomation. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b3356_rapport-information (14 mai 2022).

Rossi, Stéphane. 2017. « Patrimoine de l'Unesco : l'étang de Berre a ses ambassadeurs ». https://www.laprovence.com/article/edition-martigues-istres/4659842/patrimoine-de-lunesco-letang-de-berre-a-ses-ambassadeurs.html (18 mai 2022).

SAFEGE CETIIS Ingénieurs Conseils. 2004. *Bilan des connaissances du fonctionnement écologique et socio-économique de l'Etang de Berre*. GIPREB.

Webographie

8 vies pour la planète. « Qui sommes-nous ? » *8 vies pour la planète*. https://8vies.fr/?page_id=326 (19 mai 2022).

———. 2019. « Historique : du Groupe d'Intérêt Public au Sydicat mixte ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/le-gipreb/historique/ (17 mai 2022).

———. 2022b. « Caractérisation des rejets de la centrale hydroélectrique d'EDF ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/comprendre/generalites-sur-letang-de-berre/caracterisation-des-rejets-de-la-centrale-hydroelectrique-dedf/ (18 mai 2022).

———. 2022c. « La DCE sur l'étang ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/la-dce-sur-letang/ (18 mai 2022).

———. 2022d. « Projet HYPERBERRE : cartographie par imagerie hyperspectrale ». *GIPREB - Etang de Berre*. https://etangdeberre.org/comprendre/etudes-anterieures/projet-hyperberre-cartographie-par-imagerie-hyperspectrale/ (18 mai 2022).

_____ 2018. « Réimplantation expérimentale de zostères dans l'étang de Berre ». Centre de ressource « génie écologique » de l'OFB. http://www.zones-humides.org/agir/retours-experiences/reimplantation-experimentale-de-zosteres-dans-l-etang-de-berre

Annexe 16

Transplantation des herbiers de posidonie

Par Aurélie PRUNIER

Faculté des sciences de l'université de Montpellier

LA TRANSPLANTATION DES HERBIERS A *POSIDONIA OCEANICA (L.) Delile*

Repiquage d'un fragment d'herbier, ©Laurent Ballesta, Août 2019, Golfe Juan.

Diplôme d'Université « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Année 2022

Etudiant : Aurélie Prunier
Tuteur : Gwénaëlle Delaruelle

Remerciements

Je remercie très sincèrement ma tutrice Gwénaëlle Delaruelle pour ses nombreuses corrections, pour tous ses conseils, pour sa présence ainsi que pour la rapidité de ses réponses.

Merci également à mon amie et ancienne collègue de travail, Mathilde Berthelot (kinésithérapeute) qui m'a aidée à comprendre le plan rédactionnel.

Je remercie également mes proches pour leur soutien moral pendant la rédaction de ce rapport.

Merci à tous mes moniteurs de plongée et à tous les moniteurs de biologie sous-marine qui m'ont fait connaitre la richesse du monde sous-marin et m'ont donné l'envie de le protéger.

Résumé

Posidonia oceanica est une plante à fleurs marine endémique de la Méditerranée. Son poids écologique est considérable dans les milieux littoraux, elle est à la fois une espèce clé et ingénieure d'écosystème. Les herbiers qu'elle constitue ont un rôle majeur dans la réduction des impacts du changement climatique grâce à leurs importantes capacités de séquestration du carbone (Pergent-Martini et al., 2021 ; Pergent et al., 2014). Malheureusement ils sont particulièrement vulnérables aux impacts de l'homme et malgré les nombreuses mesures mises en œuvre afin de les protéger, les herbiers de posidonie ont régressé de façon préoccupante ces dernières années. La recolonisation naturelle de ces herbiers, lorsque les causes de leur destruction ont cessé d'agir, peut être très lente. C'est la grande valeur écologique de cet écosystème et l'importance de sa régression jointe à sa lenteur de recolonisation qui ont conduit à l'idée de procéder à des actions de restauration *via* des opérations de transplantation. Un certain nombre de techniques de transplantation ont été mises au point et des modalités optimales ont également été précisées. Actuellement, des initiatives prometteuses voient le jour en Méditerranée, mais il faudra certainement de nombreuses années avant de connaître l'éventuel succès de ces expériences de transplantation.

Table des matières

Introduction 1
Objectifs 3
Méthodologie 4
Résultats 5

1. Les paramètres influençant la survie et la croissance des transplants
2. Origine des boutures
3. Techniques de transplantation
4. Application à un programme récent

Discussion 14

1. Paramètres de transplantation
2. Origine des boutures
3. Techniques de transplantation

Conclusion.....19
Bibliographie.....20

Table des images

Figure 1 : Rhizomes et faisceaux, ©Annie Lafourcade 1
Figure 2: Serran chevrette dans la posidonie (à gauche) ©Annie Lafourcade et ponte d'escargot (à droite) ©Aurélie Prunier 2
Figure 3 : Essai de repiquage à -8m de boutures de P. oceanica. Elles ont été placées dans des dalles en béton perforées de 1m². Source : https://archimer.ifremer.fr/doc/1973/publication-6662.pdf.....8
Figure 4 : Technique du cadre en ciment autour d'un treillis métallique, source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022 8
Figure 5 : Technique du treillis métallique, source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022 9
Figure 6 : Techniques de l'agrafe métallique (à gauche) et de l'ancre biodégradable (à droite), source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022 10
Figure 7 : La transplanteuse en opération. (Crédit : Andromède océanologie).....11
Figure 8 : Repiquage d'un fragment avec une agrafe spécialement créée pour ce projet (© Laurent Ballesta, Octobre 2019).....13

Table des tableaux

Tableau 1 : Origines des boutures, avantages et limites. 15
Tableau 2 : Les techniques de transplantation, avantages et limites. 17

Introduction

Les plantes à fleurs, aussi appelées Magnoliophytes, sont constituées d'une soixantaine d'espèces marines parmi lesquelles neuf espèces du genre *Posidonia.* La posidonie *Posidonia oceanica* (L.) Delile est la seule représentante du genre en mer Méditerranée mais huit autres espèces sont présentes sur les côtes australiennes *: P. angustifolia, P. australis, P. coriacea, P.denhartogii, P. kirkemanii, P. ostenfeldii, P. robertsonae et P.sinuosa* (Kuo et Hartog, 2001).
Posidonia oceanica est endémique de la Méditerranée et présente tout autour du bassin excepté au niveau des grands estuaires (Rhône, Nil, Pô, Ebre) (Den hartog, 1970; Phillips et Meñez, 1988). *P. oceania* et les herbiers qu'elle constitue se développent sur fond de sable et de roches entre 0 et 40m et couvrent une surface estimée à 12 247 km² (Telesca et al., 2015).

P. oceanica est constituée de tiges rampantes (rhizomes plagiotropes) sur lesquelles se développent des tiges dressées (rhizomes orthotropes), généralement enfouies dans le sédiment qui se terminent par des groupes de feuilles appelés faisceaux. Le rhizome présente des racines qui fixent la plante au sédiment et lui permettent de prélever les nutriments nécessaires à sa croissance et à son développement.

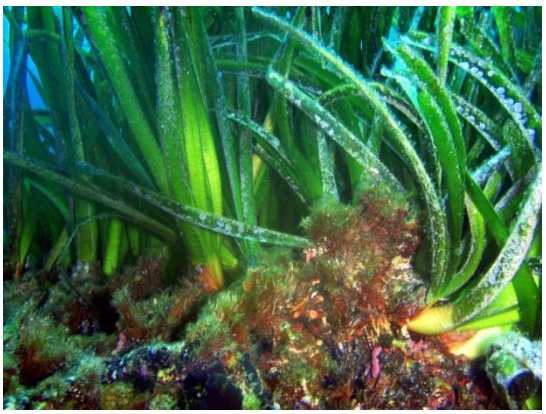


Figure 1 : Rhizomes et faisceaux, ©Annie Lafourcade

La colonisation naturelle de *P. oceanica* peut se faire de trois manières différentes (Boudouresque, 2021) : 1) progression d'une bordure de prairie grâce aux rhizomes plagiotropes, 2) exportation des boutures par les courants, 3) germination des graines (la reproduction se fait de manière asexuée par bouturage naturel, mais également de manière sexuée). Cependant, cette recolonisation naturelle semble très lente, même lorsque les causes de la destruction sont stoppées. De plus, la cessation d'un impact n'implique pas que la recolonisation commence immédiatement. Par exemple, près de Marseille, une surface de 1, 13 ha détruite par une bombe en 1942 n'a pas encore été entièrement recolonisée en 1999, soit 57 ans après : il reste 0, 39 ha de sable sans *P. oceanica* (Pergent-Martini, 1994 ; Pergent-Martini et Pasqualini, 2000). Autre exemple, à Menorca (Baléares), où trois ans après l'arrêt des activités d'une ferme aquacole, la régression de *P. oceanica* se poursuivait (Pergent et al., 1998, Pergent et al., 1999).

La croissance de ses rhizomes est la plus lente au monde pour des herbiers marins (1 à 10 cm par an, Marbà et Duarte, 1998), ce qui rend *P. oceanica* vulnérable aux pressions anthropiques alors même qu'elle joue un rôle écologique, physique et économique majeur et sert de bio-indicateur pour la qualité des eaux côtières de mer Méditerranée.

Parmi les nombreux services écosystémiques (Campagne et al., 2015) rendus par la posidonie , on peut citer : 1) la production de matière première et de nourriture, 2) son rôle d'habitat, de frayère et de nurserie pour 25% des espèces marines, 3) la protection du littoral contre l'érosion, 4) la production d'oxygène, 5) la séquestration du carbone, puisqu'elle capte 10 % du carbone de l'eau et ralentit les effets du changement climatique, (le taux de fixation total est estimé à 1 302 t C/ha/an et le taux de séquestration (graines et rhizomes morts) est estimé à 278 t C/ha/an sur le bassin méditerranéen (Pergent et al., 2020)), 6) la fixation des fonds meubles et la limitation de la turbidité.

Figure 2: Serran chevrette dans la posidonie (à gauche) ©Annie Lafourcade et ponte d'escargot (à droite) ©Aurélie Prunier

De ces rôles écologiques découle une quantité de services dont les hommes bénéficient sur le maintien de la pêche, du tourisme, des loisirs, de l'éducation et de la recherche. La valeur monétaire moyenne des biens et avantages tirés des services rendus par les herbiers de posidonie a été évaluée à 580 928 euros/ha/an (Medtrix, 2019).

P. oceanica est une espèce protégée par la législation européenne et nationale malgré cela, elle continue de décliner en Méditerranée, et a déjà perdu entre 13 % et 50 % de son étendue depuis les années 60. Les 2/3 de cette régression ont une origine humaine (Marbà et al., 2014). Les principales causes sont : 1) l'artificialisation des côtes, 2) la modification des flux sédimentaires, 3) l'augmentation de la turbidité, 4) les ancrages, 5) le chalutage, 6) la pollution de l'eau, 7) la compétition avec des espèces invasives, 8) le surpâturage.

La régression des herbiers en Méditerranée pourrait avoir entraîné une réduction substantielle (entre 11 % et 52 %) de la capacité de cet écosystème côtier à séquestrer le carbone (Marbà et al., 2014).

Ces constats indiquent qu'une mise en œuvre rapide de mesures de protection, de gestion et de restauration visant à atténuer la dégradation des herbiers est nécessaire. Le taux de croissance lent associé à une reproduction rarement réussie rendant peu probable le rétablissement naturel de *P. oceanica*, la transplantation semble être une solution appropriée pour restaurer l'herbier et accélérer le processus de recolonisation.

Objectifs

L’importance écologique et économique des herbiers de posidonie rend leur régression particulièrement préoccupante. L'urgence d'une protection légale et d'une gestion raisonnée du domaine littoral a débouché sur plusieurs initiatives législatives au niveau national et communautaire qui visent à empêcher de futures destructions d’herbiers. Cependant, malgré la mise en œuvre de mesures de protection et de conservation, le déclin des herbiers se poursuit, c’est pourquoi la mise en place de mesures de restauration est primordiale afin d’aider au rétablissement de cet écosystème.

Au cours de ces cinquante dernières années, de nombreuses techniques de restauration ont vu le jour et ont été testées avec plus ou moins de succès.

En se basant sur une étude bibliographique portant sur différents exemples anciens et récents le but de ce travail est de faire un état des lieux des connaissances actuelles sur la transplantation de cette espèce dans le bassin méditerranéen. Et plus précisément de :

- Faire un état des lieux de connaissances concernant les paramètres influençant la survie et la croissance des transplants

- Faire un point sur l’origine des boutures, leurs avantages et leurs inconvénients

- Faire une synthèse des techniques de transplantation existantes, définir leurs points forts et leurs limites.

Enfin nous en ferons une illustration en prenant pour exemple une initiative récente qui semble prometteuse.

Méthodologie

Les mots clés :

Ma première recherche a été très générale sur Google à partir de mots clés : Transplantation et Posidonie.
Les premiers résultats m'ont dirigée vers le site internet du GIS posidonie qui est un Groupement d'Intérêt scientifique créé en 1982 pour répondre à un objectif précis : sauver l'herbier à *Posidonia oceanica*.
En parcourant leurs publications j'ai sélectionné les articles en rapport avec les herbiers marins et la transplantation. Grâce à ces articles, pour la plupart en français, j'ai pu commencer ma recherche bibliographique.
J'ai également trouvé des articles anciens relatant les débuts de la transplantation de *P. oceanica* et notamment des travaux de M. Cooper avec son association « Les Jardiniers de la Mer ». Malheureusement ses recherches ont laissé peu d'articles scientifiques à exploiter.

Les bases de données :

Mes recherches se sont principalement faites sur les moteurs de recherche suivants : Google, HAL, Researchgate et Google Scholar.
La recherche se faisait soit par titre complet soit par auteur et année de publication.
Le dernier article de C-F. Boudouresque publié en 2021 a fini de compléter ma bibliographie.

Tri des articles :

Dans un premier temps, ce sont les articles traitant des herbiers marins et ceux traitant de la transplantation qui ont retenu mon attention. Les articles pouvaient être en français ou en anglais. Dans un deuxième temps, j'ai affiné mes recherches sur les techniques de transplantation, et cherché pour chacune, un ou deux exemples, afin d'avoir une meilleure illustration des techniques et de pouvoir apprécier leurs éventuelles améliorations.
Les articles n'étant ni en français, ni en anglais n'ont pas été retenus.

Pour compléter mon étude j'ai cherché un programme actuel de transplantation. Mon attention s'est donc portée sur le programme REPIC porté par Andromède Océanologie. Le descriptif de ce programme était accessible *via* la plateforme Medtrix.fr. Plateforme de surveillance des eaux côtières et des écosystèmes de Méditerranée créée en 2013 par l'Agence de l'eau RMC et l'œil d'Andromède.

Résultats

Avant d'initier toute opération de transplantation, il est nécessaire de s'assurer que les causes de la régression passée de l'herbier ont cessé d'agir.

1) Les paramètres influençant la survie et la croissance des transplants

Plusieurs études ont tenté de mettre en évidence l'effet de différents facteurs sur la croissance et la survie des transplants de *P. oceanica*. De nombreuses conditions de transplantation ont été testées avec plus ou moins de succès suivant les cas. Les taux de survie mesurés varient selon : le type morphologique des pousses utilisées (orthotropes ou plagiotropes), la profondeur de prélèvement et de transplantation des boutures, la saison de transplantation, l'espacement des boutures et les substrats. Les boutures utilisées pour tester ces conditions provenaient toutes de prélèvements sur un herbier vivant.

a) Le type morphologique des pousses :

Il constitue un facteur critique dans le développement ultérieur de la plante (Molenaar et al., 1993). Il a été constaté que les boutures initialement plagiotropes s'adaptent plus rapidement à la transplantation car elles conservent leur position initiale alors que les boutures orthotropes transplantées en position verticale deviennent plagiotropes au bout de quelques mois (Molenaar et al., 1993) et mettent donc plus de temps à coloniser un substrat. Lorsque les meilleures conditions sont réunies, le taux de mortalité des transplants orthotropes reste conséquent (57 % de mortalité, en moyenne, après 7 mois (Meinesz et al., 1991). Par contre, pour des transplants plagiotropes portant trois faisceaux de feuilles, le taux de survie atteint 99 % après 6 mois.

b) La profondeur de prélèvement et de transplantation des boutures :

Lorsque l'on transplante des boutures à une profondeur inférieure à leur profondeur d'origine leur croissance et leur développement sont meilleurs que dans le cas inverse (Molenaar et al., 1993; Molenaar et Meinesz, 1992). Ces différences peuvent s'expliquer notamment par la différence de luminosité. En effet, la posidonie étant une plante, la luminosité est un des facteurs les plus importants pour sa croissance.

c) La saison de transplantation :

La meilleure saison de transplantation pour la survie et le développement des boutures plagiotropes est le printemps (92 % de taux de survie après trois ans), et l'automne pour les boutures orthotropes (45 % de taux de survie) (Meinesz et al., 1992). En effet, il a été constaté que la température de l'eau joue un rôle dans le processus de cicatrisation au niveau des plaies des rhizomes.

d) L’espacement des transplants :

Parmi les différents espacements testés par Molenaar & Meinesz (1995), les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque les transplants étaient placés proches les uns des autres. En effet, les boutures ont tendance à coloniser les substrats en se rapprochant les unes des autres. Après trois ans, le taux de survie était de 84 % pour les boutures plantées sur matte morte avec un espacement compris entre 5 et 10 cm et de 85 % pour les boutures plantées sur sable fin à *Cymodocea nodosa* avec un espacement de 5 cm. Sur sable fin, une forte mortalité a été causée par une crevette fouisseuse, ce dernier résultat nous indique que le choix du substrat est également très important.

e) Les substrats :

Considérant le substrat, nous pouvons prendre comme exemple l’essai de transplantation de Balestri et al. (1998), où des plantules issues de graines ont été transplantées sur fond de galets et sur matte morte. Le taux de survie sur matte morte était de 68 % après trois ans contre 0 % sur fond de galets.

Si l’on prend en compte tous ces éléments, le taux de survie des boutures de posidonie peut être très bon et atteindre plus de 84% après 4 années (Charbonnel et al., 1994 et 1995), il est donc nécessaire, lorsqu’on entreprend des expériences de transplantation de *P. oceanica*, de se rapprocher au maximum de ces conditions optimales afin de maximiser la probabilité de réussite et le bon développement des transplants.

L’emplacement géographique de la transplantation est également très importante, *P. oceanica* n’étant pas présente partout sur littoral. On peut citer l’exemple du projet « *Graines de mer* » de la société SM2 (2011). L'objectif était de collecter, sur des plages, des graines de *P. oceanica*, de les faire germer en laboratoire, de les élever sur des substrats adaptés à un enracinement rapide puis de les planter en mer entre la Grande Motte et Frontignan (Occitanie, France) afin de créer 400 m^2 de prairie. Malheureusement, *P. oceanica* est naturellement très rare dans cette région, sûrement en raison de la turbidité de l’eau. Le projet a donc été un échec et n'a donné lieu à aucune publication.

2) Origine des boutures

Dans les pays où *Posidonia oceanica* est une espèce protégée, comme en France, le prélèvement de boutures (en épave ou non), de graines ou de toute autre partie de la plante, est interdit et donc soumis à des autorisations spécifiques. En France, il convient de s’adresser à la DREAL et/ou à la DDTM.

a) Issues de prélèvement au sein d’herbiers vivants :

Afin de préserver au maximum l’herbier donneur, un protocole définissant les modalités de sélection et la méthode de récolte des boutures a été établi par H. Molenaar en 1992. Il définit notamment le type d’herbier dans lequel prélever les boutures (herbier avec une densité normale ou sub-normale supérieure), le lieu de prélèvement dans l’herbier (en

bordure), la technique de prélèvement (manuellement sans outil de coupe) ainsi que les critères morphologiques des boutures (de préférence des rhizomes de type plagiotrope). De plus, précision est faite que le nombre de boutures prélevées doit être très faible par rapport à l'herbier (5% de la densité de l'herbier).
Cette technique va être utilisée dans le cadre du projet RenforC (Renforcement des puits de carbone en milieu marin) porté par le GIS posidonie dans le golfe de Sant'Amanza à Bonifacio (Corse) 2021-2023.

b) Issues d'épaves :

Les boutures en épave proviennent de fragments flottants arrachés soit par les ancres soit par les tempêtes. Elles sont disponibles par dizaines de milliers et leurs chances de réimplantation naturelle sont infimes (Meinesz et Lefèvre, 1984). La plupart des projets utilisent des boutures d'herbier vivant.

c) Utilisation de graines et de plantules :

La plantation de semis germés en laboratoire est une méthode écologique et peu coûteuse. La germination et le développement des plantules en laboratoire ont été réalisés avec succès par Balestri et al. (1998). Dans les meilleures conditions, c'est-à-dire en utilisant un substrat solide d'eau de mer artificielle, 96,2 % des graines testées ont germé et après 10 mois de développement, 70 % des graines transplantées sur de la matte ont survécu et se sont développées après trois ans d'expérimentation.

Des études ont mis en évidence que le principal problème rencontré lors des transplantations, quelque soit l'origine des boutures, réside dans la difficulté d'absorption des nutriments par les transplants (Vangeluwe 2004, Vangeluwe 2006). Ainsi, la fertilisation par l'utilisation d'engrais commerciaux dans le but d'enrichir le sédiment en nutriments a été testée. Cependant, il n'a pas été noté d'augmentation des concentrations en nutriments que ce soit dans le sédiment ou dans les différents organes des transplants. Au contraire, les résultats ont montré un moins bon développement des transplants fertilisés.

3) Les techniques de transplantation.

Plusieurs techniques de transplantation, avec ou sans ancrage, ont été mises au point.

a) Les techniques avec ancrage :

Elles consistent à attacher manuellement, et une à une des pousses isolées dépourvues de tout sédiment sur différents supports. Ces supports sont ensuite fixés sur, ou dans le sédiment du site de transplantation. Quatre méthodes ont été testées :

- Dalles de ciment trouées.

Expérience tentée par Maggi en 1971 dans le golfe de Giens (France). L'objectif était de reconstituer les herbiers de posidonie d'un endroit où ils avaient disparu afin de diminuer la

force des vagues et de protéger le littoral de l'érosion. Les boutures ont été prélevées en bordure d'un herbier vivant.

Six dalles de béton (L100xl100xh10) percées de 36 trous dans lesquels étaient placés les transplants ont été mises en place. Les dalles de ciment devaient protéger les boutures des mouvements de la mer afin qu'elles ne se désensablent pas avant leur fixation. Les dalles ont été posées à 8 m de profondeur, dans une intermatte sableuse pauvre en matière organique. Les boutures ont été transplantées en mars et en août. Entre 12 mois et 17 mois après la mise en place des dalles de ciment, les posidonies transplantées en mars ont eu un taux de survie de 60 %, celles transplantées en août ont eu un taux de survie de 30 à 40 %.

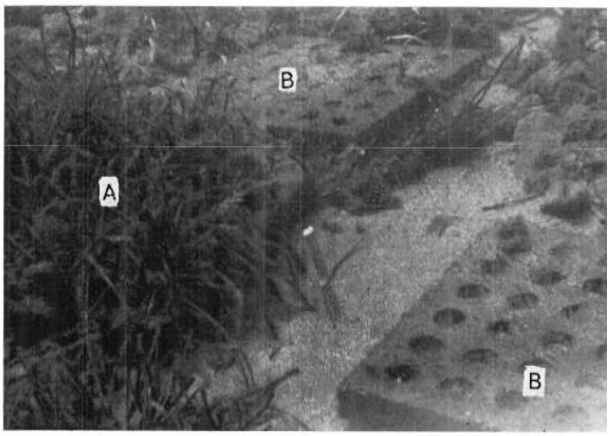


Figure 3 : Essai de repiquage à -8m de boutures de P. oceanica. Elles ont été placées dans des dalles en béton perforées de 1m². Source : https://archimer.ifremer.fr/doc/1973/publication-6662.pdf

Suite à cette tentative, Maggi a proposé quelques pistes d'amélioration : rechercher un matériau qui se désagrégerait en 1 ou 2 ans dans l'eau de mer afin d'offrir plus de facilités pour une extension latérale des posidonies enracinées, mettre au point une méthode de fixation des plants au moyen de crochets de fer (plus économique et plus facile à mettre en place) et tenter des transplantations à partir de graines.

- Cadre en ciment autour d'un treillis métallique retenant les transplants.

Cette technique a été développée par Mr Cooper (brevetée), elle consiste à prélever des boutures en épave, à les réunir par groupe de 35 à 40 unités dans des armatures en ciment où elles sont retenues par deux couches de grillage et placées sur un substrat dur. Cette technique a d'abord été testée à Giens puis à Cannes (France) par Cooper entre 1976 et 1982. Cependant, ces expériences n'ont laissé aucune donnée exploitable sur le choix des boutures, leur survie, leur traitement éventuel et la saison de transplantation. Sur plus de 10 000 boutures implantées de 1972 à 1974 seulement 48 ont été suivies.

Figure 4 : Technique du cadre en ciment autour d'un treillis métallique, source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022

- Treillis plastiques, métalliques ou biodégradables, posés à plat sur le fond, retenant les transplants.

Cette technique consiste à attacher les transplants dépourvus de tout sédiment sur une grille ou un grillage en plastique ou métallique et à ensuite fixer la grille sur le sédiment en plongée (Meinesz et al., 1991, 1992, 1993; Molenaar et Meinesz, 1992).

Figure 5 : Technique du treillis métallique, source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022

Cette technique a été employée en Corse, où des pousses de posidonie prélevées dans l'herbier ont été transplantées sur des grilles métalliques type grillage à poule à l'aide de collier de serrage en plastique (Vangeluwe et al., 2004). Après six mois d'expérience certains grillages en fil de fer ont été complètement corrodés par l'eau de mer provoquant la destruction quasi-totale de la grille et seules quelques pousses ont eu le temps de s'enraciner suffisamment pour ne pas être emportées lors des tempêtes.
Toujours en Corse, une technique plus écologique a été testée avec des grilles de bambou tressées sur lesquelles ont été attaché, avec des liens en sisal, des boutures issues d'épaves (Vangeluwe, 2006). Cependant les liens en sisal se sont rompus dès la première année d'expérience entraînant le détachement des transplants, quant au bambou, bien que peu putrescible, il s'est tout de même désagrégé après trois ans de transplantation. Ces matériaux ne permettent donc pas de réaliser des expériences de transplantation à long terme.
En Italie, une autre technique a été testée, elle consiste à déposer sur le fond des sacs grillagés doublés d'une membrane géotextile, remplis de sable, dans lesquels sont placées des boutures de *P. oceanica* (Acunto et al., 2015). Cette technique est adaptée à des projets à grande échelle permettant de minimiser les temps de transplantation, les rhizomes peuvent être fixés sans être endommagés montrant une très bonne vitalité végétative avec la production de nouveaux rhizomes, feuilles et racines quelques mois après la transplantation, de plus, cette technique est flexible, car elle peut être modifiée et adaptée aux différents types de substrats et aux diverses conditions hydrodynamiques des sites récepteurs.

- Fixation des transplants directement sur le fond au moyen de piquets ou d'agrafes métalliques.

Cette technique a été développée et brevetée par H. Molenaar en 1992. Les boutures étaient prélevées en bordure d'herbiers, elles ont ensuite été transplantées dans la même journée sur de la matte morte. Cette technique est peu onéreuse et écologique, les transplants se sont adaptés rapidement. Au total, 4 000 boutures ont pu être transplantées.
Des techniques similaires ont été testées avec du matériel biodégradable afin de diminuer l'impact sur le milieu, par exemple, l'utilisation d'une ancre en plastique biodégradable a été

testée en Italie (Scannavino et al., 2014). Les modules ont été positionnés à une profondeur de 6 mètres sur du sable avec *C. nodosa* et sur matte morte de *P. oceanica*, et après 20 mois les taux de survie était de 94 %. Cette technique permet d'accélérer la croissance naturelle et la colonisation, d'augmenter les probabilités de réussite en limitant les coûts et de réduire l'impact sur le milieu marin.

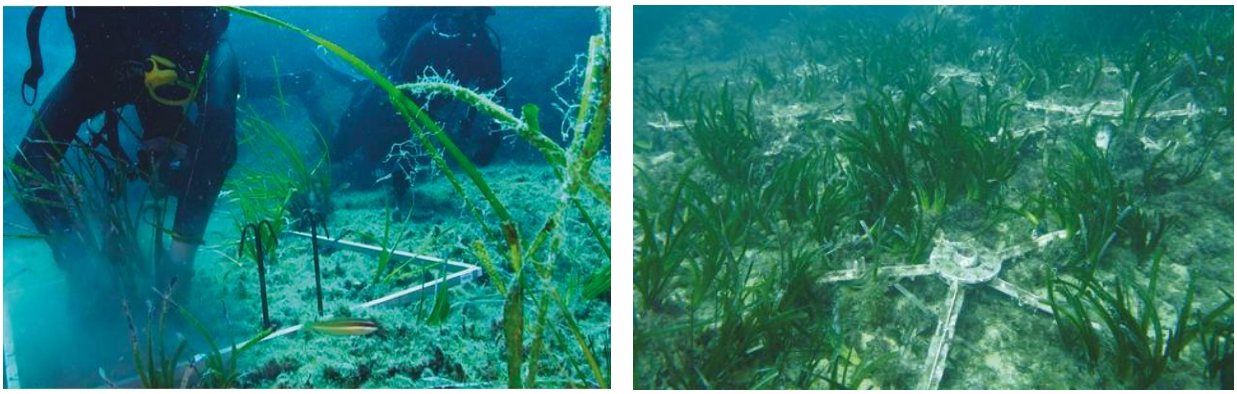


Figure 6 : Techniques de l'agrafe métallique (à gauche) et de l'ancre biodégradable (à droite), source : LIFE SEPOSSO, Mai 2022

Les techniques sans ancrage :

Elles consistent à mettre en place les transplants sur le site receveur sans aucun système d'ancrage, le maintien des transplants ne reposant que sur le dépôt de sédiment sur les transplants. Différentes méthodes ont été mises au point :

- utilisation de plantes prélevées avec le sédiment intact (méthode de la « motte »),
- prélèvement de carottes de sédiment intact et les pousses qui les accompagnent et repiquage direct des carottes sur le site receveur,
- repiquage des transplants dans des trous dans des boîtes placées dans le sédiment

Nous pouvons citer comme exemple l'extension du port de Piombino (Ligurie) afin d'accueillir les navires de croisière. En premier lieu, un plongeur prélevait au moyen d'un filet les espèces vivant dans l'herbier. Puis les mottes (2,0 m × 1,5 m × 1,2 m) ont été prélevées grâce à une grue et transplantées sur un fond sablonneux dans la baie de Piombino, chaque motte a été fixée au substrat par quatre piquets de 1,5m de long. Au total, 1020 m ^{2} de *P. oceanica* ont été transplantés avec un taux de survie de 92 % (Bedini et al., 2020).

Un projet innovant appelé « Safebent » porté par Andromède Océanologie Monaco a été utilisé pour transplanter des mottes de *P. oceanica* (pousses et matte). Le principe était de prélever une motte comprenant l'herbier vivant, sa matte et le sédiment sous-jacent, de les placer dans des paniers métalliques recouverts de fibre de coco. Elle a été testée à Monaco en 2017 pour relocaliser, à la demande du gouvernement, près de 500 m ^{2} d'herbiers à *P. oceanica* menacés de destruction totale par les aménagements côtiers. Le prélèvement des transplants a été réalisé à l'aide d'une transplanteuse à long bras (Figure 2). Les blocs de matte ont été transportés dans la colonne d'eau jusqu'aux sites de repiquage situés à 300m du lieu de prélèvement, entre 17 et 20 m de profondeur, et placés dans des trous préalablement creusés dans un fond sableux et de matte morte. La transplantation a été réalisée entre le 20 mars et le 15 mai 2017. Au total, 496m ² d'herbier ont été transplantés, ce qui représente 37% de l'herbier existant. L'évaluation du taux de réussite de l'opération demandera plusieurs

années, le suivi scientifique qui a commencé en mai 2017 se poursuivra pendant 10 ans jusqu'en 2027 (Descamps et al., 2017).

Figure 7 : La transplanteuse en opération. (Crédit : Andromède océanologie)

Etant donné le coût relativement élevé de ces transplantations, dû aux contraintes propres au milieu marin, il est important de noter que la même méthode de transplantation peut engendrer des résultats variables sous différentes conditions environnementales.

4) Application à un programme récent

L'une des principales menaces de dégradation des herbiers à grande échelle est sans aucun doute le mouillage (Marbà et al., 2014). En juin 2019, la préfecture maritime de Méditerranée française a promulgué un nouvel arrêté (n°123/2019) réglementant l'ancrage de tout type de bateaux (commerce, plaisance, etc…) de plus de 20 ou 24 mètres. Cet arrêté interdit formellement l'ancrage dans un habitat d'espèce marine végétale protégée, afin de préserver les herbiers des dommages liés à cette pression anthropique. Ainsi, le mouillage n'est désormais autorisé qu'en dehors de ces zones d'interdiction, ou au sein de tâches de sable matérialisées sur les cartes comme zones autorisées. En parallèle de cette réglementation interdisant l'ancrage des navires de grande plaisance dans l'herbier, la DIRM (Direction Inter Régionale de la Mer) a lancé un appel à projet pour promouvoir la création de ZMEL (Zone de Mouillage et d'Equipement Léger) destinée à la petite plaisance. Une nouvelle stratégie mouillage Méditerranée a été élaborée pour faciliter et donner les clés aux porteurs de projets de ZMEL.
Toutefois, si ces réglementations sont de nature à réduire considérablement l'impact de l'ancrage sur les herbiers dans l'avenir, les surfaces perdues au cours des dernières décennies sont importantes et leur recolonisation naturelle risque d'être très longue du fait de la faible vitesse de croissance de la Posidonie.

Nous présentons ci-dessous un exemple de programme récent de transplantation d'herbier dans des zones impactées par l'ancrage des bateaux et qui sont maintenant incluses dans les nouvelles zones réglementaires définies par l'arrêté n°123/2019 :

Le programme REPIC (Restaurer la Posidonie Impactée par les anCres) porté par Andromède océanologie.

Objectifs : Engager une dynamique de restauration des herbiers de posidonie sur une surface de repiquage de 1000 m ² sur la période 2019-2024 au niveau de quatre sites ateliers particulièrement impactés par le mouillage situés dans le département des Alpes Maritimes (Golfe Juan, rade de Villefranche et rade de Beaulieu sur mer) et du Var (Saint Tropez). Les fragments arrachés par les ancres sont repiqués dans leur milieu.

Présentation du programme : La première opération expérimentale du projet REPIC s'est déroulée en Août 2019 à l'Est du Golfe Juan (sur la commune d'Antibes) dans une Zone Interdite aux Embarcations à Moteur (ZIEM) à -3m. Elle a permis de repiquer 17 000 faisceaux vivants de posidonie. La deuxième opération s'est déroulée pendant trois semaines en Août 2020 et a permis de repiquer plus de 35 000 faisceaux vivants de posidonie, toujours sur le même site atelier à Golfe Juan (entre -1,5 et -3m). En Juillet 2021, la ZIEM à l'Est de Golfe Juan a été complétée avec le repiquage de près de 2150 faisceaux à -3 m, et des nouvelles zones de repiquage ont été définies sur le secteur de la Rade de Beaulieu-sur-mer sur lequel plus de 10 500 faisceaux vivants de posidonie ont été repiqués entre -18 et -30m. Depuis 2019, les plongeurs professionnels et biologistes marins ont récolté durant 155 heures de plongée des fragments arrachés par les ancres. 14646 fragments portant 66045 faisceaux ont été repiqués lors de 275 heures passées au fond sur une surface d'environ 340 m ².

Origine des boutures : les boutures sont issues de fragments arrachés par les ancres de navires ou cassées naturellement. Elles ont été collectées en plongée à proximité de la zone de replantation, et ont ensuite été placées dans des sacs de 50 litres, sous l'eau. Les fragments privilégiés sont les fragments constitués de rhizomes plagiotropes d'une longueur minimum de 5 à 7 cm afin de faciliter leur fixation au sédiment et les fragments plagiotropes possédant plusieurs faisceaux.

Pour tester l'hypothèse d'un type morphologique de fragments plus propice à la transplantation, trois types de transplants (motte avec matte saine, fragment long portant des faisceaux foliaires plagiotropes et orthotropes, fragment court portant des faisceaux foliaires plagiotropes et/ou orthotropes) ont été testés dans une des zones à Golfe Juan. En deux années, aucune différence remarquable n'a été relevée entre ces trois types morphologiques de transplants.

Technique de transplantation : les fragments sont accrochés à des agrafes métalliques (spécialement conçues et développées pour le projet) puis sont enfoncés de quelques centimètres dans le substrat. Plusieurs techniques de repiquage ont été testées : disposition homogène avec agrégation faible à forte, ou agrégation forte sur des ilots épars, ou agrégation forte dans des quadrats disposés en damier. Les résultats des trois années de suivi sont en faveur d'une agrégation forte des fragments repiqués.

Zones de transplantation : les zones de repiquage sont sélectionnées grâce aux critères suivants : profondeur (équivalente voire plus faible qu'aux zones de récolte), substrat (la matte morte sera le substrat préférentiellement visé), distance (à proximité de la zone de récolte) et zones protégées du mouillage.

Ces trois années d'expérimentation montrent des résultats positifs (stabilité du recouvrement par les fragments dans les zones de repiquage, taux de survie dans les quadrats permanents de 82,5 % au bout de deux ans) mais le recul temporel reste insuffisant pour statuer sur la réussite de l'opération. La méthode de transplantation ainsi que la survie et la croissance des plants font l'objet d'un suivi scientifique jusqu'en 2024.

Figure 8 : Repiquage d'un fragment avec une agrafe spécialement créée pour ce projet (© Laurent Ballesta, Octobre 2019).

Discussion

La transplantation de *P. oceanica* est un vaste sujet qui a donné lieu à de multiples publications. Depuis une cinquantaine d'années, de nombreuses personnes se sont intéressées à ce sujet et ont tenté de restaurer cet écosystème. Toutes les expériences de transplantation réalisées n'ont pas donné lieu à des publications scientifiques. Au vu du nombre d'articles publiés, une étude exhaustive était de trop grande envergure, aussi certains articles importants ont pu être oubliés.

La posidonie étant très sensible à son environnement et les boutures étant elles même encore plus fragiles du fait de leur perte de lien avec l'herbier primaire, il est important que leur transplantation ait lieu dans les meilleures conditions.

1. Paramètres de transplantation :

Les expériences menées pour déterminer les meilleures conditions de transplantation ont été réalisées sur des fragments prélevés dans des herbiers vivants, (Meinesz et al., 1991, Molenaar et Meinesz, 1992, Molenaar et al., 1993, Molenaar et Meinesz, 1995).
Il est plus simple de sélectionner le type morphologique plagiotrope, de choisir la saison de transplantation et de connaître la profondeur de transplantation et de prélèvement lorsque les boutures sont issues de prélèvement sur des herbiers vivants. Cela est plus compliqué lorsque les boutures proviennent d'épaves, notamment pour celles issues d'arrachage suite aux tempêtes. Dans le cas des épaves issues d'arrachage par les ancres, la zone de récolte se situe souvent à proximité de la zone de transplantation. Cependant, il est impossible de choisir le type morphologique des boutures et la saison de transplantation, en effet, il est plus important de tenter de sauver le maximum de boutures que d'attendre que toutes les conditions soient optimales pour tenter une expérience de transplantation.
En ce qui concerne le substrat et le lieu de transplantation il est plus pertinent de ne replanter que dans les zones anciennement colonisées par l'espèce. En effet, remplacer un écosystème par un autre ne semble pas être une solution très écologique. Le seul habitat où une telle opération serait justifiée d'un point de vue éthique est donc la matte morte résultant de l'impact humain (par exemple les sillons d'ancrage).

2. Origine des boutures :

Que les boutures proviennent d'un prélèvement sur l'herbier vivant, de fragments arrachés naturellement ou par les ancres, ou qu'elles proviennent de plantules ou de graines germées en laboratoire, n'a pas réellement d'incidence sur la réussite ou non de la transplantation.

L'utilisation de boutures en épave (arrachés par les tempêtes ou les ancres), permet de ne pas porter atteinte à l'intégrité physique des herbiers donneurs et de sauver ces fragments. Concernant les fragments arrachés par les tempêtes, l'inconvénient est que l'on ne connait pas leur provenance, il est donc difficile de pouvoir les transplanter dans des conditions similaires à leur habitat naturel. Ce qui n'est pas totalement le cas pour les fragments arrachés par les ancres.

En ce qui concerne les boutures issues de prélèvement, l'intérêt est que l'on peut choisir exactement leur provenance (profondeur), le nombre de faisceaux par bouture et le type des rhizomes (plagiotropes ou orthotropes), et ainsi optimiser les conditions de la réimplantation. Cependant, la question peut se poser sur le fait de dégrader volontairement un herbier en bonne santé dans le but de tenter une expérience de transplantation. D'après H. Molenaar, une expérimentation montre que la régénération naturelle de l'herbier après prélèvement est très rapide. Ainsi, après deux années, le nombre de boutures prélevées (rhizomes plagiotropes) est remplacé par un nombre supérieur (150 %), ce mécanisme peut être comparé à celui observé lors de l'élagage d'un arbre qui stimule la croissance.

L'utilisation de plantules ou de graines, récoltées en mer ou sur les plages et germées en laboratoire semble être la solution la plus écologique (Boudouresque, 2021). Il n'est porté aucune atteinte à l'herbier et leur transplantation a été un succès. De plus, transplanter des graines issues de différentes localisations pourrait favoriser la diversité génétique de la plante. Des questions pourraient se poser quant à la consommation énergétique qu'implique la germination en laboratoire ainsi que pour maintenir les graines et les plantules dans les meilleures conditions de développement ? (Tableau 1).

Tableau 1 : Origines des boutures, avantages et limites.

Origine des boutures	Avantages	Limites
Prélevées sur les herbiers vivants	Connaissance de la provenance et du type de bouture	Porte atteinte à l'herbier donneur
En épaves (arrachées par les ancres ou les tempêtes)	Disponibles en grand nombre Connaissance de la provenance pour les boutures arrachées par les ancres	Pas de connaissance sur la provenance pour les boutures arrachées lors des tempêtes
Graines et plantules	Disponibles en grand nombre Ecologique	Matériel et consommation énergétique pour les faire germer ?

Pour certains chercheurs la principale cause des échecs des expériences de transplantation est due à la difficulté de la plante de capter et de mobiliser les nutriments, carbone, azote et phosphore, nécessaires à son développement. Des expériences de transplantation visant à suivre les dynamiques de ces éléments ont été menées (Vangeluwe et al., 2004). Les résultats montrent que les transplants doivent faire face à deux problèmes :

produire des racines pour se fixer dans le sédiment et absorber les éléments nécessaires à leur maintenance et à leur croissance. Les teneurs en carbone, en azote, en phosphore sont significativement plus faibles dans les transplants que dans la population saine. Après trois ans, les transplants survivants avaient pourtant produit des racines qui fixent la plante et permettent de pomper des éléments nutritifs dans le sédiment mais le bilan carbone, azote, phosphore continuait d'être insuffisant. Cependant l'utilisation d'engrais n'a pas permis d'améliorer la survie et le développement des transplants (Vangeluwe, 2006).

3. Techniques de transplantation :

Le type de matériel utilisé constitue un facteur supplémentaire dont l'influence sur la survie des transplants n'est pas négligeable. Il apparait important de privilégier les techniques avec le moins de contraintes possibles sur l'environnement.

Les techniques utilisant du ciment : dalles de ciment trouées et cadres en ciment autour d'un treillis métallique, sont à proscrire, car elles sont très intrusives et ont un impact délétère sur l'environnement mais également sur les boutures. Elles présentent également de nombreux autres inconvénients : coût élevé, utilisation importante de matériaux artificiels (béton, fer), dont le poids peut conduire, sur substrat sablo-vaseux, à l'enfouissement total du béton entrainant avec lui les posidonies, de plus, si une ou plusieurs boutures arrivent à se fixer elles ne pourront pas sortir de la contrainte est donc coloniser les alentours. Si les boutures meurent les dalles et les cadres de ciment, s'ils ne sont pas enlevés, resteront entraînant la pollution et la dégradation des fonds marins.

Les techniques utilisant un treillis plastique, métallique ou biodégradable posé à plat sur le fond : nous avons vu que les matériaux utilisés résistent mal aux conditions marines et se dégradent rapidement entraînant la détérioration des boutures. Ce type de support ne convient donc pas pour des expériences de transplantation à moyen ou long terme étant donné leur faible résistance à l'eau de mer.

Les techniques utilisant des piquets ou des agrafes sont celles ayant le moins d'impact sur l'environnement, la quantité de matériel utilisé est faible, il peut être biodégradable ou retiré après l'enracinement des boutures. Il faudra veiller à ce que le matériel soit bien fixé au substrat afin de supporter l'hydrodynamisme. Ces techniques sont utilisées pour transplanter des boutures isolées en épave ou non. Les boutures sont plantées une à une, ce qui demande du temps, et ne peut se faire que sur de petites surfaces.

La technique de la motte est surement la technique ayant le plus d'avantages. Elle permet de conserver les échanges physico-chimiques de la plante avec le sédiment indispensables à la survie de la posidonie, elle améliore les propriétés d'ancrage des transplants en limitant les phénomènes d'érosion et d'enfouissement des rhizomes, elle permet la conservation des espèces benthiques présentent dans l'herbier. De plus des milliers de pousses peuvent être transplantées simultanément. Cette technique nécessite la destruction totale de l'emplacement initial de l'herbier, de ce fait elle ne peut et ne doit être utilisée qu'en cas de menace de destruction totale de l'herbier, comme par exemple en cas de recouvrement par un ouvrage artificiel (Tableau 2).

Tableau 2 : Les techniques de transplantation, avantages et limites.

	Techniques de transplantation	**Avantages**	**Limites**
Maggi 1971 Cooper 1976	Dalles de ciment trouées Cadre en ciment autour d'un treillis		Impact délétère pour l'environnement Coût élevé Enfouissement dans le substrat Un seul point de colonisation
Vangeluwe 2004 Vangeluwe 2005	Treillis métallique Grille bambou	Plus respectueuses de l'environnement	Ne supportent pas le milieu marin
Molenaar 1992 Sannavino et al. 2014	Piquet ou agrafe Ancre biodégradable	Respect de l'environnement	Le matériel doit être bien en place pour résister à l'hydrodynamisme Demande du temps Petites surfaces
Bedini et al. 2020 Andromède océanologie	Motte SAFEBENT	Respect de l'environnement, de l'herbier et des espèces associées possibilité de transplanter de grandes surfaces	Destruction totale de l'herbier primaire

La transplantation étant encore à l'état de recherche, il serait intéressant de comparer la transplantation par rapport à la recolonisation naturelle et assistée. C'est ce que prévoit d'étudier le projet REPAIR (REstoration of Anthropogenic PAtches in PosIdonia oceanica meadows) qui s'inscrit dans une thèse de doctorat à l'Université de Liège (Belgique), en collaboration avec la STAtion de Recherches Sous-marines et Océanographiques (STARESO), à Calvi (Corse), 2022-2025.

Objectifs : Restauration et stabilisation des herbiers de posidonies endommagés par l'ancrage, afin de favoriser et d'accélérer le rétablissement des herbiers endommagés et reconquérir les surfaces détruites. Ce projet vise à mettre en place des solutions qui favoriseraient la recolonisation naturelle de l'herbier.

Présentation du programme : Ce projet vise à restaurer les intermattes anthropiques longitudinales (sillons d'ancrage) créées par l'ancrage de grands bateaux dans les herbiers de *P. oceanica*, et à favoriser la recolonisation des surfaces perdues en testant différentes techniques de restauration (transplantation et recolonisation assistée). Différents substrats écologiques et des techniques non-destructives seront utilisés pour évaluer la capacité de restauration des herbiers de posidonies endommagés par le mouillage. La recolonisation des surfaces nues dans les sites expérimentaux sera comparée aux sites témoins (sillons d'ancrage) pour évaluer l'efficacité de la restauration active et de la recolonisation assistée en comparaison de la recolonisation naturelle.

Origine des boutures : elles proviendront majoritairement d'épaves flottantes détachées par les tempêtes hivernales. Les boutures seront récoltées en plongée sous-marine entre 5 et 15 m de profondeur. Des transplants à croissance plagiotrope seront préférentiellement sélectionnés.

Techniques de transplantation : Les transplants seront attachés individuellement à différentes structures expérimentales (BESE éléments, gabions, géotextile en fibre végétale). Des fragments de posidonies seront également ancrés directement dans le sédiment au moyen d'une fixation métallique dans le but de comparer l'efficacité de cette technique vis-à-vis de la disposition de structures plus imposantes. Une seconde expérience aura lieu visant à disposer ces mêmes structures au sein de sillons d'ancrage sans aucune transplantation. L'objectif de cette dernière sera d'évaluer la capacité de ces structures à favoriser la recolonisation par les herbiers adjacents et le recrutement de faisceaux de posidonies au sein de zones dégradées, augmentant ainsi la vitesse du processus de recolonisation des surfaces nues. Enfin, les boutures seront disposées en forte agrégation.

Zones de transplantation : Les structures portant les transplants seront disposées dans les sillons d'ancrage à différentes profondeurs.

Pour conclure, les résultats de ces expériences sont difficilement comparables, les études ayant été menées dans différentes conditions, avec des techniques distinctes et sur des durées variables. Il serait intéressant de mener des études plus longues afin d'apprécier avec plus de recul le développement des boutures transplantées. Nous avons vu que la croissance de la plante est très lente, ainsi des études sur trois ans sont peut-être de trop courte durée.
Peut-être serait-il intéressant de définir un cahier des charges afin de pouvoir comparer les paramètres évalués dans les différents programmes mis en place ?

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, les projets de restauration des herbiers de posidonie s'inscrivent dans les recommandations de l'accord de Paris de 2015 visant à limiter le réchauffement climatique, à prendre des mesures pour conserver et, le cas échéant, renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre. Ils s'inscrivent également dans la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) qui a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'atteindre la neutralité carbone pour 2050. Ils s'intègrent dans la décision du Conseil de l'Europe (11 Décembre 2020) qui approuve un objectif consistant en une réduction nette des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE d'au moins 55 % d'ici 2030. D'autre part, 2021-2030 est la Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes et appelle les pays du monde entier à mettre un terme à la dégradation des écosystèmes et à restaurer ceux qui ont été endommagés.

Conclusion

Le déclin des herbiers à *Posidonia oceanica* dans certaines régions de la Méditerranée est une réalité inquiétante. La mise au point de techniques de transplantation, puis leur mise en œuvre apparaissent comme des nécessités. La régénération naturelle des herbiers étant très lente, il peut s'avérer nécessaire, dans les secteurs où la régression a été considérable, d'accélérer la régénération naturelle par des transplantations.

Le but de ce travail était de faire une synthèse des connaissances concernant la transplantation de *P. oceanica* à partir de données bibliographiques.

De nombreuses expériences ont été menées depuis les années 70 et d'autres sont encore en cours. De manière générale, elles montrent que la transplantation est envisageable à condition de respecter certains principes.

Il faut tout d'abord s'assurer que les causes de la régression ont cessé. Il apparaît que les paramètres environnementaux jouent un rôle important sur la survie et le bon développement des boutures. Il est donc primordial de se rapprocher au maximum des conditions vie antérieures des boutures dans le choix du site de transplantation.

L'utilisation des techniques les plus respectueuses de l'environnement est à privilégier. En effet, il ne parait pas concevable de laisser du matériel polluer les fonds marins.

Jusqu'à présent, les résultats des transplantations de *P. oceanica* en Méditerranée restent mitigés quant à la survie et au développement des tansplants.

Toutefois, grâce aux nombreuses recherches et à l'amélioration constante des techniques de transplantation, des projets innovants voient le jour en Méditerranée, mais il faudra des décennies pour juger réellement de leur éventuel succès.

Dans un contexte d'urgence climatique, la compensation carbone, est appelée à se développer dans les prochaines années. Les herbiers de Posidonie étant considérés comme des puits de carbone majeurs, leur préservation, constitue un défi capital dans le cadre de l'atténuation du changement climatique.

Bibliographie

Acunto S., Piazzi L., Cinelli F., De Biasi A-M., Pacciardi L., Ceraudo S., Fersini G. Transplantation of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* through naturalistic engineering techniques: value, weakness and further improvements. 2015

ANDROMEDE OCEANOLOGIE, 2021. Restaurer la posidonie impactée par les ancres – Projet REPIC – Rapport de mission 2021. Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau / NAOS. 148 pages.

Bacci T., La Porta B. (2021). Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE 16 GIE/IT/000761), Rome.

Balestri, E.; Piazzi, L.; Cinelli, F. Survival and growth of transplanted and natural seedlings of Posidonia oceanica (L.) Delile in a damaged coastal area. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1998, 228, 209–225.

Boudouresque, C.F. La restauration des écosystèmes à phanérogames marines. In Restauration des Ecosystèmes Côtiers; Drévès, L., Chaussepied, M., Eds.; IFREMER: Paris, France, 2001; Volume 29, pp. 65–85.

Boudouresque, C.F.; Bernard, G.; Bonhomme, P.; Charbonnel, E.; Diviacco, G.; Meinesz, A.; Pergent, G.; Pergent-Martini, C.; Ruitton, S.; Tunesi, L. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*; RAMOGE and RAC/SPA Publications: Tunis, Tunisia, 2012; p. 202.

Boudouresque, C.F. et al., Restoration of Seagrass Meadows in the Mediterranean Sea : A Critical Review of Effectiveness and Ethical Issues. HAL 2021

Campagne, C.S., Salles, J.M., Boissery, P., Deter, J., 2015. The seagrass Posidonia oceanica: Ecosystem services identification and economic evaluation of goods and benefits. Mar. Pollut. Bull. 97, 391–400.

Descamp P., Cornu. T, Bougerol M., Boissery P., Ferlat C., Delaruelle G., Deter J., Gobert S. Experimental transplantation of *Posidonia oceanica.* 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017

Maggi, P. Le problème de la disparition des herbiers à posidonies dans le golfe de Giens (Var). Sci. Pêche 1973, 221, 7–20

Marbà, N., Duarte, C.M., 1998. Rhizome elongation and seagrass clonal growth. Mar. Ecol. Prog. Ser. 174, 269–280.

Marbà, N.; Díaz-Almela, E.; Duarte, C.M. Mediterranean seagrass (Posidonia oceanica) loss between 1842 and 2009. Biol. Conserv. 2014, 176, 183–190.

Meinesz A., Lefèvre J.R., 1984. Régénération d'un herbier à *Posidonia oceanica* quarante années après sa destruction par une bombe dans la rade de Villefranche (Alpes Maritimes). In : International work-shop on *Posidonia oceanica* beds. Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. (eds), GIS Posidonie publ., 1, 39-44.

Meinesz A., Caye G., Loques F., Macaux S. (1990). Analyse bibliographique sur la culture des phanérogames marines. Posidonia Newsletter, Fr., 3 (1): 1-67.

Meinesz A, Caye G, Loquès F, Molenaar H (1991). Growth and development in culture of orthotropic rhizomes of *P. oceanica*. Aquatic Botany 39: 367-377.
Meinesz A., Molenaar H., Bellone E., Loques F. (1992). Vegetative reproduction in Posidonia oceanica. I. Effects of rhizome length and transplantation season in orthotropic shoots. Marine Ecology, Allem., 13 (2) : 163-174.

Meinesz A, Caye G, Loquès F, Molenaar H (1993). Polymorphism and development of *P. oceanica* transplanted from different part of the Mediterranean into the National Park of Port-Cros. Botanica Marina 36: 209-216.

Molenaar H. (1992). Etude de la transplantation de boutures de la phanérogame marine Posidonia oceanica (L.) Delile. Modélisation de l'architecture et du mode de croissance. Thèse Doct. Sci. Vie, Biol. mar., Univ. Nice-Sophia Antipolis, Fr.: 1-221.

Molenaar H., Meinesz A. (1992). Vegetative reproduction in Posidonia oceanica. II. Effects of depth changes on transplanted orthotropic shoots. Marine Ecology, Allem., 13 (2): 175-185.

Molenaar H, Meinesz A, Caye G (1993). Vegetative reproduction in *P. oceanica*. Survival and developent in diferent morphological types of transplanted cuttings. Botanica marina 36(6): 481-488.

Molenaar H, Meinesz A (1995). Vegetative reproduction in *P. oceanica*: Survival and development of transplanted cutting according to different spacings, arrangements and substrates. Botanica Marina 38: 313-322.

Pergent G, Mendez S, Pergent-Martini C, Pasqualini V (1998). Preliminary data on the impact of fish farming facilities on *P. oceanica* meadows in the Mediterranean. Oceanologica acta 22(1): 95-107.

Pergent G, Mendez S, Pergent-Martini C, Pasqualini V (1999). Preliminary data on the impact of fish farming facilities on *P. oceanica* meadows in the Mediterranean. Oceanologica Acta 22(1): 95-107.

Pergent-Martini C, Rico-Raimondino V, Pergent G (1994). Primary production of *P. oceanica* in the Mediterranean Basin. Marine Biology 120: 9-15.

Pergent-Martini, C. 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. Ph.D. Thesis, Pascal Paoli University of Corsica, Corsica, France, 1994; p. 191.

Pergent-Martini, C.; Pasqualini, V. Seagrass population dynamics before and after the setting up of a wastewater treatment plant. Biol. Mar. Mediterr. 2000, 7, 405–408.

Pergent G, Bazairi H, Bianchi C.N, BoudouresqueC.F, Buia M.C, Calvo S, Clabaut P, Harmelin-Vvivien M, Angel M., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Thibaut T., Tomasello A., Verlaque M. Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers Mediterranean Marine Science. 2014, p 12

Pergent et al., Contribution of Posidonia oceanica meadows in the context of climate change mitigation in the Mediterranean Sea, 2020

Pergent-Martini, C.; Pergent, G.; Monnier, B.; Boudouresque, C.F.; Mori, C.; Valette-Sansevin, A. Contribution of Posidonia oceanica meadows in the context of climate change mitigation in the Mediterranean Sea. Mar. Environ. Res. 2021, 165, 105236.

Scannavino, A.; Pirrotta, M.; Tomasello, A.; Di Maida, G.; Luzzu, F.; Bellavia, C.; Bellissimo, G.; Costantini, C.; Orestano, C.; Scalfani, G.; et al. Biodegradable anchor modular system for transplanting *Posidonia oceanica* cuttings. In Proceedings of the 5th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Portorož, Slovenia, 27–28 October 2014; Langar, H., Bouafif, C., Ouerghi, A., Eds.; RAC/SPA Publications: Tunis, Tunisia, 2014; pp. 236–237

Telesca, L.; Belluscio, A.; Criscoli, A.; Ardizzone, G.; Apostolaki, E.T.; Fraschetti, S.; Gristina, M.; Knittweis, L.; Martin, C.S.; Pergent, G.; et al. Seagrass meadows (Posidonia oceanica) distribution and trajectories of change. Sci. Rep. 2015, 5, 1–14

Terrados, J.; Marín, A.; Celdrán, D. Use of Posidonia oceanica seedlings from beach-cast fruits for seagrass planting. Bot. Mar. 2013, 56, 185–195

Vangeluwe, D.; Lepoint, G.; Bouquegneau, J.M.; Gobert, S. Effet de la transplantation sur les pousses de Posidonia oceanica (L.) Delile. Life Environ. 2004, 54, 223–230.

Vangeluwe, D. Effets de la Transplantation sur La Biométrie et La Dynamique des Nutriments, du Carbone et de La Chlorophylle de Posidonia oceanica (L.) Delile. Ph.D. Thesis, University of Liège, Liège, Belgium, 2006; p. 196.

Sites Internet :

http://www.corse-du-sud.gouv.fr/IMG/pdf/projet_renforc_dreal_janvier_2021.pdf

https://fondationsetec.org/2021/07/09/renforcement-des-puits-de-carbone-en-milieu-marin-renforc-par-le-g-i-s-posidonie/

https://gisposidonie.osupytheas.fr/

http://www.haute-corse.gouv.fr/derogation-portant-le-prelevement-et-la-a4245.html

https://ico-solutions.eu/wp-content/uploads/2020/12/Presentations-completes-Restauration-de-la-Posidonie_compressed.pdf

https://www.leparisien.fr/archives/on-va-planter-des-prairies-dans-la-mer-21-11-2012-2340301.php

https://medtrix.fr/cahier-de-surveillance-6/

https://objectif-languedoc-roussillon.latribune.fr/languedoc-roussillon/Actualites/SM2-Solutions-Marines-innove-pour-sauver-la-posidonie_2383.html

Annexe 17

Optimisation écologique des récifs artificiels en mer Méditerranée, complexité tridimensionnelle intérieure et hétérogénéité - focus sur les structures du Prado

Par Mathieu SOULAYROL

Optimisation écologique des récifs artificiels en mer Méditerranée : architecture et matériaux

Étude de cas : focus sur les récifs artificiels du Prado et le projet Girel

Soulayrol Mathieu

Rapport présenté pour la validation du
diplôme universitaire restauration écologique des petits fonds marins côtiers

Département Biologie-Ecologie
Université de Montpellier
France
22/05/22

Équipe d'encadrement :

Les personnes suivantes ont permis la réalisation de ce rapport.

Tuteur	Pavy Thomas Biologiste marin et plongeur professionnel indépendant Consultant en écologie marine et plongeur profond (3B) Seastems group

Jury final :

Composition de la commission d'examen.

Internal Examiner	Dr. Deter Julie Chercheuse en écologie à Andromède Océanologie et enseignante-chercheuse à l'UMR MARBEC Université de Montpellier
	Pavy Thomas Biologiste marin et plongeur professionnel indépendant Consultant en écologie marine et plongeur profond (3B) Seastems group

Remerciements

Tout simplement, merci.

Merci à Julie Deter et à Valérie Borrel pour la création de ce diplôme universitaire "Restauration Écologique des petits fonds côtiers" à l'université des sciences de Montpellier, dans laquelle j'ai apprécié effectuer ma licence en géosciences puis mon Master Génie Côtier et développement raisonné du littoral. Merci pour cette volonté d'en faire une formation accessible à tous, de permettre la réalisation de projets professionnels pour de nombreuses personnes.

Un grand merci à Thomas Pavy, pour m'avoir guidé et corrigé durant la rédaction de ce manuscrit, pour sa sincérité, sa disponibilité et sa bienveillance.

Merci à Robin Alauze pour me laisser effectuer cette formation et écrire ce rapport durant mes horaires de stage, comme il le dit si bien : "c'est de l'investissement sur l'avenir".

Merci à Philippe Lenfant pour son point de vue de plongeur nécessaire pour comprendre les dessus et les dessous de la restauration écologique, pour son animation sur les récifs artificiels et sa connaissance de la faune sous-marine.

Merci à Pierre Boissery de permettre les avancées actuelles en termes de restauration écologique, merci de regrouper tout ce petit monde pour réfléchir et acter ensemble. Merci pour son pragmatisme sur les politiques actuelles.

Merci à Anaïs Gudefin pour la présentation des grands projets de restauration écologique en mer Méditerranée, connaissance essentielle pour connaître les limites actuelles et les objectifs futurs.

Merci à Gwennaëlle Delaruelle pour aborder d'autres sujets : la restauration de coraux, de corraligène et de végétaux marins indispensables au bien-être du monde marin.

Merci à Gilles Lecaillon pour son cours pratique et intéractif, mais surtout pour l'aspect pratique présenté par un chef d'entreprise permettant le maintien de cette biodiversité marine que j'aime tant plonger voir.

Merci à Olivier Bocquet pour la présentation d'une action concrète et du processus de réalisation d'une solution de restauration écologique et de biomimétisme, un aspect essentiel qui me sera sûrement très utile au futur.

Un grand merci à Anne Tessier pour le partage de données essentielle à mon analyse.

Merci à toutes les personnes que j'ai citées précédemment pour leur implication dans l'avenir de la restauration écologique (vous formez la relève !).

Merci à tous mes camarades de cette formation ayant permis de créer des contacts forts et une bonne dynamique, avec des gens investis pour la planète bleue.

Résumé

Les risques d'extinction et d'effondrement des écosystèmes s'intensifient rapidement (Bindoff et al., 2019). Plus spécifiquement, l'écosystème marin méditerranéen subit l'effondrement de sa biodiversité (Galewski et al., 2021), classifiée par les experts comme étant parmi les plus inquiétantes au niveau mondial (Coll et al., 2010). Face aux impacts de plus en plus grave, inter-connectés et souvent irréversibles du changement climatique (IPCC, 2022), une manière de répondre à ces futurs défis a été d'acter pour la Restauration Ecologique (RE) des petits fonds marins côtiers. Les Récifs Artificiels (RA) s'inscrivent dans cette dynamique, mais nécessitent un dimensionnement correct et des matériaux adaptés à la vie sous-marine. Le manque de retour et de synthèse sur les différents projets menés en mer méditerranée empêche néanmoins de caractériser leur efficacité écologique. À partir d'une analyse bibliographique conséquente et d'une étude de cas concernant deux projets de RE par des RAs, une première identification de formes et de matériaux conventionnels pour optimiser leurs fonctions est réalisé. Cette étude montre qu'il est complexe de définir l'efficacité écologique d'un récif durant sa conception. Il est maintenant plus que nécessaire de définir des méthodes cadrées et réplicables tant dans la conception pour optimiser les fonctions biologiques, physiques ou Récréatives Pédagogiques et Culturelles (RPC) que dans le suivi pour acquérir davantage de données et affiner l'efficacité écologique des paramètres de forme et de matériau. Le béton est tout de même identifié comme le matériau le plus efficace écologiquement et privilégié actuellement, même s'il présente des limites dans sa conception et sa mise en place.

Mots-Clés : Restauration Ecologique (RE), Récif Artificiel (RA), Matériaux des récifs artificiels, structure des récifs artificiels, architecture des récifs artificiels, conception des récifs artificiels, mer méditerranée

Keywords : Ecological restoration, Artificials Reefs, Materials of artificial reefs, Structure and Architecture of artificial reefs, design of artificial reefs, Mediterranean Sea.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Glossaire

1 Introduction et objectifs **1**

1.1 Contexte général . . . 1

1.2 Objectifs . . . 3

2 État de l'art : les récifs artificiels en mer méditerranée **4**

2.1 Définition d'un récif artificiel . . . 4

2.2 Historique : les récifs artificiels en mer méditerranée française . . . 5

2.3 Objectifs et fonctionnement des récifs . . . 5

2.3.1 Fonction biologique . . . 5

2.3.1.1 Objectif de production halieutique . . . 6

2.3.1.2 Objectif de reconstitution et de protection des biocénoses marines . . . 6

2.3.1.3 Objectif d'optimisation des infrastructures portuaires . . . 7

2.3.2 Fonction physique . . . 7

2.3.2.1 Objectif de protection côtière . . . 7

2.3.3 Fonctions Récréatives Pédagogiques et Culturelles (RPC) . . . 8

2.3.4 Les types de récifs et les récifs multi-objectifs . . . 8

2.3.5 Positionnement, placement et notion de connectivité . . . 8

2.3.5.1 Profondeur d'aménagement . . . 9

2.4 Forme des récifs et caractéristiques techniques . . . 9

2.4.1 Architecture et géométrie des modules . . . 9

2.4.1.1 Rugosité . . . 9

2.4.1.2 Porosité . . . 10

2.4.1.3 Hétérogénéité/complexité . . . 10

2.4.1.4 Elévation . . . 10

2.4.1.5 Esthétique . . . 10
2.4.2 Volume . . . 10
2.4.3 Poids unitaire . . . 11
2.4.4 Surface d'emprise au sol . . . 11
2.5 Les matériaux utilisés . . . 11
2.5.1 Roche naturelle . . . 11
2.5.2 Polymères . . . 12
2.5.3 Bois . . . 12
2.5.3.1 Naturel . . . 12
2.5.3.2 Transformé . . . 12
2.5.4 Métal (acier) . . . 12
2.5.5 Béton . . . 13
2.5.5.1 Classique et haute-performance . . . 13
2.5.5.2 Manufacturé . . . 14
2.5.6 Terre cuite . . . 14
2.5.6.1 Céramique technique . . . 14
2.5.7 Cordage . . . 15
2.6 Les projets sur le littoral méditerranéen Français . . . 15

3 Étude de cas **16**
3.1 Analyse bibliographique . . . 16
3.2 Projets étudiés . . . 16
3.2.1 Récifs Prado . . . 16
3.2.1.1 Présentation et critères de déploiement . . . 16
3.2.1.2 Suivi . . . 16
3.2.1.3 Résultats . . . 17
3.2.2 Récifs Girel . . . 17
3.2.2.1 Suivi . . . 17
3.2.2.2 Résultats . . . 18

4 Résultats **19**
4.1 Type de matériaux préconisés . . . 19
4.1.1 Évolution chronologique du type de matériaux . . . 19
4.1.2 Comparaison des matériaux . . . 20

5 Conclusion et discussion **22**
5.1 Les caractéristiques architecturales à adopter . . . 22
5.1.1 L'apport des retours d'expérience . . . 22
5.1.1.1 Le Prado . . . 22

5.1.1.2 Girel 22
5.2 Discussion 22

6 Annexes **26**

Table des figures

1.1 Exemple d'un récif artificiel dans la baie du Prado, à Marseille. © Gis Posidonie 2

2.1 Illustration de l'arrangement des RAs selon l'échelle du module. © Cépralmar/Région Languedoc-Roussillon 4

2.2 Étapes de colonisation des récifs artificiels par les organismes marins. 6

2.3 Cycles de vie des poissons. © Ecocean 7

2.4 Différentes utilisations des Reef Balls. 8

2.5 Méthode de mesure de la rugosité. © Cepralmar / Région Languedoc-Roussillon 9

2.6 Schéma d'explication de la surface d'emprise au sol. © Cepralmar / Région Languedoc-Roussillon 11

2.7 L'assemblage de structure en béton réalisée par impression 3D permet dorénavant de réaliser des structures complexes et de grande envergure, ce récif construit dans le cadre du projet Récif'Lab par SeaBoost le démontre. © Aire Marine Protégée de la Côte Agathoise, © Service communication ville d'Agde /Yacine Sersar. 13

2.8 Différent type d'utilisation de terre cuite. 14

3.1 Village type et emplacement géographique des villages du Prado. Source : (Charbonnel et al., 2010) 17

4.1 Graphique : Évolution chronologique du type de matériaux utilisés pour les récifs artificiels en mer Méditerranée Française. Données issue de Tessier et al. (2015, ?) 19

1 Présentation des six différents récifs installée au Prado 27

Liste des tableaux

3.1 Tableau comparant les différentes structures de récifs artificiels installées dans le cadre du projet Girel 18

4.1 Tableau de classification des matériaux utilisés pour la conception de récifs artificiels. . . 21

1 Caractéristiques des sites de récifs artificiels déployés en Méditérranée Française ; Pas de données (-) ; le premier niveau de classification du tableau est la région, le deuxième est l'ordre d'apparition et l'année de nouveaux sites de RAs dans la région. Source : (Tessier, 2013 ; Tessier et al., 2015) 28

2 Tableau récapitulatif présentant les différents types de récifs artificiels et le résultat du suivi sur 5 ans. Une filière basse fait 3 mètres de haut, tous les cubes de bétons font 1.7 m^3. Repris de (Le Diréach et al., 2015). 29

Glossaire

AMP Aire Marine Protégée. 2

DRASSM Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines. 14

GPMM Grand Port Maritime de Marseille. 17

PEHD PolyEthylène Haute Densité. 12

RA Récif Artificiel. 1–8, 10, 12–17, 20, 22, 23
RE Restauration Ecologique. 1, 17, 22
RPC Récréatives Pédagogiques et Culturelles. 8, 22

SER Society of Ecological Restoration. 1

Chapitre 1

Introduction et objectifs

1.1 Contexte général

Les risques d'extinction et d'effondrement des écosystèmes s'intensifient rapidement (Bindoff et al., 2019). Plus spécifiquement, l'écosystème marin méditerranéen subit l'effondrement de sa biodiversité (Galewski et al., 2021), classifiée par les experts comme étant parmi les plus inquiétantes au niveau mondial (Coll et al., 2010). Face aux impacts de plus en plus grave, inter-connectés et souvent irréversibles du changement climatique (IPCC, 2022), il est maintenant plus que nécessaire de répondre aux défis futurs que nous réserve notre planète, notamment en actant pour la Restauration Ecologique (RE) des petits fonds marins côtiers.

La RE a été définie par la Society of Ecological Restoration (SER) comme le processus d'aide à l'auto-régénération d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. Il s'agit donc d'une activité intentionnelle qui, considérant l'écosystème dans son intégralité, doit réparer toutes les composantes du milieu, les fonctions écologiques et les services rendus (Lenfant et al., 2015). Cette méthode cherche donc à initier et/ou accélérer le rétablissement d'un écosystème antérieur (ancien ou récent) ayant été impacté par les activités humaines une fois les pressions maitrisées. Le but est de rendre à l'écosystème sa composition spécifique, sa structure communautaire, son fonctionnement écologique, la capacité de l'environnement physique à supporter son biote (ensemble des organismes vivants) et sa connectivité avec le paysage ambiant. Pour réaliser à bien tous ses objectifs, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle et évolutive des écosystèmes ciblés, de l'histoire de la dégradation anthropique et, enfin, choisir un écosystème de référence pour guider la planification, la réalisation, le suivi et l'évaluation du projet de restauration (White and Walker, 1997 ; Egan and Howell, 2001).

La RE peut donc intégrer de nombreux types de solutions, sur terre, comme la replante d'arbres après une exploitation forestière intensive, comme en mer, avec la repique d'herbiers de posidonie, le repeuplement de poisson juvéniles par capture et culture des posts-larves, mais également les Récif Artificiel (RA). Cette notion de RE du milieu marin est relativement nouvelle, due à la difficulté d'évaluation de l'impact des pressions anthropiques sur ce milieu difficilement accessible. Mais les recherches, le développement et l'innovation dans ce domaine s'intensifie depuis une dizaine d'années.

Concentrons-nous sur le bassin méditerranéen français, il est important de maintenir sa biodiversité, définie comme un "hot-spot", elle regroupe 8 à 9% de la biodiversité marine et possède un très fort taux d'endémisme (Lenfant et al., 2015). La RE est un élément complémentaire des politiques de prévention et de lutte contre la pollution qui ont permis l'amélioration de la qualité des eaux du littoral méditerranéen : on cherche dorénavant à y trouver des espèces emblématiques, des poissons, des algues, un herbier de posidonie en bonne santé et aucun déchet, pour corriger l'impact de notre société dont on ne se souciait guère auparavant.

Les RA font parti intégrante de ce développement en agissant activement, naissants en méditerranée languedocienne en 1968 sous l'impulsion des prud'homies de pêche, acte pionner en Europe (Cépralmar,

2015). La vision première et anthropocentrée initiale de l'utilité de ces structures était de recréer des habitats sous-marins pour dynamiser la ressource halieutique et profiter aux pêcheurs. Des capacités importantes de restauration des écosystèmes ont alors été identifiées et sont maintenant utilisées, notamment grâce à l'évolution des techniques de création des RAs, comme avec l'apparition de l'impression 3D, comme des récifs multi-usages pour protéger et restaurer l'environnement marin, soutenir la pêche professionnelle, être le support d'activités récréatives (pêche loisir, plongée sous-marine, etc.) et protéger la côte de l'érosion. De nombreux projets ont alors fait leurs apparitions, dans des ports ou des aires marines protégées. Les planifications d'aménagement et de gestion de ces outils sont bien définies (Cépralmar, 2015 ; Lenfant et al., 2015). En effet, ces projets devront à l'avenir avoir une envergure qui dépassera le simple cadre de la commune et s'articuler avec l'ensemble des Aires Marines Protégées (AMPs) qui se développent sur le littoral de la région.

Néanmoins, leur efficacité écologique, c'est-à-dire l'évaluation de l'atteinte aux objectifs fixés, n'est pas toujours optimale, et il est maintenant important de définir des bonnes manières en termes de forme et de composition de récifs. Les récifs artificiels peuvent avoir des impacts négatifs sur le milieu s'ils sont mal conçus et non adaptés. L'analyse des grands projets de restauration écologique par des récifs artificiels en méditerranée traitée dans ce rapport tentera de répondre à cette problématique de la meilleure manière possible.

FIGURE 1.1 – Exemple d'un récif artificiel dans la baie du Prado, à Marseille. © Gis Posidonie

1.2 Objectifs

Les retours d'expériences sur certains projets permettraient de comparer et de classer en fonctions de critères précis différents projets pour évaluer leurs résultats en terme d'efficacité écologique. Cette comparaison est intéressante, notamment avec l'avènement du biomimétisme ces dernières années, un processus d'innovation et d'ingénierie s'inspirant des formes, matières, propriétés, processus et fonctions du vivant, dont l'efficacité écosystémique n'est pas encore pleinement prouvée. Les RAs présents en méditerranée seront donc analysés, leurs formes et les matériaux utilisés et l'amélioration de leur optimisation écologique sera étudiée chronologiquement en s'appuyant sur la documentation actuelle.

Un problème au sujet de ces récifs artificiels est la quasi-absence de retours d'expérience. En effet, les suivis effectués suite à l'installation d'un récif artificiel se concentrent souvent sur quelques espèces d'intérêts. Il n'y a aucune étude rendant compte de l'ensemble de la biodiversité que peut abriter ce type de récif.

Il faut pour cela tout d'abord poser les bases : la réalisation d'un état de l'art, identifiant historiquement l'apparition de ces solutions, et présentant un rapide aperçu des projets en cours ou passés sur le littoral méditerranéen étudiés au cours de cette étude, permettra ensuite d'évaluer si les opérations ont été efficaces. À partir des suivis écologiques réalisés sur certains projets, une comparaison peut être faite.

Le manuscrit s'articule autour de 3 chapitres suivis d'une conclusion générale :

Le chapitre 2 présente une synthèse sur les récifs artificiels en mer méditerranée française. Une définition est tout d'abord donnée, donnant les différentes façons de nommer un récif unitaire ou une association de récif. L'historique est ensuite dressé pour ensuite aboutir sur les objectifs et fonctionnement de ces récifs. La dernière partie présente les projets notables en mer méditerranée.

Le chapitre 3 aborde la méthodologie d'analyse, présente les outils utilisés et la méthode de comparaison définie. La description des outils utilisés reste volontairement générale et n'est pas appliquée à un RA d'étude particulier afin d'illustrer le caractère reproductible de notre stratégie.

Le chapitre 4 présente les résultats suite à l'utilisation de cette méthodologie sur les projets présentés dans le chapitre 2.

Le chapitre 5 fait le bilan des travaux présentés dans ce manuscrit, dresse des tendances et évoque les limites de cette méthode. Une discussion vient argumenter sur les efforts à poursuivre.

Chapitre 2

État de l'art : les récifs artificiels en mer méditerranée

2.1 Définition d'un récif artificiel

Un RA se définit comme étant une « structure immergée volontairement afin de créer, protéger ou restaurer un écosystème riche et diversifié. Ces structures peuvent induire chez les animaux des réponses d'attraction, de concentration, de protection et dans certains cas une augmentation de la biomasse de certaines espèces » (Gerard et al., 2008). Il est important de différencier les différents composants d'un récif défini par Charbonnel (c.f figure 2.1) :

- Le module : c'est l'unité de base, indivisible, unitaire.
- Le récif unitaire : composé d'un ensemble de module. Les modules qui le composent peuvent être différents, mais le fait qu'ils soient accolés fait de la structure un récif.
- Un complexe récifal ou village : c'est un ensemble ou groupe de récifs unitaires. Dans cette zone, les récifs unitaires communiquent notamment à partir de "corridors écologiques" de déplacement (Pioch, 2008).
- Un champ de récif : c'est une zone d'aménagement définie, pour un projet, de tous les groupes de récifs d'un projet, ou du projet lui-même.

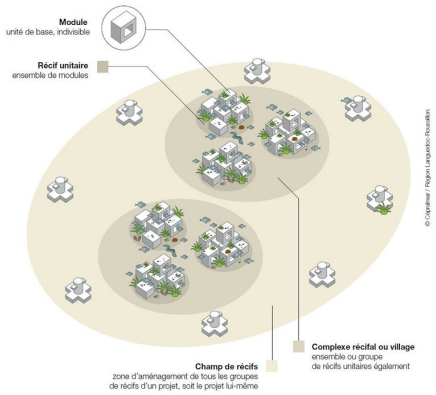


FIGURE 2.1 – Illustration de l'arrangement des RAs selon l'échelle du module. © Cépralmar/Région Languedoc-Roussillon

2.2 Historique : les récifs artificiels en mer méditerranée française

Hors méditerranée, les RA sont apparus pour la toute première fois le long des côtes japonaise, mis en place par les pêcheurs au Moyen-Âge, après avoir constaté que les poissons étaient attirés par les objets immergés en tout genre.

En méditerranée, il y a environ trois mille ans : les pierres servant à lester les cages à filet utilisées pour la pêche au thon étaient abandonnées et, avec le temps, s'accumulaient et formaient des sites attirant les poissons.

La France a relancé le principe en 1968, c'est le Languedoc-Roussillon qui se place comme une région pionnière en terme d'immersion de récifs artificiels, des premières expériences sont réalisées au large de Palavas.

En considérant toute la côte française méditerranéenne, en 1985, 21 sites étaient connus des autorités. Par exemple, dans le golfe Juan, proche de Cannes, 25.000 pneus avaient été immergés dans la zone Natura 2000 pour servir de récif artificiel.

En 1990, c'est le début des immersions de récifs avec des objectifs de protection.

En 2000, les récifs ont alors des vocations multi-objectifs de protection, de production halieutique et de restauration écologique. C'est en 2006 que naît le plus grand projet de récifs artificiels dans la baie du Prado à Marseille, 400 récifs artificiels (27 300 m^3) répartis sur 220 hectares, composé de 6 villages avec pour objectif de réhabiliter les fonds marins dégradés de Marseille et de renforcer le peuplement des espèces.

Aujourd'hui, avec l'apport de connaissances et le développement de cette filière, les notions de connectivité et de biomimétisme sont de plus en plus prisent en compte, et l'aspect ludique de certains récifs convainc davantage les collectivités par ses retombées économiques.

2.3 Objectifs et fonctionnement des récifs

La mise en place de récifs artificiels peut-être motivée par un ou plusieurs objectifs. Il est important de bien définir ses objectifs pour conditionner l'efficacité d'une solution : identifier les besoins techniques, les contraintes à intégrer, la gestion et le suivis à mettre en œuvre pour développer le projet avec succès.

2.3.1 Fonction biologique

Dès lors qu'un substrat dur est immergé, il a tendance à se faire coloniser par des organismes benthiques d'origine végétale et animale. Cette couverture est la base de la nutrition pour certains poissons brouteurs, qui viennent consommer directement sur le récif. Toute la chaîne trophique peut-être alors recrée, les prédateurs venant aux alentours pour se nourrir de petits poissons pélagiques qui utilisent le récif comme une protection grâce aux cachettes dont il est potentiellement pourvu.

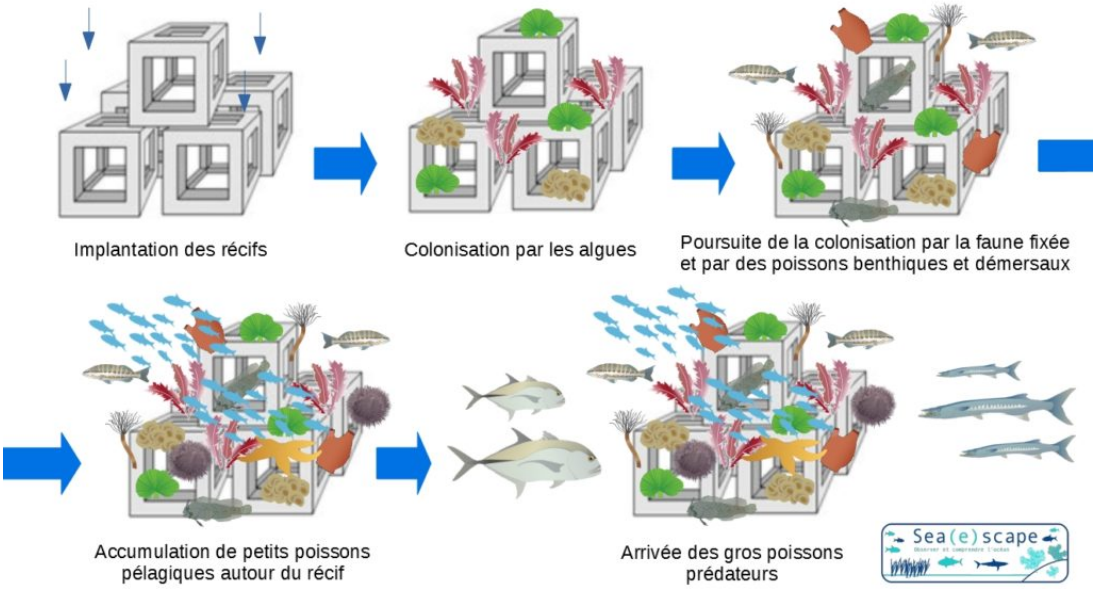


FIGURE 2.2 – Étapes de colonisation des récifs artificiels par les organismes marins.

Un RA peut donc attirer tous les stades de la chaîne alimentaire sous-marine, mais aussi aider à créer de la vie. En effet, les RAs sont aussi des aires de reproduction, parfois de ponte et de nurseries. En soi, un RA répond donc à tous les besoins biologiques des espèces, à savoir se nourrir, se reproduire et se protéger et non seulement se concentrer (Pioch, 2008). Mais répondre à tous ces objectifs demande un travail de conception et d'adaptation au milieu complexe, et de telles solutions ne pourront jamais remplacer un milieu naturel en bonne santé.

2.3.1.1 Objectif de production halieutique

L'objectif initial des RAs était d'améliorer la production halieutique. Toujours d'actualité, ceci permet de soutenir la filière pêche et de réduire les conflits d'usages entre pêche artisanale et chalutier. En effet, l'installation de ces dispositifs dissuade fortement les chalutiers de pêcher dans la zone des 3 miles, qui leur est toutefois interdite et permet une compensation dans la baisse de rentabilité actuelle de la pêcherie. En Languedoc-Roussillon, l'expérience montre que les chalutiers exploitent parfois l'effet récif en périphérie des zones aménagées en RAs, notamment après un coup de mer (poissons délogés du récif par les forts courants de surface et l'agitation).

En ce sens, les RAs permettent la concentration halieutique dans une finalité de pérennisation de la pêche par le maintien de sa productivité.

2.3.1.2 Objectif de reconstitution et de protection des biocénoses marines

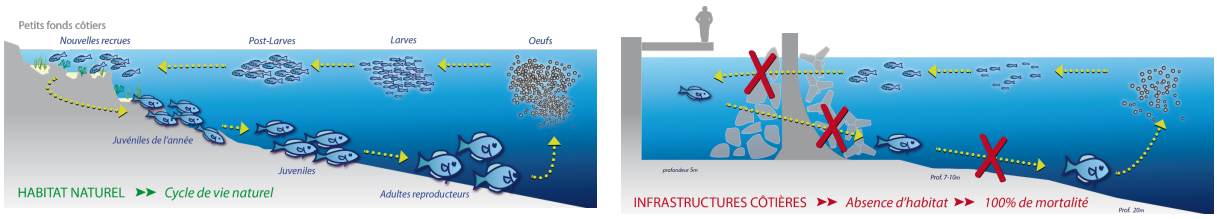
Une biocénose est un groupement d'êtres vivants (plantes, animaux, etc.) vivant dans des conditions de milieu déterminées et unis par des liens d'interdépendances. La destruction des conditions de vie du milieu, donc des habitats, est la première cause de perte de biodiversité à l'échelle internationale (classement Union Internationale pour la Conservation de la Nature). Les petits fonds côtiers sont connus pour être la zone de développement des juvéniles de poisson, et c'est la zone qui subit le plus les impacts anthropiques par sa proximité avec la terre.

Les poissons adultes se reproduisent au large, les femelles pondent ensuite une grande quantité d'œufs, avec en moyenne 300 000 œufs par kilo de son poids pour un bar femelle. Seulement, la mortalité des œufs est assez grande, représentative de leur vulnérabilité. Ces œufs deviennent donc pour certains des larves, puis des post-larves qui vont migrer vers les petits fonds côtiers pour se développer. Enfin, après

avoir atteint une taille suffisante, ces juvéniles vont à leur tour et petit à petit se diriger vers le large afin de poursuivre leur cycle. Au cours de ces différents stades de développement (c.f. figure 2.3a), la sélection naturelle élimine de nombreux individus. En réalité, pour un million d'œufs, un seul individu atteint l'âge adulte en moyenne. Les RAs ont donc leur place au sein du cycle de vie des poissons, en fonction de leur emplacement, ils peuvent cibler différents stades de vie et différentes espèces.

2.3.1.3 Objectif d'optimisation des infrastructures portuaires

La création de ports, se trouvant forcément dans les petits fonds, va inévitablement détruire certains habitats accueillant auparavant ces nouvelles recrues. Ce phénomène est à l'origine d'une perturbation du cycle de vie des poissons (c.f figure 2.3b). C'est à ce stade de vie fragile des poissons que les récifs peuvent jouer le rôle d'une nurserie, en venant se greffer aux infrastructures portuaires, les optimisant écologiquement en permettant la création d'habitats par leur forme et de nourriture par bio-colonisation de leur surface. Différents objectifs peuvent-être remplis : la protection contre les prédateurs permet de créer de l'abondance sur les espèces cibles tout en optimisant leur taux de survie, tandis que le bio-encrassement favorise leur croissance et leur permettre de migrer et de poursuivre leur cycle de vie quand ils atteignent une taille considérable.



(a) En milieu naturel

(b) En milieu anthropisé

FIGURE 2.3 – Cycles de vie des poissons. © Ecocean

2.3.2 Fonction physique

2.3.2.1 Objectif de protection côtière

Certains récifs peuvent intégrer un objectif de protection côtière. Les RAs, au-delà de leur fonction écologique, sont capables d'atténuer l'effet de la houle s'ils sont bien localisés et qu'ils réunissent certaines conditions de conception. La porosité, l'orientation, le dimensionnement, les matériaux, la limitation de l'affouillement doivent être optimisés pour ainsi ralentir l'érosion tout en favorisant le développement d'un écosystème riche et diversifié au sein de la structure. La fondation Reef Ball, créée en 1993 en Géorgie, développe des RA capables de remplir des fonctions à la fois écologiques et de protection côtières. Il s'agit de "boules de récif", faites de gravats ou de béton, immergés afin d'aider à engraisser les plages en érosion. Plus de 60 pays ont déjà testé le procédé. Aussi, les récifs sont conçus pour pouvoir servir d'abri pour la faune et permettre aux algues de s'y fixer (Kim, 2018).

(a) Fonction d'habitat des Reef Balls à Bali. © Matthew Oldfield, 2009

(b) Fonction de protection côtière des Reef Balls à Long Island. Source : Island Free Press

FIGURE 2.4 – Différentes utilisations des Reef Balls.

2.3.3 Fonctions RPC

Les récifs artificiels ont récemment trouvé un nouvel objectif : l'aspect RPC. Comme on le sait, le littoral, mais aussi la mer sont des espaces très attractifs et à grande vocation touristique et donc économique. Depuis quelques années, les sports nautiques se développent énormément, et plus particulièrement les sports de plongée (Şensurat et al., 2017). Pour profiter un maximum de l'activité, plusieurs conditions doivent être réunies pour pratiquer : avoir une dynamique de fond stable, une bonne visibilité, une sécurité globale, mais aussi et surtout une bonne richesse spécifique du milieu de pratique. Pour ces dernières conditions, les récifs, artificiels ou non, selon la configuration initiale du site (à savoir forte artificialisation ou naturalité évidente) peuvent être une bonne option. C'est alors que les formes récifales ne sont plus seulement conçues pour les espèces marines, mais aussi pour les humains.

2.3.4 Les types de récifs et les récifs multi-objectifs

Toutes les fonctions définies auparavant (c.f partie 2.3) pouvant être remplies par les RAs permettent la définition de différents types de récifs. Un récif remplissant une seule de ces fonctions peut être défini par celle-ci, par exemple, un récif avec un objectif premier de production définit un récif remplissant la fonction biologique pour le maintien de la pêche, tandis qu'un RA de protection permet de lutter contre le chalutage illégal (c.f partie 2.3.1.1).

Mais en majorité, les projets d'immersions regroupent la plupart du temps plusieurs de ses fonctions, ils correspondent alors à un projet "multi-objectifs". Celui-ci nécessite un plan de gestion précis et l'optimisation des récifs pour chacun des usages.

2.3.5 Positionnement, placement et notion de connectivité

Il est important de considérer l'emplacement des récifs artificiels. La plupart des solutions sont posées sur fond meuble, changeant radicalement la biodiversité locale (la flore et la faune fixées comme pour la faune mobile : principalement, crustacés et poissons) en apportant un substrat dur et complexe. Ceci ne peut donc pas être considéré comme de la restauration écologique lorsque installé sur ce genre de fond, mais plutôt de la réhabilitation par création d'habitats.

Un argument valable tiens à positionner les RAs sur des mattes mortes d'herbier de posidonie dans le but de restaurer l'écosystème antérieur. Il est donc important d'éviter l'isolement des aménagements et leur proximité avec un habitat naturel d'espèces similaires (roches, herbiers...) pour maintenir une connectivité.

Cette dernière notion n'est pas facile à définir, car l'aire d'influence d'un récif artificiel et la distance optimale entre les récifs sont deux notions sur lesquelles on manque encore de connaissances précises (Cépralmar, 2015). Le développement de corridors écologiques [1] est donc mis en place, ceci consiste à laisser de faibles distances (entre 20 et 50 mètres) entre les récifs permettant d'accompagner le stade de vie des poissons de la côte vers le large. Le projet Recolag permet par exemple d'améliorer la connectivité entre mer et lagune.

2.3.5.1 Profondeur d'aménagement

Le choix de la profondeur d'immersion dépend du contexte environnemental, de l'objectif visé par le projet, des modules utilisés et des espèces ciblées (Cépralmar, 2015). Sur 8 projets en Languedoc-Roussillon, tous sont installés entre 15 et 30 mètres de profondeur, avec une profondeur moyenne de 20 mètres (Cépralmar, 2015). En Languedoc-Roussillon, entre 0 et 20 m, les modules présentent des détériorations plus importantes qu'entre 20 et 40 m. En effet, l'impact sur le transport sédimentaire de la houle devient négligeable aux alentours des 20 m (Latteux, 2008). Cette contrainte peut toutefois être contournée en adaptant le poids et la forme des modules selon la nature du fond. Une immersion trop profonde impacterait tous les objectifs des récifs artificiels cités auparavant (c.f partie 2.3).

2.4 Forme des récifs et caractéristiques techniques

2.4.1 Architecture et géométrie des modules

Il est important de considérer l'architecture par module unitaire. Un récif artificiel pouvant être composé de plusieurs types de modules différents (exemple panier acier, c.f Charbonnel et al. (2010), c.f partie 2.1) : toute une palette de complexités architecturales peut en découler en fonction des objectifs recherchés (Cépralmar, 2015).

La bioréceptivité physique primaire d'un matériau, et son influence sur la colonisation du biofilm et de la méiofaune, va affecter la bioréceptivité secondaire en ayant un impact sur l'évolution des communautés successives (Guillitte, 1995). De nombreux papiers documente cette colonisation biologique des matériaux de construction, il est généralement admis que la rugosité et la porosité de surface sont des facteurs clés de la colonisation biologique (Deruelle, 1991 ; Miller et al., 2006, 2009 ; D'Orazio et al., 2014), et en particulier pour les petits organismes (Strain et al., 2018).

2.4.1.1 Rugosité

La rugosité représente une caractéristique importante de définition d'un matériau, elle peut être définie comme étant le rapport du périmètre développé - A'B' - (par un changement de hauteur, une forme, un amas de modules), divisé par la distance projetée - AB-. Un indice de 1 indique une rugosité nulle. Plus l'indice est élevé, plus l'objet est rugueux. Ce rapport, supérieur à 1, est censé représenter cette rugosité, qui s'appréhende à l'échelle paysagère (métrique) et qui intervient pour caractériser une architecture, une dimension de complexification à l'échelle d'un grand module ou d'un complexe récifal dans son ensemble (Cépralmar, 2015).

1. Les corridors écologiques assurent des connexions entre des réservoirs de biodiversité, offrant aux espèces des conditions favorables à leur déplacement et à l'accomplissement de leur cycle de vie.

FIGURE 2.5 – Méthode de mesure de la rugosité. © Cepralmar / Région Languedoc-Roussillon

Rugosité de surface

La rugosité de surface peut également être considérée lors de la création d'un module récifal. Elle représente la rugosité petite échelle, les irrégularités d'une surface (< millimétrique), c'est un élément important favorisant la phase de colonisation par les organismes sessiles (Kerr and Cowling, 2003).

2.4.1.2 Porosité

La porosité est la proportion de vides par rapport à la surface d'enveloppe (externe) d'un récif artificiel, elle peut être uniforme ou non sur l'ensemble de la surface d'un support.

L'augmentation de la porosité d'un matériau peut favoriser le dépôt et l'accumulation de particules organiques et inorganiques, en plus de favoriser la bioréceptivité extrinsèque (Guillitte, 1995). Le dépôt de spores et l'utilisation des espaces interstitiels comme habitat pour les taxons du biofilm sont appelés bioréceptivité intrinsèque (Guillitte, 1995). Pour améliorer la colonisation des organismes de petite-échelle, il est nécessaire de contrôler la micro-porosité du RA.

2.4.1.3 Hétérogénéité/compléxité

Cette notion peut-être définie comme la combinaison de cette porosité et de cette rugosité multi-échelle. Plus les modules d'un même récif unitaire sont hétérogènes et plus la biodiversité est importante (Lacroix and Simard, 2010 ; Tessier, 2013). La disposition des modules doit permettre une diversité d'habitats considérable, pour les différentes espèces, mais également les différents stades du cycle de vie, elle peut être réalisée avant immersion et ordonnée ou immergée de façon déstructurée pour produire des abris variés et un maximum de discontinuité de formes. Cette dernière option est privilégiée, les amas chaotiques, ensemble de buses, de dalots, de dalles en béton, de poutres de parpaings et de blocs de roches en sont un exemple (Tessier, 2013).

2.4.1.4 Elévation

La hauteur maximale de la structure permet, si elle est étudiée, une prise en compte des espèces de toute la colonne d'eau, et de s'affranchir de l'impact de la thermocline[2] en favorisant les espèces pélagiques vivant entre la surface et le fond. (Cépralmar, 2015)

2.4.1.5 Esthétique

Cette dimension est importante dans le cas de projets de récifs récréatifs/pédagogiques (c.f partie 2.3.3). Cet aspect esthétique est purement imaginé par les architectes ou concepteurs pour une gamme de public visé.

2.4.2 Volume

Il est important de connaître le volume des RAs pour dimensionner les ouvrages et déterminer les paramètres biologiques et écologiques propres influençant les densités et peuplement halieutiques au m^3. Ceci permet de comparer de façon fidèle et fiable les récifs entre eux et un même récif au cours du temps (Cépralmar, 2015). Tessier décline le volume immergé en trois déclinaisons :

— Volume théorique : Volume constitué par l'addition des volumes des éléments et modules constitutifs du récif artificiel, chaque volume étant défini par l'enveloppe externe de ceux-ci. C'est ce volume

2. Zone de transition entre deux masses d'eau de températures différentes et se mélangeant difficilement, elle sépare les eaux de surface des couches de fond.

qui, en pratique, est le plus souvent utilisé par les biologistes lorsqu'ils ramènent les abondances de poissons au m^3. En outre, il correspond aussi au prix réel du récif et intègre une dimension économique (Cépralmar, 2015 ; Tessier, 2013).

— Volume réel : volume constitué par l'enveloppe externe du récif artificiel. Cette dimension réelle tient donc compte de l'interpénétration des éléments et modules constitutifs des récifs artificiels, des volumes générés entre ces constituants par l'assemblage final, mais également par la perte de volume résultant de l'ensouillement des structures (tassement, enfouissement par hydrodynamisme) (Cépralmar, 2015 ; Tessier, 2013).

— Volume utile : Volume réel des récifs artificiels auquel s'ajoute les volumes inter-récifs qui sont utilisés par les espèces résidentes temporaires ou permanentes. Il correspond à la zone du récif étendue à 5 mètres autour de la structure selon Charbonnel.
Si les récifs artificiels sont organisés en complexes suffisamment denses, le volume utile sera alors étendu au complexe en entier pour définir une zone récifale homogène.

2.4.3 Poids unitaire

Le poids des modules ou des récifs artificiels eux-mêmes constitue une donnée fondamentale pour les moyens d'exécution des projets. Il détermine les équipements de levage et de transport des sites de fabrication jusqu'à la zone d'immersion (Cépralmar, 2015).

2.4.4 Surface d'emprise au sol

La surface d'emprise au sol d'un récif unitaire (exprimée en m^2) représente la somme de la surface en contact avec le sol de chaque module unitaire.

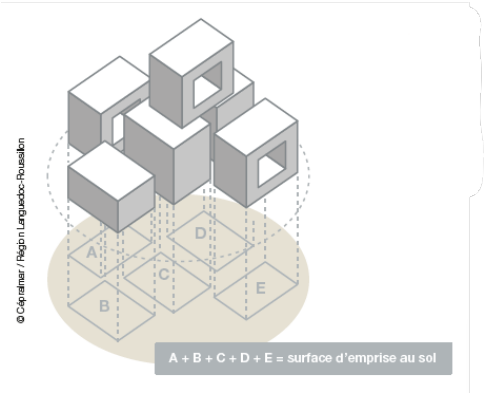


FIGURE 2.6 – Schéma d'explication de la surface d'emprise au sol. © Cepralmar / Région Languedoc-Roussillon

2.5 Les matériaux utilisés

2.5.1 Roche naturelle

Les enrochements sont très utilisés sur le littoral méditerranéen, notamment pour la réalisation d'ouvrages de protections de type digue, épi ou brise-lame. Le caractère naturel de ce matériau et la connaissance du taux de colonisation due à la création d'habitats par agencement pousse certains projets à l'utilisation de blocs de roche. Cependant, due à leur faible ratio volume/cavité les rendant moins efficaces, à leurs possibilités architecturales limitées et à la manipulation peu aisée (Cépralmar, 2015), ils sont souvent utilisés comme liaison fonctionnelle entre les récifs (c.f 2.3.5) : comme pour les récifs du Prado

à Marseille avec l'utilisation de roches de carrières (modules "rocky boulders", c.f figure **??**, Charbonnel et al.). Le retour d'expérience positif, la très bonne intégration paysagère et la durabilité du matériau en font donc un matériel encore utilisé et utilisable à l'avenir.

2.5.2 Polymères

Les polymères désignent les plastiques, caoutchouc, polyesters, PolyEthylène Haute Densité (PEHD), polypropylène, etc. Certains ont été utilisés dans le passé : l'amas de pneus maintenant retirés décris dans l'historique (c.f partie 2.2), et le sont toujours actuellement, mais les matériaux plus étudiés, comme avec le projet ReFISH porté par Suez Consulting utilisant un bioplastique d'origine végétale non alimentaire. Néanmoins, des recherches sont toujours en cours quant au relargage de macro-plastique de la part de certaines de ces solutions. Très utiles pour obtenir des structures en élévation grâce à la souplesse et à la légèreté du matériau, ils peuvent également être utilisés pour complexifier une structure (Cépralmar, 2015). Matériaux nouveaux utilisés pour les structures simples de sentier pédagogique, ils peuvent reproduire des végétaux et être utilisés comme filières hautes (Cépralmar, 2015). Néanmoins, son coût porte parfois à préjudice quand le matériau est biosourcée.

2.5.3 Bois

Le bois est un matériau naturel et renouvelable. Utilisé traditionnellement en Asie et en Afrique, il a un aspect paysager et ornemental valorisable (Cépralmar, 2015).

2.5.3.1 Naturel

Un des grands défauts du bois naturel viens de sa tenue limitée dans le temps, très putrescible. En effet, Charles et al. ont montrés que le bois perd en moyenne 0,38% de sa masse par jour au contact d'eau de mer. C'est tout de même un matériau valorisé pour les structures saisonnières et pour l'expérimentation continue. Peu adéquat en France, aucune référence n'est cité quant à son utilisation.

2.5.3.2 Transformé

Les montages avec pièces de charpentes permettent une plus grande plasticité architecturale, mais les essences utilisées peuvent avoir un impact environnemental conséquent. Ils ne sont pas pour autant imputrescible et leur durée dans le temps est limitée. Leur faible résistance mécanique aux aléas hydroclimatiques fait que peu de projets en Méditerranée s'équipe de ce genre de solution, malgré un fort potentiel : ils sont utilisés et toujours en place pour des récifs situés dans la réserve de Couronne (Parc Marin de la Côte Bleue) après 10 ans d'immersion.

2.5.4 Métal (acier)

Les structures en métal sont très utilisées aux USA pour le recyclage des structures type navire, avion, etc. L'Espagne ou Malte contourne la convention de Barcelone en considérant qu'un navire dépollué et reconditionné n'y relève pas. La France est toujours en discussion, Ico Solution souhaite à l'avenir éditer un guide juridique relatif aux enjeux liés à l'immersion de navires et lancer une étude de caractérisation de la vie marine liée aux épaves, ce serait le début d'une immersion de grande quantité de métal. Actuellement, la plasticité et modularité de ce matériau permet son utilisation comme support de grandes structures, par exemple, une armature métallique est utilisée pour le plus gros RA type "metal basket" de la baie du Prado (Charbonnel et al., 2010).

2.5.5 Béton

Le béton, matériau composite à base minérale, est le matériau le plus employé en France avec l'utilisation de structures préfabriquées et de moulage spéciaux. Sa solidité et sa durabilité élevée permettent de compenser les soucis de manipulation. L'inconvénient actuel est l'empreinte carbone élevée, la contribution à l'épuisement de certaines ressources telles que le sable et les granulats, et le pH.

2.5.5.1 Classique et haute-performance

Les bétons dis "classiques" sont les agglomérats sable, les graviers et les ciments. Ils permettent une formulation contrôlée du béton, qui a fortement évoluée ces dernières années, notamment avec l'apparition des structures imprimées en 3D et du béton fibré.

L'encrassement biologique (*en. biofouling*) dépend des caractéristiques physico-chimiques des matériaux (Ryley et al., 2021). Les recherches de composition chimique pour créer un béton marinisée écoconçu sont en cours, couplée à des recherches sur la modification des caractéristiques intrinsèques d'un béton : sa porosité superficielle, sa micro-porosité et sa rugosité.

Les bétons haute-performance, voir ultra-haute-performance ont permis l'évolution de la filière et la construction de nombreux RAs. En comparant des formulations CEM III (ciment laitier de haut-fourneau) fabriquées à partir de matériaux écologiques ou recyclés, notamment du sable de coquillage, sable de verre et des formulations comprenant des géopolymères comme liant, Ly et al. a montré que le CEM III possédait la meilleure biocolonisation initiale et qu'en moyenne, c'est la formulation avec la meilleure résistance mécanique au fil du temps. L'utilisation de ce type de béton est courante en mer méditerranée Française, la micro-porosité peut maintenant être contrôlée, le nombre de cavités crée et la rugosité également.

Pour réduire l'impact environnemental de ce genre de béton, les coquilles sont privilégiées (Richardson and Fuller, 2013 ; Ly et al., 2021 ; Nguyen et al., 2017 ; Varhen et al., 2017 ; Eziefula et al., 2018 ; Dahiru et al., 2018 ; Ruslan et al., 2021 ; Uddin et al., 2021 ; Han et al., 2022), différentes études ont démontré qu'une introduction d'agrégats de coquillages dans la composition du béton favorise leur bio-réceptivité en fournissant un meilleur substrat pour les organismes marins (Hanlon et al., 2018 ; Dennis et al., 2018). Cependant, pour maintenir une mécanique suffisamment forte, les coquillages ne peuvent remplacer plus de 20% des granulats fins du béton pour ne pas réduire excessivement ses propriétés mécaniques (Eziefula et al., 2018 ; El Biriane and Barbachi, 2021). Ce taux peut atteindre 50% comme agrégat grossier partiel pour donner un béton de poids normal (Eziefula et al., 2018). Un polymère vient donc lier le mortier aux coquilles.

Il est donc nécessaire de maintenir cet effort de recherche pour créer des mortiers et des bétons plus respectueux de l'environnement en utilisant de nouveaux matériaux tout en améliorant leur bio-réceptivité (Guillitte and Dreesen, 1995).

FIGURE 2.7 – L'assemblage de structure en béton réalisée par impression 3D permet dorénavant de réaliser des structures complexes et de grande envergure, ce récif construit dans le cadre du projet Récif'Lab par SeaBoost le démontre. © Aire Marine Protégée de la Côte Agathoise, © Service communication ville d'Agde /Yacine Sersar.

2.5.5.2 Manufacturé

Le béton manufacturé désigne les parpaings, hourdis, blocs à bancher et briques, utilisées comme élément de maçonnerie moulé et produits en grande quantité pour l'industrie du BTP. Ce type de structures sont souvent couplées à d'autres matériaux, utilisé comme remplissage interne d'armatures béton ou acier, ou comme micro-habitat complémentaire à des structures dû à leur faible coût.

Une référence dans l'utilisation de ce genre d'outils est l'expérience de complexification du récif Bonna à Golfe Juan. Face à la faible efficacité d'un RA de grand volume (160 m^3) inspiré d'un modèle japonais, l'ajout de 37 m3 de petits éléments (parpaings, hourdis, briques, etc.) a permis la création d'une multitude d'abris de taille variée et un réseau complexe de cavités. Ceci a permis une amélioration considérable des capacités du récif, Pascaline et al. (2011) ont prouvé que le nombre total d'espèces de poissons a été multiplié par 2, le nombre moyen d'espèces par 3, les densités par 22 et les biomasses par 90. De plus, les espèces d'intérêt commercial (sars, daurade, pageot) contribuent à 38 % des densités, contre 8 % sur le module initial non modifié.

2.5.6 Terre cuite

La terre cuite est un matériau composite à base minérale, les produits manufacturés de taille réduite sont utilisés comme complément/complexification de structure existante (Cépralmar, 2015), comme les "pots à poulpe" dans les récifs du prado (Arnal et al., 2006) ou les amphores du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines (DRASSM) ré-immergées au large du Frioul (Marseille). Les possibilités architecturales de ce matériau sont complexes et sa résistance mécanique est faible (Cépralmar, 2015).

Néanmoins, à l'international, à Hong-Kong, des "carreaux de récifs" sont créés en terre cuite à l'aide d'une imprimante 3D pour bouturer des coraux.

(a) Amphores du Frioul. © F. Launette

(b) fig :des carreaux de terre cuite imprimés en 3D sont utilisés pour créer des récifs artificiels. © Vriko YU

FIGURE 2.8 – Différent type d'utilisation de terre cuite.

2.5.6.1 Céramique technique

La céramique est composée de matériau naturel et renouvelable, celle dite technique est une céramique dont les caractéristiques sont modifiées pour une application industrielle donnée. Par exemple, l'utilisation de céramique d'alumine pour le bouturage de coraux étudié à l'aquarium de Limoges présente des résultats positifs.

La porosité peut être créée de manière sélective par le choix des matières premières, du procédé de

fabrication et, si nécessaire, des additifs. Ainsi, il est possible de fermer et d'ouvrir des pores de différentes tailles allant de quelques mm à quelques µm (Holst, 2022).

L'impression 3D permet l'impression de céramiques, elles possèdent des propriétés mécaniques et des géométries haute définition qui n'auraient pas pu être exploitées avec les techniques traditionnelles (3DNatives, 2019). Cette diversification des possibilités d'encre d'impression nécessite encore des études techniques et comparatives entre différents matériaux (3DNatives, 2019), mais pourrait se populariser au futur.

Ce type de matériau n'est pas référencé comme déjà utilisé en Méditerranée.

2.5.7 Cordage

Utilisés comme éléments de garnissage de récifs et comme filières hautes. Les cordages sont issus de matière végétale, leur caractère naturel entraîne une durabilité moindre, mais est très attractif pour les espèces pélagiques. Des structures tridimensionnelles peuvent être facilement réalisable et la flottabilité permet une occupation de la colonne d'eau conséquente. Conséquemment utilisés en Méditerranée Française, comme avec des cordages en fibre de coco reproduisant des Roselières sur le projet Girel (Lapinski et al., 2014).

2.6 Les projets sur le littoral méditerranéen Français

Tessier (2013) a permis la classification des sites de récifs artificiels déployés en France (Métropolitaine et Outre-Mer). En 2015, avec 50.060 m^3 de volume de RAs déployés en PACA, 37.575 en Languedoc-Roussillon et 250 en Corse, la méditerranée compte au total 87.885 m^3 de RAs (c.f annexe 1 ; Tessier (2013) ; Tessier et al. (2015). Des suivis scientifiques sont obligatoires pour évaluer les impacts positifs ou négatifs de ces installations. Car il y a eu des échecs : récifs recouverts de sédiments, usés, déplacés, détruits ; autant de retours d'expérience qui ont apporté des connaissances pour mieux adapter les récifs artificiels au milieu naturel.

Chapitre 3

Étude de cas

3.1 Analyse bibliographique

L'état de l'art défini précédemment constitue une synthèse de nombreux éléments nécessaires à l'analyse de l'efficacité écologique des récifs.

3.2 Projets étudiés

3.2.1 Récifs Prado

3.2.1.1 Présentation et critères de déploiement

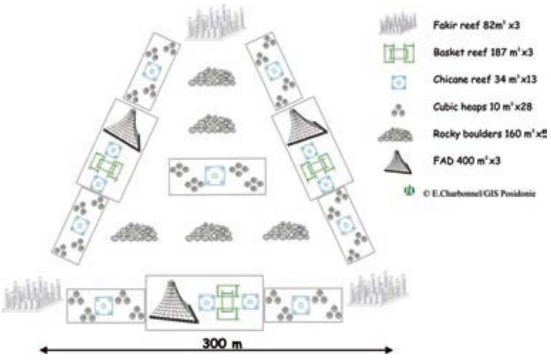
Avec le déploiement de 27.300 m^3 de RAs et un budget de 6 millions d'euros, le projet "Récifs PRADO" est le plus grand site de RAs en Europe. Installées au cœur de la baie du Prado, au large de Marseille, ce programme de grande envergure est consacré à la restauration d'une zone ou les herbiers de posidonies, habitats très productifs, ont été détruits. Pour favoriser la diversité des espèces, trois grands critères de déploiement (Le Diréach et al., 2015) :

— Diversification du type de structure (forme, taille et matériaux de construction, en y ajoutant de la complexité avec l'apport de matériaux biogéniques)
— Le regroupement et la disposition spatiale des modules
— La création de corridors biologiques des habitats naturels vers les RAs et entre les RAs.

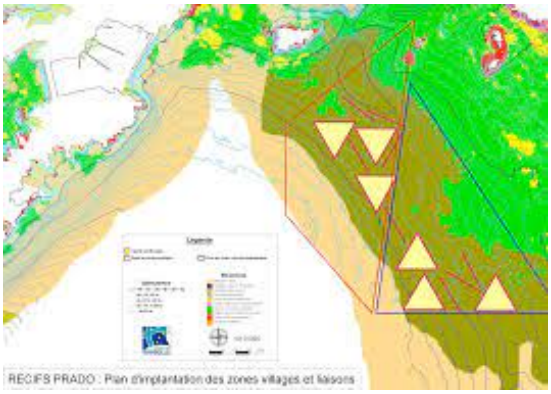
Six types de récifs artificiels sont répartis en six villages (c.f figure 3.1). Tous les récifs contiennent une partie en béton, certains sont couplés avec une armature en métal ou des filières. La diversité d'habitats a été densifié par des pots à poules, des regroupements d'huîtres et des parpaings. Pour plus de précision sur chacun de ces récifs, se référer

3.2.1.2 Suivi

Le suivi des poissons a commencé un an après l'installation des AR. Le recensement visuel sous-marin consistait en un comptage "total" des poissons (sans compter les petites espèces cryptiques) sur les mêmes 6 réplicats par type de récifs. Le nombre de poissons a été enregistré et la taille individuelle des poissons a été estimée à 2 cm près. Pendant 22 saisons consécutives, les 6 types de RA ont été suivis, 6 comptages ont été effectués par RA en béton et 12 transects (20 m x 5 m) sur les enrochements, soit un total de 921 réplicats.



(a) Plan d'aménagement d'un village et arrangement spatial entre les six types de modules du Prado.



(b) Emplacements géographiques des villages

FIGURE 3.1 – Village type et emplacement géographique des villages du Prado. Source : (Charbonnel et al., 2010)

3.2.1.3 Résultats

Le Diréach et al. (2015) ont permis de mettre en évidence que les différents modules sont occupés par des communautés de poissons variant selon les saisons, et ne présentant pas les mêmes schémas d'évolution de colonisation. La composition spécifique, la densité et la biomasse différaient significativement entre les types de récifs et présentaient une forte variabilité temporelle. L'influence de la taille, de la conception des structures, des matériaux et du volume des matériaux de remplissage différait selon le type de récif, mais les espèces cibles de la pêche augmentaient globalement en densité et/ou en taille moyenne. En effet, les sparidés ont totalisé 44% de la biomasse totale, quand les labridés était dominant en termes de densité au sein de la population de poisson des RAs (plus de 50% des espèces dénombrées ;Le Diréach et al. (2015)). Concernant les espèces benthiques, sédentaires et cryptique, l'augmentation est considérable durant ces 5 années, bénéficiant de la protection et des effets habitats des RAs (Le Diréach et al., 2015), l'abondance des Scorpaenidés dépendant de la complexité et de la taille des récifs.

Le tableau en annexe (c.f tab. 2) présente ces différents types de récifs et les résultats d'efficacité écologique de chacun d'eux. Malheureusement, toutes les structures contiennent du béton, empêchant de comparer les résultats en terme d'efficacité de matériaux. On peut tout de même remarquer que logiquement, la richesse spécifique augmente en fonction de la taille et de la complexité des RAs. Le Diréach et al. (2015) ont montré que les populations de poissons présents sur les plus gros récifs subissait le moins les variations saisonnières de températures. Les récifs de plus petit volume présente un meilleur rapport abondance/volume, sauf pour le récif composé de filières hautes de cordes.

3.2.2 Récifs Girel

Le projet GIREL est porté sur les infrastructures industrialo-portuaire du Grand Port Maritime de Marseille (GPMM), il a pour but de restaurer les fonctionnalités écologiques de nurserie par déploiement d'habitats artificiels. Ces grandes constructions anthropiques empêchent les juvéniles de s'installer en proposant un substrat lisse bloquant la bio-colonisation. L'étude de ce programme est intéressante par sa diversité de projets pilotes, comprenant différentes techniques de RE, dont les projets Ecorécif (Egis Eau) installés en 2014 et ®BioHut (®Ecocean) installés en 2011.

3.2.2.1 Suivi

Le suivi scientifique par comptage visuel en comparaison de sites non équipés de référence a été confié au GIS Posidonie pour Ecorecif, et au CEFREM pour les BioHut, EGIS a réalisé un suivi vidéo par caméras fixées. Ces derniers avaient pour objectif d'évaluer l'efficacité des nurseries portuaires.

3.2.2.2 Résultats

Le suivi sur Eco-Récifs montre que les digues en enrochements ont une capacité intrinsèque à accueillir des juvéniles mais qui peut être améliorée par l'apport d'Oursins biomimétiques (Lapinsky and Perrot). Certaines espèces sont plus sensibles à l'apport de micro-habitats (labres, sparaillon) tandis que d'autres y sont rapidement indifférents en grandissant (saupe, oblade, sar commun) (Lapinsky and Perrot). Les nurseries font également office de nurserie se colonisant au fur et à mesure du temps.

TABLE 3.1 – Tableau comparant les différentes structures de récifs artificiels installées dans le cadre du projet Girel

Nom structure	Matériaux	Fonctionnalités	Description	Durée de vie	Nombre de modules	Suivis (abondance de vie ref/sol)	Nombre d'espèces observées
Roselière	Fibre de coco	Micro-habitats pour juvéniles	Solution biomimétique des écosystèmes d'herbiers et d'algues installées sur les quais	5 ans	12 stations expérimentales de Roselières pour un total de 460 ml	x8 à x17	32
Oursin	Polypropylène "conchylicole"	Habitat et nurserie pour les juvéniles	Solution biomimétique de l'oursin diadème installé sur des digues à gros blocs rocheux	10 ans	12 stations expérimentales d'Oursins pour un total 240 unités	x3 à x4	
BioHut	Metal, coquilles d'huîtres	Habitat nouvelles recrues et juvéniles	Armature en métal avec une moitié remplie de coquille d'huîtres et une autre vide	5 ans	12 Biohut, 3 par quais	x4 en moyenne, x30 meilleures zones testées	16

Mercader et al. (2017) ont identifié une densité totale de juvénile (le stade de vie ciblé par les récifs) plus élevé sur les quais équipés de ®BioHut que sur les quais pour deux des trois zones (x5.5 et x 3.6 individus/10m linéaires). Il est nécessaire que les structures installées dans les grands ports soient compatibles avec une activité industrialo-portuaire conséquente. Un avantage des récifs Roselières et Oursin est leur meilleure adaptabilité, quand les BioHut peuvent être endommagés par les bateaux de grandes tailles (Lecaillon et al., 2015).

Cette expérience de complexification porte donc ses fruits et des matériaux plus efficaces que d'autres ont été identifiés (les roselières en corde de coco sont plus productives). Le caractère non naturel du récif oursin en polymères affecte l'efficacité du récif. Ceci montre que la biomasse est sensible aux matériaux nobles et naturels. Des limites quant à cette comparaison entre structures sont identifiables, il aurait été plus intéressant qu'une même structure effectue le suivi, pour que les protocoles soient strictement identiques.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Type de matériaux préconisés

4.1.1 Évolution chronologique du type de matériaux

En Méditerranée Française, c'est le béton qui reste privilégié dans la conception des récifs artificiels (c.f fig. 4.1). Utilisé depuis toujours et sous différente forme, le béton dis classique (agglomérats sables, graviers et ciments) est présent sur plus de 80% des projets ayant eu lieu sur la côte méditerranéenne entre 1968 et 2021.

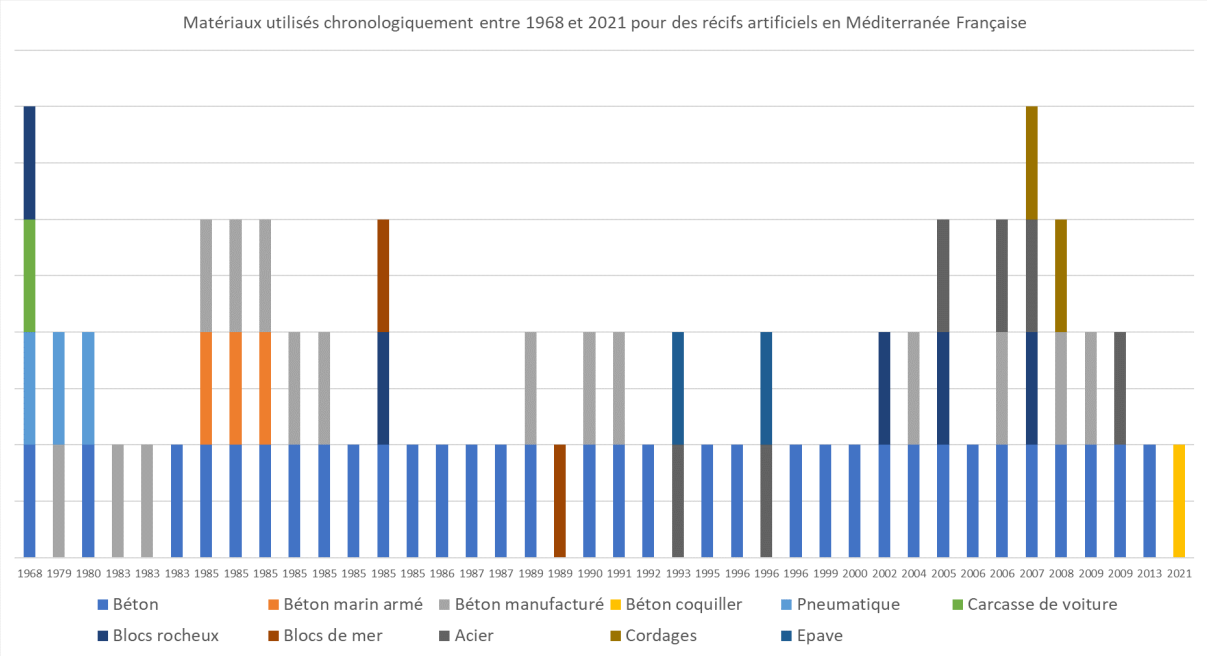


FIGURE 4.1 – Graphique : Évolution chronologique du type de matériaux utilisés pour les récifs artificiels en mer Méditerranée Française. Données issue de Tessier et al. (2015, ?)

En comparant l'effet de quatre substrats (béton, contreplaqué, fibre de verre et aluminium) Anderson and Underwood (1994) ont montré que le béton par son caractère minéral laisse des signaux chimio-attractifs qui encouragent la colonisation de certaines espèces marines. Mais d'autres matériaux peuvent être utilisés et certains assemblages réalisés. Comme avec les récifs artificiels de type "paniers aciers" du

Prado à Marseille, comprenant des modules en béton pour remplir la structure et permettre l'habitat des espèces benthiques, des cordes pour attirer et abriter les espèces pélagiques et de l'acier pour maintenir en forme les modules.

Actuellement, pour qu'un récif prenne en compte toutes les espèces de la colonne d'eau (c.f partie 2.4.1.4), les filières de cordages ou de polymères flottants sont privilégiés face à des tentatives d'élévation de structures en béton couteuses et limités techniquement.

4.1.2 Comparaison des matériaux

Le module de Young permet de connaître la capacité de résistance du matériau en identifiant son seuil de rupture ou de compression, plus il est élevé, plus le matériau est rigide et en capacité de résister aux aléas hydrodynamiques. C'est à partir de données de comportement mécanique des matériaux que les différents matériaux pouvant composer un RA ont été comparés (Simulation-Matériaux, 2018).

La notion d'impact environnemental concerne l'empreinte carbone et le relargage chimique. La notion de hauteur maximale étudie la stabilité du matériau en fonction de la hauteur. La section pose/retrait concerne la facilité de manipulation d'un récif composé de tel ou tel matériau. Le coût au m^3 représenté le coût de production d'un tel récif. Le critère de retour d'expérience concerne l'étude des suivis sur ce genre de matériaux et les retours positifs en mer méditerranée.

TABLE 4.1 – Tableau de classification des matériaux utilisés pour la conception de récifs artificiels.

Type de matériau		Durabilité	Impact environnemental	Intégration paysagère	Ratio volume/cavité	Retour d'expérience	Possibilités architecturales	Résistance mécanique	Hauteur max	Pose/Retrait	Potentiel culturel/éducatif/récréatif	Coût au m3	Indice d'éfficacité
Roche naturelle		Elevée	Moyen	Très élevée	Faible	Positifs	Faibles	Très élevée	Faible	Difficile	Faible	€€	11
Bois	naturel	Faible (putrescible, tenue très limitée dans le temps)	Faible (matériau naturel et renouvelable)	Elevée	Moyen	(-)	Faibles	Faible	Elevée	Facile	Elevé	€	13
	transformé	Faible (putrescible, tenue très limitée dans le temps)	Faible (matériau naturel et renouvelable) à Moyen (selon les essences)	Moyenne	Moyen	(-)	Elevées	Faible	Elevée	Facile	Elevé	€€	12
Metal (acier)		Moyenne (oxydation)	Elevé	Faible	Moyen	Mitigés	Elevées	Elevée	Elevée	Difficile	Faible	€	9
Bétons	Classiques (agglomérats sables, graviers et ciments)	Elevée	Moyen (matériau composite à base minérale)	Elevée	Elevé à très élevé	Positifs	Très élevées	Très élevée	Elevée	Difficile	Elevé	€€	20
	Manufacturés (parpaings, hourdis, blocs à bancher)				Elevé		Elevées	Très élevée			Elevé	€€	18
Terre cuite		Elevée	Moyen (matériau composite à base minérale)	Elevée	Faible	(-)	Faibles	Faible	Faible	Facile	Très Elevé	€	12
Céramique technique		Elevée	Moyen	Elevée	Elevé	(-)	Elevées	Elevée	Elevée	Facile	Elevé	€€	17
Polymères		Elevée	Elevé	Moyenne	Faible	(-)	Elevées	Elevée	Elevée	Facile	Faible	€€	11
Cordages (coco, chanvre...)		Faible	Faible	Elevée	Moyen	Mitigés	Faibles	Faible	Très elevée	Facile	Elevé	€	15

Chapitre 5

Conclusion et discussion

5.1 Les caractéristiques architecturales à adopter

5.1.1 L'apport des retours d'expérience

Les retours d'expériences sont une composante essentielle à l'évolution de la RE (c.f partie 2.6). Or la multiplication des publications et le manque de protocole clair affecte la comparaison d'efficacité entre les structures vis-à-vis des objectifs visés.

5.1.1.1 Le Prado

Les principaux critères décris auparavant (volumes différents, ajout de complexité et disposition des récifs ; c.f partie 3.2.1.1) peuvent expliquer le succès de ce déploiement de RAs (Le Diréach et al., 2015). Cela signifie que pour augmenter l'efficacité écologique d'un récif, il faut optimiser l'effet refuge pour une grande variété d'espèces de poissons. Il faut donc réfléchir lors de la construction d'un village de récif à coupler différentes formes, les petits RAs possède une meilleure densité de biomasse et conviennent par exemple davantage aux espèces démersales qu'aux espèces benthiques, tandis que les grands permettront l'apparition d'une plus grande diversité d'espèces.

5.1.1.2 Girel

Il est clair que les petits habitats artificiels constituent donc des outils d'ingénierie écologique prometteurs pour améliorer la fonction de nurserie à l'intérieur des ports et donc de réduire l'empreinte écologique de ces infrastructures (Mercader et al., 2017). L'expérience a montré que les filières en végétaux naturels sont les plus attractives dans une zone portuaire, elle permet également de valider le fonctionnement des ®BioHut. Les projets pilotes sont importants, ils permettent d'identifier réellement les limites d'une solution décrite comme viable et de faire avancer la recherche.

5.2 Discussion

Cette étude montre qu'il est complexe de définir l'efficacité écologique d'un récif durant sa conception. Il est maintenant plus que nécessaire de définir des méthodes cadrées et réplicables tant dans la conception pour optimiser les fonctions biologiques, physiques ou Récréatives Pédagogiques et Culturelles (RPC) que dans le suivi pour acquérir davantage de données et affiner l'efficacité écologique des paramètres de forme et de matériau.

Actuellement, le béton est privilégié, car ses caractéristiques morphologiques et de composition peuvent être facilement modifiables, il permet une colonisation conséquente par sa composition minérale se rapprochant des systèmes rocheux, et sa porosité et sa rugosité sont contrôlées. Mais sa conception a un impact sur l'environnement, à la fois par sa composition, exploitant des ressources naturelles non renouvelables, et par son empreinte carbone.

La dynamique d'évolution de l'impression 3D pourrait permettre de faire des formes de plus en plus complexes et se rapprochant de récifs naturels. Il est tout de même probablement utopique de vouloir créer un récif répondant à tous les besoins actuels, car la réussite d'une installation dépend des objectifs fixés, l'exemple du Prado à montrer qu'une bonne planification permet d'y répondre.

Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts, de réaliser des études comparatives multi-critères (bio-colonisation, résistance mécanique...), et de développer des plateformes d'information sur les RAs et leurs suivis.

Mais avec plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés de récifs déjà détruits dans le monde au cours des 50 dernières années (Carpenter et al., 2008 ; Hoegh-Guldberg et al., 2007), il est surtout important de préciser que la meilleure solution est la non-dégradation de l'environnement naturel.

Bibliographie

3DNatives. L'impression 3d céramique : une révolution pour la fabrication additive ? - 3dnatives. https://www.3dnatives.com/impression-3d-ceramique-17042019/, 2019. (Accessed on 05/17/2022).

M. Anderson and A. Underwood. Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 184(2) :217–236, 1994.

O. Arnal, G. Veron, and D. Sauzade. Opération récifs prado 2006 pour l'installation de récifs artificiels au large de marseille. 2006.

N. L. Bindoff, W. W. Cheung, J. G. Kairo, J. Arístegui, V. A. Guinder, R. Hallberg, N. J. M. Hilmi, N. Jiao, M. S. Karim, L. Levin, et al. Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities. *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, pages 477–587, 2019.

K. E. Carpenter, M. Abrar, G. Aeby, R. B. Aronson, S. Banks, A. Bruckner, A. Chiriboga, J. Cortes, J. C. Delbeek, L. DeVantier, et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*, 321(5888) :560–563, 2008.

R. Cépralmar. Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en languedoc-roussillon. 2015.

E. Charbonnel. Les peuplements ichtyologiques des récifs artificiels dans le département des alpes-maritimes (france). *Bulletin de la Société zoologique de France*, 115(1) :123–136, 1990.

E. Charbonnel, F. Carnus, S. Ruitton, L. L. Direac'h, J.-G. Harmelin, and J. Beurois. Artificial reefs in marseille : from complex natural habitats to concepts of efficient artificial reef design. In *Global Change : Mankind-Marine Environment Interactions*, pages 81–82. Springer, 2010.

F. Charles, J. Coston-Guarini, J.-M. Guarini, and S. Fanfard. Wood decay at sea. *Journal of Sea Research*, 114 :22–25, 2016.

M. Coll, C. Piroddi, J. Steenbeek, K. Kaschner, F. Ben Rais Lasram, J. Aguzzi, E. Ballesteros, C. N. Bianchi, J. Corbera, T. Dailianis, et al. The biodiversity of the mediterranean sea : estimates, patterns, and threats. *PloS one*, 5(8) :e11842, 2010.

D. Dahiru, U. Yusuf, and N. Paul. Characteristics of concrete produced with periwinkle and palm kernel shells as aggregates. *FUTY Journal of the Environment*, 12(1) :42–61, 2018.

H. D. Dennis, A. J. Evans, A. J. Banner, and P. J. Moore. Reefcrete : reducing the environmental footprint of concretes for eco-engineering marine structures. *Ecological Engineering*, 120 :668–678, 2018.

S. Deruelle. Rôle du support dans la croissance des microorganismes. *Materials and Structures*, 24(3) :163–168, 1991.

M. D'Orazio, G. Cursio, L. Graziani, L. Aquilanti, A. Osimani, F. Clementi, C. Yéprémian, V. Lariccia, and S. Amoroso. Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of etics compared to clay bricks. *Building and environment*, 77 :20–28, 2014.

D. Egan and E. Howell. The historical ecology handbook : A restorationist's guide to reference ecosystems., 2001.

M. El Biriane and M. Barbachi. State-of-the-art review on recycled mussel shell waste in concrete and mortar. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1) : 1–10, 2021.

U. G. Eziefula, J. C. Ezeh, and B. I. Eziefula. Properties of seashell aggregate concrete : A review. *Construction and Building Materials*, 192 :287–300, 2018.

T. Galewski, L. Segura, J. Biquet, E. Saccon, and N. Boutry. Living mediterranean report–monitoring species trends to secure one of the major biodiversity hotspots. *Tour du Valat : Arles, France.) Available at*, 2021.

A. Gerard, E. Thouard, G. Veron, J. Denis, and O. Thebaud. Les récifs artificiels-état des connaissances et recommandations. 2008.

O. Guillitte. Bioreceptivity : a new concept for building ecology studies. *Science of the total environment*, 167(1-3) :215–220, 1995.

O. Guillitte and R. Dreesen. Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. *Science of the total environment*, 167(1-3) :365–374, 1995.

Y. Han, R. Lin, and X.-Y. Wang. Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 47 :103918, 2022.

N. Hanlon, L. B. Firth, and A. M. Knights. Time-dependent effects of orientation, heterogeneity and composition determines benthic biological community recruitment patterns on subtidal artificial structures. *Ecological Engineering*, 122 :219–228, 2018.

O. Hoegh-Guldberg, P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *science*, 318(5857) :1737–1742, 2007.

Holst. Porosité de masses céramiques | propriétés de la porcelaine et de la céramique | holst porzellan professionnel. https://holst-porzellan.com/fr/connaissance/caracteristiques/porosite, 2022. (Accessed on 05/17/2022).

IPCC. Ipcc ar6 for policymakers. https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf, 2022.

A. Kerr and M. Cowling. The effects of surface topography on the accumulation of biofouling. *Philosophical Magazine*, 83(24) :2779–2795, 2003.

K.-H. Kim. Artificial reef as a beach erosion countermeasure. In *HANDBOOK OF COASTAL AND OCEAN ENGINEERING*, pages 435–455. World Scientific, 2018.

D. Lacroix and F. Simard. Integrating coastal zone dialogue : can initial networking of partners reduce conflicts in marine coastal areas ? In *ICES International council for the exploration of the sea, 20-24 sept 2010, Nantes*, 2010.

M. Lapinski, M. Perrot, L. Le Direach, E. Rouanet, and P. Astruch. Support to nursery functionalities of the port of marseilles-fos given by artificial micro-habitats. In *RECIF Congress on Artificial Reefs : from Materials to Ecosystems. ESITC, Caen, France-27-29 January*, pages 256–263, 2014.

M. Lapinsky and M. Perrot. Girel - pilote eco-recifs. https://plateforme.medtrix.fr/index.php/view/media/getMedia?repository=rep06&project=restau-med&path=/media/GIREL/Presentation_GIREL.pdf, 2019 .

B. Latteux. Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral. *Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral*, pages 1–164, 2008.

L. Le Diréach, P. Astruch, D. Bonhomme, P. Bonhomme, M. Fourt, E. Rouanet, A. Goujard, and S. Ruitton. Comparative assessment of the deployment of 6 artificial reef types in marseille prado bay (france) from a five-year seasonal survey of the fish fauna. In *Proceedings of the RECIFS Conference on Artificial Reefs : from Materials to Ecosystems, Caen, France*, volume 27, page 29, 2015.

G. Lecaillon, P.Lenfant, S. Fonbonne, A. Mercière, and I. Simonnet. Synthèse de la phase 3 - girel ecocean, 2015.

P. Lenfant, A. Gudefin, S. Fonbonne, G. Lecaillon, J. Aronson, E. Blin, S. Lourie, J.-L. L. P. Boissery, G. H. A. Palmaro, and J. Person. Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de méditerranée. orientations et principes., 2015.

O. Ly, A. I. Yoris-Nobile, N. Sebaibi, E. Blanco-Fernandez, M. Boutouil, D. Castro-Fresno, A. E. Hall, R. J. Herbert, W. Deboucha, B. Reis, et al. Optimisation of 3d printed concrete for artificial reefs : Biofouling and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 272 :121649, 2021.

M. Mercader, A. Mercière, G. Saragoni, A. Cheminée, R. Crec'hriou, J. Pastor, M. Rider, R. Dubas, G. Lecaillon, P. Boissery, et al. Small artificial habitats to enhance the nursery function for juvenile fish in a large commercial port of the mediterranean. *Ecological Engineering*, 105 :78–86, 2017.

A. Miller, A. Dionísio, and M. F. Macedo. Primary bioreceptivity : a comparative study of different portuguese lithotypes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 57(2) :136–142, 2006.

A. Z. Miller, A. Dionísio, L. Laiz, M. F. Macedo, and C. Saiz-Jimenez. The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms. *Annals of Microbiology*, 59(4) :705–713, 2009.

D. H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, F. Baraud, and L. Leleyter. Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials*, 135 :137–150, 2017.

B. Pascaline, S. Catherine, E. Charbonnel, and F. Patrice. Monitoring of the artificial reef fish assemblages of golfe juan marine protected area (france, north-western mediterranean). *Brazilian Journal of Oceanography*, 59(SPE1) :167–176, 2011.

S. Pioch. *Les «habitats artificiels» : élément de stratégie pour une gestion intégrée des zones côtières ? Essai de méthodologie d'aménagement en récifs artificiels adaptés à la pêche artisanale côtière*. PhD thesis, Université Paul Valéry-Montpellier 3 ; Tokyo University of Marine Science and …, 2008.

A. E. Richardson and T. Fuller. Sea shells used as partial aggregate replacement in concrete. *Structural Survey*, 2013.

H. N. Ruslan, K. Muthusamy, S. M. S. Mohsin, R. Jose, and R. Omar. Oyster shell waste as a concrete ingredient : A review. *Materials Today : Proceedings*, 2021.

M. Ryley, M. Carve, R. Piola, A. J. Scardino, and J. Shimeta. Comparison of biofouling on 3d-printing materials in the marine environment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 164 :105293, 2021.

G. T. Şensurat, Ö. Aytaç, and A. LÖK. The use of artificial reefs for recreational diving. *Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences*, 3(1) :27–33, 2017.

Simulation-Matériaux. Comportement mécanique des matériaux - liste de masses volumiques, modules de young et coefficients de poisson. https://www.simulationmateriaux.com/ComportementMecanique/comportement_mecanique_Liste_modules_de_Young.php, 2018. (Accessed on 05/16/2022).

E. M. Strain, C. Olabarria, M. Mayer-Pinto, V. Cumbo, R. L. Morris, A. B. Bugnot, K. A. Dafforn, E. Heery, L. B. Firth, P. R. Brooks, et al. Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity : Which interventions have the greatest ecological benefit ? *Journal of Applied Ecology*, 55(1) :426–441, 2018.

A. Tessier. *Caractérisation des récifs artificiels du Golfe du Lion : de l'écologie aux usagers*. PhD thesis, Perpignan, 2013.

A. Tessier, P. Francour, E. Charbonnel, N. Dalias, P. Bodilis, W. Seaman, and P. Lenfant. Assessment of french artificial reefs : due to limitations of research, trends may be misleading. *Hydrobiologia*, 753(1) :1–29, 2015.

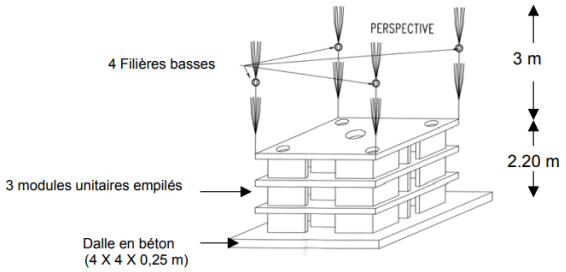
M. J. Uddin, K. J. Smith, and C. W. Hargis. Development of pervious oyster shell habitat (posh) concrete for reef restoration and living shorelines. *Construction and Building Materials*, 295 :123685, 2021.

C. Varhen, S. Carrillo, and G. Ruiz. Experimental investigation of peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 136 :533–540, 2017.

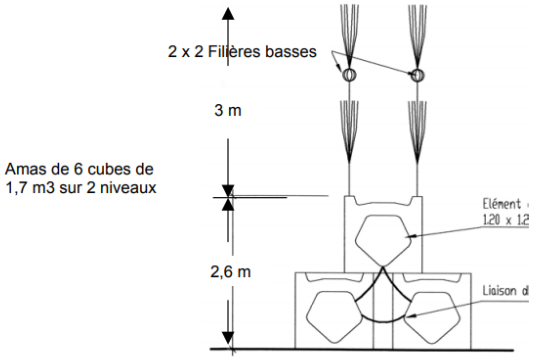
P. S. White and J. L. Walker. Approximating nature's variation : selecting and using reference information in restoration ecology. *Restoration Ecology*, 5 (4) :338–349, 1997.

Chapitre 6

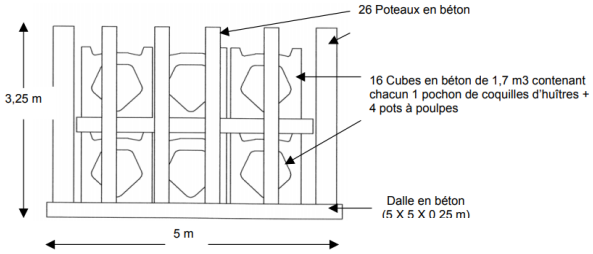
Annexes



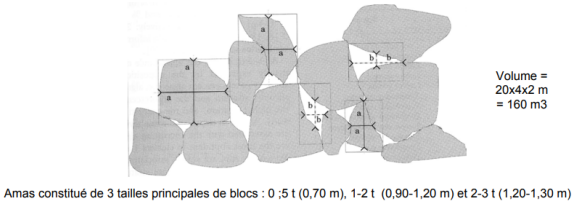
(a) Récif CHICANE (en. MAZE)



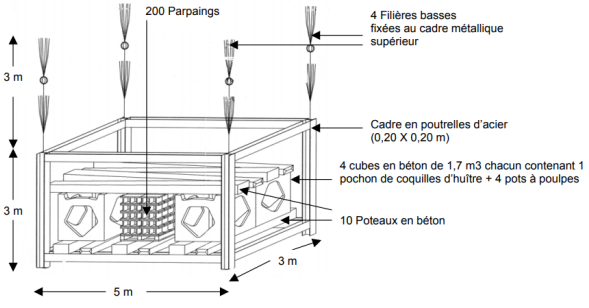
(b) Récif amas de CUBES



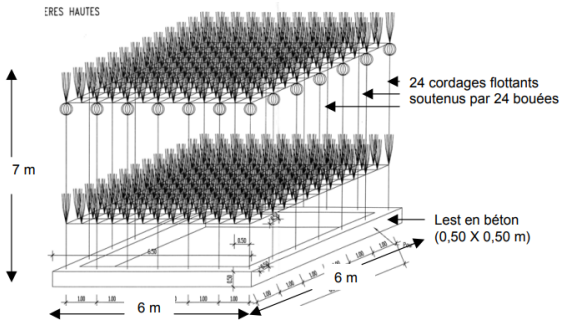
(c) Récif Panier FAKIR



(d) Récifs amas de roches (en. ROCKS)



(e) Récif Panier Acier (en. METAL BASKET)



(f) Récif Filières Hautes (en. ROPES)

FIGURE 1 – Présentation des six différents récifs installée au Prado

TABLE 1 – Caractéristiques des sites de récifs artificiels déployés en Méditérranée Française ; Pas de données (-) ; le premier niveau de classification du tableau est la région, le deuxième est l'ordre d'apparition et l'année de nouveaux sites de RAs dans la région. Source : (Tessier, 2013 ; Tessier et al., 2015)

Table 1 Characteristics of artificial reef sites deployed in France; No Data (–); the first level of classification of the table is the region, the second is the order of appearance in the time of RAs new sites in the region

Deployment area	Year of deployment	Description of artificial reefs	Dumped volumes (m^3)	Dpth of deployment (m)	Objectives	References
Provence-Alpes-Côte d'Azure (PACA)						
Roquebrune	1980/83	6 Modules of breeze blocks	48	22–39	Maintain artisanal fishing	Charbonnel (1990) and Charbonnel et al. (2001b)
	1985/87	590 Cubic reefs of 1 m^3, 448 cubic reefs of 2 m^3, 252 cubic reefs of 1.4 m^3, 15 Bonnas	4,208	22–39	Protect marine habitat	Charbonnel (1990) and Charbonnel et al. (2001b)
	1990	3 Thalamés, modification of 2 Bonnas containing breeze blocks,concrete elements	81	15–30		Charbonnel et al. (2001b)
Cagnes-sur-Mer	2009	6 Heaps of 7 piles of 3 concrete domes, 6 heaps of 3 piles of 2 concrete domes, 35 piles of perforated plate steel, 30 concrete plates with rope streamers	850	6–12	Maintain artisanal fishing Enhance biodiversity	Serre C. (pers. comm.)
Beaulieu-sur-Mer	1980/83	36 Modules of breeze blocks	288	22–39	Maintain artisanal fishing	Charbonnel (1990) and Charbonnel et al. (2001b)
	1985/87	561 Cubic reefs of 1 m^3, 96 cubic reefs of 2 m^3, 72 reefs of 1.4 m^3, 11 Bonnas	2,592	22–39	Protect marine habitat	Charbonnel (1990) and Charbonnel et al. (2001b)
	1990/91	2 Thalamés, modification of 2 Bonnas within breeze blocks	78	15–30		Charbonnel et al. (2001b)
Golfe-Juan	1979/83	20,000 Old tires, 47 modules of breeze blocks	3,856	15–30	Anti-trawling	Charbonnel (1990) and Barnabé et al. (2000)
	1985/88	588 Cubic reefs of 1 m^3, 284 cubic reefs of 2 m^3, 252 cubic reefs of 1.4 m^3, 14 Bonnas	3,721	15–30	Maintain artisanal fishing	Charbonnel (1990) and Charbonnel & Serre (1999)
	1988/91	3 Thalamés, modification of 3 Bonnas containing breeze blocks, tyres and concrete elements	127	15–30	Experimental test	Charbonnel & Serre (1999)
	1993	1 Wreckage	250	31	Protect marine habitat	Charbonnel & Serre (1999)
	1996	1 Wreckage	140	36		Charbonnel & Serre (1999)
Port-Cros	1965	35 Cubic reefs	35	–	Protect marine habitat Experimental test	Ody (1987), Ody & Harmelin (1994) Barnabé et al. (2000) and Charbonnel et al. (2001a)
La Ciotat	1986	190 Cubic reefs of 1.98 m^3, 3 Bonnas	856	33	Anti-trawling	Gauteaume (2000)
	1989	125 modules of 1.92 m^3	240		Maintain artisanal fishing	

Table 1 continued

Deployment area	Year of deployment	Description of artificial reefs	Dumped volumes (m^3)	Dpth of deployment (m)	Objectives	References
Marseille	2007/08	168 Heaps of 6 cubic reefs, 78 Mazes, 18 steel baskets, 30 heaps of rocky blocks, 18 floating ropes, 18 Fakir electric piles	27,300	18–33	Maintain artisanal fishing Experimental test Enhance biodiversity, habitats	Charbonnel et al. (2011) and Jouvenel & Roche (2011)
Côte Bleue Marine Park (Five sites: see Fig. 1)	1983	9 Alveolar pyramidals, 27 alveolar	225	15–23	Anti-trawling	Ody (1987) and Charbonnel et al. (2011)
	1985/89	390 Cubic reefs of 1.7 m^3, 90 cubic reefs of 2 m^3, 8 Bonnas, 83 rocky blocks, 100 Sea-rocks	2,628	15–55	Maintain artisanal fishing	Ody (1987) and Charbonnel et al. (2011)
	1996/97	87 Cubic reefs of 1.7 m^3, 91 Fakir electric piles	1,149	15–75	Experimental test	Charbonnel et al. (2011)
	2000/04	40 Nègri columns, 12 Tripods, 6 Khéops	734	15–25		Charbonnel et al. (2011)
Beauduc	1989	440 Sea-rocks	654	–	Anti-trawling	Barnabé et al. (2000)
Total PACA			50,060			
Languedoc-Roussillon						
Agdes-Mornes	1999	109 Pipes, 25 heaps of 20 Sablas	1,623	7–22	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	CREOCEAN (2003) and Fourrier & Barral (2009)
	2006	144 Pipes, 80 heaps of 20 Sablas	2,400	15–20		Fourrier & Barral (2009)
Palavas-les-Flots	1968	15 Pipes, 7 T of old tires, 100 car wrecks, 50 rocky blocks	400	20–23	Maintain artisanal fishing Experimental test	Bombace (1989)
Marseillan	1992	60 Pipes	426	7–23	Anti-trawling	Collart & Charbonnel (1998) and Fourrier & Barral (2009)
	1996	45 Pipes	319	30–35	Maintain artisanal fishing	Collart & Charbonnel (1998) and Fourrier & Barral (2009)
Agde	1985	4 Bonnas, 9 heaps of 14 Comins	1,942	17–30	Anti-trawling	Bombace (1989) Fourrier & Barral (2009)
	1995	200 Pipes	1,420	9–20	Maintain artisanal fishing	Collart & Charbonnel (1998) and Fourrier & Barral (2009)
	2009	99 Pipes, 10 steel baskets, 2 Eco-reefs	1,083	9–32		Blouet et al. (2010)

Table 1 continued

Deployment area	Year of deployment	Description of artificial reefs	Dumped volumes (m^3)	Dpth of deployment (m)	Objectives	References
Valras	2006	34 Pipes, 9 steel baskets, 1 heap of 3 steel baskets	950	9–22	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	Fourrier & Barral (2009) and Dallas et al. (2012)
Gruissan	1985	22 Bonnas, 22 heaps of 14 Comins	6,688	17–30	Anti-trawling	Bombace (1989) and Fourrier & Barral (2009)
	2002	2 Heaps of Dalots and telegraph poles, 9 heaps of telegraph poles, 12 spiral staircases, 2 chaotic heaps	4,250	10–25	Maintain artisanal fishing	CREOCEAN (2004) and Fourrier & Barral (2009)
	2005	Same as in 2002 and 8 steel baskets with chaotic heaps	5,100	10–25		Fourrier & Barral (2009)
Port-la-Nouvelle	1980	Pipes, Old tires	3,000	–		Bombace (1989)
	1985	4 Bonnas, 4 heaps of 14 Comins	1,216	17–30	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	Bombace (1989) and Fourrier & Barral (2009)
Leucate-Le Barcarès	2004	60 pipes, 36 chaotic heaps with pipes, 72 Dalots, Dalots and concrete platforms	2,200	15–30	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	Lenfant et al. (2007), Fourrier & Barral (2009) and Koeck et al. (2011)
Canet-en-Roussillon	1985	8 Bonnas, 6 heaps of 14 Comins	2,138	17–30	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	Bombace (1989) and Fourrier & Barral (2009)
Saint-Cyprien	1985	9 Bonnas, 7 heaps of 14 Comins	2,420	17–30	Anti-trawling Maintain artisanal fishing	Bombace (1989) and Fourrier & Barral (2009)
Total LR			37,575			

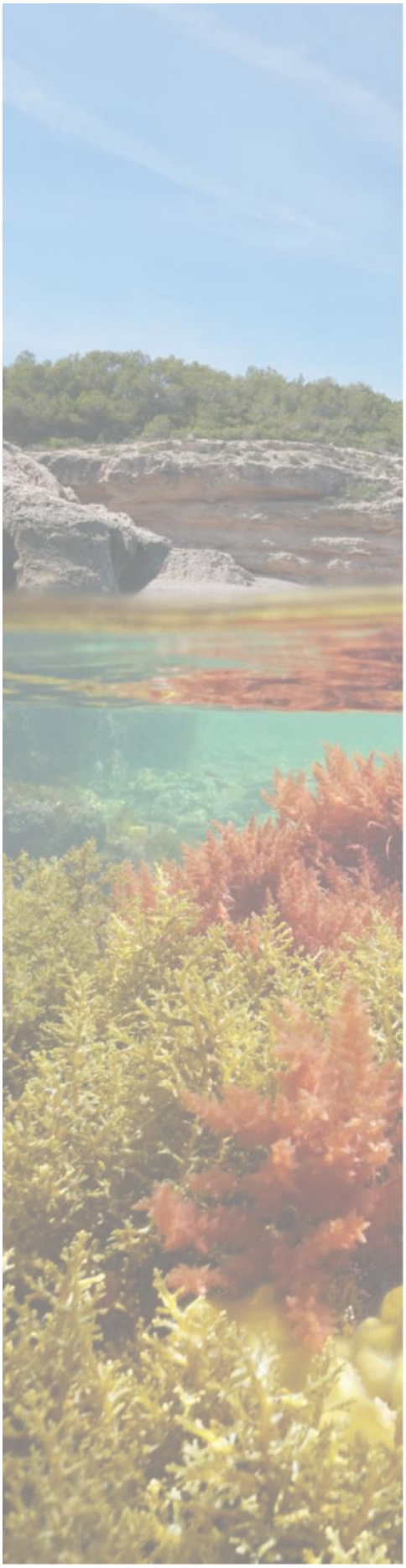
TABLE 2 – Tableau récapitulatif présentant les différents types de récifs artificiels et le résultat du suivi sur 5 ans. Une filière basse fait 3 mètres de haut, tous les cubes de bétons font 1.7 m^3. Repris de (Le Diréach et al., 2015).

DESCRIPTION DES RAs						MOYENNE DU SUIVI SUR 5 ANS		
Type de RA	**Matériaux utilisés**	**Volume (m^3)**	**Taille l x L x H (m)**	**Description**	**Caractéristiques architecturales**	**Densité (poisson/m^3)**	**Biomasse (g/m^3)**	**Richesses spécifiques**
METAL BASKET	Béton, fer, parpaings, filières	187	10 x 5 x 10	3 armatures métalliques remplient de plusieurs matériaux de taille différente (4 cubes de bétons, 10 pieux en béton, 200 parpaings). 4 filières basses fixées au cadre métalliques supérieur	Grands volumes et forte complexité	2.2 ± 2.7	76.2 ± 50.8	16 ± 3
FAKIR	Béton, parpaings	86	5 x 5 x 3	Dalle de béton composée de 26 pieux périphériques en béton, remplis de plusieurs matériaux de tailles différentes (16 cubes en béton et 200 parpaings)		2.3 ± 1.6	141.6 ± 101.5	14 ± 3
ROCKS	Roche naturelle	160	20 x 4 x 2	Blocs de carrière de taille différentes		1.8 ± 2.7	89.1 ± 118.8	11 ± 3
CUBES	Beton, fillières	10	(-) x (-) x 2	Assemblage de six cubes en béton, avec de petits espaces vides entre les cubes. Filières basses sur les blocs supérieurs	Petit volume et faible complexité	6.7 ± 5.1	274.0 ± 451.8	8 ± 3
MAZE	Beton, fillières	19	4 x 2.4 x 2	Structure en béton (parpaings liés maçonnerie) avec deux étages de galeries en forme de labyrinthe, reliées par cinq trous. Filières basses sur chaque coins supérieurs		3.0 ± 4.0	81.3 ± 126.9	5 ± 3
ROPES	Béton, cordes	(-)	6 x 6 x 7	Cadre en béton avec deux étages de cordes flottantes interconnectées		1.0 ± 1.4	22.3 ± 26.8	7 ± 2

Annexe 18

Prospective de restauration des fonds meubles en comparaison aux autres techniques de restauration écologiques (Coralligènes, posidonie...), plus développées

Par Charlène STEINMETZ



Prospective de restauration des fonds meubles en comparaison aux techniques de restauration existantes.

Charlène Steinmetz

Encadré par *Pierre Boissery.*

FACULTÉ DES SCIENCES
MONTPELLIER

Remerciements

Je remercie tout d'abord Julie Deter et Valérie Borel pour la création de ce diplôme universitaire qui est très enrichissant.

Merci à Pierre Boissery, m'encadrant pour ce projet, en étant toujours présent avec de bons conseils.

D'une manière générale je tiens à remercier aussi tous les intervenants rencontrés lors de cette formation, Philippe Lenfant, Pierre Boissery, Anaïs Gudefin, Gilles Lecaillon Gwenaëlle Delaruelle et Olivier Bocquet, qui ont rendu ces heures d'enseignements très intéressantes et riches.

Et enfin, une pensée aux autres personnes passant se diplôme avec moi. Merci pour ces nombreux échanges pertinents et pour l'entraide qu'il y a pu avoir. Mais aussi pour la bonne ambiance globale.

Résumé

La restauration écologique des petits fonds marins côtiers a de nombreux avantages : Elle permet d'instaurer une prise de conscience générale de l'état écologique marine et de réparer toutes les fonctions et les services rendus.

Actuellement, plusieurs projets ont été mis en place en Méditerranée afin de reconstituer la biodiversité marine (restauration de zone de nurserie, transplantation d'herbiers et de coralligènes, utilisation des récifs artificiels).

Toutes ces solutions sont associées à des espèces et un type de sol particulier, les documents traitant de la biocénose des fonds meubles est moindre et donc la restauration écologique qui est associée également.

Ce rapport a permis de mettre en avant la biocénose et le service écosystémique de ce type de substrat et a aussi permis de proposer des éléments de prospective pour la restauration écologique des fonds meubles grâce au benchmarking des méthodes existantes.

Table des matières

Remerciements 2
Résumé 2
Table des matières 3
Liste des figures et tableaux 3
Préambule 1
Introduction 1
Objectifs 2
Méthodologie 2
Etat de l'art 3
Les fonds meubles 3
Fonction écologique du milieu : Biocénose et service écosystémique 3
Les causes d'altération du milieu. 10
La restauration écologique 12
Prospectives de restauration des fonds meubles 16
Discussion 19
Conclusion 20
Bibliographie 21

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Représentation des pressions humaines sur le littoral méditerranéen © Pôle-relais lagunes méditerranéennes. 1

Figure 2 : Répartition des types de côtes françaises © Réseau national des observatoires du trait de côte 3

Figure 3 : Étages des zones littorales (Lenfant et al. 2015) 4

Figure 4 : Photographie d'une des pressions exercées sur cet habitat : la pêche. (« La pêche aux tellines en Méditerranée » s. d.). 5

Figure 5 : Photographie d'une sole (« Mer et océans, le média des mers » 2019) et Rouget barbet (« Biopix , le rouget barbet » s. d.) 6

Figure 6 : Photographie d'un Rhodolithe à gauche (« Aquaportail : les Rhodolithes » s. d.) et d'un maërl à droite (« Oceanopolis : Maërl » s. d.) 7

Figure 7 : Photographie d'un Gouania Willdenowi © (« Adriatic nature -Gouania » s. d.) 8

Figure 8 : Photographie de Cymodocea nodosa (« Andromède océanologie » s. d.) et Caulpera prolifera (« Caulerpe de Méditerranée » 2018) 9

Figure 9 : Représentation de diverses pressions exercées sur les fonds côtiers (Lenfant et al, 20&5) 12

Figure 10 : Cycle de reproduction et de développement des poissons, Lenfant et al, 2015 13

Figure 11 : Illustration du fonctionnement des Biohut (gauche) et photographie des structures immergées (droite). © Ecocean 13

Figure 12 : Photographie du projet TRANSCOR © G. Delaruelle (gauche) et Graphique représentant la proportion de coralligène non nécrosé (droite). 14
Figure 13 : Photographie du projet REPIC dans le Golfe Juan (Alpes-Maritimes). © A. Gudefin15
Figure 14 : Illustration des récifs artificiels PEGASE pour la commune d'Agde © SEABOOST. 15
Figure 15 : Photographie de la surfréquentation de la flèche de l'Espiguette..... 16
Figure 16 : Photographie d'hippocampe à museau court et d'une Syngnathe (Aquaportail) 17
Figure 17 : Photographie de la solution proposée par (« P2A Développement » s. d.) 18
Figure 18 : Illustration de la solution de protection proposée par S-Able (© C.Steinmetz) 19
Figure 19 : Schéma récapitulatif sur la restauration écologique des fonds meubles. 20

Tableau 1 : Description de la biocénose associée aux sables fins de haut niveau..... 4
Tableau 2 : Description de la biocénose associée aux sables fins bien calibrés. 5
Tableau 3 : Biocénose associée aux sables et graviers sous influence des courants de fond. ... 6
Tableau 4 : Biocénose associée aux sables grossiers et fins graviers brassés par les vagues... 7
Tableau 5 : Biocénose des galets infralittoraux..... 8
Tableau 6 : Biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme. 9
Tableau 7 : Tableau de référencement des services écosystémiques du substrat meuble. 10

Préambule

Introduction

La Terre, très justement surnommée la planète bleue dont sa surface compte près de 71% de mers et d'océans abrite une part importante de la biodiversité mondiale. Ils renferment près de 230 000 espèces marines dont (actuellement) 17 000 en méditerranée (Coll et al, 2010).
Malgré sa petite superficie, elle regroupe 8 à 9% de la biodiversité marine avec un fort taux d'endémisme (Lenfant et al, 2015). La Méditerranée est un bassin semi-fermé sensible à de nombreuses pressions.

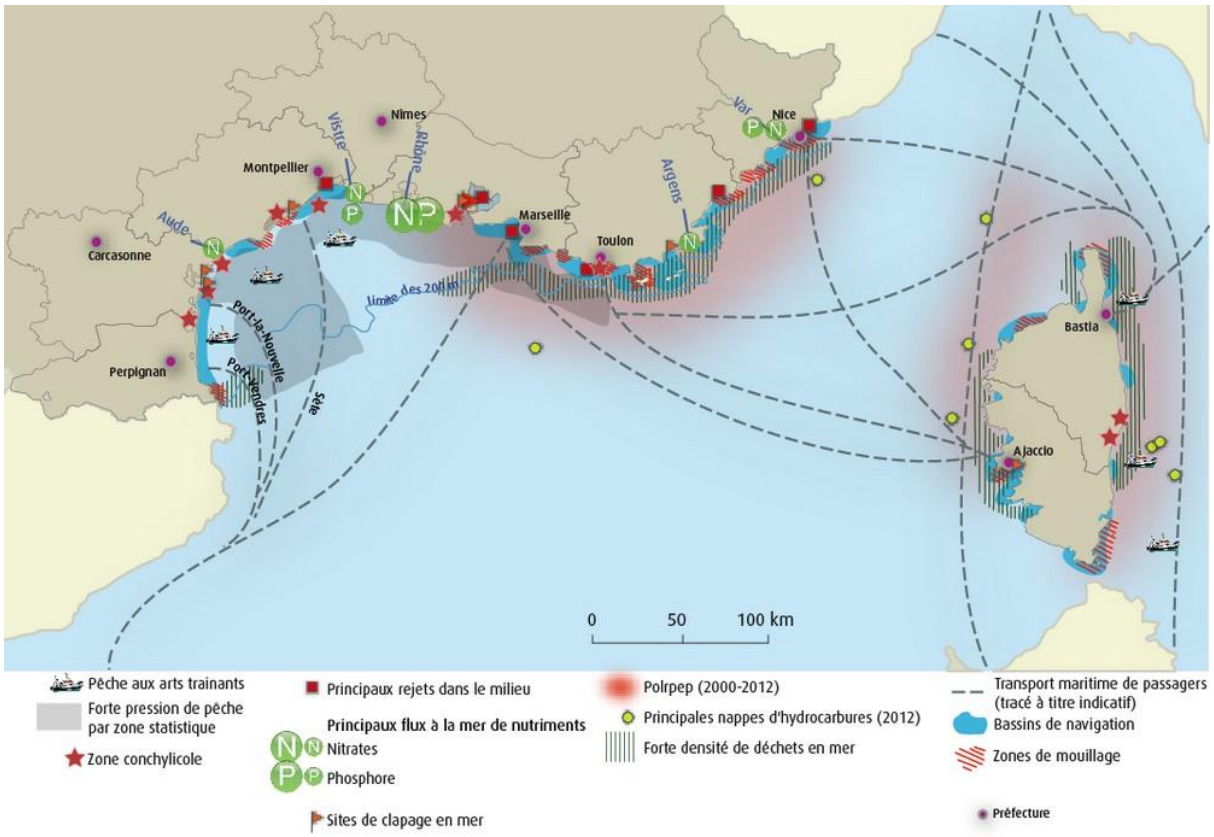


Figure 1 : Représentation des pressions humaines sur le littoral méditerranéen © Pôle-relais lagunes méditerranéennes.

Provenant de la terre (rejets des eaux usées, déversements non contrôlés), mais aussi de la mer (rejets des bateaux, déchets, perte du matériel de pêche). À cause de tous ces facteurs, on considère aujourd'hui la mer Méditerranée comme étant l'une des plus polluées de la planète. (Arévalo et Lazaro, 2017).
Outre les rejets polluants terrestres ou maritimes, d'autres pressions aggravent son état. Le réchauffement climatique et donc l'acidification des eaux, l'introduction d'espèces envahissante, la surpêche et l'artificialisation de la frange littorale rendent ce milieu d'autant plus fragile.

Les scientifiques s'accordent pour dire que des solutions d'ingénierie écologique doivent être mises en place avant que des limites irrévocables ne soient atteintes.
D'après le SER (Society of Ecological Restoration), la restauration écologique est un élément fondamental des programmes de conservation et de développement durable, donnant la possibilité de réparer les dommages écologiques, mais aussi d'améliorer la condition humaine.

La restauration écologique est une action intentionnelle qui initie ou accélère le rétablissement d'un écosystème en le considérant dans son intégralité en réparant toutes ses composantes, ses fonctions écologiques et les services rendus.

Bien que ce soit une « science nouvelle » il existe néanmoins de nombreuses façons de restaurer les fonds marins côtiers.

Objectifs

La restauration écologique des fonctions de nurseries, des herbiers et des fonds rocheux est ce qui est le plus répandu sur notre littoral. Toutefois ces types de restauration ne couvrent pas tous les types de substrats existants : les fonds meubles, tout aussi répandus que les substrats durs ne sont pas sujets aux travaux de restauration au même titre que ceux cités au-dessus. À ce jour aucun retour d'expérience n'est notable.

Bien que le sable, par principe, apporte aussi des services écosystémiques importants, pourquoi est-il plus difficile d'appliquer ces travaux sur ce type de substrat ? Quels sont les perspectives ou axes de travaux envisageables ?

Méthodologie

Afin de répondre à ces questions, ce rapport s'articulera sur différentes parties :
Une partie factuelle, un état de l'art des fonds meubles, montrant l'importance de prise de conscience de ce milieu, suivi d'une partie traitant des méthodes existantes, leur fonctionnement pour ensuite développer les axes de travaux possibles applicables sur les fonds meubles.

Aucune méthode n'existe pour la restauration des fonds meubles, c'est pourquoi les approches proposées sont basées sur des propositions en réponse aux problématiques d'altération de ce même milieu.

Etat de l’art

Les fonds meubles

Caractéristiques, biocénose et service écosystémique

Le littoral français (métropolitain et ultra-marin) est réparti en trois types de côtes :

Les côtes rocheuses et à falaises (substrat dur), les côtes d’accumulation (substrat meuble) et les mangroves.

Le substrat meuble définissant un milieu dont les sédiments sont mobiles (pour une taille allant du sable au galet), soumis aux courants et à la houle, sans zone de refuge apparente. (« Fonds meubles | Parc national des Calanques » s. d.)

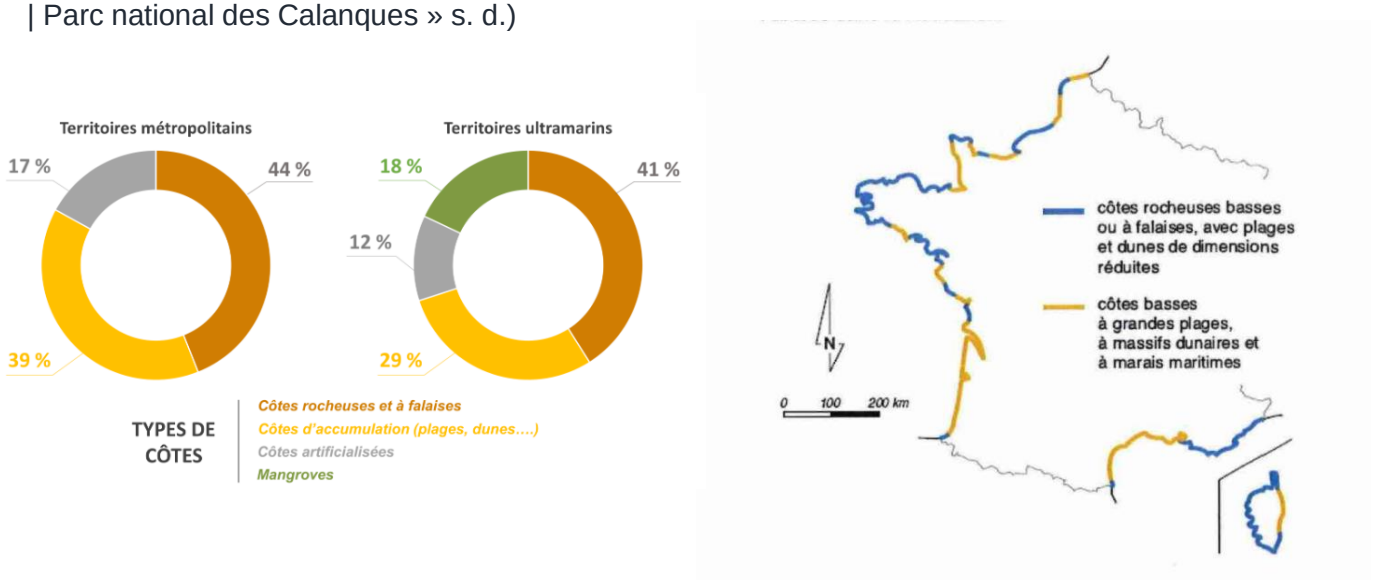


Figure 2 : Répartition des types de côtes françaises © Réseau national des observatoires du trait de côte

Sur ces trois façades maritimes, les côtes françaises métropolitaines sont constituées de 39% de côtes sableuses, n’étant pas consolidés ce type de côte est directement influencé par les différentes pressions dont elle fait face (Courants, vagues, aménagements côtiers, pollution par divers rejets…)

Fonction écologique du milieu : Biocénose et service écosystémique.

Tout comme les autres types de substrat, ces zones abritent une grande variété de biocénoses.

Leur état de conservation a été jugé « défavorable mauvais » dans le cadre de l’évaluation biogéographique de la DHFF de 2006, ce qui traduit un état actuel mauvais et des « perspectives défavorables. (Service du Patrimoine naturel, 2012).

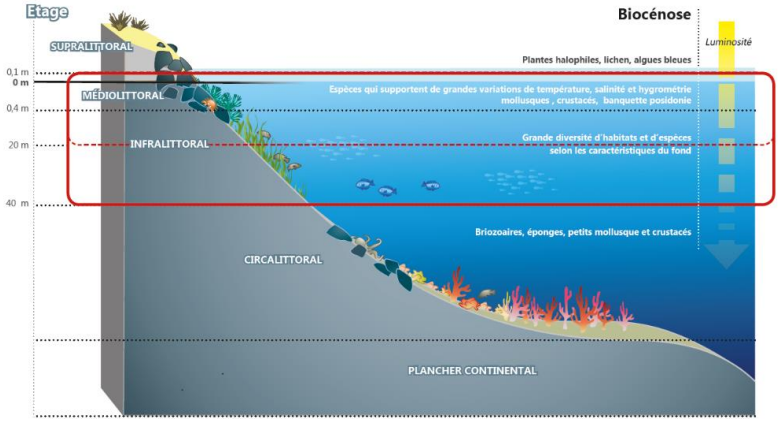


Figure 3 : Étages des zones littorales (Lenfant et al. 2015)

Ce sont les zones de l'infra-médiolittorale (entouré en rouge sur la figure 3) qui sont le plus exposées aux pressions anthropiques et abritent une grande diversité d'habitats et d'espèces selon les caractéristiques du fond.

Très peu de données traitant de la biologie associée aux substrats meubles existent, un des seuls rapports l'abordant est *Caractéristiques et état écologiques ; biocénose des fonds meubles infralittorales* (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012).

La répartition de ces habitats et des espèces associées au fond meubles dépend du type de sédiment et de l'hydrodynamisme rencontré.

Évidemment, bien d'autres espèces sont présentes dans ces zones, cette liste est non exhaustive et permet d'illustrer le type de population présente.

Les sables fins de haut niveau (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012)

Les sables fins de haut niveau se trouvent dans la zone de plus forte énergie : la zone de déferlement des vagues (entre 2,5 et 3m de profondeur). Les espèces vont et viennent de façon saisonnière : lorsque l'hydrodynamisme est trop important (déferlement, tempête) les organismes s'enfoncent ou fuient et reviennent aux périodes plus calmes.

Tableau 1 : Description de la biocénose associée aux sables fins de haut niveau.

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Sable fin, mélangé à des morceaux de coquilles mortes et petits graviers à des débris de feuilles mortes de posidonie.	Mollusques bivalves (tellines) Annélides polychètes Crustacés amphipodes Crustacés isopodes Crustacés décapodes D'autres espèces prolifèrent lors d'apports d'eau douce	Touristes (piétinement) Pêche Nappes d'hydrocarbures Macrodéchets

Figure 4 : Photographie d'une des pressions exercées sur cet habitat : la pêche. (« La pêche aux tellines en Méditerranée » s. d.).

Il faut noter que pour cette zone a forte turbidité les mouvements liés à l'hydrodynamique permettent de s'auto « protéger » contre l'envasement et donc le dépôt de détritus.

Du fait de son abondance en mollusque, cette zone constitue une zone de nourrissage des juvéniles et de certains poissons.

Les sables fins bien calibrés (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012)

Cet habitat fait suite au dernier, le sable est homogène et d'origine terrigène. La biocénose citée va de 2,5 à 25m de profondeur.

Cet habitat fait localement l'objet de dessalure (Estuaires, étangs) provoquant un appauvrissement compensé par la présence d'espèces euryhalines.

La dynamique de peuplement est aussi liée aux saisons, mais pour des raisons quelque peu différentes : le remaniement du substrat enrichit la zone en matière organique qui est également importante pour la chaîne trophique.

Tableau 2 : Description de la biocénose associée aux sables fins bien calibrés.

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Sable fin et granulométrie homogène d'origine terrigène.	Mollusques gastéropodes (Nasses) Mollusques bivalves (Bucarde, Mactre, tellines) Annélides polychètes Crustacés amphipodes Crustacés isopodes Crustacés décapodes Echinodermes Poissons (Gobie, dragonnet lyre) Présence d'**herbiers de cymodocées** et de grande nacre.	Emissions de polluants Aménagements mal conduits, macrodéchets Pêche artisanale Chalutage

Cet habitat représente une fonctionnalité écologique très importante : c'est une zone de nourrissage des poissons plats (Soles, rombou) et de poissons fouisseurs (Rouget, marbré).

Figure 5 : Photographie d'une sole (« Mer et océans, le média des mers » 2019) et Rouget barbet (« Biopix , le rouget barbet » s. d.)

Comme expliqué dans la dernière partie, les herbiers jouent un rôle très important dans le recrutement et l'installation d'un grand nombre d'espèces. Ils participent donc à l'enrichissement en matière organique. Ils jouent un rôle de support pour la microflore et la faune occupant une place importante dans la chaîne trophique.

Biocénose des sables et graviers sous influence des courants de fond (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012).

Cette zone est plus dans les profondeurs, entre 4 et 25m, s'étendant de l'étage infra à circalittoral.

Il est fréquent entre les passes des îles soumises aux courants violents, qui constituent le facteur prédominent conditionnant son existence. On le retrouve aussi dans les chenaux creusés par les courants dans les herbiers à posidonie. Lors de conditions particulièrement intenses, cet habitat est « mélangé » avec la biocénose détritique côtière.

Tableau 3 : Biocénose associée aux sables et graviers sous influence des courants de fond.

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Sables grossiers et fins graviers d'origine organogène.	Mollusques bivalves (Praire, amandes de mer, bucarde, tellines, dosine) Annélides polychètes Crustacés décapodes Crustacés isopodes Echinodermes (Spatangue pourpre) Céphalocordé	Biotope craignant l'envasement : sensible à la qualité de l'eau et la quantité de matière en suspension
	Associations considérées comme prioritaires (Convention de Barcelone) Rhodolithes (rencontré à l'étage circalittoral) Maërl (étage circalittoral)	

Les lits océaniques de rhodolithes créent un habitat biogénique pour les communautés benthiques (Aquaportail).

Quant à lui, le maërl, désigne une accumulation d'algues rouges calcaires constituant un écosystème marin remarquable et une niche écologique abritant une forte biodiversité (Coquilles, vers ou juvéniles) (Oceanopolis).

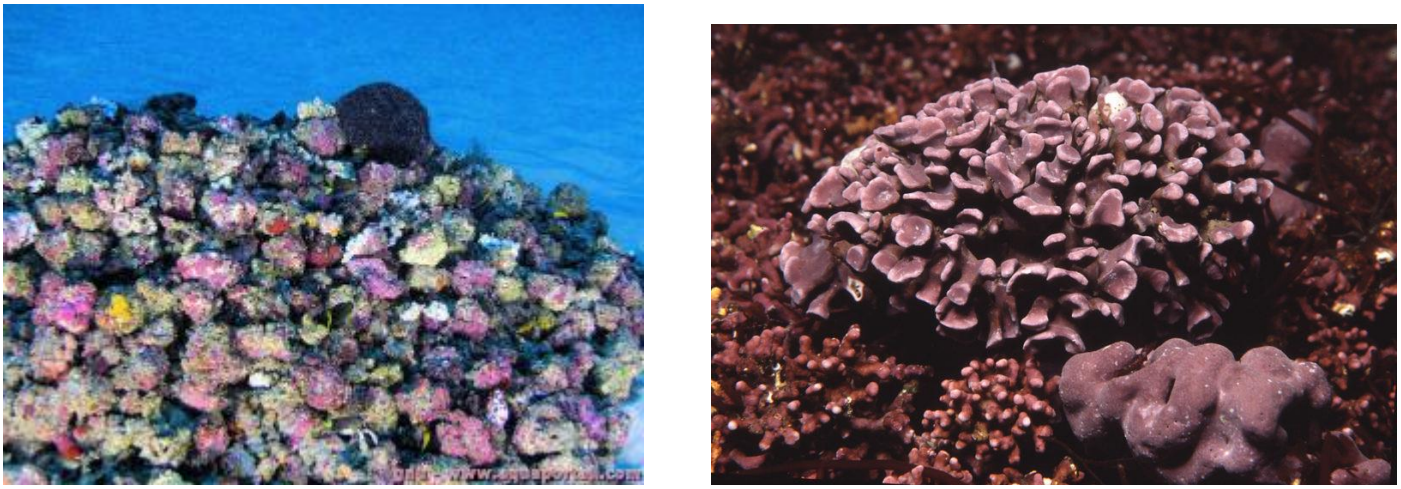


Figure 6 : Photographie d'un Rhodolithe à gauche (« Aquaportail : les Rhodolithes » s. d.) et d'un maërl à droite (« Oceanopolis : Maërl » s. d.)

Biocénose des sables grossiers et fins graviers brassés par les vagues (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012).

Ce biotope se situe dans les petites criques battues par les vagues, n'excède pas quelques décimètres de profondeur.

Peu de connaissances sont associées à ce milieu, cependant les espèces qui le caractérisent sont très intéressantes.

Tableau 4 : Biocénose associée aux sables grossiers et fins graviers brassés par les vagues.

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Sable grossier et fins graviers (pratiquement dépourvu de fraction fine)	Archiannélide Némertes Rares rhodolites	Biotope craignant l'envasement : sensible à la qualité de l'eau et la quantité de matière fine en suspension Peut s'accommoder de polluants dissous dans l'eau

Biocénose des galets infralittoraux (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012)

Cette zone commence à quelques décimètres de profondeur à la profondeur définissant la limite d'action des vagues.

Tableau 5 : Biocénose des galets infralittoraux

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Galets	Crustacés amphipodes Custacés décapodes Poissons (Gouania Willdenowi)	Accumulation de détritus bloquant les galets et colmatant les interstices Pollutions par les hydrocarbures

Le Gouania est une espèce extrêmement rare.

Figure 7 : Photographie d'un Gouania Willdenowi © (« Adriatic nature -Gouania » s. d.)

Lors des périodes calmes, les galets se recouvrent de diatomées (microalgue entourée d'une membrane siliceuse), favorisant l'apparition d'espèces de biotopes voisins.

Biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme (Service du Patrimoine Naturel, Bellan-Santini, et Bellan 2012)

Cet habitat contrairement aux derniers présentés est totalement à l'abri des houles et vagues. La profondeur de cet habitat n'excède pas 3m de profondeur. Il est situé dans les criques protégées, les milieux calmes.

Tableau 6 : Biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme.

Caractéristique du substrat	Espèces	Pression et vulnérabilité
Sédiment sablo-vaseux parfois mêlé à une petite quantité de gravier.	Mollusque gastéropode (Bruguière, cérite goumier) Mollusque bivalve (Palourde grise, sipunculide) Annélide Polychète Crustacés décapodes (Pagure de rocher) Moule de méditerranée Cymodocée nodosa, Zostère noltei Caulerpa prolifera Loripes lacteus Pastarella tyrrhena	Disparition de l'habitat par remblaiement des surfaces Pêche aux mollusques et appâts Accumulation de détritus et polluants Destruction de l'habitat par suppression des barrières naturelles.

Figure 8 : Photographie de Cymodocea nodosa (« Andromède océanologie » s. d.) et Caulpera prolifera (« Caulerpe de Méditerranée » 2018)

Malgré ce que l'on peut penser, les fonds sableux constituent un habitat pour une variété d'espèces importante. Ils représentent une zone de frayère grâce à la flore qui y vit, et la faune y vivant est capable de s'adapter aux contraintes que présente ce type de sol.

Service écosystémique.

Le service écosystémique permet de rendre compte de la valeur sociale des fonctionnalités écologiques, plus particulièrement des services rendus par les écosystèmes pour l'Homme.

Ce concept permet de rendre compte de la dépendance qui existe entre le bien-être humain et les écosystèmes marins (Thievent, Boissery, et Boeuf 2016).

Il s'organise en plusieurs catégories :

Tableau 7 : Tableau de référencement des services écosystémiques du substrat meuble.

Services directs		Pêche professionnelle
		Extraction de minéraux
Services indirects	**Services de régulation**	Régulation de la diversité fonctionnelle
		Régulation des interactions interspécifiques
		Protection contre l'érosion du littoral
		Maintien du cycle de vie des espèces marines
		Contrôle des espèces envahissantes
		Recyclage des nutriments et matières organiques
	Services socio-culturels	Tourisme, loisirs et sport
		Esthétique, paysage
		Pêche de loisir
		Support de recherche
		Espèces protégées

	Valeur d'option
	Valeur écologique
	Valeur instrumentale
	Valeur patrimoniale

Les services directs sont ceux amenant des bénéfices immédiats pour l'Homme, dans ce tableau ils sont de valeur d'option c'est-à-dire qu'ils représentent un réservoir en ressource et ont un potentiel d'innovation.

Les services indirects sont séparés en deux parties :

Les fonctions de régulation concernent des zones de nurseries et des facteurs de contrôle des écosystèmes et du climat et représentent donc les valeurs écologiques.

Concernant le socio-culturel, il intègre plusieurs domaines, des valeurs d'option comme pour les services directs, des valeurs patrimoniales pour les espèces protégées, mais plus particulièrement les activités à valeurs instrumentales, ce qui est un moteur pour l'économie.

Les bénéfices sont donc nombreux et il est facile de comprendre qu'il est indispensable de préserver ce milieu.

Ce sont nos actions, majoritairement à des fins économiques (valeurs d'option et instrumentales) qui détruisent ce milieu.

Les causes d'altération du milieu.

Les causes sont diverses, mais l'action entraînant le plus de dégât est sans doute la pêche commerciale.

Des recherches sur le chalutage des fonds ont permis de définir l'impact environnemental de cette méthode, un grand nombre d'espèces non ciblé sont prises dans ces filets , par exemple dans la zone de Pacifique nord, on dénombre 82% de prises accessoires rejetées à la mer, elles peuvent représenter 90% de prise du filet (« Le chalutage: une méthode de pêche destructive qui transforme les fonds marins en « déserts » 2014).

Mais ce n'est pas tout, le chalutage est destructif pour les fonds, il déloge les espèces, abîme leur habitat et déplace les sédiments qui comme on l'a vu au-dessus est un des critères de vulnérabilité pour un grand nombre de biotopes.

De plus, de nombreuses espèces relarguent du carbone en plus de la pollution du bateau.

On note 50% d'espèces en moins dans les zones chalutées en comparaison aux zones non touchées par le chalutage. Le cycle du carbone et la chaîne trophiques peuvent être totalement bouleversés.

Le rejet des eaux usées est aussi problématique, la présence de nitrate ou phosphate est nocive pour les biotopes et la présence de certaines bactéries (l'Escherichia coli par exemple) peut l'être pour l'homme.

Toutes les activités nautiques représentent une pression de plus. Lors du mouillage, les ancres des bateaux sont parfois posées sur des biotopes importants de l'écosystème marin, l'herbier de posidonie fait partie de la flore des fonds sableux.

Ses herbiers ne sont pas les seuls à être victimes de ces poids de parfois, plusieurs dizaines de kilos, comme expliqué tout à l'heure une diversité benthique importante existe et est menacée par ce phénomène.

Pour ne pas déroger à la règle, l'Homme exerce une pression importante sur les fonds marins sableux.

Tout d'abord, la forte anthropisation des côtes a développé le tourisme en masse et tout ce monde qui piétine les fonds est un réel bouleversement pour le biotope.

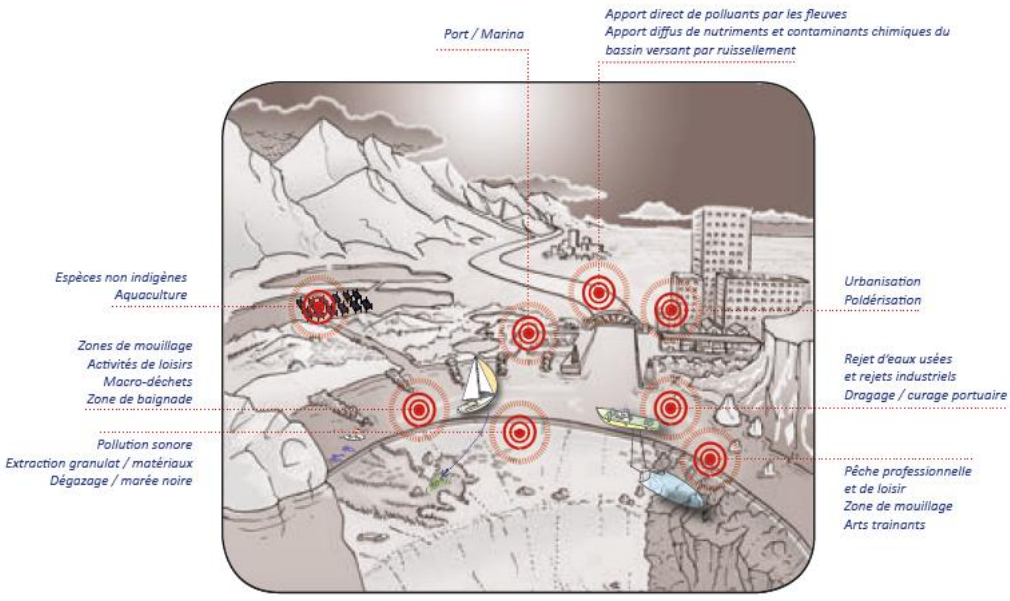


Figure 9 : Représentation de diverses pressions exercées sur les fonds côtier (Lenfant et al, 20&5)

Qui dit anthropisation dit aménagement côtier. Encore une fois, ces derniers bousculent complètement le mode de vie des espèces présentent, une digue, un épi, un port, un phare… Tels sont les structures posées sur le fond dénaturant totalement le substrat meuble présent, délogeant et supprimant l'habitat originel.

N'oublions pas l'extraction de granulat qui en France représente 7,5 millions de tonnes pour 2% des matériaux de construction (Extraction des matériaux marins, 2012), qui comme le dragage est source de mort pour un grand nombre d'espèces.

Mais comptons aussi les résultats du changement climatique, les rejets des eaux usées des micros et macrodéchets.

La restauration écologique

La restauration écologique est le processus d'aide au rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. (« Restoration in Action - Society for Ecological Restoration » s. d.).

La Méditerranée, très exposé à l'action de l'Homme est un terrain plus que favorable à la restauration écologique.

Plusieurs fonctions nécessaires au bon développement de la biodiversité marine y sont sujettes.

Restauration des fonctions de nurserie.

Lors de leur cycle de reproduction, les poissons se rassemblent sur des zones spécifiques, leur permettant un développement favorable.

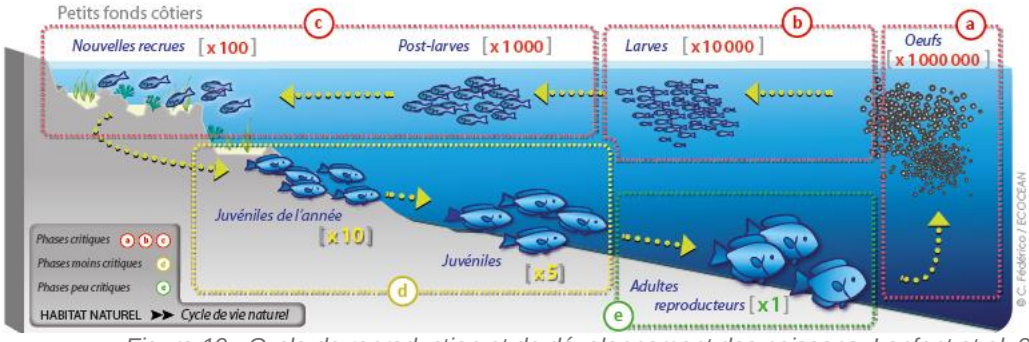


Figure 10 : Cycle de reproduction et de développement des poissons, Lenfant et al, 2015

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus, les posts larves (zone c) s'installent dans les petits fonds côtiers. Cette étape correspond à une phase importante de leur développement et permet une sélection pour ces individus, car cet habitat constitue un abri contre les prédateurs et leur permet d'atteindre une taille suffisante dite « refuge » (Lenfant et al, 2015).

Ce cycle de vie est très important pour permettre une certaine abondance des espèces et leur survie. Seulement la forte anthropisation des côtes brise cette boucle, les constructions très « lisses » des ports et autres aménagements ne constituent en aucun cas un abri pour ces post-larves.

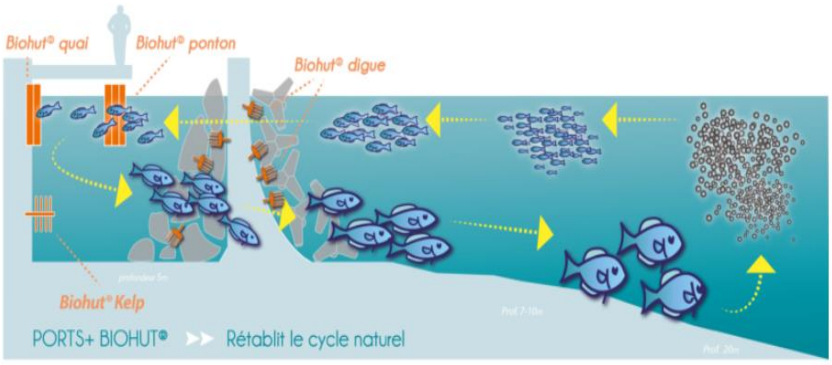


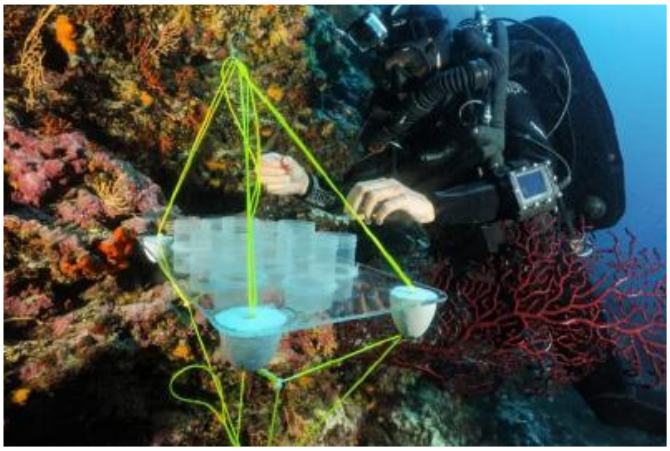
Figure 11 : Illustration du fonctionnement des Biohut (gauche) et photographie des structures immergées (droite). © Ecocean

Les nurseries artificielles *Biohut,* permettent de répondre à ces problématiques, principalement en limitant les impacts sur les ressources (préserver la qualité et quantité des poissons côtiers) et en optimisant la gestion entre ressource et besoin (ports et pêcheurs) © Ecocean.

Actuellement, 33 ports sont équipés des biohuts et présentent des résultats satisfaisants.

Récifs coralligènes

Les coralligènes, écosystème marin complexe d'origine biogénique édifié par l'accumulation d'algues calcaires encroûtantes, abritent une faune variée et constitue un des habitats les plus riches en espèces de la zone côtière méditerranéenne (1700 espèces d'invertébrés 315 espèces d'algues et 110 espèces de poissons, *S. Sartoretto et al*, 2010). Le projet TRANSCOR (2019-2021) de l'association Septentrion vise à mieux comprendre l'adaptation du corail rouge et des gorgones en les transplantant afin de proposer une restauration pérenne.



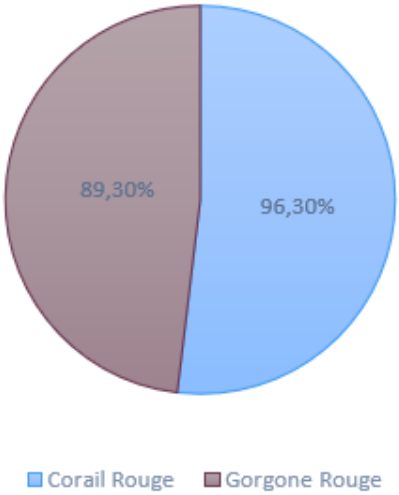


Figure 12 : Photographie du projet TRANSCOR © G. Delaruelle (gauche) et Graphique représentant la proportion de coralligène non nécrosé (droite).

Visiblement, une majorité des gorgones et coraux rouges ne montraient aucun signe de nécrose (2021), les résultats sont donc probants.

Andromède océanologie propose également une solution visant au pompage de matériaux pour dé-ensevelir les coraux en dessous.

Les herbiers

Se plaçant en tête de liste, les herbiers de posidonie constituent l'habitat regroupant le plus de biodiversité en zone côtière de la méditerranée.

Cet écosystème joue un rôle d'une importance capitale pour l'écologie, ils sont de véritables « poumons » marins, leur activité photosynthétique participe à la régulation du taux de carbone qui permet lui-même de réguler le climat et relâche ainsi de l'oxygène. Ils forment des zones d'atténuation de la houle permettant par ce même biais de limiter l'érosion côtière. Les herbiers sont source de nourriture et représentent une zone de frayère et de refuge pour de nombreux organismes (© OFB)

Par exemple, en 2019 Andromède Océanologie a proposé le projet REPIC qui consiste au repiquage des herbiers de posidonie dans une zone impactée par le mouillage.

Figure 13 : Photographie du projet REPIC dans le Golfe Juan (Alpes-Maritimes). © A. Gudefin

Pour ce faire, des faisceaux arrachés (toujours vivants) ont été récupérés pour les replanter dans une zone où le mouillage a été interdit.

Ces trois années d'expérimentation montrent des résultats satisfaisants : plus de 80% de survie dans les quadrats permanents.

Les récifs artificiels

Un récif artificiel est une structure immergée permettant de restaurer un écosystème riche et diversifié. Ces structures peuvent induire chez les animaux des réponses d'attraction, de concentration, de protection et dans certains cas une augmentation de la biomasse de certaines espèces (Gerard et al, 2008).

Ce type de substrat dur est assez rapidement colonisé par des organismes benthiques, profitant à toute la chaîne trophique. Le récif permet à certains de s'y accrocher, à d'autres de s'abriter au même titre qu'une nurserie. Les récifs artificiels permettraient donc une pérennisation de la pêche et le maintien de la biodiversité.

Les récifs artificiels ont d'autres avantages : ils peuvent être utilisés à des fins de protection côtière. Placés à des endroits stratégiques, ces récifs peuvent atténuer la houle et de ce fait limiter l'érosion du trait de côte.

Ces derniers peuvent aussi être utilisés à des fins récréatives : la mer est un espace très convoité par les touristes et amateurs de plongée ce qui signifie un réel apport économique.

Voici un exemple de structure mise en place par l'entreprise SEABOOST, dans le cadre du projet PEGASE visant à lutter contre l'érosion côtière et par le même biais, rétablir certaines fonctionnalités écologiques.

Figure 14 : Illustration des récifs artificiel PEGASE pour la commune d'Agde © SEABOOST

Ce projet est en cours et vise à restaurer les habitats afin de conserver la chaîne trophique des petits fonds côtiers.

Les habitats reproduits par ces types de travaux sont, comme leur nom l'indique des substrats durs, or, comme on le voit sur la figure 14. Cette solution est directement posée sur du sable. Ce qui est problématique, c'est de proposer une solution de restauration sans tenir compte des biotopes et espèces présentes sur site. Le risque est d'amener une biocénose totalement différente en dénaturant celle qui était présente originellement.

C'est pourquoi cette méthode est souvent considérée comme étant à la limite de la restauration écologique, on dit plus souvent qu'il s'agit de réhabilitation.

Prospectives de restauration des fonds meubles

Actuellement, aucune réelle méthode de restauration des fonds meubles n'est recensée. Pourtant, comme vu précédemment ce milieu abrite un écosystème important pour l'homme *(cf. Biocénose et service écosystémique).*

Voici une liste non exhaustive d'idées de restauration réalisables, la plupart de ces propositions s'inspirent des techniques existantes *(cf. La restauration écologique).*

Report de mouillage

Il existe déjà des zones où le mouillage est interdit pour préserver les herbiers de posidonie, étant une espèce protégée. On peut étendre cette réglementation à certains milieux sableux regorgeant d'une faune et flore importante.

Par exemple, au niveau de la flèche de la plage de l'Espiguette, un bon nombre de plaisanciers profitent donc de ce plan d'eau protégé des vents violents. Cette zone est sur fréquentée, en témoigne cette photographie de *M. Dubardier.* Actuellement, aucune réglementation n'existe hormis des bouées pour délimiter une zone de baignade.

Figure 15 : Photographie de la surfréquentation de la flèche de l'Espiguette

Le site marque l'extrémité nord de la zone Natura 2000 des bancs sableux se l'Espiguette (FR9102014) (*ZMODELE : Projet Espiguette*, s. d.). Il présente une faune et flore importante, des hippocampes à museau court, des syngnathes (figure 16), des casserons bambou, Théthys et des rougets-barbets.

Figure 16 : Photographie d'hippocampe à museau court et d'une Syngnathe (Aquaportail)

La présence et l'observation de ses espèces permettent de surveiller la dynamique écologique du site au regard de la qualité de l'eau et des conditions hydro sédimentaires. (*ZMODELE : Projet Espiguette*, s. d.)

Le but est de créer une zone de mouillage organisée pour contrôler la fréquentation du site et éviter la destruction de ce biotope, comme c'est déjà le cas pour les herbiers de posidonie. C'est le projet ZMODELE qui travaille là-dessus pour la commune du Grau du roi.

Aires marines protégées

Étendre les aires marines protégées à certains fonds meubles semble être judicieux afin de protéger certaines espèces rares (par exemple la Maërl, gouania …)

Pêche industrielle et chalutage

On l'a vu, le chalutage et la pêche commerciale sont nocifs pour l'environnement marin. Il serait nécessaire de diminuer de façon drastique ces pratiques, surtout le chalutage des fonds.

Concernant la pêche commerciale, il faudrait privilégier les techniques ne rasant pas le plancher, comme la palangre, la senne, la canne. Évidemment cela doit passer par une baisse de la consommation de poisson ou privilégier les pêcheurs locaux. Par ce biais, on peut restreindre les pêches.

Pourquoi ne pas développer une technique de pêche plus respectueuse de l'environnement ? Utiliser des filets biodégradables en cas de perte de matériau dans l'eau, qui permettrait en plus aux poissons de s'y échapper. Pourquoi ne pas revenir à des techniques ancestrales comme les nasses à poisson.

L'Ifremer utilise un système d'identification des espèces entrant dans les filets afin d'identifier la présence d'espèce accessoire couplé à un dispositif permettant de les laisser s'échapper.

Nettoyage des fonds

Les déchets, les hydrocarbures, sont fatals pour la biocénose des fonds meubles.

Une méthode de restauration possible serait de proposer un nettoyage des fonds marins, pour restituer l'habitat originel.

Algues artificielles

Les sables ne constituent pas une frayère à eux-mêmes, c'est en fait la flore de ce milieu qui constitue un abri. Étant donné la destruction observée sur ces espèces, une technique de restauration intéressante consisterait à implanter des herbiers ou algues de synthèse. Non pas dans l'optique de restaurer la faune, mais plutôt de restaurer l'habitat afin de permettre à la vie de reprendre.

Elles peuvent être fabriquées synthétiquement (avec des matières biologiques, cordes de coco ou de chanvre). Ce serait une solution temporaire permettant à la biodiversité de se reconstruire petit à petit.

Le dragage

Les dragages sont souvent utilisés sur nos côtes pour recharger des plages, l'impact de telles choses est énorme, et bien souvent les résultats sont moindres (le système revient à son état initial).

C'est un procédé à bannir qui a plus de mauvaises que de bonnes conséquences.

Amélioration de la gestion lors d'aménagements

Comme expliqué au-dessus, les aménagements côtiers sont également des nuisibles. Afin qu'ils le soient moins, il serait nécessaire de faire des bilans écologiques des milieux afin de trouver la plus adaptée.

L'écoconception serait une solution intéressante dans le cadre de l'aménagement côtier.

Solutions fondées sur la nature

Il existe actuellement des solutions fondées sur la nature utilisée pour l'aménagement côtier ayant une utilité écologique.

Par exemple, l'entreprise P2A Développement a développé une solution permettant d'atténuer la houle (à l'image des herbiers de posidonie) tout en créant une zone de nurserie.

Figure 17 : Photographie de la solution proposée par (« P2A Développement » s. d.)

Il est également possible de proposer d'autres types d'aménagement de cette façon, par exemple, il existe un dispositif (© S-Able) permettant de reconstruire les barres d'avant côte *(bancs de sable immergés permettant de protéger les plages qu'elle abrite*) à l'aide d'un filet conçu pour, ne pas piéger les poissons, mais les sédiments lors de leur transit et ainsi recréer une barre sableuse, étant le même substrat qu'à l'origine.

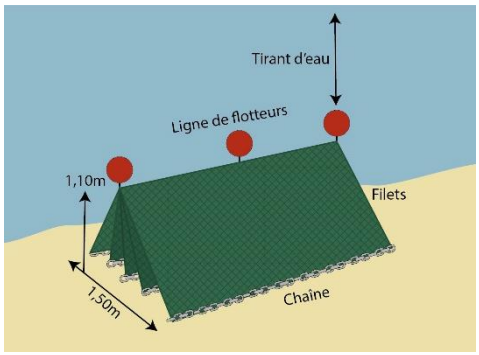


Figure 18 : Illustration de la solution de protection proposée par S-Able (© C.Steinmetz)

Discussion

Quelles sont les limites des mesures de restauration ?

On l'a vu, les solutions sont nombreuses et celles présentées offrent de nombreux avantages.

Seulement, on peut noter des limites à certaines d'entre-elles.

Par exemple, les récifs artificiels qui sont une reconstitution d'un substrat dur sont posés sur un fond meuble.

C'est plutôt contre nature d'imposer un biotope fondamentalement différent, on attire des espèces qui ne sont pas du tout de ce milieu, en plus de détruire le milieu présent sous l'ouvrage.

Les récifs mis en place pour attirer des plongeurs et touristes sont contre-productifs et ne font que « déplacer » le problème, ça peut ne pas être considéré comme étant à la limite de la définition de restauration écologique.

« Les pêcheurs vont pouvoir continuer à tirer leurs chaluts sur les fonds des zones marines officiellement protégées de l'Union européenne »(*Le Monde.fr* , 2022), tels sont les récentes nouvelles concernant le chalutage. On peut se demander, comment sommes-nous censés avancer dans la protection de l'environnement littoral avec de telles décisions politiques.

L'avantage de ces mesures concerne leur facilité de mise en place, ce ne sont pas d'aussi gros travaux que certaines méthodes. Il faut réussir cependant à convaincre les décideurs de mettre en place ces solutions alors que les connaissances de ce domaine ne sont pas très importantes.

Conclusion

L'élaboration de ce rapport a permis de mettre en avant la faune et la flore associée au milieu sableux, mais aussi et surtout tout le service écosystémique qui en découle. Ce qui a permis de rendre compte de l'intérêt que nous avons à le conserver.

Il a été possible de montrer qu'a ce stade de connaissance du domaine sableux, il n'est pas forcément possible d'apporter de réelle proposition de restauration, mais plutôt des éléments pour réduire les pressions pour ne plus le dégrader. Ainsi, si nous en avons conscience il serait possible d'éviter d'arriver à un seuil d'altération et donc de restauration.

Ces solutions de protection concernent la création de mouillage écologique, le nettoyage des fonds marins, la création de zones de frayère compatible au sable, une gestion raisonnée de la pêche et des aménagements côtiers.

Des limites quant aux méthodes existantes sont notables et peuvent être sujettes à débat, comme lors de la pose de récifs artificiels amenant un biotope associé au substrat dur sur des sédiments meubles.

In fine, la restauration écologique est une science nouvelle dont les résultats actuels sont satisfaisants. Il faut étendre ce savoir aux autres types de support afin de ne laisser aucun milieu de côté.

Au vu de l'état actuel de la biodiversité marine il est je pense, plus que nécessaire d'intégrer la restauration écologique comme étant un pilier des fonds marins côtiers.

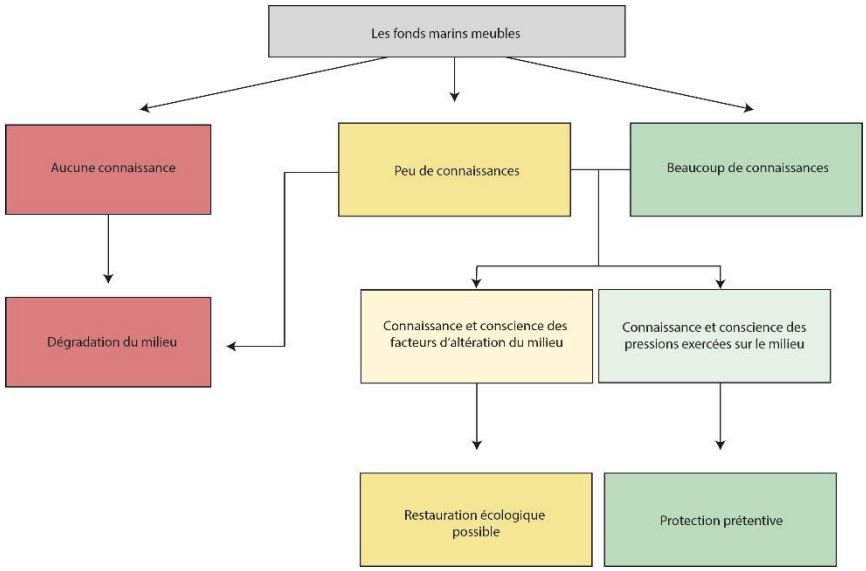


Figure 19 : Schéma récapitulatif sur la restauration écologique des fonds meubles.

Ce schéma permet de résumer l'importance de la connaissance des fonds meubles pour permettre un meilleur maintien de son état écologique.

Bibliographie

« Adriatic nature -Gouania ». s. d. Consulté le 10 mai 2022. https://adriaticnature.com/archives/905.

« Andromède océanologie ». s. d. Andromède Océanologie. Consulté le 12 mai 2022. https://www.andromede-ocean.com/.

« Aquaportail : les Rhodolithes ». s. d. Consulté le 9 mai 2022. https://www.aquaportail.com/definition-4624-rhodolithe.html.

Arévalo, Catalina, et Lourdes Lazaro Marin. 2017. « L'information environnementale en Méditerranée. Guide sur les questions et institutions pertinentes pour les journalistes. »

Atlas permanent de la mer et du littoral. s. d. Vol. 5. http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-r9.html.

« Biopix , le rouget barbet ». s. d. Consulté le 9 mai 2022. http://www.biopix.eu/rouget-barbet-de-roche-mullus-surmuletus_photo-16931.aspx.

« Caulerpe de Méditerranée ». 2018. Institut océanographique Paul Ricard. 6 septembre 2018. https://www.institut-paul-ricard.org/especes_aquarium/caulerpe-de-mediterranee/.

Coll, Marta, Chiara Piroddi, et Jeroen Steenbeek. 2010. « The biodiversity of the Mediterranean Sea : Estimates, Pattern, and Threats ». In . Vol. 5.

Curry, Philippe, et Serge Morand. s. d. « Biodiversité marine et changements globaux : une dynamique d'interactions où l'humain est partie prenante. (Chapitre 3) ». In .

Delaruelle, Gwénaëlle. 2022. « Restauration des coralligènes et des coraux. » mai 9.

« Fonds meubles | Parc national des Calanques ». s. d. Consulté le 12 mai 2022. http://www.calanques-parcnational.fr/fr/fonds-meubles.

Gudefin, Anaïs. 2022. « Panorama des actions et cas concrets ».

« Hippocampus hippocampus (Hippocampe à museau court) ». s. d. AquaPortail. Consulté le 16 mai 2022. https://www.aquaportail.com/fiche-poisson-495-hippocampus-hippocampus.html.

« La pêche aux tellines en Méditerranée ». s. d. Consulté le 9 mai 2022. https://www.midilibre.fr/2017/07/19/la-peche-en-mediterranee-gerald-tellinier-de-pere-en-fils,1538085.php.

« Le chalutage: une méthode de pêche destructive qui transforme les fonds marins en « déserts » ». 2014. Nouvelles de l'environnement. 9 septembre 2014. https://fr.mongabay.com/2014/09/le-chalutage-une-methode-de-peche-destructive-qui-transforme-les-fonds-marins-en-deserts/.

Le Monde.fr. 2022. « Bras de fer sur le chalutage de fond dans les aires marines protégées de l'Union européenne », 3 mai 2022. https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/05/03/bras-de-fer-sur-le-chalutage-de-fond-dans-les-aires-marines-protegees-de-l-union-europeenne_6124612_3244.html.

Lenfant, Philippe, Gilles Lecaillon, Anaïs Gudefin, et James Aronson. 2015. « Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée ».

« Les herbiers marins : des prairies sous-marines au rôle écologique considérable. » s. d. Consulté le 30 avril 2022. https://www.ofb.gouv.fr/les-herbiers-marins-des-prairies-sous-marines-au-role-ecologique-considerable#:~:text=Une%20plante%20embl%C3%A9matique%20de%20M%C3%A9diterran%C3%A9e%20%3A%20la%20Posidonie&text=Les%20herbiers%20%C3%A0%20posidonies%20accueilleraient,%2C%20Baucour%20Colombe%20(2012).

« Mer et océans, le média des mers ». 2019. 2019. https://www.mer-ocean.com/le-camouflage-de-la-sole-reperee-par-un-plongeur-nocturne/.

« Oceanopolis : Maërl ». s. d. Consulté le 9 mai 2022. https://www.oceanopolis.com/maerl.

« P2A Développement ». s. d. P2A Développement. Consulté le 16 mai 2022. https://www.p2adev.com/galerie.

« PEGASE : PROTECTION CONTRE L'EROSION DU LITTORAL DU GRAU D'AGDE ET SAUVEGARDE DES ECOSYSTÈMES ». s. d. Consulté le 2 mai 2022. https://www.seaboost.fr/projet/pegase-protection-contre-lerosion-du-littoral-du-grau-dagde-et-sauvegarde-des-ecosystemes/.

« Pôle-relais lagunes méditerranéennes ». s. d. Consulté le 9 mai 2022. https://pole-lagunes.org/synthese-statistique-sur-la-facade-mediterraneenne/.

« Réseau national des observatoires du trait de côte ». s. d. http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-r9.html.

« Restauration écologique par Ecocean ». s. d. Consulté le 30 avril 2022. https://www.ecocean.fr/restauration-ecologique/.

« Restoration in Action - Society for Ecological Restoration ». s. d. Consulté le 14 mai 2022. https://www.ser.org/page/RestorationinAction.

Sartoretto, Stéphane, Colombe Baucour, et J Harmelin. 2012. « Caractéristiques biologiques -biocénose. Habitat particulier : le coralligène. »

Service du Patrimoine Naturel, Denise Bellan-Santini, et Gérard Bellan. 2012. « Caractéristiques et état écologique, Biocénoses des fonds meubles de l'infralittoral en méditerranée occidentale. »

Thievent, Philippe, Pierre Boissery, et Gilles Boeuf. 2016. « Biodiv'2050, Biodiversité marine: usages et dépendances. »

Véron, G, J Denis, E Thouard, O Thébaud, et A Gérard. 2008. « Les récifs artificiels, état des connaissances et recommandations ».

ZMODELE : Projet Espiguette. 2020.

Annexe 19

Restauration écologique des milieux lagunaires, quelles possibilités et quels résultats ?

Par Laura THOMAS-SLEIMAN

Faculté des sciences de
l'université de Montpellier

Diplôme d'Université (DU) « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Restauration écologique des herbiers en milieux lagunaires des côtes méditerranéennes françaises : quelles possibilités et quels résultats ?

Année 2022

Laura Thomas-Sleiman,
encadrée par Anaïs Gudefin

Table des matières

Introduction **1**

1. Contexte *1*

2. Objectif *2*

Méthode d'analyse **3**

1. Définitions *3*

Restauration écologique 3

Réhabilitation écologique 4

État de référence 4

Nurseries 4

2. Méthode d'analyse *4*

Analyse **6**

Restauration des herbiers sur la lagune du Brusc dans le cadre du projet SAR-LAB *6*

Objectif 6

Méthode 6

Suivis et résultats de la transplantation 7

Suivis et résultats de la fonction de nurserie 7

Transplantation de zostères dans l'étang de Berre *8*

Objectif 8

Méthode 8

Suivis et résultats 9

Réimplantation d'herbiers sur les étangs de Thau, Ingril et Bages *9*

Objectif 10

Méthode 10

Suivis et résultats 10

Discussion **12**

Conclusion **16**

Bibliographie **17**

Introduction

1. Contexte

Au cours du temps, les pressions anthropiques exercées sur les habitats naturels ont mené à la détérioration de leurs fonctions écosystémiques. Malgré les efforts parfois payants pour éviter la pollution et la poursuite de cette dégradation, de nombreux écosystèmes voient leurs fonctions altérées. Parmi ces écosystèmes, les petits fonds marins de méditerranée ont été sévèrement impactés que ce soit par de fortes pollutions, par diverses activités anthropiques ou encore par l'artificialisation du littoral (Anonyme, s.d.). Au sein de ces milieux aquatiques côtiers, nous retrouvons les lagunes, particulièrement vulnérables en raison de leur fonctionnement dynamique. La variation naturelle de leur salinité et de leur volume d'eau, et leur connexion avec le milieu marin plus ou moins limitée par une barrière physique ou temporelle, rendent leur gestion complexe. L'exposition aux eaux douces par le bassin versant peut notamment conduire à des pollutions régulières. Elles sont aussi affectées par les espèces exotiques envahissantes et le changement climatique. Les lagunes fournissent de nombreux services écosystémiques comme la régulation de la qualité de l'eau et le maintien du cycle de vie des espèces marines. Elles sont aussi un support à la culture alimentaire, au tourisme, aux loisirs et aux sports. Ces activités engendrent de nombreuses pressions tels que l'eutrophisation du milieu, due à un apport excessif de nutriments, notamment le phosphore et l'azote ou encore la perturbation du fonctionnement hydraulique naturel des lagunes. Malgré cela, les lagunes font parties des écosystèmes les plus productifs (Kennish & Paerl, 2010). Elles représentent un habitat pour de nombreuses espèces et rassemble une hétérogénéité d'habitats servant de nurserie à de nombreuses espèces de poissons (Hébert et al, 2012). Cependant, les lagunes eutrophisées peuvent être problématiques pour les espèces y vivants, notamment lors de fortes chaleurs et en cas d'absence de vent (Hébert et al, 2012), des évènements rares qui peuvent intervenir plus fréquemment avec le changement climatique global. Il est donc crucial de protéger cet habitat.

A l'échelle mondiale, les lagunes représentent 13 % des zones côtières (Barnes, 1980). En France, on compte 22 complexes lagunaires, c'est-à-dire les lagunes et leurs zones humides périphériques, rien que sur le littoral méditerranéen (Sy, 2019). Par différentes réglementations, ces habitats sont de plus en plus gérés et protégés. Les lagunes sont notamment reconnues comme habitat d'intérêt communautaire prioritaire selon la Directive Habitat Faune et Flore (DHFF) et certaines sont protégées grâce au statut d'aire marine protégée (AMP). Elles sont

aussi reconnues comme masse d'eau de transition par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), visant l'atteinte du bon état écologique pour toutes les masses d'eau d'ici 2027. Pour cela, de nombreux efforts furent menés afin de lutter contre la pollution de ces écosystèmes et stopper leur dégradation. Néanmoins, pour certaines lagunes, ces actions ne sont pas suffisantes et il devient crucial d'entreprendre des actions de restauration. La restauration écologique fait d'ailleurs maintenant partie des objectifs fixés par la DCE et la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Pour cela, il y a d'abord un besoin de rendre compte de l'état de conservation et de fixer un état optimal, tout en incluant les différents services écosystémiques. L'un des habitats présents dans les lagunes et participant à évaluer son état de conservation sont les herbiers de plantes phanérogames. Ces herbiers sont des espèces et des habitats remarquables représentant un habitat pour 20 à 25 % de la biodiversité méditerranéenne (Institut Paul Ricard, s.d.). Cependant, ces habitats sont aujourd'hui marqués par leur recul ou leur fragmentation, ce qui les fragilise (Anonyme, s.d.). Ils sont pourtant d'une importance écologique et économique cruciale pour plusieurs raisons. Premièrement, ils participent fortement à la production primaire dont vont dépendre d'autres espèces du réseau trophique. Ensuite, ils jouent un rôle majeur de stabilisation du sédiment (Thibault, 2011), ils captent le carbone atmosphérique et participent à la limitation de la houle et de l'érosion des côtes. Enfin, ils représentent un habitat essentiel pour plusieurs espèces, notamment comme habitat nurserie pour de nombreux juvéniles de poissons (Couvray, 2020 ; Thibault, 2011). En effet, le cycle de vie des poissons passe par différentes phases de croissance s'effectuant dans des habitats différents. La phase d'installation des post larves est limitée par la présence d'habitats favorables. Il est ainsi nécessaire et important de conserver cet habitat lagunaire et d'entreprendre des actions de restauration afin de tendre à rétablir les fonctions écologiques perdues.

2. Objectif

L'objectif de ce rapport est de faire un état des lieux non exhaustif de différents projets de restauration écologique d'herbiers dans les lagunes de la côte méditerranéenne française, afin d'étudier leurs spécificités, les outils mis en place et les résultats obtenus. En effet, chaque lagune étant très différente par leurs critères physico-chimiques et morphologiques, nous souhaitons ici pouvoir discuter des différences entre ces travaux. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. Quels sont donc les différents outils de restauration d'herbiers ayant été mis en place dans les lagunes ? Pour restaurer quelles fonctions écosystémiques ont-ils été mis en

place ? Quels résultats ont-ils eu ? En résumé, quelles sont les possibilités de restauration des herbiers en milieux lagunaires sur les côtes méditerranéennes françaises, et quels résultats ont-elles donné ?

Pour répondre à cette question, nous avons tout d'abord développé une méthode d'analyse que nous avons ensuite appliquée à trois différents projets de restauration d'herbier afin de les analyser, puis de comparer les résultats obtenus et de les discuter afin de mettre en avant une perspective de standardisation de ces méthodes.

Méthode d'analyse

1. Définitions

Tout d'abord, il est important de comprendre ce qu'est et en quoi consiste la restauration écologique. En effet, de nombreuses actions se disent être des solutions de restauration écologique mais s'apparentent finalement plus à de la réhabilitation ou encore à des mesures accompagnatrices de restauration, pouvant être des actions de bioingénierie ou de remédiation à un problème écologique par le biais d'une solution biologique.

Restauration écologique

Selon la société de restauration écologique (SER), la restauration écologique est définie comme le processus d'accompagnement vers la résilience d'un écosystème dégradé, détruit ou abimé (SER, 2004). Plus précisément, elle désigne une activité intentionnelle initiant ou accélérant le rétablissement d'un écosystème, en prenant en compte sa composition, la structure de ses communautés, ses fonctions écologiques, sa cohérence avec l'environnement et sa connectivité avec le paysage alentour. Elle vise donc à rétablir l'intégrité biotique préexistante (Anonyme, s.d.). Il est ainsi crucial de définir, pour toute action de restauration écologique, un état de référence vers lequel tendre. Les travaux du programme DRIVER (2015), ont ajouté à cette définition que les actions de restauration écologique peuvent cibler un habitat, la faune ou la flore, dans une zone où la qualité de l'eau est bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation sont absentes ou maîtrisées (Ruyssen, 2019).

Nous distinguons la restauration écologique active, incluant une action directe de l'Homme sur l'environnement (réintroductions d'espèces, mise en place de modules techniques...) de la restauration écologique passive, consistant en une suppression des pressions exercées sur l'écosystème dégradé et à miser sur sa capacité propre de régénération vers un état souhaité.

Réhabilitation écologique

La réhabilitation est souvent confondue avec la restauration écologique. Bien que visant également comme référence les écosystèmes préexistants, elle vise surtout la réparation et la récupération des processus de productivité et des services que fournissent l'écosystème, sans tenir compte de l'intégrité biotique préexistante (Aronson et al., 1995).

État de référence

Selon Lenfant et al. (2015), l'écosystème de référence est l'objectif final vers lequel on souhaite tendre. C'est un état choisi, parmi plusieurs états possibles, accessible par une succession d'étapes servant de trajectoires.

Nurseries

Nous pouvons identifier les nurseries selon quatre critères (Beck et al., 2004) :

- L'abondance des individus est plus importante qu'ailleurs ;
- Le taux de survie des individus est supérieur que dans d'autres zones ;
- La croissance des individus est supérieure que dans d'autres zones ;
- L'habitat permet aux individus d'atteindre leur taille refuge (taille qui permet de ne pas être prédaté) et leur migration vers les habitats adultes.

2. Méthode d'analyse

Les différents projets ont été évalués en fonction des questions suivantes :

- Le projet est-il mis en place à des fins de restauration écologique ou répond-il à d'autres attentes ?
- L'action mise en œuvre est-elle cohérente vis-à-vis de l'état de l'écosystème ? En effet, des actions de restauration sont possibles lorsque l'écosystème est proche de celui de référence, perturbé ou éventuellement dégradé avec une possibilité de retour à un état souhaitable en entreprenant une action de restauration. Autrement, si l'écosystème est trop dégradé, les actions possibles sont de l'ordre de la réaffectation vers une autre utilité (Figure 1).
- Quelles sont les solutions techniques employées pour répondre à la problématique rencontrée ?
- Un suivi permettant d'évaluer la restauration est-il mis en place et si oui, comment ?

Quels ont été les résultats obtenus ?

Deux autres questions cruciales mais non traitées dans ce travail sont importantes à prendre en compte lors de l'analyse d'une méthode de restauration :

- Quels sont les moyens financiers pour mettre en œuvre cette restauration ?
- Quelles ont été les autorisations administratives et règlementaires pour appliquer ces solutions ?

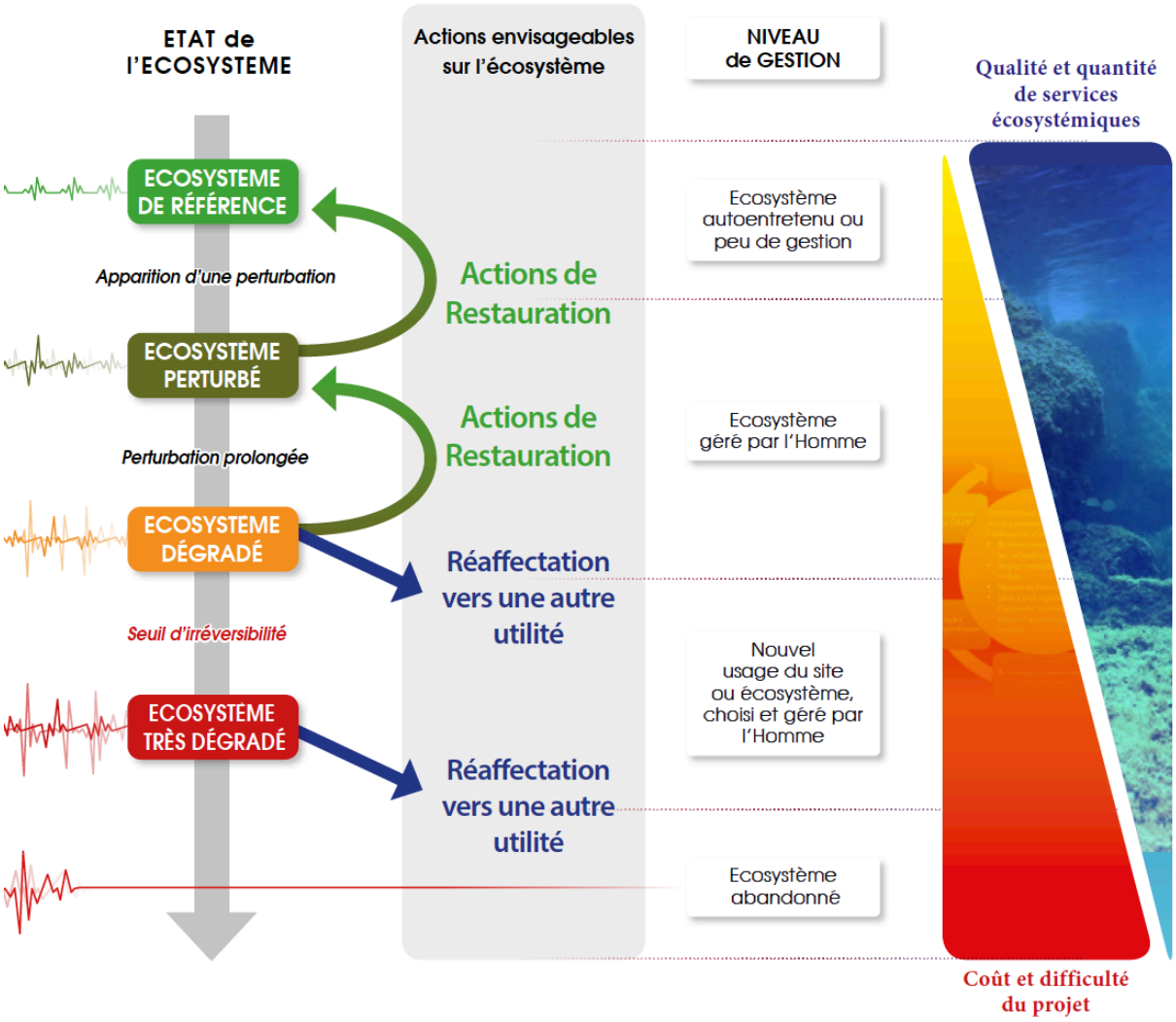


FIGURE 1. LES ACTIONS POSSIBLES DU GESTIONNAIRE, EN FONCTION DE L'ETAT DE DEGRADATION DE L'ECOSYSTEME. LE NIVEAU DE GESTION POST-RESTAURATION DEPENDRA DU NOUVEL ETAT DE L'ECOSYSTEME (LENFANT ET AL., 2015).

Analyse

Parmi les actions possibles de restauration active, il existe la réintroduction d'espèces ingénieures (qui construisent un habitat), comme les herbiers de magnoliophytes. En effet, il est possible de transplanter ces plantes, et ce de différentes manières. Dans ce rapport, trois projets de restauration écologique sur les herbiers ont été analysés :

- Le projet SAR-LAB, concernant la restauration des herbiers sur la lagune du Brusc ;
- La transplantation de zostères dans l'étang de Berre ;
- La réimplantation d'herbiers sur l'étang de Thau, d'Ingril et de Bages Sigean.

Restauration des herbiers sur la lagune du Brusc dans le cadre du projet SAR-LAB

Le projet SAR-LAB est un projet de restauration écologique de la lagune du Brusc, située sur les côtes françaises méditerranéenne, dans le département du Var. Cette lagune présente une morphologie différente des autres lagunes car elle est isolée de la mer par une barrière de posidonie plutôt que par un lido, et fonctionne ainsi comme un lagon. Cette lagune avait en son sein un herbier de Cymodocée (*Cymodocea nodosa*) dont la surface a régressé de 30 ha entre 2008 et 2010 principalement à cause des rechargements en sable des plages environnantes, engendrant une perte de fonctions écologiques de la lagune. En 2017, suite à l'observation d'une repousse naturelle, des travaux de restauration écologique de ces herbiers ont pu être envisagés.

Objectif

L'un des nombreux objectifs du projet SAR-LAB était de valider la capacité de restaurer cette espèce d'herbier par transplantation, servant d'appui à la population déjà existante, en augmentant sa surface, et ces herbiers peuvent présenter une fonction de nurserie. Aussi, l'idée est de pouvoir laisser, à terme, les herbiers transplantés en autonomie sans qu'aucune gestion ne soit nécessaire, recouvrant ainsi l'état de l'écosystème de référence.

Méthode

La restauration de l'herbier a été réalisé par transplantation de rhizomes bouturés issus d'un site donneur à proximité, qui sont ensuite protégés par des grilles limitant le broutage par les saupes. Cette méthode avait déjà été testée à plus petite échelle lors des programmes LANDEAU en 2014 et 2015. 4 m² ont été prélevés dans l'herbier ancestral, avec un transport entre la zone de

prélèvement et la zone de transplantation court (maximum une centaine de mètres). 10 modules de 8 unités de transplantation de 1 m² accueillant chacun 100 faisceaux de Cymodocée ont pu être installés dans la lagune, sur un corridor de 140 m de long, dans une ancienne zone de présence de l'herbier de Cymodocée. Ce site d'habitat sableux était situé entre deux zones connues de nurseries. L'installation de ces modules représente 250 m^2 dont 80 m^2 de transplantation d'herbier, ce qui représente 8000 faisceaux transplantés.

Suivis et résultats de la transplantation

Le suivi des herbiers transplantés s'est fait par mesures de la densité des faisceaux et de l'extension des herbiers. Des comptages bimensuels furent faits sur 3 unités de transplantation de 3 modules.

Après les premières semaines, la survie et la pousse des boutures ont été observées. En août, période connue pour être au pic annuel de pousse, il a été mesuré en moyenne 643 faisceaux/m^2, soit une augmentation d'un facteur 6 par rapport à ce qui avait été planté. La diminution naturelle dès la fin du mois d'août et jusqu'au mois de février reste supérieure à ce qui avait été transplanté au départ et il y a eu une reprise de croissance dès le mois de mars 2019. De plus, les stolons se sont également étendus et ce dès la première année. 30 cm d'extension furent constatés en juillet 2018, puis en août 2019, une extension d'un mètre, avec une variation selon la zone sur le corridor.

Suivis et résultats de la fonction de nurserie

La détermination de la composition des communautés ichtyologiques a été effectuée par des comptages visuels de juvéniles sur différents habitats : le corridor de Cymodocée transplanté, un herbier naturel représentant la cible à atteindre et une zone sableuse sans herbier, représentant la zone témoin.

Le suivi s'est fait via deux méthodes :

- Des comptages bimensuels en points fixes, sur une surface d'1 m^2 des modules centraux de transplantation de Cymodocée, en comparaison à la zone cible et à la zone témoin ;
- Des comptages le long de transects sur les trois habitats étudiés.

Au niveau de la zone témoin, seuls quelques juvéniles de la famille des Gobiidae ont été observés. Comme attendu, il n'y a donc pas de fonction de nurserie pour cet habitat. La fonction de nurserie semble être similaire entre la zone de référence et le corridor de Cymodocée transplantées, avec environ 13 taxons identifiés sur les deux zones. En revanche, les abondances relatives les plus représentées des différents taxons ne se sont pas équivalentes entre la zone de

Cymodocée transplantée et celle naturelle. Les quatre espèces les plus abondantes dans le corridor de Cymodocée transplantées appartiennent toutes à la famille des Sparidae et ont atteint leur stade de jeunes adultes. La Cymodocée transplantée leur a donc servie de nurserie. Il a aussi été montré que cette zone fut utilisée comme habitat temporaire par les adultes. Enfin, les modules centraux semblent avoir été déterminants pour attirer les individus sur la zone corridor, jouant un rôle de protection pour ces derniers.

Transplantation de zostères dans l'étang de Berre

La surface des herbiers de zostères de l'étang de Berre, dans le département des Bouches-du-Rhône, a historiquement chuté en raison des diverses pollutions par les industries environnantes. La surface est passée de 6000 ha à 1 ha entre 1965 et 1995. Malgré une amélioration des conditions environnementales, la surface des herbiers n'a pas augmenté. Le GIPREB (Gestion Intégrée Prospective et Restauration de l'Étang de Berre) vise ainsi la restauration de ces herbiers, qui doit couvrir 50 % de la surface végétalisée de l'étang pour prétendre au bon état écologique fixé par la DCE. Ainsi, des transplantations de deux espèces de zostères ont été réalisées au printemps 2009, *Zostera noltii*, présente naturellement au moment du projet, et *Zostera marina*, ponctuellement observée depuis 1972.

Objectif

L'objectif de la réimplantation était de savoir si la non-progression des herbiers présents était liée à une faible capacité intrinsèque aux populations ou à d'éventuelles mauvaises conditions environnementales du milieu. L'étude visait également à connaitre dans quelle mesure la réimplantation de l'herbier à plus grande échelle serait envisageable (EAU France, 2011).

Méthode

Des prélèvements de 5 m^2 sur l'herbier le plus proche en dehors de la lagune (Anse de Carteau) ont été faits. Les transplants ont été faits en mai 2009, sur 6 sites anciennement couverts d'herbiers (moins de 20 ans avant), dont deux sont à proximité de l'herbier relique (herbier déjà présent). Les sites ont été sélectionnés selon les différentes contraintes : profondeur, hydrodynamisme, rejets urbains et industriels, zones portuaires…

Sur chaque site, des transplants ont été disposés sur 3 transects de 30 m, parallèlement au trait de côte, dont un transect de *Z. noltii* contenant 30 boutures de rhizome, un transect de *Z. noltii* contenant 15 mottes et un transect de *Z. marina* contenant 30 boutures de rhizome. Ceci

représente donc 75 transplants par site, chaque transplant mesurant 12 cm de diamètre. Les herbiers ont été plantés à une profondeur entre 0.8 et 1.2 m.

Suivis et résultats

Les suivis ont été faits sur 4 ans, de 2009 à 2012. La survie et la croissance des transplants ont été surveillées (dont le diamètre maximum du transplant, la longueur des feuilles, la densité de faisceaux et l'état général du transplant).

Après 2 ans, les deux espèces n'avaient survécu que sur 3 des 6 sites. Cependant, les résultats concernant les taux de survie et la croissance des deux espèces étaient encourageants. Le diamètre des transplants de *Zostera noltii* a été multiplié entre 7 et 16 fois et le nombre de faisceaux fut multiplié de 20 à 100 fois (GIPREB Syndicat mixte, 2011; Bernard, 2022). En ce qui concerne *Zostera marina*, des croissances très fortes et des fructifications ont été observées, et les taux de survie atteignaient jusqu'à 53 %.

Après 4 années, les transplants n'ont survécu que sur 2 des 6 sites, soit 1/3 de réussite et avec des taux de survie très faibles. Sur le point témoin (herbier relique), il n'y a pas eu de progression significative. Le vent aurait joué un rôle en diminuant la lumière ambiante et en brassant les boutures (Dandine, 2013). *Zostera noltii* semble être l'espèce qui a le mieux persisté, dont le diamètre a augmenté pendant 4 ans dans l'un des sites. *Zostera marina* persistait bien sur l'un des sites jusqu'en 2012 puis un seul transplant étant encore vivant en 2013. Le taux de survie ne différait pas selon la technique employée (motte ou transplant).

Le déclin des transplants et le fait que l'herbier relique se maintienne mais ne progresse pas montre que les conditions environnementales ne permettent pas la recolonisation des herbiers de zostères vers le large (Dandine, 2013). Ce projet présente par contre une forte variabilité entre les différents sites de la même lagune.

Réimplantation d'herbiers sur les étangs de Thau, Ingril et Bages

Selon le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et dans le plan de développement durable du littoral (PDDL), l'eutrophisation est un paramètre prioritaire des lagunes pour atteindre leur bon état écologique. Le compartiment sédimentaire, en stockant les nutriments, peut entretenir l'eutrophisation des milieux lagunaires (Hébert et al., 2012).

En dehors du rôle écologique d'habitat que jouent les herbiers, ils représentent aussi un piégeage intéressant d'éléments nutritifs, une stabilisation et une oxygénation du substrat

(Hébert et al., 2012). Pour la réimplantation d'herbiers, il faut un niveau d'eutrophisation acceptable et des conditions physico-chimiques particulières, ce qui implique l'idée de non-pollution préalable à toute action de transplantation. La réimplantation faite dans ce projet a donc été effectuée sur 3 lagunes ayant été eutrophisées par le passé ; l'étang de Thau, de Bages Sigean et d'Ingril ; afin de mettre en évidence le rôle des herbiers dans le piégeage des nutriments contenus dans le sédiment. Ainsi, des transplantations de *Ruppia cirrhosa* et *Zostera noltii* ont été faites en octobre 2007 et en mai 2008.

Objectif

L'objectif du projet était d'étudier la faisabilité technique et de déterminer les conditions optimales de la réimplantation des herbiers à petite échelle (14 m^2 par site) afin d'éventuellement poursuivre à plus grande échelle pour dépolluer les sédiments des lagunes.

Méthode

Deux méthodes de transplantation furent employées. Des mottes d'herbier (faisceaux et matte) furent prélevées et placées dans des trous et des boutures de rhizome furent placées sur le fond sédimenteux à l'aide de tuteurs. Le prélèvement des phanérogames venant du même site dans des zones denses a été réalisé avec un carotteur. Sur les sites de réimplantation, deux catégories de profondeur ont été testées (0-0,5 m et 0,5-1 m) avec deux méthodes de réimplantation différentes. Pour les boutures, deux densités ont été testées (25 plants /m^2 et 49 plants /m^2). Sur la zostère, les différentes études ne s'accordent pas : pour certaines la meilleure période de réimplantation est en automne, pour d'autres c'est au printemps. Ici, des essais ont été réalisés sur la lagune de Thau pour la période automnale.

Suivis et résultats

Différents suivis ont été mis en place :

- Des comptage de plants et une estimation de la surface de recouvrement (présence/absence et comptage des faisceaux respectivement) ;
- Des suivis sur les sédiments (azote et phosphore) et les paramètres physico-chimiques (température, salinité) (résultats non développés ici) ;
- La capacité des herbiers réimplantés à pomper les nutriments, permettant de voir s'ils contribuent à l'accélération de la restauration du compartiment (résultats non développés ici).

Sur les 3 sites, les mottes ont présenté un meilleur taux de survie que les boutures. Ces résultats se sont poursuivis sur les 5 premiers mois de suivis. Cette méthode a aussi été plus simple et plus rapide à mettre en place et a mieux résisté aux tempêtes. Globalement, les deux types de méthode ont présenté un meilleur taux de survie sur la profondeur faible (0-0.5 m). Après 5 mois, il y a eu une disparition quasiment totale des différents types de réimplantation avec un rare cas présentant 12,5 % de survie. Le projet a aussi permis de mettre en évidence que les différents substrats entre les sites ne semblent pas présenter un problème pour la méthode de réimplantation en elle-même. Par contre, la turbidité, l'épiphytage et l'accumulation de macroalgues semblent avoir été des facteurs limitants de la réussite de la réimplantation. Dans ce projet, la faisabilité de réimplantation d'herbiers à grande échelle n'a donc pas été démontrée.

Discussion

La réimplantation d'herbiers est aujourd'hui toujours en phase expérimentale sur les lagunes de la côte méditerranéenne française. Les 3 projets présentés dans ce rapport visent tous la réimplantation des herbiers mais n'ont pas les mêmes objectifs. En effet, le projet Sar-Lab et le projet réalisé sur l'étang de Berre, visant tous les deux une restauration écologique, n'ont pourtant pas les mêmes attentes. Notamment le projet Sar-Lab, en plus de la restauration de l'herbier lui-même, souhaite restaurer la fonctionnalité de nurserie que celui-ci apporte. Le projet sur les trois lagunes du Languedoc-Roussillon souhaite utiliser la restauration des herbiers comme une mesure accompagnatrice de la restauration du bon état chimique des lagunes. Il ne s'agit ainsi pas de restauration mais plutôt d'une méthode de bio remédiation.

Avant toutes actions entreprises, le porteur de projet doit s'assurer de la non-pollution et de la non-dégradation du milieu, la restauration écologique étant une action permettant d'améliorer l'état d'un écosystème là où la qualité de l'eau est déjà bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation sont nulles ou maitrisées (Lenfant et al., 2015). En effet, le succès de réintroduction des espèces ingénieures tient notamment dans la maitrise des pressions qui ont conduit à leur disparition (Anonyme, s.d.). Les trois projets analysés dans ce rapport n'ont pas pris en compte de la même manière ces critères. En effet, il semble que ces projets se soient basés sur l'état de pousse de l'herbier présent, plutôt que sur les critères de bon état chimique évalués dans le cadre de la DCE. Pourtant, pour de nombreuses lagunes, l'état chimique était évalué comme médiocre en 2013, dont la lagune de Bages Sigean, l'étang de Thau et l'étang de Berre (Pôle-Relais Lagunes, 2017 ; GIPREB Syndicat mixte, 2022). Cependant, les herbiers semblent pouvoir s'y installer et il est peut-être intéressant de développer, comme c'est le cas pour les projets étudiés ici, une restauration d'herbier en parallèle de la lutte contre la pollution. En effet, comme nous l'avons vu pour le projet sur les trois lagunes du Languedoc-Roussillon, les herbiers ont aussi la capacité de séquestrer certains nutriments et ainsi améliorer la qualité de l'eau. Ceci rend difficile d'analyser la cohérence des actions mises en place en fonction de l'état de l'écosystème, lorsque l'on prend en compte que les conditions environnementales font partie de l'état de ces écosystèmes. Cependant, si l'on regarde uniquement la fonctionnalité de l'herbier, les actions de restauration du projet Sar-Lab était en cohérence avec l'état de l'écosystème, ce qui semble moins être le cas dans l'étang de Berre, qui ne voyait pas ses herbiers recoloniser de manière naturelle avant l'opération. Pour le dernier projet, il n'y a pas

lieu d'analyser la cohérence de la mise en place de l'action puisqu'il ne s'agit pas à proprement parler de restauration écologique.

Les solutions techniques employées dans ces projets diffèrent également. En effet, le choix des espèces implantées est propre au projet. Les différentes espèces de phanérogames composant les herbiers ne présentent pas toutes les mêmes caractéristiques de pousse, que ce soit au niveau du fonctionnement hydrologique et des caractères physico-chimiques du milieu qu'au niveau de leur fonctions intrinsèques comme leur vitesse de croissance. Ces critères doivent donc être évalués afin de cibler correctement leur restauration écologique. Globalement, dans tous les projets, les espèces restaurées sont celles qui étaient initialement présentes sur les sites. Cependant, ces espèces n'ont pas les mêmes caractéristiques. La Cymodocée réimplantée dans le cadre du projet Sar-Lab a une croissance d'extension rapide (horizontalement), jusqu'à 2 m par an, avec un développement au maximum de croissance au début de l'été (Couvray et al., 2020). Dans le projet sur les trois lagunes du Languedoc-Roussillon, *Zostera noltii* est préférablement choisie car les plants se développent plus rapidement que ceux de *Zostera Marina* (Duarte, 1991) et que la première pousse entre 0.1 et 1,5 m de profondeur, alors que cette dernière pousse entre 1 et 3 m de profondeur, ce qui rend le suivi plus facile (Hébert et al., 2012). *Zostera noltii* et *Ruppia cirrhosa* se reproduisent aussi par multiplication végétative, ce sont donc des espèces intéressantes pour la réimplantation (Hébert et al., 2012).

La méthode (motte ou bouture de rhizome) et la surface de transplantation ne sont pas les mêmes entre les différents projets, l'espacement entre les transplants et le nombre de répliquât diffèrent. Ceci rend ainsi difficile la comparaison entre les différents résultats. De plus, il n'est pas précisé dans les différents projets si le substrat est transféré ou non avec les transplants, ce qui constitue pourtant une information importante quant à l'éventuellement survie des plants. Cependant, il ne semble pas que pour ces trois projets il y ait eu une influence de ce facteur sur la survie puisque la mortalité est parvenue à la suite d'arrachage (cas du projet sur les trois lagunes) et à une turbidité prolongée à cause du vent (étang de Berre). Ainsi, le projet Sar-Lab présente les meilleurs résultats quant à la transplantation des herbiers. Cependant, ne s'agissant pas des mêmes espèces et n'ayant pas encore une période de suivis aussi importante que dans l'étang de Berre, il est difficile de conclure. Il semble par contre que les grillages anti-broutage sont une solution intéressante pour que l'herbier s'étende suffisamment, et cette méthode pourrait être appliquée dans d'autres lagunes et sur d'autres espèces d'herbiers.

Les suivis sont aussi adaptés aux objectifs de chaque projet, comme c'est le cas du projet Sar-Lab qui étudie les populations ichtyologiques, énonçant clairement une volonté de restaurer l'habitat naturel de nurserie. Aussi, la durée du suivi ne rend pas compte des mêmes résultats, comme c'est le cas dans l'étang de Berre où les populations d'herbier ont montré des taux de mortalité soudain après 4 années sur les sites où les transplants semblaient installés et croître avant cela. Ceci met donc en évidence la nécessité de suivre les projets sur le long terme et de manière régulière. Ce point rend aussi l'interprétation des résultats et leur extrapolation pour mener un projet de restauration des herbiers à plus grande échelle complexe, d'autant que chaque lagune a ses caractéristiques et problématiques propres. Par exemple, le volet de restauration de la Cymodocée du projet Sar-Lab est difficilement extrapolable car cette plante n'est pas présente dans la majorité des lagunes plus fermées des côtes françaises. Il y a donc un compromis à faire entre un besoin de standardiser les méthodes de transplantations d'herbier à terme afin de mener ces projets à plus grande échelle, et un besoin de s'adapter aux différences écologiques et socio-économiques des différentes lagunes.

Afin de pouvoir tendre à standardiser les méthodes, il serait intéressant de combiner les données existantes des différents projets de restauration des herbiers en lagunes et lagons dans le monde, en considérant chaque espèce, en prenant en compte les critères physico-chimiques des lagunes (bathymétrie, granulométrie des sédiments, matière organique dans les sédiments, biomasse algale, les courants, l'exposition au vent…) et les facteurs socio-éco-culturels (rejets urbains, aquaculture…) afin de déterminer des lieux propices de réimplantation dans chaque lagune et de maximiser les chances de réussite (Hébert et al., 2012). Il faudrait, en plus de cela, s'assurer que les plants utilisés pour la réimplantation soient géographiquement, écologiquement et génétiquement proche de la population détériorée (Van Den Hartog, 2000). Pour chaque projet mis en place, il faudrait ainsi évaluer en amont :

- La zone à restaurer. Le périmètre est-il pertinent et prend-il en considération les caractéristiques écologiques, physico-chimiques et socio-économiques ?
- Évaluer l'état de dégradation : quelles fonctions écosystémiques sont touchées et lesquelles peut-on améliorer, tout en proposant des actions cohérentes face à cet état (Figure 1).
- Définir les objectifs de manière quantifiable en plus de qualifiable (Anonyme, s.d.), ce qui n'est ici pas fait dans les différents projets. Un exemple appliqué au projet Sar-Lab pourrait être de savoir quelles abondances et quelles richesses de poissons on souhaite

voir dans la nurserie. Pour répondre à ce point, il faut pouvoir définir un état de référence. Celui-ci pourrait par exemple être celui du point témoin.

- Considérer les outils existants et leur applicabilité (financières et législatives).
- Pouvoir évaluer la solution mise en place et pouvoir mesurer les paramètres.
- Déterminer la poursuite des actions selon les résultats de l'évaluation et prévoir des mesures de gestion en fonction de ceux-ci.

Boudouresque et al., proposent notamment certaines règles de conduite afin de mener à bien les projets de restauration des herbiers. Ils considèrent premièrement que la réimplantation d'herbiers doit se faire uniquement si les herbiers naturellement présents sont déjà en train de croitre ou sont stables. Ils proposent également de réimplanter de l'herbier de la même espèce et au même endroit que l'ancien herbier, prenant comme témoin des mattes mortes ou d'anciennes cartes, tout en considérant qu'une réimplantation dans des zones où il n'y avait pas d'herbier connu est possible si les conditions du milieu ont été bouleversées par un aménagement du littoral au moins 10 ans avant et qu'elles sont favorables à la pousse. Comme nous l'avons vu, il est également crucial que les causes de la disparition des herbiers doivent être maitrisées afin de permettre une repousse naturelle. Boudouresque et al., proposent également une règle commune à chaque projet de réimplantation d'herbier sur la phase expérimentale. Selon eux, celle-ci devrait être obligatoire et devrait se faire sur un minimum de 200 à 500 boutures en comparant plusieurs méthodes, avec un suivi de 3 ans afin de valider le projet à plus grande échelle. Aussi, le prélèvement des boutures destinées à la réimplantation ne devrait pas mettre en péril les herbiers existants et les prélèvements ne devraient se faire qu'après avoir mené des études sur la dynamique de ramification des rhizomes, ce qui permettrait de déterminer un nombre maximal de boutures à prélever par an et par m^2. Enfin, ils proposent que les actions de réimplantation s'insèrent dans une stratégie globale de gestion des herbiers (Boudouresque et al., 2013).

Conclusion

Dans ce rapport, nous avons étudié trois projets de restauration d'herbier différent. Seule la transplantation de Cymodocée dans la lagune du Brusc, qui est un projet encore en cours, présente des résultats très encourageant. Les transplantations effectuées sur l'étang de Berre présentaient des résultats similaires lors des deux premières années puis les conditions environnementales ont perturbé cette repousse de l'herbier. Aussi, les lagunes étant soumises à des variations fortes dans ces conditions hydrodynamiques, il est difficile de prévoir ce qu'adviendront les herbiers présents aujourd'hui. L'idée étant, de plus, de ne pas avoir à gérer les sites restaurés en continu mais que les systèmes s'auto-entretiennent. Cependant, avec les changements globaux actuels, il est de plus en plus compliqué pour les écosystèmes de se maintenir dans leur état optimal. Aujourd'hui, les actions de restauration écologique sont mises en œuvre en test sur le terrain, et nous avons encore peu de retour d'expérience. Ces projets nécessitent un suivi à long terme, car certains projets sont suivis le temps de leur financement, puis après cela il n'y a plus de données disponibles. De plus, les opérations menées ont montré un succès sur de petites échelles ou des échelles expérimentales seulement, et ce surtout à cause de contraintes techniques et financières (Anonyme, s.d.). Ainsi, afin de mettre en place des actions à grande échelle et de façon plus pérennes, il y aurait besoin de suivre un protocole standardisé prenant en compte tous les critères physico-chimiques et socio-éco-culturels des lagunes afin de déterminer des zones de transplantions où la réussite serait possible. Cette standardisation pourrait aussi débloquer des financements et permettre de globaliser les démarches d'autorisations pour leur mise en place. De plus, il serait intéressant de mettre en évidence les résultats obtenus pour les transplantations d'herbier en lagune dans le monde afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces démarches et pouvoir les appliquer à plus large échelle. Enfin, dans l'évaluation de l'état de conservation réalisée sur les lagunes méditerranéennes françaises, une cartographie plus fine des herbiers va être effectuée, ce qui pourrait permettre, à terme, de mieux cibler les actions de restauration dans les années à venir.

Bibliographie

Anonyme, (s.d.). Littoral partie 2.2. *Plan d'action du document stratégique de façade méditerranée*, p 226 à 258 [en ligne]. [Consulté le 22 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.dirm.mediterranee.developpement-durable.gouv.fr/consultation-sur-le-volet-operationnel-du-document-a2966.html

Aronson, J., Floret, C., Floc'h, L., Ovalle, C., & Pontanier, R. (1995). Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides : le vocabulaire et les concepts.

Barnes, R.S.K., 1980. Coastal lagoons: the natural history of a neglected habitat. Cambridge University Press, Cambridge. doi:10.2307/2259652

Beck, M. W., Heck, K. L., Able, K. W., Childers, D. L., Eggleston, D. B., Gillanders, B. M., & Weinstein, M. P. (2001). The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates: a better understanding of the habitats that serve as nurseries for marine species and the factors that create site-specific variability in nursery quality will improve conservation and management of these areas. *Bioscience*, *51*(8), 633-641.

Bernard, G., 2022. Réimplantation expérimentale dans l'étang de Berre. *OFB, GENIE ECOLOGIQUE, Centre de ressources* [en ligne]. [Consulté le 22 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.genieecologique.fr/reimplantations-experimentales-de-zosteres-dans-letang-de-berre

Boudouresque, C., Gravez, V., Meinesz, A., Molenaar, H., Pergent, G. Vitiello, P., 2013. Posidonie : réimplantations et transplantations. *Gis Posidonie* [en ligne]. Publié le 17/03/2013 par Ledireach Laurence. [Consulté le 9 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=136

Couvray S., Simide R., Kirchhofer D., Vion A., Bonnefont J-L., 2020 - Projet SAR-LAB. Site Atelier de Restauration écologique Lagune du Brusc. Rapport intermédiaire. Phase 2017 – _2018. 140p.

Dandine, F., 2013. Transplantations de zostères : un outil clé pour l'interprétation écologique des herbiers de l'étang de Berre (Provence, France). Rapport de Stage au GIPREB. 09/2013.

Duarte C. M. Seagrass depth limits Aquatic Botany, Volume 40, Issue 4, 1991, Pages 363-377.

Eau France, 2011. Réimplantation expérimentale de zostères dans l'étang de Berre. *Zones Humides* [En ligne]. Publié le 21/04/2011. Mis à jour le 09/02/2018. [Consulté le 22 mai 2022]. Disponible à l'adresse : http://www.zones-humides.org/agir/retours-experiences/reimplantation-experimentale-de-zosteres-dans-l-etang-de-berre.

GIPREB Syndicat mixte, 2011. *Etude des possibilités de restauration des herbiers de Zostera dans l'étang de Berre par des réimplantations expérimentales, Bilan de l'opération après 2ans de suvi.* [Powepoint]. Publié le 8/12/2011. Disponible à l'adresse : https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/mce-zostera-bilan-final_255.pdf, consulté le 22 mai 2022.

GIPREB Syndicat mixte, 2022. La DCE sur l'étang. *Etang de Berre* [en ligne]. Article modifié le 29/03/2022. [Consulté le 22 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://etangdeberre.org/la-dce-sur-letang/

Hebert, M., Dupré, N. †, Barral, M., Messiaen, G., Oheix, J., Deslous-Paoli, J-M., E., Roque d'orbcastel, Laugier, T., Programme de réimplantation d'herbiers de phanérogames (Zostera noltii/ Ruppia cirrhosa) dans les lagunes de Bages, Ingril et Thau (Languedoc-Roussillon – France), Rapport Cépralmar : 07-2012.

Kennish, M. J., & Paerl, H. W. (Eds.). (2010). *Coastal lagoons: critical habitats of environmental change*. CRC press.

Lenfant P, Gudefin A, Fonbonne S, Lecaillon G, Aronson J, Blin E, Lourie SM, Boissery P, Loeuillard JL, Palmaro A, Herrouin G, Person J (2015) Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes.

Ruyssen, M. (2019). Direction interrégionale de la mer Méditerranée. *Document stratégique pour la restauration écologique en Méditerranée*. PAMM Méditerranée Occidentale. 56 pages.

Sy, M. M. (2019). *Évaluation des services écosystémiques fournis par les complexes lagunaires dans un processus de restauration écologique* (Doctoral dissertation, Université Montpellier).

Thibault, M. (2011). Formation connaissance et gestion des milieux lagunaires [Fichier PDF], Techniques de restauration et de gestion des milieux lagunaires. http://85.31.222.100/alexandrie-7/dyn/portal/index.seam?page=alo&aloId=5405

Van den hartog C., (2000), Procedures for the restoration of lost seagrass beds. Biol. Mar. Medit., 7 (2),353-357