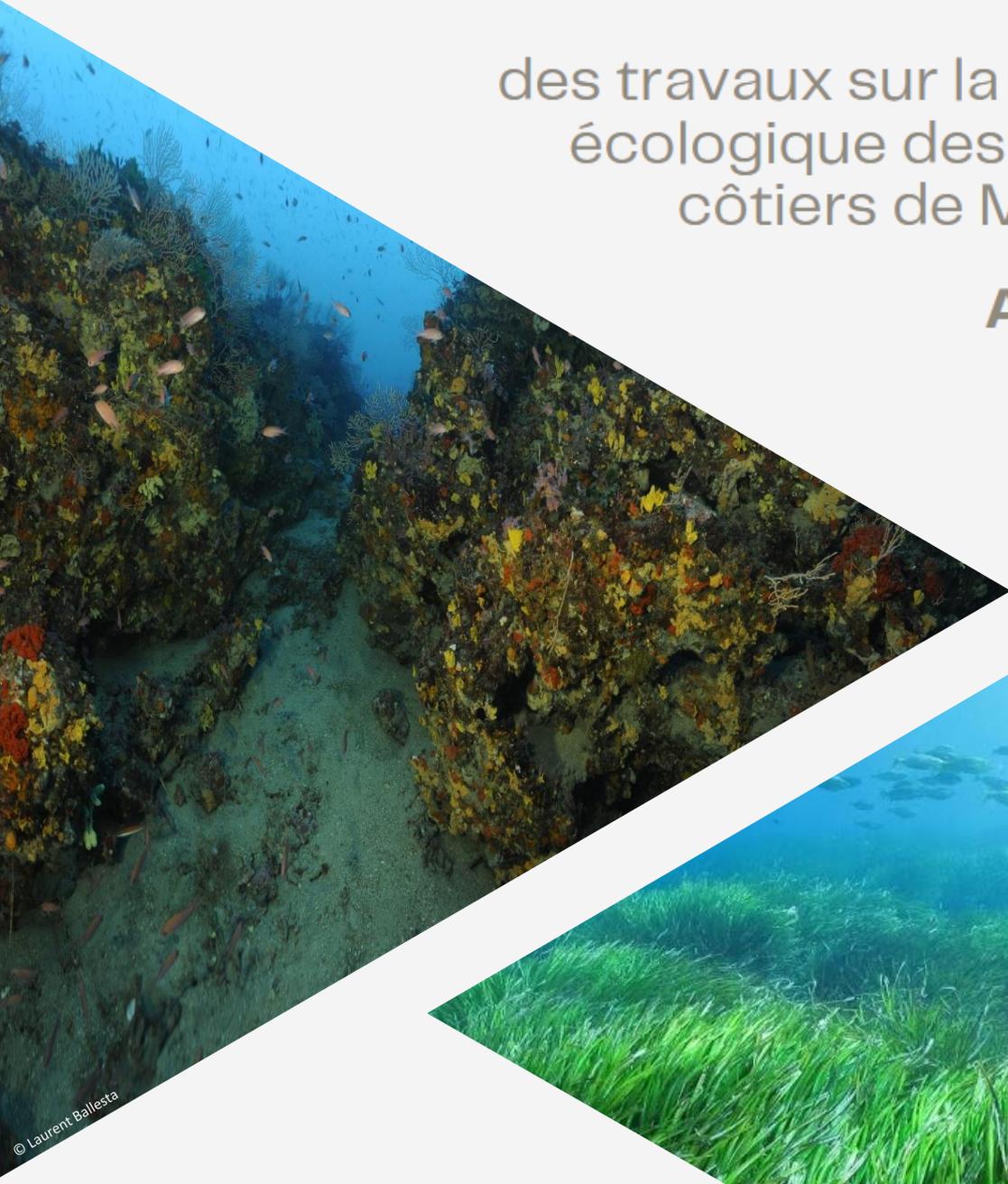




Synthèse des travaux sur la restauration écologique des petits fonds côtiers de Méditerranée

Année 2022



Projet porté par la Faculté des
Sciences de l'Université de Montpellier
Département Biologie Ecologie

En partenariat avec :



LAB ROUGERIE+TANGRAM
ARCHITECTURE BIOMIMÉTIQUE

© Sandrine Ruitton

Coordination

Julie DETER (julie.deter@umontpellier.fr)

Rédaction et mise en page

Samantha WEBER (samanthaweberpro@gmail.com)

Contribution (contenus de cours et travaux étudiants)

Eirini APAZOGLOU (étudiante), Lorenzo ARDUINO (étudiant), Loïs BAROTIN (étudiante), Alexandre BELLY (étudiant), Felix BESSE (étudiant), Olivier BOCQUET (enseignant, Tangram Architectes), Pierre BOISSERY (enseignant, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), Mathilde BOUE (étudiante), Céline CAMBAS (étudiante), Rémi CONTE (étudiant), Hannah DAUM (étudiante), Margot DENTAN (étudiante), Gwénaëlle DELARUELLE (enseignante, Andromède Océanologie), Bruna GIORDANO (étudiante), Anaïs GUDEFIN (enseignante, Ecocean), Marin JULLIAND (étudiant), Juliette LANGLOIS (étudiante), Gilles LECAILLON (enseignant, Ecocean), Philippe LENFANT (enseignant, Université de Perpignan), Philippe MANON (étudiant), Ken NOVELLAS (étudiant), Aurélie PRUNIER (étudiante), Mathieu SOULAYROL (étudiant), Charlène STEINMETZ (étudiante), Laura THOMAS-SLEIMAN (étudiante)

Ce document doit être cité de la manière suivante

Université de Montpellier, 2022. Synthèse des travaux sur la restauration écologique des petits fonds côtiers de Méditerranée. 69 pages.

SOMMAIRE

1. Introduction	1
2. Porteur et partenaires du projet	2
2.1. Porteur du projet.....	2
2.2. Organismes partenaires et intervenants.....	2
3. La restauration écologique des petits fonds côtiers : contexte, généralités et concepts.....	5
3.1. Restauration écologique : définitions	5
3.2. Les spécificités de la restauration écologique en milieu marin	6
3.2.1. Les petits fonds côtiers de Méditerranée : contexte et enjeux	6
3.2.2. Cycle de vie des poissons côtiers et habitats essentiels	7
3.3. De l'environnement à l'Homme : enjeux, pressions et impacts	8
3.3.1. Les services écosystémiques	8
3.3.2. Le modèle Driving forces, Pressures, State, Impact, Responses (DPSIR)	10
3.3.3. Lien entre pressions, impacts et risques	11
3.4. Restauration écologique : lignes directrices	12
3.4.1. Quand fait-on de la restauration écologique ? Vers quoi veut-on tendre ?	12
3.4.2. Construire un projet de restauration écologique : les grandes étapes.....	13
3.5. Les politiques de restauration écologique, complémentarité et réglementation	14
3.5.1. Cadre réglementaire.....	14
3.5.2. Perspectives.....	16
3.6. Les acteurs de la restauration écologique et leurs prérogatives	16
3.7. Enjeux économique et financiers de la restauration écologique	18
3.8. Evaluation de l'atteinte aux objectifs et efficacité écologique : cas des nurseries portuaires	18
3.8.1. Pourquoi cadrer l'évaluation de l'efficacité des opérations ?.....	18
3.8.2. Validation de l'efficacité d'un nouveau produit ou procédé - projets de Recherche et Développement (TRL 6 et 7).....	20
3.8.3. Evaluation du niveau d'efficacité des travaux de restauration écologique – projets opérationnels (TRL 8 et 9)	22
4. Mise en application concrète	26
4.1. Les récifs artificiels pour la gestion intégrée : de l'écologie aux usagers.....	26
4.1.1. Contexte et historique.....	26
4.1.2. Objectifs, fonctionnement et services	27
4.1.3. Sites d'étude.....	27
4.1.4. Evolution spatio-temporelle – Variations ichtyques	27

4.1.5.	Soutien aux pêcheurs artisanaux	28
4.1.6.	Les usagers	29
4.2.	La restauration des peuplements végétaux marins	29
4.2.1.	Généralités	29
4.2.1.	La restauration des macroalgues	30
4.2.2.	La restauration des phanérogames marines.....	30
4.2.3.	Zoom sur la Posidonie	31
4.2.4.	Exemples de projets de restauration de la Posidonie à grande échelle	32
4.3.	La restauration du coralligène et des coraux	39
4.3.1.	Généralités	39
4.3.2.	Surveillance du coralligène.....	40
4.3.3.	Exemples de projets de restauration	42
4.4.	Restauration écologique et biomimétisme : quelle synergie ?	51
4.4.1.	Vers une démarche biomimétique opérationnelle pour la restauration écologique ...	51
4.4.2.	Généralités	52
4.4.3.	Exemple de projet : REMORA +	54
4.5.	Panorama d'autres actions et cas concrets.....	57
4.5.1.	Les zones de mouillage.....	57
4.5.2.	Fonds marins altérés ou détruits.....	57
4.5.3.	Les sites dégradés par un rejet.....	58
4.5.4.	Les zones portuaires.....	59
4.5.5.	Exemples à l'étranger	60
5.	Etudes de cas et bilan du DU 2022	61
5.1.	Etudes de cas.....	61
5.2.	Bilan du DU : avis et devenir des étudiants, et perspectives d'évolution	62
6.	Conclusion	64
7.	Bibliographie	65

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Différentes actions possibles de l'Homme en fonction de l'état de dégradation d'un écosystème (Source : Lenfant et al., 2015, modifié d'après Aronson et al., 2007)	6
Figure 2. Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement chez les poissons. Les phases les plus critiques sont indiquées en rouge, moins critiques en jaune et peu critiques en vert.	7
Figure 3. A : Répartition spatiale des juvéniles de plusieurs espèces dans différents habitats de nurseries côtières (herbiers, sable, roche). B : Exemple de répartition temporelle pour les sparidés. (Source : Lenfant et al., 2015)	8
Figure 4. Illustration du modèle DPSIR (réponse face à une pression et ses impacts) à travers le cas de la navigation de plaisance. Modifié par Lenfant et al. (2015) d'après l'Agence Européenne de l'Environnement (2000).....	10
Figure 5. Représentation des diverses pressions anthropiques exercées sur les petits fonds côtiers. (Source : Lenfant et al., 2015)	11
Figure 6. Exemple de variation temporelle de l'importance d'un risque engendré par un dégazage illégal sur les populations de post-larves. (Source : Lenfant et al., 2015).....	12
Figure 7. Dynamique d'un écosystème (ligne bleu clair) soumis à des perturbations naturelles et des pressions anthropiques ponctuelles ou régulières. (Source : Lenfant et al., 2015).....	12
Figure 8. Représentation de la réglementation concernant l'environnement, le milieu marin et les petits fonds côtiers à différentes échelles. (Source : Lenfant et al., 2015).....	15
Figure 9. Description des différents niveaux de maturité technologique (TRL) appliqués à la restauration écologique des petits fonds côtiers. (Source : Gudéfin et al., 2022).....	19
Figure 10. Typologies de suivi en fonction de la typologie de port. (Source : Gudéfin et al., 2022)	23
Figure 11. Suivis préconisés par typologie de suivi et par période. Les suivis entre parenthèses sont à effectuer dans la mesure du possible ou en fonction des préconisations, et ceux dans la colonne « si possible » n'ont pas de périodes préconisées et peuvent donc être réalisés n'importe quand en fonction des objectifs. (Source : Gudéfin et al., 2022)	24
Figure 12. Comparaisons et évaluations de différentes méthodes de suivi pour les poissons démersaux, les poissons crypto-benthiques et invertébrés mobiles, et la faune et flore fixées. UVC : Underwater Visual Census (comptage visuel sous-marin) ; PMT : Palmes-Masque-Tuba ; ROV : Remotely Operated underwater Vehicle (véhicule sous-marin téléopéré) ; ADNe : ADN environnemental. (Source : Gudéfin et al., 2022)	25
Figure 13. Résultats de l'étude de la richesse spécifique, de la densité d'individus et des assemblages d'espèces sur les modules doubles-buses, au sein des trois sites suivis (Agde, Valras, Bacarès-Leucate). (Source : diaporama de Philippe Lenfant, lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer le 9 mai 2022)	28
Figure 14. Procédé et équipement utilisés pour le projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)	33
Figure 15. Paniers utilisés dans le cadre du projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)	34
Figure 16. Atelier de réimplantation du projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)	35
Figure 17. Repiquage d'un fragment d'herbier. Août 2019, Golfe Juan (© Laurent Ballesta – Andromède océanologie).....	36
Figure 18. Vue d'un site atelier par photogrammétrie, avant et après repiquage. (Source : Andromède Océanologie)	37

Figure 19. Illustration de la méthode de repiquage utilisée. La forme et la taille des piquets (a) ont été conçues et leur force de traction a été testée sous l'eau (b) avant de fixer les boutures sur la matre morte (c, d). Les sections 1, 2 et 3 sont des points de mesure du diamètre des piquets pour évaluer leur dégradation au cours du temps, correspondant à différents niveaux de plantation ("1" partie inférieure, "2" partie intermédiaire, "3" partie supérieure). (Source : Mancini et al., 2021)	38
Figure 20. Orthophotomosaïque RVB de la zone de transplantation à la fin du mois de septembre 2020, montrant les fragments de <i>P. oceanica</i> transplantés et les quadrats de suivi de 1 × 1 m. (Source : Ventura et al., 2022)	39
Figure 21. Localisation des sites suivis dans le cadre du réseau RECOR. (source : https://plateforme.medtrix.fr/)	40
Figure 22. Exemple de suivi d'un site comportant cinq stations. 30 quadrats sont réalisés à 70 m, puis à 60 m, 50 m, 40 m, et 35 m. (Source : Andromède Océanologie)	41
Figure 23. Arbre de décision pour aider au processus devant conduire à une action de restauration écologique des récifs coralliens. (Source : Edwards et Gomez, 2007)	42
Figure 24. Evolution de l'aménagement de la Pointe Focinane de 1948 à 2019.....	43
Figure 25. Schéma représentant le système Air lift. (Source : diaporama de Gwénaëlle Delaruelle lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 9 mai 2022)	44
Figure 26. Photographies de la paroi du tombant des Spélugues prises avant et après l'opération de nettoyage. (Source : Andromède Océanologie)	44
Figure 27. Localisation de la zone du projet RESCOR. (Source : www.plateforme.medtrix.fr)	45
Figure 28. Représentation des zones de suivi par quadrats photographiques (en rouge). (Source : Andromède Océanologie)	46
Figure 29. Exemple d'analyse de quadrats permanents désensevelis à T-1 (avant désensevelissement) et T3. (Source : Andromède Océanologie)	46
Figure 30. Suivi photogrammétrique d'une zone de nettoyage du projet RESCOR à T1 et T5. (Source : Andromède Océanologie)	47
Figure 31. Analyse des proportions de vivant et non-vivant sur les quadrats permanents nettoyés et désensevelis. (Source : Andromède Océanologie).....	48
Figure 32. Sites de transplantation du protocole 1 du projet TRANSCOR (transplantation in situ). Les cercles rouges représentent les sites de transplantation de <i>C. rubrum</i> et les étoiles bleues les sites de transplantation de <i>P. clavata</i> . (Sources : Estaque, 2021 ; Parc National des Calanques, IGN, Septentrion Environnement).....	48
Figure 33. Evolution du taux de survie des gorgones transplantées au cours des suivis. (Source : Casoli et al., 2022).....	50
Figure 34. Définition des différentes notions gravitant autour du biomimétisme. (Source : Les techniques de l'ingénieur - https://www.techniques-ingenieur.fr/)	52
Figure 35. Stratégie globale de développement soutenable. (Source : CEEBIOS)	53
Figure 36. De gauche à droite : tableau du cahier des charges scientifique issu du projet REMORA+, tableau du cahier des charges du vivant modifié d'après Guide KARIM (2015), tableau des services écosystémiques modifié d'après DRIVER (2015).....	54
Figure 37. Modélisation informatique du projet REMORA+. (Source : diaporama d'Olivier Bocquet lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 10 mai 2022)	56
Figure 38. Critères remplis par la solution dans les différents cahiers des charges. (Source : diaporama d'Olivier Bocquet lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 10 mai 2022).....	56
Figure 39. Extrait de réponse des étudiants à l'enquête sur leur devenir depuis le DU Restauration écologique des petits fonds marins côtiers 2022.....	63

1. Introduction

Alors que les incitations financières à la restauration écologique sont de plus en plus nombreuses, les projets de restauration sont encore assez rares en mer du fait de la complexité du milieu, mais aussi d'un besoin de montée en compétences des personnes actuellement en poste et appelées à mettre en place, autoriser et/ou monter ces projets de restauration. La thématique étant porteuse et créatrice d'emplois, de plus en plus de jeunes souhaitent également se former.

C'est pour répondre à ce besoin qu'a été créé en 2022 le **Diplôme d'Université « Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »** (DU RestauMer), suite à une demande directe de l'Agence de l'Eau, du Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres, et d'entreprises partenaires des formations de Licence-Master de l'Université de Montpellier. Le public visé est donc formé d'agents de la fonction publique, chefs de projets en entreprise, jeunes diplômés en recherche d'emploi et étudiants de niveau master.

L'objectif de la formation est de donner une connaissance aussi bien pratique que théorique aux acteurs du littoral afin qu'ils puissent les utiliser dans le cadre de leur profession. Pour cela, les enseignements sont dispensés par différents intervenants ayant des niveaux d'opérationnalités ou d'expertises complémentaires (voir 2.1).

En 2022, la formation se compose de 33 heures de cours en présentiel réparties sur quatre journées divisées en deux sessions (4-5 avril et 9-10 mai 2022), et de 47 heures de travail semi-autonome encadré par un tuteur. Durant le temps de travail en semi-autonomie, chaque apprenant doit réfléchir à un cas d'étude de restauration écologique prêtant à controverse. Un rapport écrit a été rédigé par chaque étudiant, et les soutenances orales de leurs mémoires ont eu lieu le 2 juin 2022, devant les pairs et devant un jury composé de Julie Deter (présentation ci-après), Philippe Lenfant (présentation ci-après) et Arnaud Martin, directeur du département Biologie Ecologie. Les 19 étudiants inscrits en 2022 seront donc capables de répondre à des sollicitations sur la restauration écologique soit en tant que prestataires, soit en tant que donneurs d'ordre, soit en tant que chercheurs. Ces fonctions apparaissent dans les métiers d'ingénieur de recherche, de cadre d'une collectivité, de chargé de mission dans un bureau d'études, de gestionnaire d'espace naturel, d'agent technique, de chargé d'étude en bureau d'études.

Cette synthèse des travaux sur la restauration écologique des petits fonds côtiers de Méditerranée s'appuie donc sur les cours et TD dispensés durant le DU de mars à juin 2022, ainsi que sur une synthèse bibliographique. Elle est rédigée dans l'objectif d'être mise à disposition des acteurs littoraux, nationaux et internationaux, en libre accès.

2. Porteur et partenaires du projet

2.1. Porteur du projet



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



FACULTÉ DES SCIENCES
DE MONTPELLIER



Le **Département Biologie Ecologie** est un département d'enseignement de la **Faculté des Sciences** (FdS) de l'**Université de Montpellier** (UM), qui forme des diplômés aux niveaux Licence (Bac+3) et Master (Bac+5) dans le domaine de l'écologie, incluant les aspects :

- **Naturalistes** : zoologie, botanique, biologie des organismes, etc.
- **Evolutifs** : biologie et génétique des populations, phylogénie, etc.
- **Ecosystémiques** : interactions biologiques, communautés, flux de matière, etc.

Le département propose ainsi des formations de licence générale, licence professionnelle, Master, et Diplôme Universitaire (DU).

Julie Deter et Valérie Borrell, responsables du projet, sont toutes les deux Maitresses de Conférences à l'Université de Montpellier, rattachées respectivement à l'UMR Marbec (Unité Mixte de Recherche travaillant sur la biodiversité marine, ses usages et sa conservation) et l'UMR HydroSciences Montpellier (laboratoire UM-CNRS-IRD pluridisciplinaire dans les domaines des interactions entre eau, environnement et santé).

2.2. Organismes partenaires et intervenants



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



AGENCE DE L'EAU RHÔNE MEDITERRANEE CORSE (RMC)

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse est un établissement public du ministère de l'environnement, dédié à la préservation de l'eau. Elle perçoit des redevances

sur l'eau payées par tous les usagers. Chaque euro collecté est réinvesti auprès des collectivités, acteurs économiques et agricoles pour lutter contre les pollutions, améliorer les connaissances sur les milieux aquatiques ou encore mieux utiliser l'eau disponible, à travers un programme pluriannuel d'intervention. Sa stratégie d'actions en faveur de la Méditerranée s'articule autour de trois piliers fondamentaux et complémentaires : la **lutte contre la pollution**, la **non-dégradation**, et la **restauration écologique**

Site internet : <https://www.eaurmc.fr/>

Intervenant : Pierre BOISSERY, en charge de l'expertise pour la mer et le littoral méditerranéen.



UNIVERSITE DE PERPGNAN – CREM

La plateforme IEEM-CREM (Intervention et Expertise en Environnement Marin – Centre de Restauration Ecologique Marine) est la **Plateforme technologique** de l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), rattaché à l'UMR 5110 CEFREM. Les recherches menées au CREM s'articulent autour de quatre axes :



- Les mécanismes de maintien des populations de poissons
- Le fonctionnement des Aires Marines Protégées et récifs artificiels
- La caractérisation des comportements des poissons
- La restauration écologique : post-larves et repeuplement

Site internet : <https://crem.univ-perp.fr/>

Intervenant : Philippe LENFANT, chercheur et enseignant.



ECOCEAN

Ecocean est une entreprise privée de génie écologique qui travaille sur le développement de procédés opérationnels basés sur les résultats de la recherche scientifique. Face à l'effondrement constaté des stocks, les solutions proposées par Ecocean ont toutes le même objectif : booster le recrutement des poissons. Pour cela la société propose deux solutions qui se complètent : **BioRestore** pour repeupler les populations de poissons et **Biohut**, des habitats artificiels pour redonner les fonctions de nurseries perdues par des aménagements côtiers.

Site internet : <https://www.ecocean.fr/>

Intervenants : Gilles LECAILLON (président et fondateur), Anaïs GUDEFIN (chargée de mission).



ANDROMEDE Océanologie

Andromède Océanologie est une entreprise dont l'objet principal est de conduire tout type de projet lié à l'étude et à la valorisation de l'environnement marin. Pour ce faire, ses activités s'articulent autour de trois grands domaines :

- **L'image, pour explorer et magnifier** : les explorations sous-marines menées par Andromède visent à faire découvrir le monde marin et à fédérer un large public, à travers notamment la production de documentaires, et l'édition de livres.
- **Recherche et compréhension** : Andromède porte plusieurs réseaux de surveillance de l'état écologique des eaux côtières dont les résultats sont disponibles sur la plateforme cartographique MEDTRIX. La société participe à des programmes de recherche portant sur le développement de techniques innovantes pour l'évaluation, le suivi et l'amélioration de l'état de santé des écosystèmes marins en partenariat avec l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse et avec le monde universitaire.
- **Protection et restauration** : De l'étude d'impact à la mise en œuvre de mesures de restauration écologique, Andromède accompagne les projets maritimes à forte ambition environnementale (accompagnement, conseil, expertise...).

Site internet : <https://www.andromede-ocean.com/>

Intervenant : Gwénaëlle Delaruelle, chef de projets en environnement marin.

LAB ROUGERIE + TANGRAM ARCHITECTURE BIOMIMÉTIQUE

LAB ROUGERIE + TANGRAM

Le Lab Rougerie + Tangram est le laboratoire de **recherche et innovation biomimétique** de l'agence Rougerie+Tangram, dont les travaux s'articulent autour de projets prospectifs ou construits, axés sur quatre thématiques :

- L'énergie et les économies d'énergie
- La matière et les économies de matière
- Les déchets comme ressources
- La biodiversité et les écosystèmes

Site internet : <https://www.rougerie-tangram.com/>

Intervenant : Olivier Bocquet, directeur.

3. La restauration écologique des petits fonds côtiers : contexte, généralités et concepts

3.1. Restauration écologique : définitions

La **restauration écologique** a été définie par la SER (Society of Ecological Restoration) en 2004, comme étant le **processus d'aide au rétablissement d'un écosystème ayant été dégradé, endommagé ou détruit**. Elle peut également être définie comme « *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 où la qualité de l'eau est bonne et où les pressions à l'origine de la dégradation ont disparu ou sont maîtrisées* » (Agence de l'eau, 2014).

On parle de **restauration passive** lorsque les forces de dégradations sont réduites et que les processus de récupération se font naturellement et dirigent la restauration. Au contraire, la **restauration active** est dirigée par des interventions humaines. Dans tous les cas, il est indispensable d'arrêter ou réduire les pressions responsables de la dégradation avant d'entreprendre toute action de restauration écologique.

La restauration écologique vise une régénération de la structure, composition et des fonctions de l'écosystème tel qu'il était avant la perturbation. Elle ne doit pas être confondue avec :

- La **réhabilitation**, qui vise la régénération de certaines fonctions de l'écosystème existantes avant la perturbation
- La **réaffectation**, qui vise la reconversion d'un écosystème trop endommagé vers de nouveaux usages
- La **compensation**, qui vise à restaurer ou recréer un milieu naturel en contrepartie d'un dommage provoqué par un projet. Elle intervient dans le cadre de la séquence ERC (Eviter – Réduire – Compenser)

Le type d'action à mettre en place sur un écosystème se décide selon le niveau de perturbation subi par ce dernier. Globalement, plus l'écosystème est dégradé, plus le projet va être complexe et coûteux, et la gestion par l'Homme être importante, et moins les services initiaux vont être retrouvés.

L'**écosystème de référence** pour la restauration est unique à chaque projet et modifiable en fonction des évolutions du projet. On peut également utiliser une **référence séquentielle**, par paliers de références intermédiaires à atteindre au fur et à mesure (Clewel et Aronson, 2010 ; Aronson *et al.*, 2012). La réaffectation, quant à elle, est basée sur un besoin sociétal et non une référence.

Enfin, l'**abandon de l'écosystème** intervient lorsque le seuil d'irréversibilité est atteint (**Figure 1**).

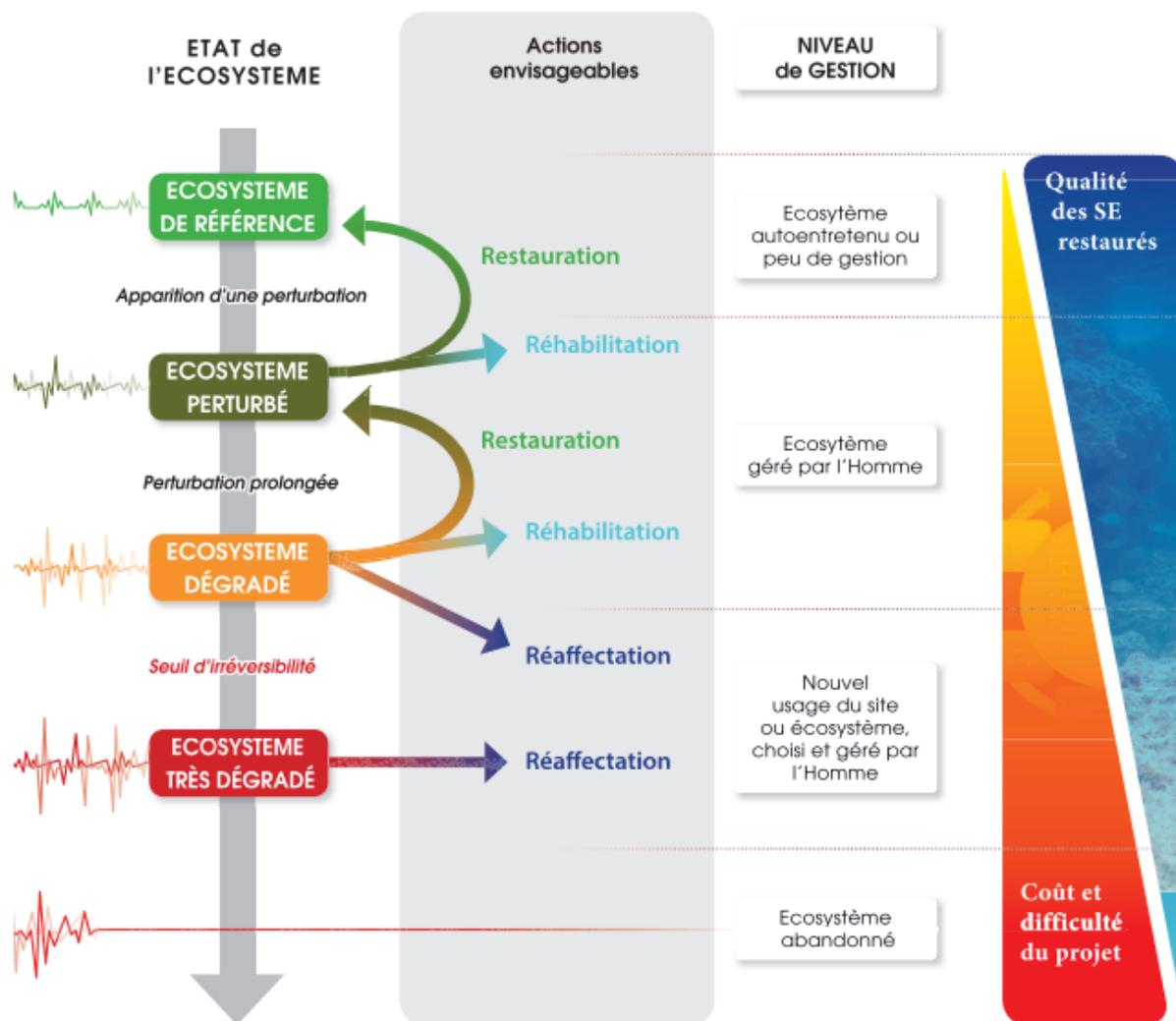


Figure 1. Différentes actions possibles de l'Homme en fonction de l'état de dégradation d'un écosystème (Source : Lenfant *et al.*, 2015, modifié d'après Aronson *et al.*, 2007)

3.2. Les spécificités de la restauration écologique en milieu marin

3.2.1. Les petits fonds côtiers de Méditerranée : contexte et enjeux

Les **petits fonds côtiers** sont des zones à forts enjeux aussi bien écologiques que socio-économiques, du fait de leur diversité et complexité en termes d'habitats (petits fonds rocheux, sableux, herbiers...), et d'espèces. Ces habitats sont soumis, plus qu'ailleurs, aux pressions anthropiques terrestres et marines (ex : surpêche, pollution, espèces invasives, etc) (Lenfant *et al.*, 2015). Pourtant ces derniers jouent un rôle crucial dans le bien-être de l'Homme, qu'il s'agisse d'approvisionnement alimentaire, de protection des côtes ou de régulation du climat global (Barbier, 2012 ; Halpern *et al.*, 2012 ; HLPE, 2014).

Malgré les efforts croissants déployés pour conserver ces écosystèmes, les mesures employées aujourd'hui sont parfois insuffisantes pour les maintenir en bonne santé, et encore plus pour inverser le déclin et restaurer leurs fonctions et services (Lotze *et al.*, 2011 ; De'ath *et al.*, 2012 ; Parravicini *et al.*, 2013). C'est pourquoi il devient nécessaire d'agir pour essayer de **restaurer**, **réhabiliter** ou **réaffecter** ces milieux. Dans ce sens, des moyens techniques sont actuellement développés et mis en œuvre, confortés par un intérêt politique et une filière en développement (Lenfant *et al.*, 2015).

3.2.2. Cycle de vie des poissons côtiers et habitats essentiels

En plus de fournir de nombreux services écosystémiques aux sociétés humaines, les petits fonds côtiers constituent une zone d'interface cruciale dans le cycle de vie d'une grande majorité d'espèces de poissons. Au cours de ce cycle (**Figure 2**), certaines phases sont identifiées comme étant plus critiques que d'autres. C'est le cas notamment des phases « post-larves » et « nouvelles recrues », qui sont amenées à subir de fortes mortalités naturelles, accentuées par la dégradation des petits fonds côtiers. Les connaissances scientifiques actuelles et la technologie innovante développée par certaines entreprises françaises de génie écologique nous permettent d'intervenir sur ces stades afin de soutenir le maintien des populations de poissons (Lenfant *et al.*, 2015).

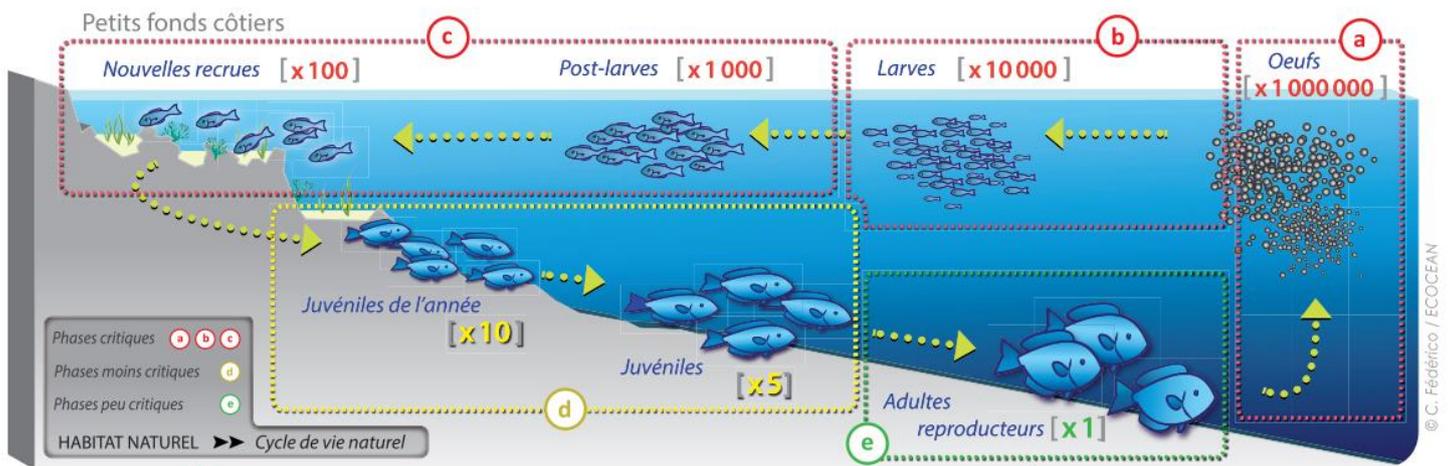


Figure 2. Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement chez les poissons. Les phases les plus critiques sont indiquées en rouge, moins critiques en jaune et peu critiques en vert.

Selon Beck *et al.* (2001), l'habitat essentiel pour boucler le cycle de vie chez les poissons est la **nurserie**. Une nurserie est une zone optimale pour la croissance où se rassemblent des individus juvéniles qui ont dépassé le stade larvaire. Elle se caractérise notamment par une abondance d'individus plus importante, avec un taux de survie et une croissance supérieurs aux autres zones, ainsi qu'une migration des individus adultes.

Les caractéristiques (ex : régime alimentaire) et exigences propres des différentes espèces de poissons concernant leurs habitats essentiels entraînent une **variabilité spatio-temporelle interspécifique** : au stade juvénile, les espèces se répartissent l'utilisation de ces habitats

dans l'espace et dans le temps, ce qui permet ainsi de limiter les phénomènes de compétition interspécifique (**Figure 3**) (Lenfant *et al.*, 2015).

A l'**échelle spatiale**, chaque espèce fréquente l'habitat qui présente les caractéristiques correspondant à ses exigences, pour chacun de ses stades de développement.

A l'**échelle temporelle**, un même habitat est fréquenté à différentes périodes selon les espèces. Les périodes de reproduction sont bien définies par espèce et échelonnées dans le temps (printanière, automnale et hivernale).



Figure 3. A : Répartition spatiale des juvéniles de plusieurs espèces dans différents habitats de nurseries côtières (herbiers, sable, roche). B : Exemple de répartition temporelle pour les sparidés. (Source : Lenfant *et al.*, 2015)

3.3. De l'environnement à l'Homme : enjeux, pressions et impacts

3.3.1. Les services écosystémiques

La restauration écologique est une discipline très anthropo-centrée, qui vise principalement à retrouver les **services écosystémiques** fournis et les bénéfiques qui en découlent. Cependant, même si

la restauration permet de retrouver certains services, il est extrêmement difficile de revenir totalement à l'état initial d'un écosystème, et c'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles il faut toujours privilégier la non-dégradation en premier lieu.

Les écosystèmes marins fournissent notamment :

- Des **services d'approvisionnement** : production de biens consommés par l'Homme (nourriture, molécules à vocations pharmaceutiques, etc).
- Des **services de régulation** : canalisation de certains phénomènes naturels et maintien des processus biochimiques (eau, nutriment, matière organique, etc), entraînant un impact positif sur le bien-être humain (régulation du climat, protection contre les catastrophes naturelles, etc).
- Des **services socio-culturels** : bénéfiques immatériels que l'être humain tire de la nature en termes de santé, de liberté, d'identité, de connaissances, de plaisir esthétique et de loisirs (pêche de loisir, sports de nature, support de recherche, etc).

On peut également classer les biens et services rendus par les écosystèmes de la manière suivante (Credoc *et al.*, 2009) :

- Services directement positifs, liés au bon état de l'écosystème (pêche, tourisme de nature, etc).
- Services directement positifs mais avec aménagement nécessaires (hydroélectricité, aquaculture, etc).
- Services permettant une atténuation des phénomènes naturels dits négatifs, liés au bon état de l'écosystème (protection contre l'érosion ou la submersion, contrôles des espèces envahissantes, etc).
- Services par un aménagement des écosystèmes, ou des prélèvements qui conduisent à réduire certaines fonctions naturelles pour en optimiser d'autres (algoculture pour les biotechnologies, agro-carburants, etc).

Enfin, il est important d'établir les relations entre les **services écosystémiques**, les **bénéfices** et les **valeurs** associées. Les valeurs données à la biodiversité peuvent être de différentes natures. D'après une analyse de plusieurs travaux de recherche sur la valeur de la biodiversité réalisée par Lenfant *et al.* en 2015, les types de valeurs suivants ont été identifiés (FRB, 2013 ; Salles, 2013) :

- **Valeur intrinsèque** : valeur de la biodiversité en elle-même et pour elle-même.
- **Valeur patrimoniale** : valeur culturelle, identitaire et historique de la biodiversité.
- **Valeur instrumentale** : valeur des ressources et services utiles voire indispensables fournis par la biodiversité aux sociétés humaines.
- **Valeur d'option** : peut être considérée comme une valeur instrumentale particulière, source potentielle d'innovation pour les sociétés actuelles et futures.
- Certains scientifiques mettent en avant la **valeur écologique** d'un écosystème, qui correspond à la valeur accordée implicitement à la biodiversité pour son importance dans le fonctionnement et la résilience des écosystèmes

Ces valeurs constituent les raisons de conserver la biodiversité, et pourront être différentes pour un même élément, selon les acteurs.

3.3.2. Le modèle Driving forces, Pressures, State, Impact, Responses (DPSIR)

Le modèle DPSIR, mis au point par l'Agence Européenne pour l'Environnement (European Environment Agency, 1999), permet d'analyser les relations entre des facteurs qui ont une incidence sur l'environnement selon une logique de causalité (**Figure 4**).

Il prend en compte cinq facteurs :

- La **force motrice** (driving forces) : changement du système social, économique et/ou institutionnel qui entraîne des changements d'états directs ou indirects sur son environnement.
- La **pression exercée** (pressures) : événement ponctuel ou prolongé qui induit un changement d'état. C'est l'action directe de la force motrice sous forme de flux.
- La **situation** ou **état** (state) : changement observable de l'écosystème. C'est une variable physique, chimique ou biologique qui est mesurable
- L'**impact** : conséquence du changement d'état sur la faune et la flore de l'écosystème, une perte ou un gain selon les effets.
- La **réponse** : si elle existe, mesure mise en place par la société pour diminuer l'impact écologique de son activité.

Cette méthode permet ainsi de sélectionner les pressions anthropiques les plus importantes s'exerçant sur les milieux, d'en évaluer les effets, et de pouvoir travailler sur leurs conséquences.

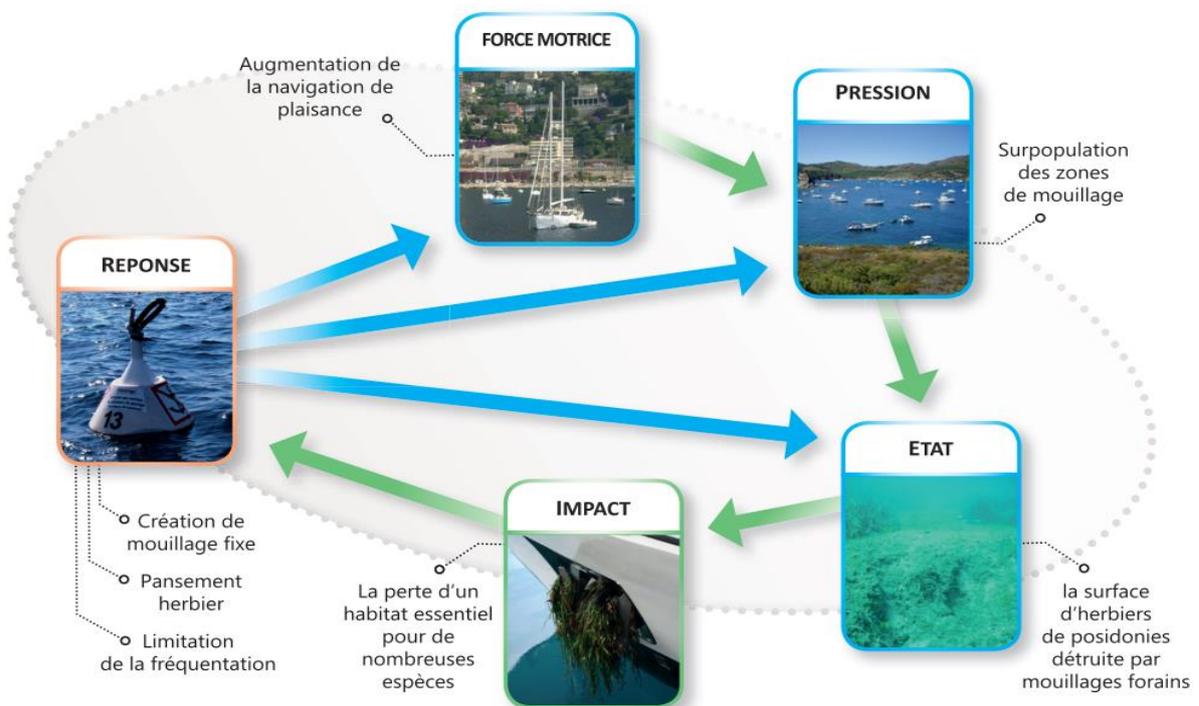


Figure 4. Illustration du modèle DPSIR (réponse face à une pression et ses impacts) à travers le cas de la navigation de plaisance. Modifié par Lenfant *et al.* (2015) d'après l'Agence Européenne de l'Environnement (2000)

3.3.3. Lien entre pressions, impacts et risques

Les nombreuses contraintes s'exerçant sur le littoral Méditerranéen engendrent une grande diversité de **pressions**, directes et indirectes. Ces pressions, identifiées dans le cadre du Plan d'Action pour le Milieu Marin (PAMM) en Méditerranée Occidentale (DIRM Méditerranée), sont notamment liées à l'artificialisation du littoral, à la pêche, aux macro-déchets, à l'introduction d'espèces non-indigènes, etc (**Figure 5**).

Les **impacts** générés par ces pressions sur les petits fonds côtiers peuvent être physiques (turbidité, destruction d'habitats, etc), chimiques (pollution aux pesticides, etc) ou biologiques (extraction d'espèces, introduction d'espèces non indigènes, etc). Dans tous les cas, il n'est pas possible de les mesurer tous précisément.

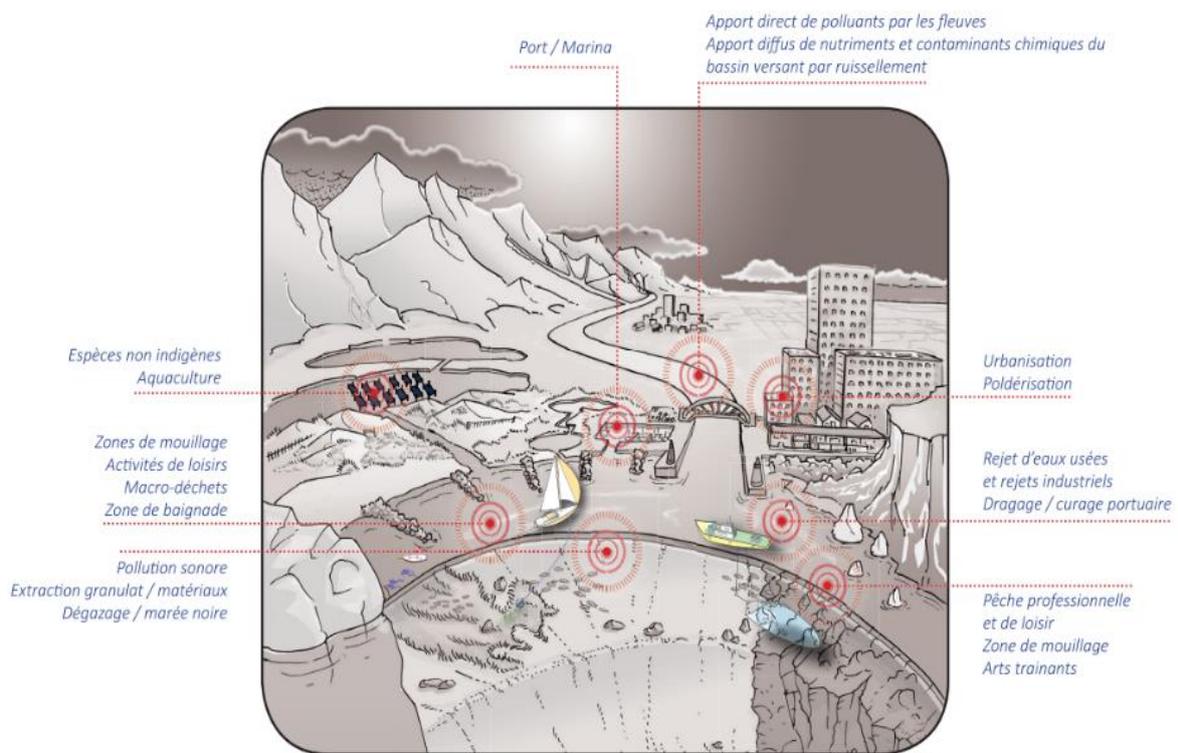


Figure 5. Représentation des diverses pressions anthropiques exercées sur les petits fonds côtiers. (Source : Lenfant *et al.*, 2015)

Les **risques** sont des événements (pressions) dont l'arrivée est aléatoire et susceptible de causer un dommage. Ils sont définis par leur probabilité d'apparition (aléa), et par la vulnérabilité de l'écosystème face à cet aléa. L'exposition est également à prendre en compte : pour une même pression, un risque va être plus ou moins important selon la localisation et la période à laquelle elle survient. Un exemple est présenté en **figure 6**.

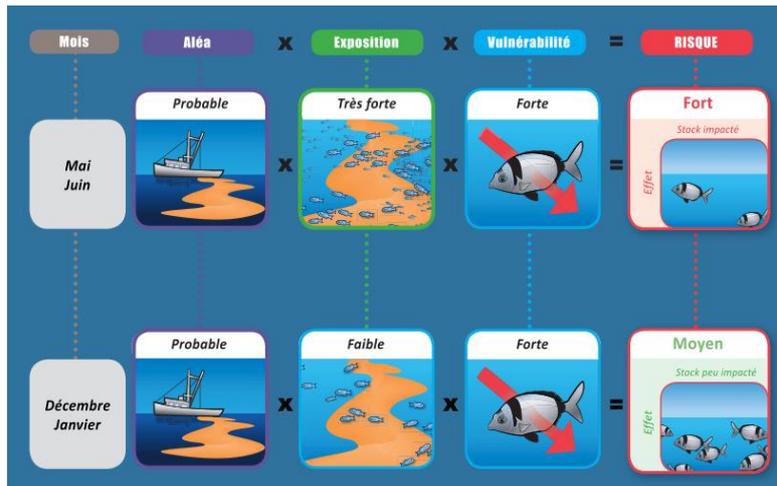


Figure 6. Exemple de variation temporelle de l'importance d'un risque engendré par un dégazage illégal sur les populations de post-larves. (Source : Lenfant *et al.*, 2015)

3.4. Restauration écologique : lignes directrices

3.4.1. Quand fait-on de la restauration écologique ? Vers quoi veut-on tendre ?

Tous les écosystèmes ont une dynamique de **variabilité naturelle** (Figure 7), qui consiste à osciller entre **résilience** et **résistance** face aux perturbations naturelles, jusqu'à un certain **seuil**. A ces perturbations naturelles viennent s'ajouter des pressions anthropiques, qui vont au fil du temps faire basculer l'écosystème sous ce seuil de résilience : on parle alors de **transformation** de l'écosystème, voire de **dégradation** lorsque la transformation a des conséquences négatives pour l'Homme et pour la résilience du système. Dans ce cas, même si les pressions sont supprimées, l'écosystème ne pourra pas revenir à sa **trajectoire antérieure**. Dès lors, si les mesures de protection et de gestion ne suffisent pas pour faire retrouver une **trajectoire acceptable** à l'écosystème, il est nécessaire d'agir directement sur ce dernier par la **restauration écologique**.

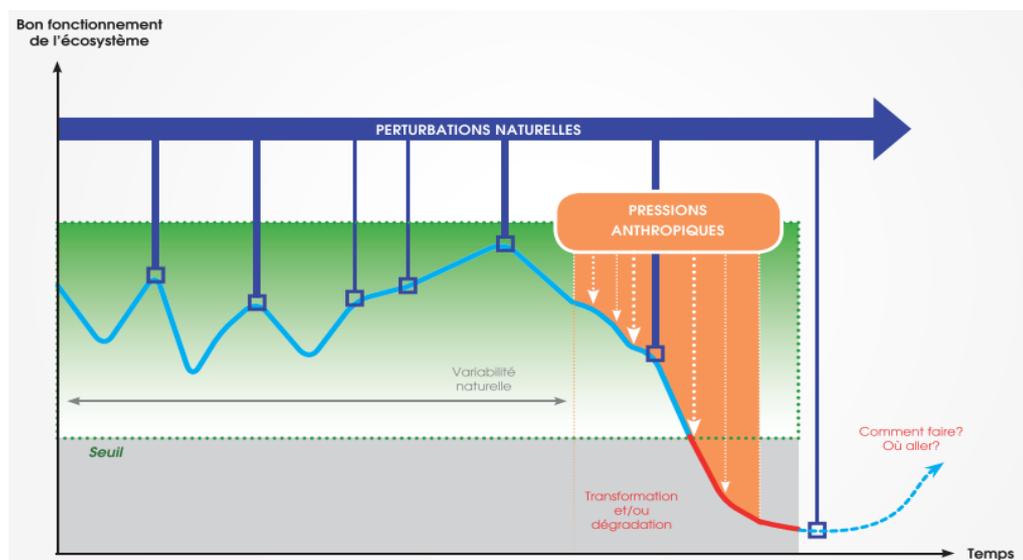


Figure 7. Dynamique d'un écosystème (ligne bleu clair) soumis à des perturbations naturelles et des pressions anthropiques ponctuelles ou régulières. (Source : Lenfant *et al.*, 2015)

Lorsqu'on envisage de restaurer un écosystème, il faut commencer par savoir vers quel état et trajectoire on veut mener ce dernier. Autrement dit, il faut choisir ou construire un **écosystème de référence** pour orienter le travail de restauration. L'écosystème de référence est défini comme une approximation de l'état souhaitable, une norme choisie parmi plusieurs états alternatifs possibles et accessibles par une succession d'étapes appelées trajectoires. C'est donc l'objectif final vers lequel on souhaite tendre (Aronson *et al.*, 1993a,b ; Le Floc'h *et al.*, 1995 ; SER, 2004). Il peut être construit à partir de données historiques existantes (Falk *et al.*, 2006 ; Wagner *et al.*, 2000), ou identifié parmi les écosystèmes déjà existants et environnants qui présentent une dynamique et un fonctionnement similaires à ce qui est attendu (ex : Aires Marines Protégées, réserves intégrales, etc) (Clewell *et al.*, 2013).

Une référence est unique à chaque projet, et peut évoluer avec ce dernier. Elle doit prendre en compte la complexité de l'écosystème que l'on souhaite utiliser comme référence, la qualité et la quantité des biens et services rendus, mais aussi la gestion, les coûts, la difficulté du projet, et l'acceptabilité par la population. Il est donc important de faire un choix **réaliste** d'un point de vue **écologique, économique et social** (Lenfant *et al.*, 2015).

Enfin, des **éléments quantifiables** de la référence doivent être choisis (SER, 2004) pour permettre de savoir si les objectifs sont atteints, à quelle vitesse, et avec quelle efficacité.

3.4.2. Construire un projet de restauration écologique : les grandes étapes

La mise en place d'un projet de restauration écologique commence par une étape de **planification conceptuelle**, au cours de laquelle on identifie clairement le périmètre géographique du site à restaurer, le fonctionnement physique et biotique de l'écosystème concerné, son état de dégradation et les pressions auxquelles il est soumis, les financements et autorisations réglementaires nécessaires au projet, ainsi que sa durée. A l'issue de cette réflexion, on décide de la poursuite ou non du projet, selon sa **cohérence** et sa **faisabilité**.

S'il est décidé de poursuivre le projet, on peut alors commencer les **activités préliminaires** suivantes :

- Constitution d'une équipe de restauration écologique avec expert technique
- Montage du budget
- Description du site et étude de son historique
- Réalisation d'un suivi avant-projet
- Choix de l'écosystème de référence
- Recherches sur la biologie des espèces clés
- Définition des objectifs intermédiaires
- Coordination avec les services de l'Etat
- Communication auprès du public

Une fois cette phase terminée, la **réalisation des travaux** peut débuter, sans oublier la mise en place d'un dispositif de suivi des travaux.

Il est ensuite nécessaire d'effectuer des **travaux postérieurs à la réalisation**, tels que la protection du site, la reconnaissance du site pour d'éventuelles corrections, la mise en place d'un suivi pour vérifier l'atteinte des objectifs, ou encore tout simplement la gestion du site.

Enfin, la dernière étape consiste à **évaluer le projet** en termes d'atteinte des objectifs et d'efficacité du projet, ainsi qu'à **communiquer** les résultats aux différents publics (financeurs, décideurs, usagers, etc).

3.5. Les politiques de restauration écologique, complémentarité et réglementation

3.5.1. Cadre réglementaire

La réglementation en zone littorale et marine est particulièrement complexe, car de nombreux textes régissent la protection de la faune et de la flore, les aménagements, les usages, la qualité de l'eau, l'occupation du Domaine Public Maritime, etc (**Figure 8**). De plus, la restauration écologique étant une discipline relativement jeune, un flou réglementaire et juridique persiste. Il reste néanmoins important de connaître le **cadre réglementaire** autour des petits fonds côtiers. Celui-ci s'établit à trois niveaux :

- Au **niveau international**, principalement à travers la **convention de Barcelone** (1976) et ses sept protocoles, adoptés dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), qui constituent le principal accord multilatéral juridiquement contraignant sur l'environnement, portant sur la Méditerranée. Cette convention a notamment permis un éveil des consciences sur la nécessité de préserver l'environnement et de gérer durablement les ressources naturelles.
- Au **niveau européen**, avec la **Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin** (DCSMM) (2008/56/CE), dont l'objectif est de « maintenir ou restaurer un bon fonctionnement des écosystèmes marins (diversité biologique conservée et interactions correctes entre les espèces et leurs habitats, océans dynamiques et productifs) tout en permettant l'exercice des usages en mer pour les générations futures dans une perspective de développement durable ». Elle établit un cadre d'actions pour les États membres de l'Union européenne, qui doivent ainsi prendre toutes les mesures nécessaires pour réduire les impacts des activités sur le milieu marin.
- Au **niveau national**, la transposition de la DCSMM en droit français s'effectue par l'élaboration du **Plan d'Action pour le Milieu Marin** (PAMM) (art L 219-9 du code de l'environnement). Depuis 2017, le PAMM est intégré dans le Document Stratégique de Façade (DSF), ce qui permet de faciliter la mise en œuvre d'une politique maritime intégrée en garantissant un équilibre entre protection de l'environnement marin et développement socio-économique. La **Loi littoral** (1986) influe également à ce niveau, en imposant une réglementation concernant l'urbanisation de la côte dans l'objectif de préserver les écosystèmes côtiers et d'assurer une économie aquatique pérenne.

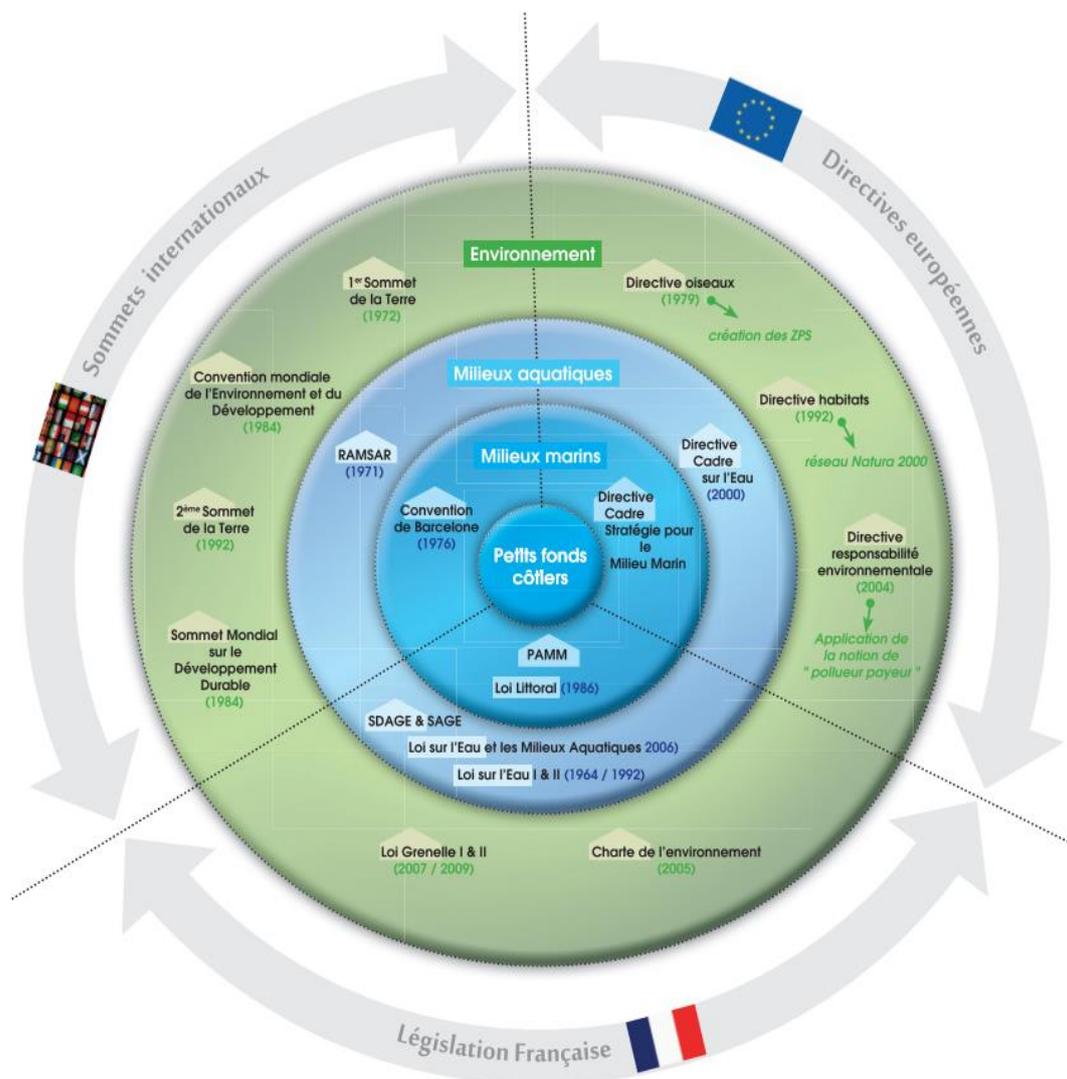


Figure 8. Représentation de la réglementation concernant l'environnement, le milieu marin et les petits fonds côtiers à différentes échelles. (Source : Lenfant *et al.*, 2015)

Une des mesures du PAMM est de définir un cadrage stratégique de façade de la restauration écologique des habitats naturels (M035-MED2). Les objectifs sont donc de :

- Dégager un **cadre d'intervention** et des méthodologies à suivre dans le cadre d'une démarche de restauration écologique, pour les porteurs de projets et pour les services instructeurs.
- Donner un bilan de l'**efficacité** des outils de restauration existants
- Proposer des **territoires propices** à la restauration écologique à l'échelle de la façade.

Pour répondre à ces objectifs, un nouvel outil de planification a été mis en place : le **Schéma Territorial de Restauration Ecologique** (STERE). Ce document permet donc de faire de la restauration écologique une démarche planifiée et intégrer, et de programmer concrètement des actions en fonction des enjeux du territoire, là où on ne travaillait jusqu'à présent que par opportunités (DIRM, 2019).

Malgré l'existence de ces différents documents, il est important de noter qu'il n'y a actuellement **aucune obligation réglementaire** en termes de restauration écologique. Cela traduit une certaine volonté des structures qui s'inscrivent dans cette démarche d'aller au-delà de l'aspect réglementaire.

En effet, elles ne font pas de la restauration écologique par obligation, mais parce qu'elles sont convaincues de l'intérêt pour le milieu, ou parce qu'elles y trouvent un intérêt en termes de communication et d'image. On utilise alors cette volonté pour les amener à travailler sur d'autres aspects.

3.5.2. Perspectives

En 2021, un bilan des travaux de restauration écologique engagés a mis en évidence des avancées significatives sur la mise en œuvre de la politique de restauration des fonctions de nurserie : à ce jour et en l'espace de quatre ans, 45 des 121 ports de Méditerranée (soit plus de 45 %) sont équipés de nurseries artificielles. L'Agence de l'Eau RMC, en partenariat avec d'autres structures, a donc décidé de lancer un **plan de reconquête des fonctions nurseries portuaires**, qui consiste à remobiliser des moyens techniques, humains et financiers pour essayer de revenir à l'état des fonctions de nurseries (équivalent situation) avant la construction des ports.

D'autre part, le cadre réglementaire et juridique de la restauration écologique connaît actuellement une importante évolution. Le 28 juin 2022, la Commission européenne a présenté dans le cadre de la stratégie européenne de la biodiversité un projet de règlement pour la restauration de la nature, avec des objectifs **juridiquement contraignants** qui s'appliqueront à chaque Etat membre en complément de la législation existante. L'objectif général est de couvrir au moins **20 % des zones terrestres et marines de l'Union européenne d'ici à 2030 par des mesures de restauration** de la nature, et d'étendre d'ici 2050 ces mesures à tous les écosystèmes qui doivent être préservés en priorisant ceux qui présentent le plus gros potentiel de services écosystémiques tels que le stockage du carbone ou la réduction de l'impact des catastrophes naturelles (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique, 2022)

3.6. Les acteurs de la restauration écologique et leurs prérogatives

Un **acteur de la restauration écologique** est ici considéré comme un facteur de changement prenant réellement part à la démarche, qui a essayé d'apporter des solutions techniques par le biais de recherches et/ou de mise au point d'outils, méthodes etc.

On considère cinq catégories d'acteurs institutionnels, techniques et socio-économiques :

- Les **scientifiques**
- Les **opérationnels**
- Les **donneurs d'ordre** (qui ont la capacité d'engager une opération, et fixent les objectifs)
- Les **financeurs**
- Les **régaliens** (Etat qui interdit ou autorise la mise en place des projets)

Une logique de **collaboration** entre ces différents acteurs permet une répartition des rôles et une mise en synergie des compétences. C'est pourquoi il est indispensable de connaître les prérogatives de chaque structure (ce qu'elle est capable ou non de faire et d'accepter de faire), et d'avoir un réseau d'acteurs construit selon la complémentarité des compétences.

Aujourd'hui certains acteurs se distinguent en matière de restauration écologique :



L'**Agence de l'Eau RMC**, qui est un acteur opérationnel.



La **Direction Interrégionale de la Mer (DIRM)**, qui est plutôt un acteur institutionnel.



Le **Pôle Mer Méditerranée**, pôle de compétitivité qui a beaucoup aidé à travailler sur la création de la filière génie écologique/restauration écologique. C'est une structure très active en termes d'animation de réseau (catalogues de sociétés qui proposent des actions en matière de restauration écologique par exemple).



La **Caisse De Consignation Biodiversité**, qui travaille sur la logique ERC *via* le programme « Biodiversité 2050 » : une entreprise qui détruit un espace naturel peut donner de l'argent à CDC Biodiversité qui va financer des actions de compensation. Ainsi, quelques projets de restauration écologique ont été intégrés dans Biodiversité 2050.

En matière de sciences, on retrouve différents acteurs plus ou moins impliqués, tels que l'**Université de Perpignan**, l'**Université de Montpellier**, Le **CNRS Corse**, La **STARESO** (Station de Recherches Sous-marines et Océanographiques de Calvi), le **MIO** de Marseille (Institut Méditerranéen d'Océanologie), et l'**Ifremer**.



Certaines entreprises de génie écologique se démarquent également dans le domaine de la restauration. C'est le cas notamment d'**Ecocean** (essentiellement sur la partie nurseries portuaires et petits poissons), **Andromède Océanologie** (Posidonie, réflexions sur les habitats coralligène, etc, et démarche à l'échelle de la Méditerranée), **Seabooost** (développement d'outils dans les ports), et **SUEZ** (essentiellement sur les macroalgues).



Enfin, parmi les donneurs d'ordre prenant la responsabilité des travaux de restauration écologique (maitres d'ouvrage), on retrouve entre autres les **collectivités territoriales** et les **maitres de ports**.

3.7. Enjeux économique et financiers de la restauration écologique

Le financement d'un projet est un facteur essentiel à sa mise en œuvre, qui peut souvent constituer le principal point bloquant, d'autant plus si le coût du projet est estimé être plus important que la valeur du bénéfice de service écosystémique restauré (Lenfant *et al.*, 2015).

Les **subventions publiques** constituent aujourd'hui une des sources principales de financement des projets de restauration écologique. En effet, les possibilités d'aides financières publiques pour mener une action de restauration sont nombreuses, et cumulables à hauteur de **80 % du coût total du projet**, les 20 % restant étant généralement financé par le maitre d'ouvrage. L'**Agence de l'Eau**, principal financeur publique aux côtés des **collectivités territoriales**, est en moyenne financeur à hauteur de 50 à 70 %, et peut dans certains cas l'être à 100 %. Cependant, le financement de l'Agence de l'Eau se fait à condition d'avoir vérifié l'efficacité de la solution.

De façon plus ponctuelle, des **fonds européens** tels que le **FEDER** ou le programme **Life +** peuvent également être sollicités.

Au-delà du financement, la **volonté d'agir des collectivités** peut également constituer un frein, tout comme l'obtention des autorisations (généralement délivrées par l'Etat).

3.8. Evaluation de l'atteinte aux objectifs et efficacité écologique : cas des nurseries portuaires

3.8.1. Pourquoi cadrer l'évaluation de l'efficacité des opérations ?

La **validation de l'outil** est une étape essentielle dans le processus de création et mise en œuvre de solutions techniques et opérationnelles de restauration écologique, comme dans n'importe quel processus industriel. Cette validation se fait *via* l'**échelle TRL** (Technology Readiness Level) (**Figure 9**) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie en vue de financer son développement ou dans la perspective de l'intégrer dans un système ou un sous-système opérationnel. Cette échelle comporte neuf niveaux de maturité de 1 (faible) à 9 (fort), plus le niveau est haut, plus la technologie est sécurisée pour être industrialisée (Grenoble INP-UGA, 2021).



Figure 9. Description des différents niveaux de maturité technologique (TRL) appliqués à la restauration écologique des petits fonds côtiers. (Source : Gudefin *et al*, 2022)

L'évaluation de l'efficacité d'une solution de restauration écologique intervient au cours de la phase de **validation**, avant que cette dernière ne soit produite et commercialisée. Elle est née d'une volonté des entreprises de vérifier que leurs solutions fonctionnent vraiment.

Dans la continuité de cette volonté, un **guide technique** a alors été élaboré dans le cadre des travaux **ICO Solutions** (Îles, Côtes et Océans) et **DRIVER**¹ pour permettre la **standardisation du suivi** pour toutes les opérations. Ce guide donne une méthodologie pour l'évaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique dans le cas des nurseries portuaires, et est destiné aux maîtres d'ouvrage, porteurs de projets, sociétés, bureaux d'études, laboratoires, etc, souhaitant faire valider leurs solutions techniques.

On peut réaliser deux types d'évaluations :

- L'évaluation des **pilotes expérimentaux**, pour les projets de Recherche et Développement (**TRL < 8**) qui consistent à mettre en place une opération sans savoir si elle fonctionne. L'objectif est donc de définir si la solution est **efficace** en tant que nurserie à poissons. Pour cela, on compare des zones équipées avec des zones témoins.
- L'évaluation des **travaux**, pour les projets opérationnels (**TRL 8 ou 9**) dont la solution est déjà commercialisée et vendue. Dans ce cas, l'objectif est de définir le **niveau d'efficacité** de la solution, en comparant la situation avant et après équipement.

¹ ICO Solutions et DRIVER sont des démarches de coopération dans le domaine de la restauration écologique qui associent des chercheurs, techniciens, gestionnaires, institutions et partenaires financiers. Leur dynamique permet le montage de projets, le partage et la valorisation de résultats, et contribue à la définition des politiques de restauration écologique des petits fonds côtiers.

3.8.2. Validation de l'efficacité d'un nouveau produit ou procédé - projets de Recherche et Développement (TRL 6 et 7)

Dans le cadre de l'évaluation de l'efficacité d'un nouveau produit ou procédé de restauration des fonctions de nurseries, ce dernier est validé s'il répond à **au moins trois des quatre critères d'une nurserie**, définis par Beck *et al.* en 2001 :

- Une **densité initiale** plus importante qu'ailleurs
- Une **croissance** plus importante qu'ailleurs, liée à une nutrition variée et adaptée
- Un **taux de mortalité** plus faible, grâce à un habitat favorable jusqu'à l'atteinte de la taille refuge
- A la taille refuge, une **migration** des juvéniles vers les habitats adultes (sachant que la migration est difficile à évaluer car elle nécessite de taguer les poissons, et les technologies adaptées n'ont pas encore été développées)

Pour valider ces différents critères, on compare la zone équipée à des zones témoins non équipées dans le port. Il est également idéal de pouvoir s'appuyer sur des données de suivi d'un milieu naturel proche faisant office de milieu de référence (cf. **Réseau RESPIRE**).

Le réseau RESPIRE

Mis en place depuis 2014 par Ecocean et l'Agence de l'Eau RMC, Le **réseau de surveillance RESPIRE** vise à suivre l'évolution spatio-temporelle du recrutement ichtyque sur les côtes méditerranéennes françaises, afin d'établir et de mesurer la fonction nurserie des ports pour, *in fine*, se projeter sur l'état des populations adultes.

Au total, 23 ports répartis entre Port-Vendres et Monaco, en passant par la Corse, sont donc suivis trois fois par an (suivi basse fréquence) et jusqu'à 24 fois par an pour sept d'entre eux (suivi haute fréquence). Les principaux résultats sont mis en ligne sur la plateforme Medtrix (www.medtrix.fr)

Cette validation doit être réalisée par un **organisme extérieur** à l'entreprise : un laboratoire universitaire, un bureau d'étude ou une association, et par une personne un minimum experte dans ce domaine, car des compétences sont nécessaires pour le travail de terrain (reconnaissance des juvéniles, comptage, etc.) et l'analyse des résultats.

Les descripteurs à suivre sont donc les suivants :

- La **densité**, exprimée en abondance pour 10 mètres linéaires (prendre 10 m permet de limiter les 0 tout en évitant d'avoir des transects trop longs). Elle permet d'évaluer la réponse aux critères 1 et 3.
- La **taille des individus**, en mm, qui permet d'évaluer la réponse au critère 2.
- Les **assemblages d'espèces**, dont les proportions sont liées à la spécificité du flux de post-larves et des habitats disponibles. Cela permet de lister les espèces pour lesquelles la fonction de nurserie est validée pour la solution étudiée.

- La **distance** et les **interactions** des individus par rapport au module (suivi comportemental). Ce suivi permet de valider l'existence d'une aire d'influence de la solution testée. Au fur et à mesure que l'on suit notre cohorte (individus arrivés dans l'année), on s'aperçoit qu'il y a une augmentation du cercle d'exploration autour du module.

La **durée** du suivi doit permettre l'intégration de la variabilité naturelle du recrutement. Pour un projet de R&D, elle doit donc être de deux ans au minimum, idéalement trois ans.

La **fréquence** doit être suffisamment importante pour suivre et comparer le comportement des post-larves et des juvéniles, ainsi que pour évaluer la croissance et la mortalité des individus utilisant le module. Pour cela il est donc recommandé d'effectuer un suivi tous les 15 jours, idéalement sur toute l'année afin de couvrir toutes les espèces. Si cette fréquence est trop élevée, il est possible de réduire le suivi sur une partie de l'année seulement, en choisissant les périodes relatives aux espèces ciblées par la solution. Pour les espèces démersales par exemple, la période à favoriser est comprise entre mars et novembre.

Le guide liste ensuite toutes les **techniques** d'intervention existantes en fonction de leurs avantages et inconvénients, à savoir :

- La **randonnée palmée** : c'est la technique la plus souvent utilisée, car elle est la plus simple à réaliser et mettre en place.
- La **plongée bouteille**, qui nécessite plus de matériel, ainsi que d'être classé plongeur professionnel (Certificat d'Aptitude au travail Hyperbare niveau 0b minimum).
- Le **prélèvement**, qui permet d'avoir accès à beaucoup d'espèces cryptiques, mais est assez difficile à mettre en place et entraîne une certaine mortalité.
- La **vidéo** : cette technique présente des problèmes liés au remplacement de l'œil humain, tels que la distorsion de l'image, ou la difficulté d'identifier les juvéniles qui bougent beaucoup, d'estimer leur taille, etc. De plus, elle nécessite un temps conséquent pour l'analyse des vidéos.

La ou les **zones témoins** doivent idéalement se trouver à une distance de 30 à 50 m des modules. En effet, elles doivent présenter les mêmes conditions environnementales et flux arrivant que la zone équipée, mais ne doit pas être trop près non plus, afin qu'il n'y ait pas de migration d'individus issus des modules.

En outre, pour évaluer l'efficacité d'une solution, il est nécessaire d'effectuer un **diagnostic avant installation**, qui prenne en compte les éléments suivants :

- La **localisation des pressions** (eaux pluviales, concentration de macrodéchets, zones d'avitaillement, etc.).
- La **présence éventuelle de post-larves ou juvéniles** de poissons dans certaines zones du port
- La **distribution des habitats artificiels** (quai, ponton...) et **naturels** (roche, herbier de posidonie...).
- La **distance de l'entrée du port** (houle, etc).

Mises sous forme de SIG, ces informations constituent une aide à la décision pour l'emplacement du module.

Enfin, pour valider la fonction nurserie d'une solution à **grande échelle**, il faut idéalement tester au moins deux ports contrastés (marina, port de commerce, port en eau profonde, port peu profond, littoral sableux, rocheux, etc), afin de gagner en rigueur, et d'avoir un début d'idée de l'interopérabilité de la solution dans différentes conditions.

3.8.3. Evaluation du niveau d'efficacité des travaux de restauration écologique – projets opérationnels (TRL 8 et 9)

Une fois que l'on sait que la solution fonctionne, on l'installe à différents endroits dans le port (sur des quais, des pontons, etc), afin de mesurer maintenant son **niveau d'efficacité**. A savoir que l'évaluation doit être un minimum, et ne doit pas coûter plus cher que la solution en elle-même.

Les **objectifs du suivi** sont donc :

- D'évaluer le **niveau d'efficacité atteint localement** par l'action corrective.
- De **comparer la situation avant et après équipement** par le produit, la solution ou le procédé mis en œuvre.
- De **comparer avec une zone naturelle de référence**, afin de prendre en compte la forte variabilité naturelle annuelle de colonisation.

Pour évaluer l'atteinte de la cible, plusieurs descripteurs sont à prendre en considération :

- La **densité**, exprimée encore une fois en abondance pour 10 mètres linéaires, que l'on compare à celle du milieu naturel.
- La **taille des individus**, en mm, qui permet de connaître l'impact de la solution sur la survie des individus juvéniles.
- Les **assemblages** d'espèces, soit le nombre d'espèces et les espèces concernées, comparés à la zone de référence.

Restaurer une fonction de nurserie s'envisage sur du **moyen à long terme** (cf. cycle de vie complet des poissons). Si on veut avoir un impact significatif sur le milieu, il faut donc prévoir un suivi sur une période de **8 à 12 ans** (pour couvrir une période décennale environ). Ce qui est intéressant dans ce cas de restauration, c'est de pouvoir intervenir entre deux pics naturels de productivité, et d'avoir une capacité de renouvellement plus importante à ce niveau-là. C'est dans ce cas que l'on va gagner en efficacité sur l'ensemble de la population et son renouvellement.

Une première phase de suivi de **3 ans minimum** doit permettre d'évaluer l'intérêt ou non de poursuivre les actions sur un temps plus long.

Tous les ports sont différents du fait de leurs activités et pressions. C'est pourquoi on va adapter le suivi en fonction des différentes **typologies portuaires**. A partir de quatre activités et/ou pressions en jeu, on considère le port comme un port à forte activité (catégorie « nombreuses activités et/ou pressions »), et on peut proposer un suivi renforcé.

Les **activités** impactant le type de suivi sont :

- La grande plaisance
- La pêche
- Un port de commerce

- Un port à sec

Les **pressions** impactant le type de suivi sont :

- Un linéaire côtier artificialisé
- Une station essence
- La présence de déversoir(s) d'orage
- Des travaux prévus pendant la phase de restauration

Les trois types de suivi proposés dans le guide (**Figure 10**) en fonction de ces activités et pressions sont donc :

- Le **suivi minimal** : minimum à mettre en œuvre pour évaluer l'efficacité des mesures correctives. Il vise uniquement les espèces cibles de la solution (juvéniles de poissons côtiers démersaux), et correspond à **une seule intervention par an sur la période la plus favorable**.
- Le **suivi optimal** : meilleur compromis (informations obtenues contre coûts déployés), il vise les juvéniles de poissons démersaux et correspond à **deux interventions par an**.
- Le **suivi renforcé** : situations particulières intégrant l'évaluation de paramètres annexes. Il vise les juvéniles de poissons dans leur globalité, et correspond à **trois interventions par an**, prenant en compte d'autres paramètres (cf. diagnostic du port).

Un suivi renforcé peut également être mis en œuvre dans les cas d'une volonté du maître d'ouvrage ou du maître d'œuvre, ou de la présence d'habitat(s) d'intérêt communautaire prioritaire dans l'espace portuaire directement concerné par l'opération.

		TYPOLOGIES DE SUIVI		
		Minimal	Optimal	Renforcé
Petit port (Nombre d'anneaux <250)	Peu d'activités et/ou de pressions	X		
	Nombreuses activités et/ou pressions		X	
Moyen port (250<Nombre d'anneaux <1000)	Peu d'activités et/ou de pressions		X	
	Nombreuses activités et/ou pressions			X
Grand port (Nombre d'anneaux > 1000)	Peu d'activités et/ou de pressions		X	
	Nombreuses activités et/ou pressions			X

Figure 10. Typologies de suivi en fonction de la typologie de port. (Source : Gudefin *et al.*, 2022)

Le suivi des **poissons crypto-benthiques** (blennies, gobies, motelles, juvéniles d'espèces démersales...) n'est pas obligatoire, car il n'existe pas de méthode reproductible et standardisée pour une évaluation sur quelques mètres dans les ports (même si l'ADN environnemental semble être une méthode désormais utilisable en milieu marin ouvert ; voir Dalongeville *et al.* (2017) et Boulanger *et al.*, (2021)), et très peu de données en milieu naturel. Si cela est possible, il est néanmoins fortement recommandé et encouragé.

D'autres suivis peuvent également être réalisés en fonction du diagnostic de pré-installation ou des enjeux spécifiques au port, tels que :

- Le suivi des **invertébrés mobiles**, qui sont des espèces indicatrices de la qualité du milieu, et une source d'attraction des post-larves et juvéniles (biophonie, source de nourriture, etc). Ce suivi est intéressant car il peut expliquer en partie pourquoi il y a plus de juvéniles dans certains systèmes. Il peut également permettre de suivre les potentielles espèces invasives présentes dans le port. Il n'existe cependant pas de méthode standardisée.

- Le suivi de la **faune et flore fixées**, qui sont source de nourriture pour certains juvéniles. L'aspect trophique peut expliquer une meilleure attractivité, et la composition de la faune et flore fixées peut présenter des espèces invasives.
- Le suivi d'**habitats naturels présents à l'intérieur du port**, comme des herbiers ou des zones rocheuses. Ce type de suivi permet de comprendre le fonctionnement du port et l'influence de ces habitats sur les modules de restauration, et inversement.

Si on souhaite réaliser un suivi **minimum**, la période de suivi jugée la plus favorable correspond aux mois de **juin et juillet**. Compte tenu des éventuelles pollutions liées à l'activité de plaisance, il est préconisé de favoriser le mois de juin, qui permet également d'observer un grand nombre d'espèces de juvéniles venant d'arriver, ou étant présents depuis quelque temps mais utilisant toujours les nurseries.

La période d'**octobre à décembre** est également intéressante pour les espèces hivernales, et permet de récupérer des informations sur ce qui s'est passé durant l'été. Couplée au suivi du mois de juin, elle permet de capter la majeure partie des espèces côtières de Méditerranée nord occidentale.

Pour le suivi de la **faune et de la flore fixée**, si les espèces cibles sont des algues, il est préférable de réaliser le suivi en **juin**, sinon il vaut mieux le réaliser en **automne**.

Pour le suivi des **invertébrés mobiles**, le suivi peut être effectué indifféremment en **juin-juillet** ou en **octobre-décembre**.

La **figure 11** résume les préconisations en termes de typologies de suivi et de période.

		Mars	Juin	Oct/Nov	Si possible
Suivi minimal	Juvéniles démersaux		X		
	Juvéniles crypto-benthiques				(X)
Suivi optimal	Juvéniles démersaux		X	X	
	Juvéniles crypto-benthiques				(X)
Suivi renforcé	Juvéniles démersaux	X	X	X	
	Juvéniles crypto-benthiques				(X)
	Faune & flore fixées			(X)	
	Invertébrés mobiles				(X)
	Habitats naturels intra portuaires				(X)

Figure 11. Suivis préconisés par typologie de suivi et par période. Les suivis entre parenthèses sont à effectuer dans la mesure du possible ou en fonction des préconisations, et ceux dans la colonne « si possible » n'ont pas de périodes préconisées et peuvent donc être réalisés n'importe quand en fonction des objectifs. (Source : Gudefin *et al.*, 2022)

Une **base de données** sera également mise à disposition, avec une liste des espèces et leur période de présence à différents stades (données issues du réseau RESPIRE).

La **figure 12** présente un résumé de toutes les méthodes disponibles pour chaque type de suivi (Gudefin *et al.*, 2022).

SUIVI POISSONS DEMERSAUX	Evaluation des assemblages	Evaluation des densités	Evaluation des tailles	Couverture temporelle	couverture spatiale	Facilité d'observation des juvéniles	Quantité de matériel requis	Cadre d'utilisation	Facilité de mise en œuvre	Impact sur le milieu	Coût estimé
UVC PMT	+++	++	++	+	+++	+++	-	0 à 1m	+++	0	€
UVC Plongée bouteille ou recycleur	+++	++	++	+	+++	+++	-	0 à 40+	++	0	€€
vidéo rotative	++	++	-	++	++	++	+++	2 à 40+	++	0	€€€
vidéo tractée	++	++	-	+	+++	-	+++	0 à 40+	+	0	€€€
vidéo fixe (ou option stereo)	++	++	-	+++	+	++	++	0 à 40+	++	0	€€
ROV	++	++	-	+	+++	++	++	0 à 40+	++	0	€€€
ADNe	+++	-	-	+	+++	-	+	0 à +100m	++	0	€€€
Bioacoustique	++	++	-	+++	+++	-	+++	0 à 40+	++	0	€€€

SUIVI INVERTEBRES ET POISSONS CRYPTO-BENTHIQUES	Evaluation des assemblages	Evaluation des densités/m²	Evaluation des tailles	Couverture temporelle	couverture spatiale	Facilité d'observation des juvéniles crypto-benthiques	Quantité de matériel requis	Cadre d'utilisation	Facilité de mise en œuvre	Impact sur le milieu	Coût estimé
UVC PMT	+	++	++	+	+++	+	-	0 à 1m	+++	0	€
UVC Plongée bouteille ou recycleur	+	++	++	+	+++	+	-	0 à 40+	++	0	€€
Prélèvement	+++	+++	+++	++	++	+++	++	2 à 40+	++	++	€
Quadrat photo	++	++	++	++	+++	+	+	0 à 40+	++	0	€€
ADNe	++	nd	nd	+	+++	++	+	0 à +100m	++	0	€€€
Bioacoustique	++	++	-	+++	+++	-	+++	0 à 40+	++	0	€€€

SUIVI FAUNE ET FLORE FIXEES	Evaluation des assemblages	Recouvrement	Evaluation de la structure 3D	Quantité de matériel requis	Cadre d'utilisation	Facilité de mise en œuvre	Impact sur le milieu	Coût estimé
UVC	++	++	++	-	0 à 1m	+++	0	€€
Prélèvement	+++	+	0	++	0 à 40+	++	+++	€€
Quadrat photo	+++	+++	++	++	0 à 40+	++	0	€€
Photogrammétrie	+++	+++	+++	+++	0 à 40+	++	0	€€€

+++ Très élevé
 ++ Elevé
 + Moyen
 - Faible
 0 Nul
 € Peu cher
 €€ Moyennement cher
 €€€ Très cher

très adapté
 partiellement adapté
 peu adapté
 nd non déterminé

Recommandé
 Complémentaire/Suivi dégradé
 non adapté
 En cours de développement

Figure 12. Comparaisons et évaluations de différentes méthodes de suivi pour les poissons démersaux, les poissons crypto-benthiques et invertébrés mobiles, et la faune et flore fixées. UVC : Underwater Visual Census (comptage visuel sous-marin) ; PMT : Palmes-Masque-Tuba ; ROV : Remotely Operated underwater Vehicle (véhicule sous-marin téléopéré) ; ADNe : ADN environnemental. (Source : Gudefin *et al.*, 2022)

Pour conclure, l'objectif global est de tendre vers une **normalisation des suivis**, de la fréquence, et des méthodes pour arriver à quelque chose d'interopérable et comparable. Mais également et avant tout de valider toute solution avant qu'elle soit mise à l'eau.

4. Mise en application concrète

4.1. Les récifs artificiels pour la gestion intégrée : de l'écologie aux usagers

4.1.1. Contexte et historique

Les récifs artificiels constituent depuis maintenant plusieurs années (voire décennies) de réels outils pour la **gestion intégrée des écosystèmes côtiers**. Ils sont complémentaires aux Aires Marines Protégées (AMP), quotas de pêche, Loi Littoral, etc, et trouvent ainsi leur place dans les politiques publiques de la DCSMM ou les protocoles méditerranéens régis par la Convention de Barcelone. Au-delà de ce rôle d'habitat artificiel au service de la gestion du littoral, les récifs sont également des outils de dialogue qui facilitent la mise en place de synergies entre acteurs. En effet, du fait de leurs vocations multiples (halieutique, récréative, de restauration...), ils permettent de fédérer, sensibiliser, concerter et donc de gérer les usages afin de limiter leur pression sur le milieu marin (Cépralmar, 2015). En Méditerranée, les récifs artificiels sont très orientés sur la pêche artisanale, mais concernent également des activités récréatives telles que la plongée et la pêche de loisir.

Cependant, les récifs artificiels peuvent poser des problèmes d'un point de vue écologique, liés à la modification du milieu et notamment la destruction du substrat meuble, dont les fonctions sont encore mal connues.

L'utilisation des récifs a commencé dans les **années 1960**, avec une phase d'immersions expérimentales qui n'était pas très « durable », puisque beaucoup de carcasses de voitures, pneus, etc, étaient immergés. Ces outils se sont ensuite progressivement perfectionnés et leur conception s'est affinée au cours du temps. Il faudra attendre les années 90 pour qu'ils soient utilisés à des fins de protection en plus de la production halieutique, puis les années 2000 pour que vienne s'ajouter l'objectif de restauration écologique. Aujourd'hui, les récifs artificiels peuvent également être conçus dans un objectif de connectivité, biomimétisme et esthétisme.

En 2012, un **document stratégique pour l'implantation des récifs artificiels** est publié par la DIRM Méditerranée, dans l'objectif de définir une doctrine de l'ensemble des services de l'État intervenant, au sein des régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA) et Occitanie (auparavant Languedoc-Roussillon), dans l'instruction des demandes d'implantations de récifs artificiels. Ce document a alors pour objet d'harmoniser les pratiques entre les différents services du littoral, et d'assurer pour les porteurs de projets une lisibilité maximale sur les attentes des services de l'État quant à la justification des dossiers déposés, et sur les obligations auxquelles ils s'exposent dans le montage de ces aménagements (DIRM, 2012).

Cependant, suite à l'essor rapide des récifs artificiels, des questionnements fréquents ont commencé à émaner des services de l'Etat : *les récifs ont-ils rempli leurs objectifs ? Comment conserver leurs bénéfices ? Y-a-t-il de nouvelles attentes ? Comment les atteindre ?* Un travail a alors été réalisé - notamment par l'IEEM-CREM - sur ces questions, et formalisé au travers de différents suivis.

4.1.2. Objectifs, fonctionnement et services

On considère trois compartiments qui interagissent entre eux : Le **socio-système**, l'**écosystème** et les **récifs artificiels**. Les interactions entre ces différents compartiments ont été étudiées au travers des suivis réalisés, afin de savoir par exemple quels facteurs de l'écosystème influencent la colonisation des récifs, quels effets/apports ont les récifs sur l'écosystème, quels facteurs intrinsèques peuvent jouer sur l'efficacité du récif, ou encore quels effets ont les usagers sur les récifs, et inversement.

La **caractérisation des récifs artificiels** s'est concentrée sur certains de ces facteurs, et a été déclinée en trois parties :

1. **Evolution spatio-temporelle de l'ichtyofaune (écologie)** : comment l'âge du récif, la localisation et l'architecture conditionnent le peuplement ichthyque ?
2. **Soutien aux pêcheurs artisanaux (pêche)** :
 - Y-a-t-il un gradient de distance aux récifs pour les captures ?
 - Les captures diffèrent-elles de celles des roches naturelles ?
3. **Les usagers** :
 - Qui sont les usagers des récifs ?
 - Comment les utilisent-ils et les perçoivent-ils ?

4.1.3. Sites d'étude

Le travail a été réalisé sur trois récifs en Occitanie : à Agde, Valras et Leucate-Barcarès. Il s'agit de trois sites pour lesquels il y avait suffisamment de données disponibles et des suivis assez cohérents pour qu'ils soient comparables. Différents types de structures ont été immergés à différentes périodes sur ces trois sites :

- **Agde** :
 - 1985 : Récif de type Bonna et Comin
 - 1995 : Doubles buses
 - 2009 : Doubles buses et paniers en acier
- **Valras** :
 - 2006 : Doubles buses et paniers en acier
- **Leucate-Barcarès** :
 - 2004 : Doubles buses, Dalots et amas chaotiques

Grâce aux modules doubles-buses présentes sur les trois sites, il a été possible d'étudier l'effet de la localisation géographique du récif, en regardant notamment la richesse spécifique, la densité et les assemblages d'espèces.

Pour chaque site étudié, une zone naturelle de référence a été suivie.

4.1.4. Evolution spatio-temporelle – Variations ichthyques

L'étude réalisée a tout d'abord permis de caractériser la colonisation des modules (doubles buses) sur les trois sites, à l'échelle de l'ensemble du Golfe du Lion. En termes d'assemblages, la constitution n'était pas la même à Valras et Agde qu'à Leucate-Barcarès (plus de Sars communs au Nord, contre plus de Sars à tête noire et de Rougets au Sud). Une forte variabilité a été observée en termes de densité

d'individus (individus/m³), tandis que la diversité d'espèces était sensiblement similaire (**Figure 13**). Ces différences en termes d'assemblage et d'abondance peuvent être dues à un recrutement différent entre les deux zones (Nord et Sud) influencé par une différence de régime de température, et d'autres paramètres tels que la ressource alimentaire.

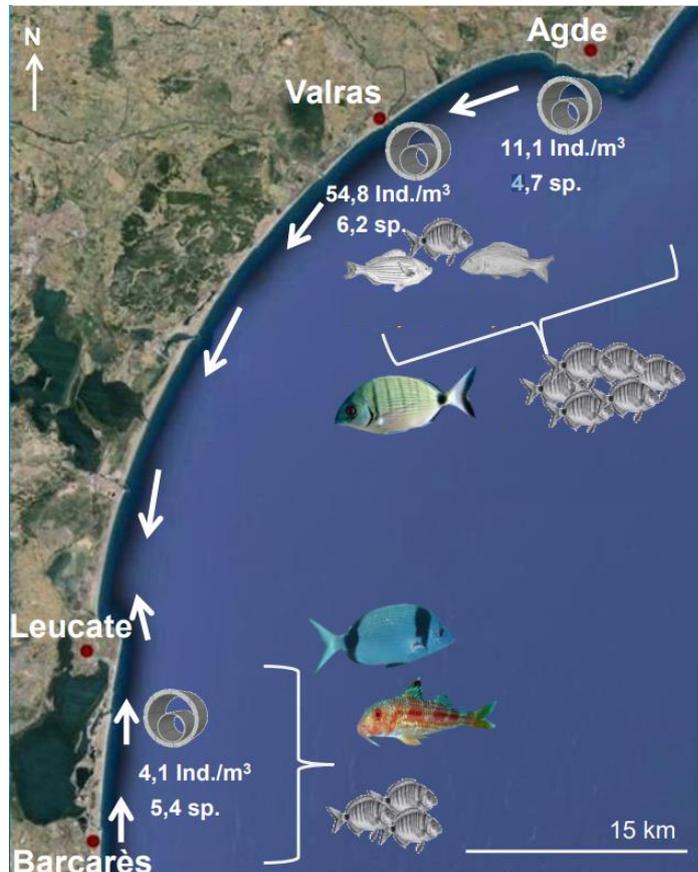


Figure 13. Résultats de l'étude de la richesse spécifique, de la densité d'individus et des assemblages d'espèces sur les modules doubles-buses, au sein des trois sites suivis (Agde, Valras, Bacarès-Leucate). (Source : diaporama de Philippe Lenfant, lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer le 9 mai 2022)

A l'échelle de chaque site, la diversité spécifique et la densité d'individus sont également différentes selon les endroits où on se situe dans le village de récifs. Cela peut être expliqué en partie par la forme des modules, et la pression de pêche qui n'est pas la même selon les endroits.

4.1.5. [Soutien aux pêcheurs artisanaux](#)

Suite à la mise en place d'un protocole de pêche expérimentale sur trois jours qui n'a pas donné de bons résultats, un protocole de débarquement a été expérimenté, consistant à suivre les débarquements de pêche quotidiennement sur l'année. Ce suivi a montré que les pêches réalisées autour des récifs artificiels sont du même ordre que les pêches réalisées sur les zones naturelles rocheuses. Cela signifie donc que les récifs permettent un report d'activité bénéfique pour les zones naturelles.

4.1.6. [Les usagers](#)

Les récifs artificiels sont devenus des solutions multi-usages, fréquentées aussi bien par les pêcheurs professionnels de loisir, les chasseurs sous-marin, les plongeurs, les plaisanciers, etc. Des entrevues réalisées sur le terrain avec les différents usagers ont montré une certaine satisfaction de leur part, et ont notamment permis de souligner l'efficacité de cette solution en termes de sensibilisation des populations. On peut donc considérer que les récifs artificiels, en plus de leur intérêt écologique, participent au développement socio-économique et à l'éducation à l'environnement.

Cependant, si une gestion et des actions préventives (interdiction de plongée/chasse sous-marine, ne sont pas mises en place sur ces sites, on risque la surexploitation. Ce travail de gestion doit donc être fait pour les futures immersions.

4.2. La restauration des peuplements végétaux marins

4.2.1. [Généralités](#)

Les végétaux marins peuvent être **libres** (phytoplancton) ou **fixés**. On s'intéresse ici à cette deuxième catégorie, qui comprend les **plantes à fleurs** (angiospermes) et les **algues**.

Les **Angiospermes** (ou Magnoliophytes) sont des plantes à fleurs majoritairement terrestres, que l'on retrouve également en milieu marin (une soixantaine d'espèces identifiées au niveau mondial), où elles forment des écosystèmes à phanérogames marines. Ces écosystèmes jouent un rôle central dans le fonctionnement des milieux marins, et présentent les caractéristiques suivantes :

- Ils sont composés d'espèces clés (qui jouent un rôle important, clé de voute) et ingénieuses (qui modulent la biodisponibilité des ressources pour les autres espèces)
- Ils recyclent le dioxyde de carbone
- La circulation des nutriments s'y fait par les racines
- Ils possèdent des rhizomes qui permettent le stockage des carbohydrates
- Ils exportent des détritiques organiques vers d'autres écosystèmes sous forme de feuilles mortes
- Ils présentent deux types de production primaire : à recyclage lent (phanérogames) et rapide (algues épiphytes des feuilles)
- Ils présentent une biodiversité élevée

En Méditerranée, on compte **sept espèces** d'Angiospermes, dont cinq strictement marines : *Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*, *Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Halophila stipulacea*. Parmi celles-ci, seule la Posidonie (*Posidonia oceanica*) est endémique de Méditerranée.

Les herbiers à Magnoliophytes marines régressent et progressent différemment selon les espèces et les zones géographiques. Ces régressions/progressions peuvent être liées à des **processus naturels** (maladies, changements climatiques, processus cycliques de colonisation et érosion...), ou à des **activités humaines** (enrichissement en nutriments, rejets urbains, pêche, mouillage, aquaculture, introduction d'espèces non-indigènes...). Elles vont dépendre principalement de leur faculté de **résilience** (capacité d'un écosystème à retrouver les structures et les fonctions de son état de référence

après une perturbation) et de leur **stabilité d'ajustement** (modalités et vitesse de retour à un état moyen antérieur).

Tous ces éléments sont autant de facteurs à prendre en compte dans le cadre de projets de restauration écologique. En effet, c'est l'espèce que l'on veut restaurer et ses caractéristiques intrinsèques qui vont influencer sur le succès de la restauration.

Les **algues** sont des végétaux chlorophylliens aquatiques qui ne possèdent ni racines, ni feuilles, ni fleurs, ni vaisseaux, ni graines. Elles se développent par photosynthèse à partir d'éléments simples comme le dioxyde de carbone, l'eau, l'énergie lumineuse et les sels minéraux. Les **macroalgues** désignent essentiellement les algues pluricellulaires dont l'appareil végétatif est clairement visible à l'œil nu. Ce terme comprend les algues rouges, algues brunes et algues vertes.

Parmi les milliers d'espèces de macroalgues connues dans le monde, 1 500 peuplent les mers d'Europe (Tela Botanica, 2011). Du fait de leur forte capacité d'adaptation, les espèces d'algues non-indigènes importées accidentellement ou non en Méditerranée ont le potentiel de représenter une menace pour la flore marine locale. En effet, plusieurs espèces de macroalgues sont considérées comme envahissantes (caulerpes, algues filamenteuses...).

C'est pourquoi il est d'autant plus important d'agir pour préserver et, quand c'est nécessaire, restaurer les populations d'espèces indigènes

4.2.1. La restauration des macroalgues

- **Cystore (SUEZ) : Projet pilote de transplantation de Cystoseira**

La cystoseira, algue brune endémique de Méditerranée, est une « espèce-ingénieur » qui va jouer un rôle d'habitat tout comme la posidonie. Le projet Cystore a été mené de 2017 à 2019 dans le Port Vauban, et a consisté à prélever des boutures de cystoseira en bonne santé dans leur milieu naturel, pour les transplanter sur une digue récemment rénovée dans le port. L'objectif de cette opération était d'apporter plus d'habitats naturels pour favoriser la vie marine sur la digue.

Un suivi a été mis en place de l'automne 2017 à l'été 2019 pour mesurer la pousse et le développement des zygotes/recrues. Les résultats ont montré un fort impact du broutage par les poissons herbivores, qui a limité la réussite du projet (Javel et Puissant, 2020).

4.2.2. La restauration des phanérogames marines

Les premières tentatives de restauration de phanérogames marines ont eu lieu en 1947 sur la côte Est des Etats Unis, à partir de graines et de parties végétatives de *Zostera marina* (Addy, 1947a, b). En Méditerranée, des essais de réimplantation de *Cymodocea nodosa* et de *Zostera noltii* ont été menés par transplantation de mottes, en 1979 dans les Bouches-du-Rhône (Meinesz et Verlaque, 1979) et en 1984 dans le Var (Jeudy de Grissac, 1984). Toutefois, c'est *Posidonia oceanica* qui a donné lieu au plus grand nombre de travaux (Meinesz *et al.*, 1990).

Jusqu'à aujourd'hui, un grand nombre d'essais expérimentaux ont été réalisés, le plus souvent à des petites échelles spatiales. Le faible nombre d'expériences à grande échelle s'explique par un taux élevé d'échecs, un manque de matériel végétal à transplanter, et des coûts opérationnels importants.

Néanmoins, ces opérations ont permis d'expérimenter différentes techniques de transplantation de phanérogames marines, qui se répartissent globalement en sept catégories, de la plus intrusive (impliquant des artefacts durables) à la plus écologique (sans artefacts) (Boudouresque *et al.*, 2001 dans Boudouresque *et al.*, 2021) :

- La mise en place de **dalles en ciment avec des trous dans lesquels sont placés des boutures** (Maggi, 1973)
- La mise en place de **cadres en ciment à l'intérieur desquels sont placés des boutures retenues par un grillage** (Cooper, 1976, 1982 ; Giaccone et Calvo, 1980 ; Chessa et Fresi, 1994 ; Tomasello *et al.*, 2019)
- L'utilisation de **grillages métalliques, plastiques ou biodégradables posés à plat sur le fond, sur lesquels sont fixés des boutures** (Larkum, 1976 ; Molenaar et Meinesz, 1992 ; Molenaar *et al.*, 1993 ; Piazzini et Cinelli, 1995 ; Piazzini *et al.*, 1998, 2000 ; Acuntoni *et al.*, 2015)
- La **fixation de boutures directement sur le fond au moyen de piquets (tuteurs) ou d'agrafes** (Fonseca *et al.*, 1982a ; Molenaar, 1992 ; Rismondo *et al.*, 1995 ; Davis et Short, 1997 ; Ward *et al.*, 2020)
- Le creusement de **trous dans lesquels sont placés des blocs de mat** (Addy, 1947a ; Phillips, 1980a ; Noten, 1983 ; Dennison et Alberte, 1986 ; Chessa et Fresi, 1994 ; Rismondo *et al.*, 1995 ; Faccioli, 1996 ; Sfriso *et al.*, 2019 ; Da Ros *et al.*, 2021)
- La mise en place de **plantules (jeunes individus) ayant germé en laboratoire** (Addy, 1947a ; Cooper, 1976 ; Thorhaug, 1979 ; Lewis et Phillips, 1980 ; Kawasaki *et al.*, 1988 ; Meinesz *et al.*, 1993 ; Piazzini et Cinelli, 1995 ; Balestri *et al.*, 1998 ; Piazzini *et al.*, 2000 ; Tuya *et al.*, 2017)
- La plantation de **graines récoltées en mer ou sur les plages** (Williams et Orth, 1998 ; Terrados *et al.*, 2013 ; Orth *et al.*, 2020)

Le succès de ces différents types d'opérations peut-être très variable. Ces différences principalement par les facteurs suivants :

- L'**espèce considérée** pour la réimplantation et sa rapidité de croissance
- Les **techniques de prélèvement et de réimplantation** utilisées
- Les **facteurs environnementaux** (profondeur, température, substrat, hydrodynamisme, etc)

4.2.3. Zoom sur la Posidonie

La Posidonie (*Posidonia oceanica*) est une espèce **protégée par la législation européenne et nationale** que l'on retrouve sur le littoral des trois régions de Méditerranée française (Occitanie, PACA et Corse), où elle forme de vastes prairies sous-marines comprises **entre 0 et 40 mètres de profondeur**. Au total, elle couvre 34 % des fonds le long du continent, et 66% le long de la Corse.

Les herbiers de Posidonie rendent de **nombreux services écosystémiques** (clarté des eaux, oxygénation, protection contre l'érosion côtière, maintien des équilibres biologiques et physiques, zones de nurseries, etc) qui leur confèrent un rôle essentiel dans le fonctionnement écologique de la Méditerranée et le bien-être des Hommes. A l'échelle de la France, la valeur économique de ces services rendus est estimée entre 25,3 et 45,9 environ 46 millions d'euros par an (Campagne *et al.*, 2015), alors que son coût actuel de protection est évalué à un peu moins de 5 millions d'euros.

Malgré les mesures réglementaires existantes, la Posidonie connaît une **forte régression** sur l'ensemble du bassin Méditerranéen où la surface qu'elle occupait a diminué de 10 % en 100 ans, ainsi qu'en France, où certains secteurs ont perdu jusqu'à 100 ha d'herbier vivant en une dizaine d'années.

Parmi les nombreuses causes de régression de ces herbiers, le **mouillage des bateaux** est à l'origine de dégâts irréversibles. En effet, après avoir été détruite, la recolonisation naturelle de la Posidonie est très lente car sa vitesse de croissance n'est que de quelques centimètres par an dans de bonnes conditions.

Il existe plusieurs solutions pour préserver les herbiers de Posidonie. Ces dernières consistent notamment à :

- **Mettre à disposition des usagers de la mer un outil de connaissance et de gestion de l'environnement marin, grâce à l'application DONIA**, qui met à disposition des plaisanciers la cartographie des fonds marins, permettant ainsi d'aider tout bateau à ancrer en dehors des écosystèmes fragiles comme les herbiers de Posidonie. Il s'agit d'une application communautaire gratuite développée par la société Andromède Océanologie en partenariat avec l'Agence de l'eau RMC en 2013. En intégrant la réglementation en mer, des outils de navigation, de signalisation et d'alarmes, DONIA constitue à la fois un outil de gestion des usages en mer et un moyen de préserver les herbiers.
- **Instaurer un régime cohérent de zones interdites au mouillage dans les herbiers le long du littoral (Préfecture maritime)**, par le biais de deux arrêtés :
 - L'Arrêté n°155/2016, obligeant les grands navires (navires de plaisance supérieurs à 80 m ou autres navires supérieurs à 45 m) à demander une autorisation avant de mouiller
 - L'Arrêté n°123/2019) et ses déclinaisons locales, interdisant certaines zones au mouillage, à tous les navires supérieurs à 24 m.
- **Créer des zones de mouillage préconisées pour les bateaux en dehors des herbiers**, grâce aux zones de mouillage organisé et aux bouées de mouillage. Ces solutions concernent principalement la petite plaisance, mais Donia mooring (Andromède Océanologie a prévu des solutions pour les yachts durant l'été 2022.
- **Restaurer les herbiers de posidonie** *via* différentes méthodes et projets. On parle ici de restauration active impliquant des interventions humaines, et notamment de **renforcement de populations** par réimplantation (planter 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). Il est important de rappeler que la préservation est toujours à mettre en place en premier lieu, avant d'en arriver à la restauration (pour des raisons écologiques et économiques, il vaut mieux éviter de dégrader que dégrader puis restaurer).

[4.2.4.Exemples de projets de restauration de la Posidonie à grande échelle](#)

Les herbiers de Posidonie se caractérisant par une croissance lente et une reproduction rarement réussie, leur recolonisation naturelle après une perturbation reste complexe. Les transplantations à grande échelle permettraient de faciliter le rétablissement des herbiers existants et d'accélérer le processus de récupération. Voici donc trois exemples de projets de ce type :

- **SafeBent (Andromède Océanologie) : Transplantation par déplacement de mottes**

SafeBent® est une opération de transplantation de 500 m² d'herbiers de Posidonie réalisée en 2017 à Monaco, il s'agit d'une mesure d'accompagnement dans le cadre du projet d'extension de l'Anse du Portier en mer. La transplantation a été divisée en deux ateliers : un atelier de prélèvement et un atelier de réimplantation, gérés simultanément grâce à un système de plateforme jackup. Le transport des mottes entre les deux ateliers est assuré par remorquage sous bouées jusqu'à des zones de stockage situées à proximité du lieu de réimplantation (**Figure 14**).

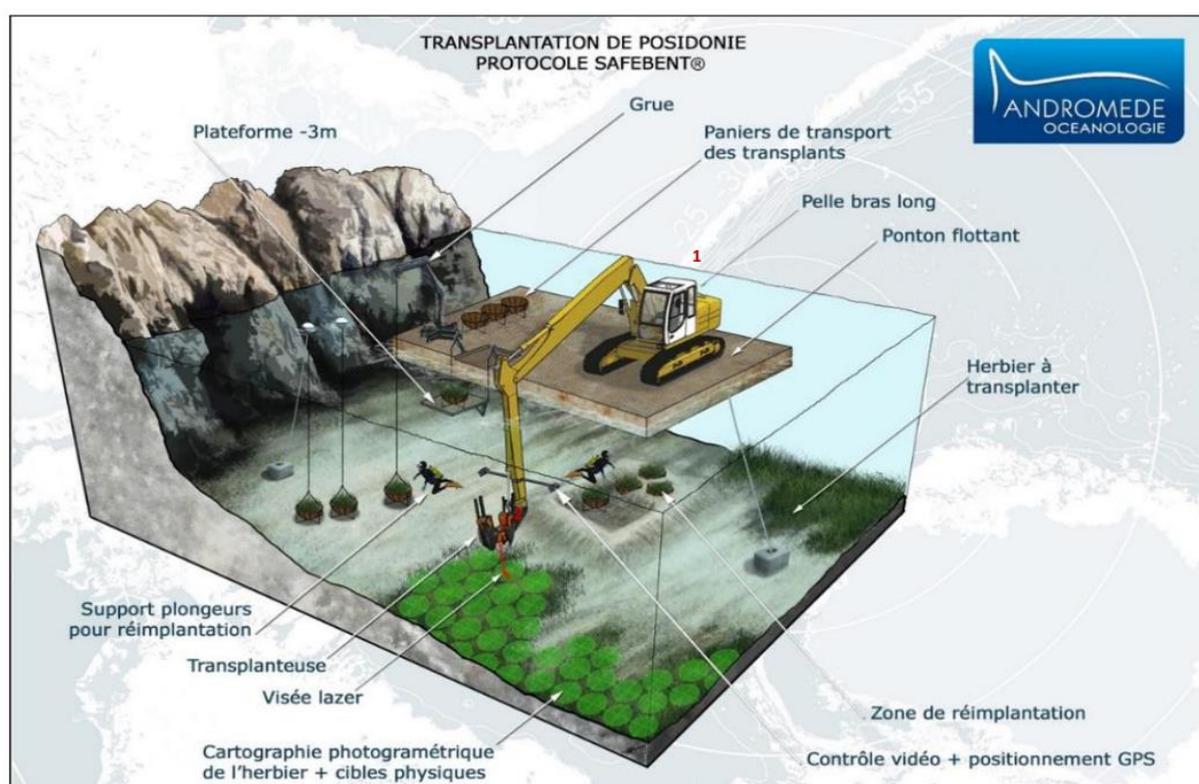


Figure 14. Procédé et équipement utilisés pour le projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)

Le prélèvement des transplants a été réalisé à l'aide d'une transplanteuse opérée par une pelle long bras elle-même équipée de deux rallonges, portant le bras à une longueur totale de 27 mètres. A bord de la transplanteuse, un système d'assistance vidéo permet un prélèvement précis de l'herbier par le pelleur (zone d'herbiers ciblées au préalable). Les zones privilégiées pour le prélèvement étaient celles avec un recouvrement d'au moins 50 %, et situées presque en bordure d'herbier afin qu'il y ait des rhizomes plagiotropes permettant une croissance en dehors des paniers une fois les mottes réimplantées.

Les mottes prélevées sont ensuite placées dans des paniers d'environ 90 cm de diamètre et 60 cm de profondeur, constitués d'une armature métallique en fer et d'une toile de coco, ainsi que d'un couvercle pour le transport (**Figure 15**). La toile coco est conçue pour se déliter au cours du temps, et l'armature en fer est retirée 3 ans après par des plongeurs.

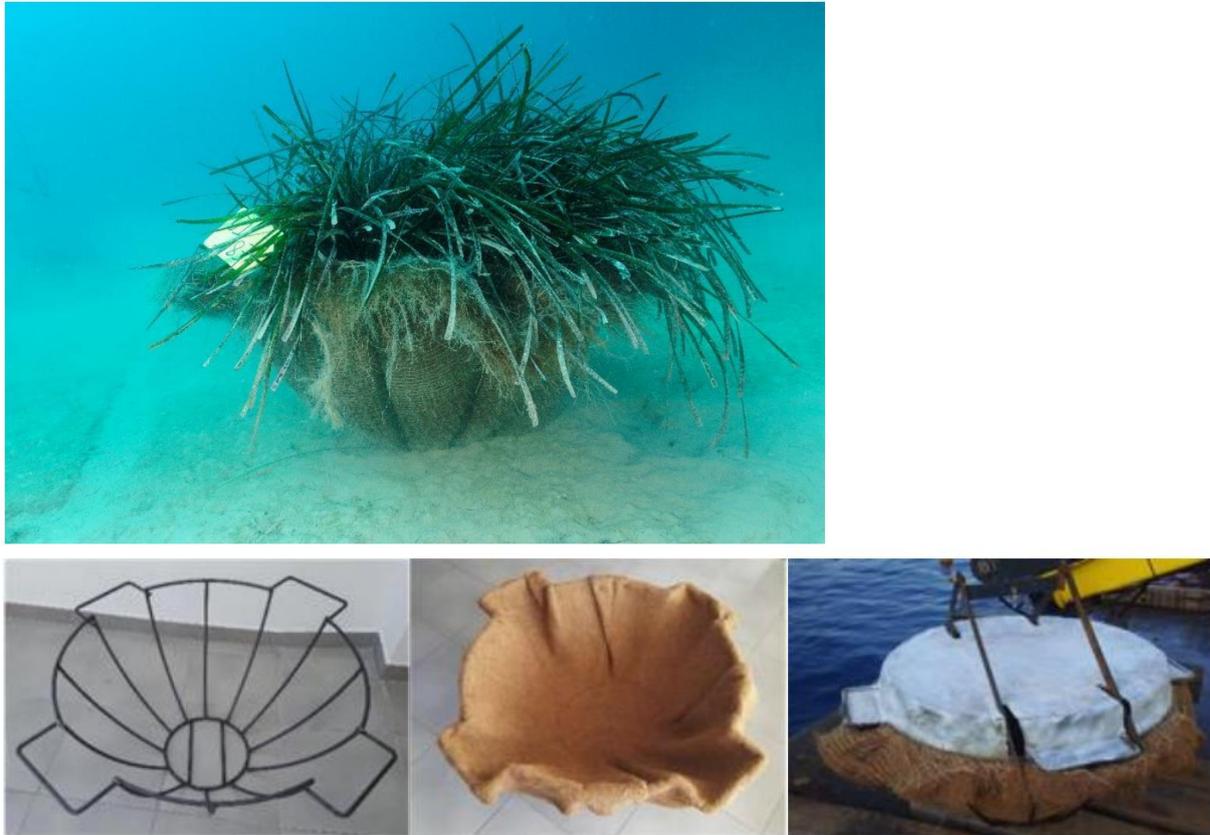


Figure 15. Paniers utilisés dans le cadre du projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)

L'atelier de réimplantation consistait notamment à préparer la zone en creusant des souilles avec une pompe toyo, dans lesquelles il n'y avait plus qu'à positionner les paniers (**Figure 16**). Ainsi, les paniers ont été transplantés sur une zone d'herbier continu située à proximité du chantier, au sein de la Réserve du Larvotto. Un suivi de chacun des paniers a été réalisé pour s'assurer qu'ils soient transplantés dans des conditions environnementales similaires à leurs points d'origine.

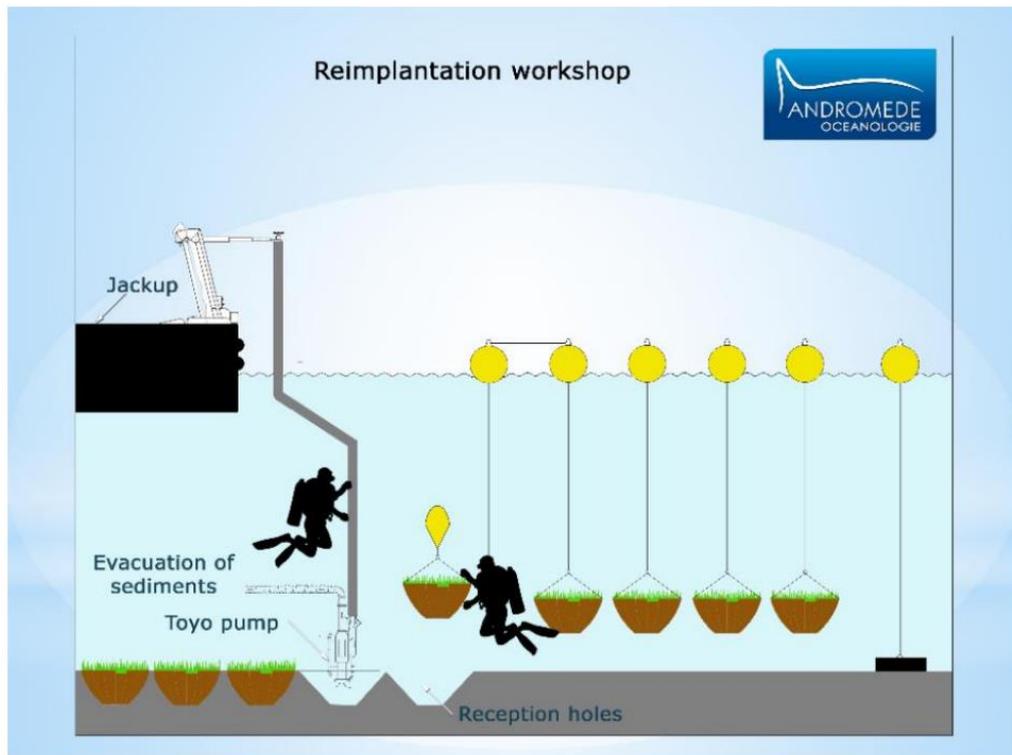


Figure 16. Atelier de réimplantation du projet SafeBent® (source : Andromède Océanologie Monaco)

Le suivi du site pour évaluer l'efficacité de l'opération est toujours en cours actuellement, et sera réalisé sur une dizaine d'année environ. Néanmoins, les résultats préliminaires montrent déjà que :

- Le pourcentage de rhizomes plagiotropes a augmenté dans les paniers de toutes les stations depuis 2019.
- Le recouvrement et la densité de faisceaux ont augmenté depuis l'arrêt des travaux en 2020.
- Les teneurs en carbohydrates (indicateur de réserves de la plante), qui au départ augmentaient avec l'éloignement du chantier (gradient), sont désormais les mêmes pour l'herbier transplanté que pour l'herbier naturel à proximité. Ce gradient a disparu en 2021. L'herbier transplanté a les mêmes réserves que l'herbier naturel à proximité. On a également observé que ces concentrations en hydrates de carbone suivent un cycle saisonnier classique aussi bien dans l'herbier en place que dans les transplants.
- Une floraison a été observée en octobre 2020 à la fois dans l'herbier naturel et dans l'herbier transplanté (ces floraisons ne sont pas observées annuellement).
- Le taux de survie des transplants est actuellement estimé à 83 %, cela malgré la proximité du chantier.

Pour conclure, le projet SafeBent® a permis une restauration à grande échelle présentant beaucoup d'avantages (conservation de la structure de l'herbier, résistance accrue à l'érosion, cadence et capacité de transplantation élevées, transport aisé des mottes dans les paniers...) mais nécessitant d'autre part d'importants moyens, et des coûts très élevés. Ce projet innovant permet un déplacement de l'écosystème dans son ensemble, car le prélèvement de l'herbier avec sa matre permet de conserver les échanges physico-chimiques entre la plante et les sédiments indispensables à sa survie,

de limiter les phénomènes d'érosion et enfouissement des rhizomes, et de conserver les espèces benthiques associées.

- **REPIC (Andromède Océanologie) : Transplantation manuelle de rhizomes isolés en région PACA**

REPIC est un projet initié en 2019 pour renforcer les populations d'herbiers de Posidonie dans des zones qui étaient auparavant impactées par le mouillage. Les objectifs de ce projet sont de :

- Contribuer à un effort collectif pour aider la nature à se rétablir
- Engager une dynamique de restauration des herbiers de Posidonie en plantant des fragments flottants d'herbier
- Comprendre les phénomènes complexes liés à la recolonisation de l'herbier (axe de R&D)

Deux sites ateliers font l'objet de repiquage chaque année depuis 2019 (Golfe-Juan et Beaulieu-sur-Mer). Ces derniers sont propices pour tester la restauration des herbiers du fait des anciennes dégradations liées au mouillage subies par l'herbier, et des nouvelles mesures de protection en place (réglementation du mouillage).

Les boutures utilisées sont récoltées en plongée sous-marine et sont issues de fragments d'herbier arrachés par les ancres des bateaux durant la saison estivale ou cassés de manière naturelle lors des tempêtes. Cette technique de prélèvement ne présente aucun impact négatif sur les herbiers. Les fragments sont ensuite préparés sur le bateau (mise en place d'agrafes métalliques dégradables spécialement conçues et développées pour le projet REPIC sur chaque fragment) et immergés dans des caisses remplies d'eau de mer. Une fois qu'une caisse est pleine, elle est immergée sur le site atelier et le repiquage des fragments est alors réalisé en plongée sous-marine par une équipe de plongeurs (**Figure 17**).



Figure 17. Repiquage d'un fragment d'herbier. Août 2019, Golfe Juan (© Laurent Ballesta – Andromède océanologie)

Chaque année, un suivi des fragments d'herbier plantés est réalisé. Il comprend les paramètres suivants :

- Une analyse des conditions environnementales naturelles des sites ateliers (température de fond et surface, salinité, chlorophylle a, courantologie...)
- Une évaluation du taux de survie et de la vitalité des fragments dans des quadrats permanents

- Un suivi des réserves en glucides (carbohydrates) des fragments (ces réserves assurent la survie de l'herbier au cours des périodes où la luminosité est faible, spécialement durant la période hivernale)
- Un suivi visuel des zones de repiquage par la photogrammétrie (image en vue « aérienne ») (**Figure 18**)

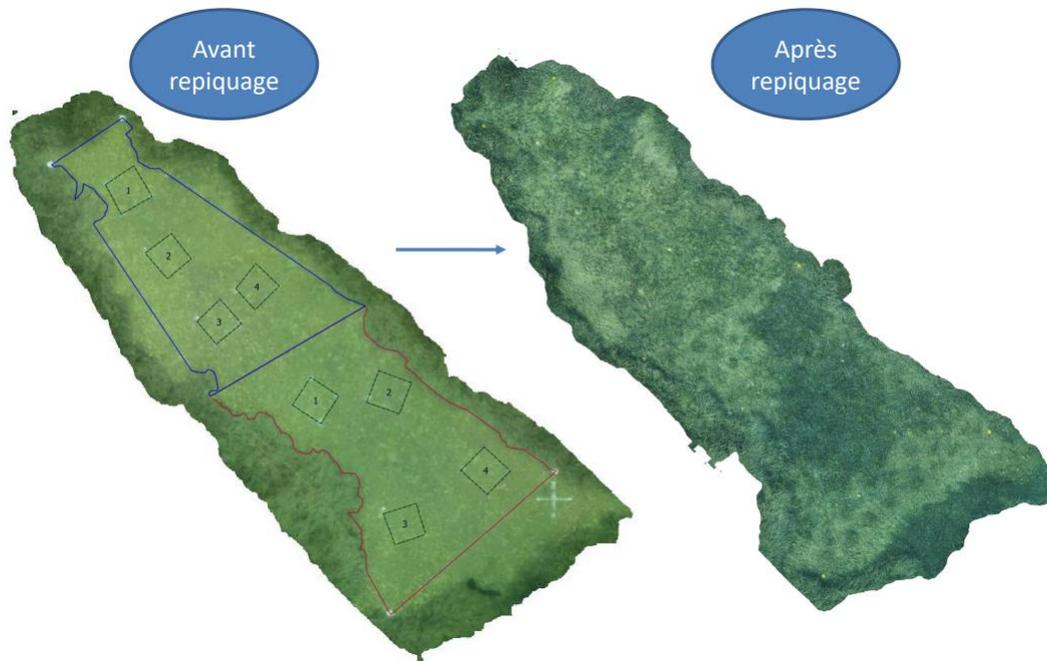


Figure 18. Vue d'un site atelier par photogrammétrie, avant et après repiquage. (Source : Andromède Océanologie)

Sur la période 2019-2021, le projet REPIC a représenté un total de 51 jours de terrain répartis en trois missions, correspondant à 430 heures de plongée (155 heures de récolte de fragments et 275 heures de repiquage et suivi scientifique), au cours desquelles 14 646 fragments portant 66 045 faisceaux ont été plantés sur les deux sites ateliers. Ces trois années d'expérimentation montrent des résultats positifs : le recouvrement par les fragments dans les zones de repiquage est stable, et le taux de survie est supérieur à 80 % dans les quadrats permanents.

Les **perspectives** pour le projet sont d'ajouter deux nouveaux sites ateliers localisés à St Tropez et Villefranche (sites envisagés, sous réserve des financements), et de réaliser du repiquage d'herbier sur une surface totale de 1 000 m².

- **Costa Concordia (Mancini *et al.*, 2022) : Transplantation manuelle de rhizomes isolés en Italie**

Ce projet de transplantation a été mis en place sur le site du naufrage du Costa Concordia, situés près de l'île du Giglio au large de la Toscane, en Italie. De 2012 à 2015, la zone a été exposée à de multiples perturbations liées à l'accident et aux activités d'enlèvement, qui ont mécaniquement et physiquement affecté l'herbier de Posidonie installé : 8 427 m² de *Posidonia oceanica* ont disparu, laissant sur le fond un substrat de matre morte de 5 à 35 mètres de profondeur.

Une zone de transplantation de 2 048 m² a été sélectionnée et divisée en cinq sous-zones, situées entre 10 et 23 m de profondeur. Quatre campagnes de transplantations ont eu lieu entre 2019 et 2022, durant lesquelles 190 plongées ont été effectuées, pour 7 900 boutures plantées avec des piquets (**Figure 19**). Comme pour le projet REPIC, les boutures étaient issues de fragments arrachés par les ancrs des bateaux et par les tempêtes.

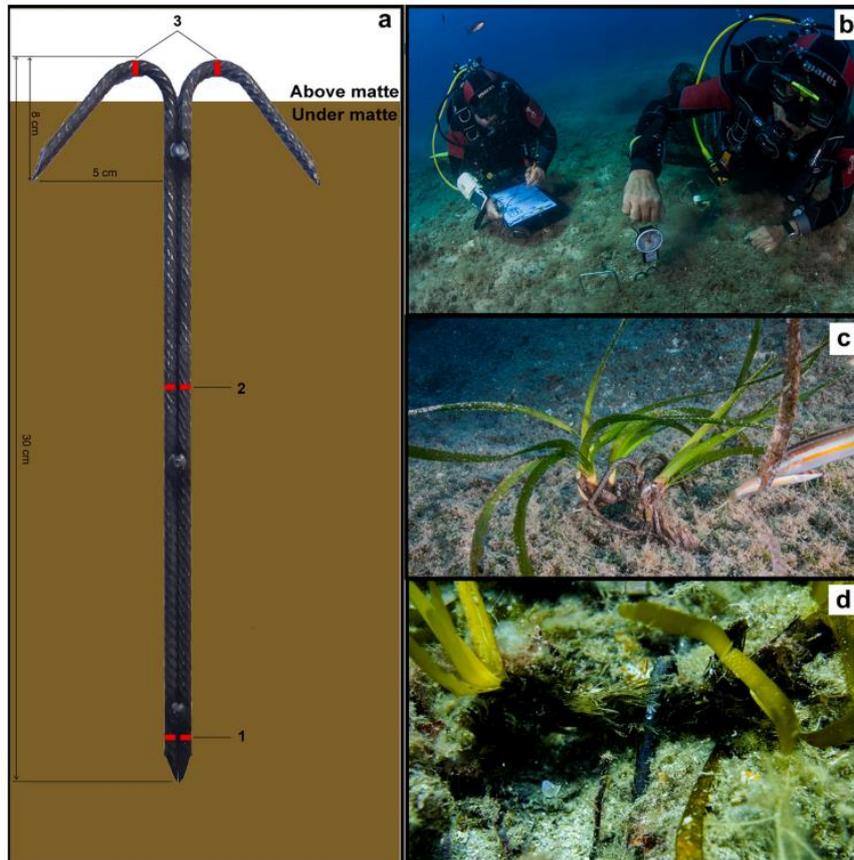


Figure 19. Illustration de la méthode de repiquage utilisée. La forme et la taille des piquets (a) ont été conçues et leur force de traction a été testée sous l'eau (b) avant de fixer les boutures sur la matte morte (c, d). Les sections 1, 2 et 3 sont des points de mesure du diamètre des piquets pour évaluer leur dégradation au cours du temps, correspondant à différents niveaux de plantation ("1" partie inférieure, "2" partie intermédiaire, "3" partie supérieure). (Source : Mancini *et al.*, 2021)

Le suivi de la Posidonie transplantée est réalisé à une échelle large avec la photogrammétrie pour évaluer le recouvrement, et à une échelle plus fine afin d'évaluer certains paramètres dans des carrés de surveillance spécifiques et fixes (taux de survie, densité des pousses, croissance des feuilles, etc) (**Figure 20**).

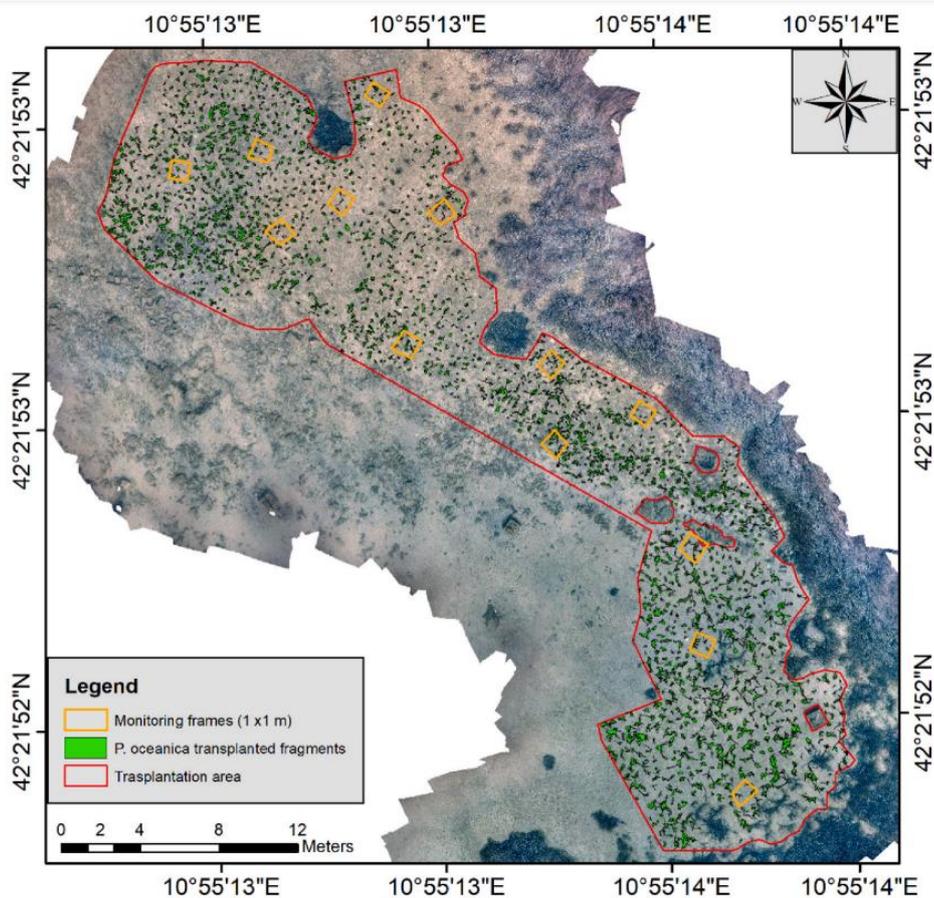


Figure 20. Orthophotomosaique RVB de la zone de transplantation à la fin du mois de septembre 2020, montrant les fragments de *P. oceanica* transplantés et les quadrats de suivi de 1 × 1 m. (Source : Ventura *et al.*, 2022)

4.3. La restauration du coralligène et des coraux

4.3.1. Généralités

Le coralligène est un habitat qui se compose de blocs de concrétions organiques, principalement d'algues calcaires et d'animaux bio-constructeurs comme les bryozoaires, les serpulidés, les cnidaires, les mollusques, les éponges, les crustacés et les foraminifères. Ces blocs sont des hot spots de biodiversité qui représentent un substrat pour la fixation et la croissance d'autres organismes comme les colonies de corail rouge ou de gorgones. En termes de biodiversité, le coralligène constitue le deuxième écosystème clé de Méditerranée, juste après les herbiers de Posidonie. En effet, on estime qu'il y a environ 1 800 espèces (fixées et libres) associées au coralligène, dont beaucoup d'espèces protégées, commerciales et patrimoniales. On peut le trouver dans des zones très profondes (jusqu'à 120 m) éloignées des pressions anthropiques et moins sensibles au réchauffement, etc, qui sont alors dites « refuge ».

Les concrétions coralligènes ont un taux de croissance assez lent et une grande longévité, et sont dépendantes de l'équilibre entre leur bio-construction et la bio-érosion. Elles forment une mosaïque complexe de micro-habitats qui peut prendre la forme de massifs, de tombants, etc.

Le coralligène, qui présente également une forte valeur esthétique, est un habitat très sensible qui subit de nombreuses perturbations d'origine anthropique directes ou indirectes, tels que des dommages mécaniques liés aux engins de pêche, la pollution, la sédimentation, la surfréquentation par les plongeurs, les invasions biologiques, les anomalies de températures, etc.

4.3.2. Surveillance du coralligène

Le coralligène est suivi dans le cadre du **réseau de surveillance RECOR** (https://medtrix.fr/portfolio_page/recor/), mis en place depuis 2010 par Andromède Océanologie en partenariat avec l'Agence de l'eau RMC. Ce réseau fonctionne par campagnes régionales annuelles : tous les trois ans, les mêmes sites sont suivis en Corse, Occitanie et PACA. Au total, 190 stations allant de 17 à 115 m de profondeur, réparties sur 111 sites (**Figure 21**), sont suivies en France. La base de données comprend alors actuellement 539 suivis de récifs coralligènes réalisés entre 2010 et 2021.



Figure 21. Localisation des sites suivis dans le cadre du réseau RECOR. (source : <https://plateforme.medtrix.fr/>)

Le suivi de ces récifs coralligènes se fait par **quadrats photographiques** : une trentaine de photographies de quadrats de 50x50 cm, sont prises et analysées pour chaque station (**Figure 22**). A partir de ces quadrats, on va ensuite utiliser un logiciel qui va répartir 64 points de manière aléatoire, sur lesquels une personne va évaluer les espèces présentes, la nature des sédiments, etc. A partir de cette analyse, on peut calculer de nombreux paramètres sur chaque site, et comparer leur évolution (en retournant sur les mêmes sites tous les 3 ans) pour pouvoir évaluer l'état écologique du coralligène.

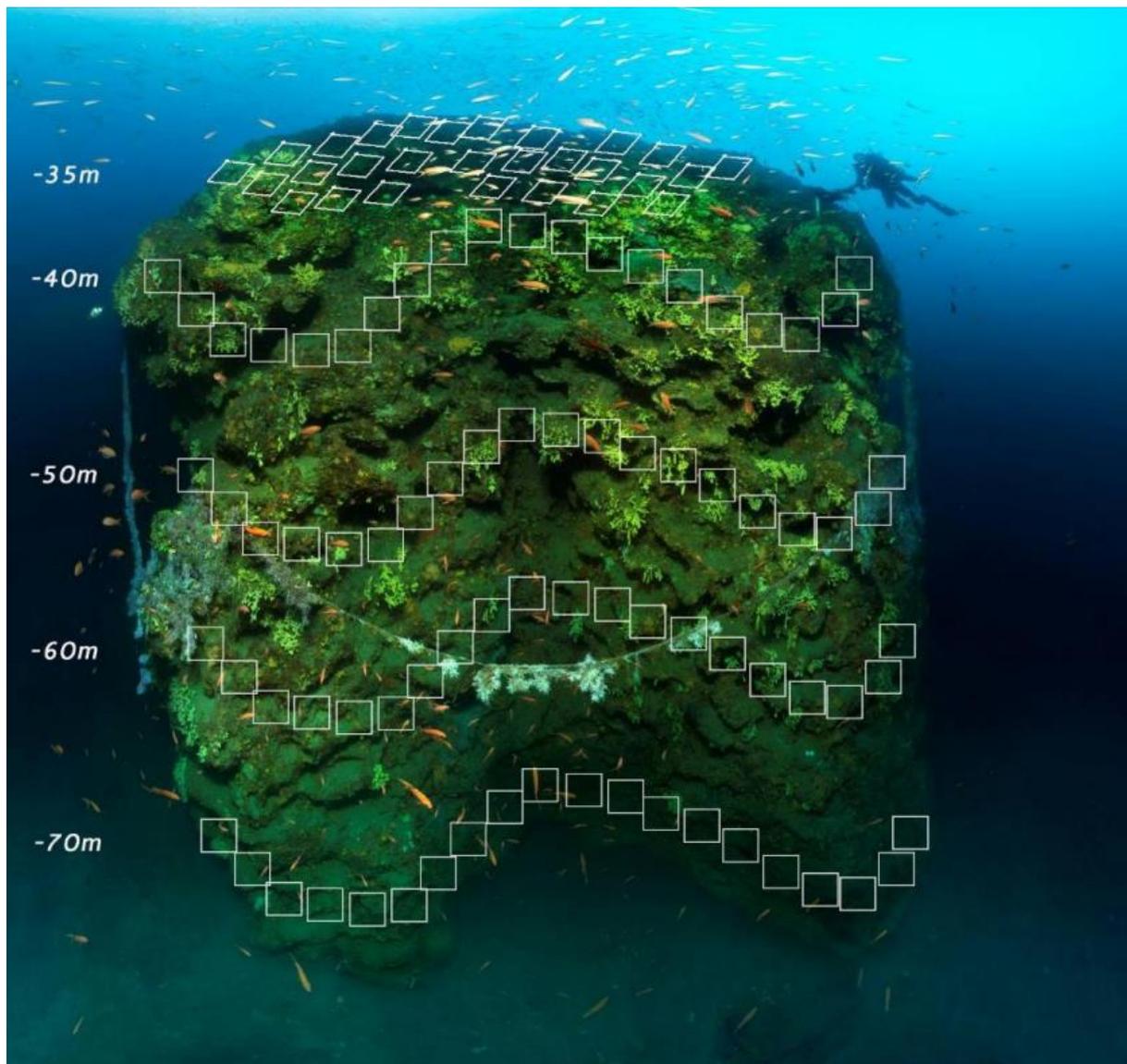


Figure 22. Exemple de suivi d'un site comportant cinq stations. 30 quadrats sont réalisés à 70 m, puis à 60 m, 50 m, 40 m, et 35 m. (Source : Andromède Océanologie)

Une surveillance des populations de gorgones est également effectuée sur certains sites, qui consiste à suivre la taille et la nécrose des individus au cours du temps.

Parmi toutes les sources de dégradations du coralligène et des coraux, certaines sont incontrôlables et causent des dégâts irréversibles (épisodes de maladies, réchauffements de l'eau, etc). Cependant, il est toujours possible d'agir sur la nature des substrats et sur le peuplement et les espèces présentes, en prenant des mesures de restauration active ou passive. En 2007, Edwards et Gomez ont proposé un « arbre de décision » pour aider à identifier le potentiel de rétablissement naturel d'un site dégradé et choisir les mesures de restauration qui pourraient être appropriées (**Figure 23**). Initialement créé pour les récifs coralliens, celui-ci peut être appliqué au cas des récifs coralligènes.

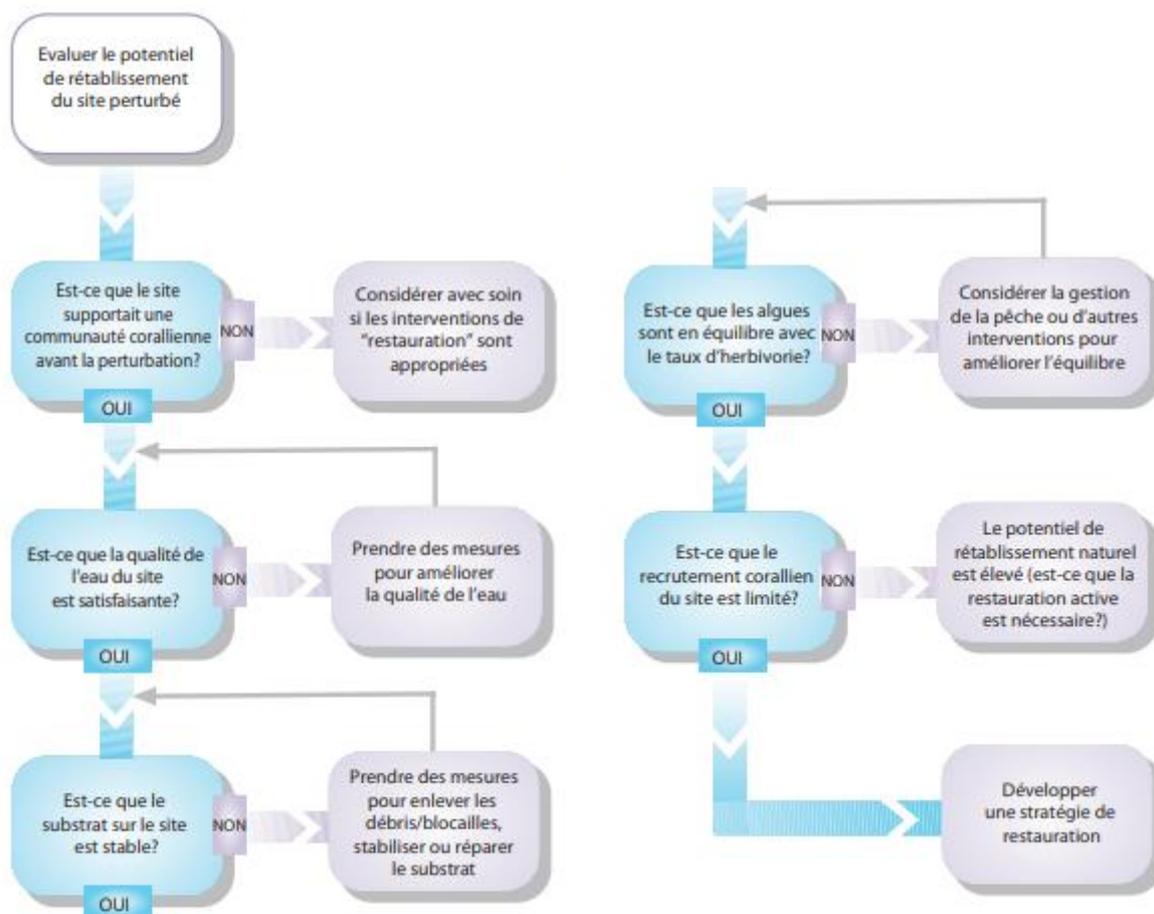


Figure 23. Arbre de décision pour aider au processus devant conduire à une action de restauration écologique des récifs coralliens. (Source : Edwards et Gomez, 2007)

4.3.3. Exemples de projets de restauration

Une fois le substrat réhabilité, on peut alors envisager un plan de restauration avec, par exemple, transplantation d'espèces. Ci-dessous, deux exemples de projet de désensivellement de récifs coralligène, suivis d'exemples de transplantations d'espèces. Les gorgones et le corail rouge notamment, sont des espèces emblématiques du coralligène, particulièrement sensibles et impactées par les anomalies thermiques comme celles connues en Méditerranée Occidentale lors de deux épisodes particulièrement meurtriers (en 1999 et 2003).

- **Réhabilitation du tombant des Spélugues à Monaco (Andromède Océanologie)**

L'aménagement du littoral monégasque commence dès le début du XX^{ème} siècle, avec d'abord la construction d'une route le long du bord de mer, puis d'un tunnel, et d'un port (Port Hercule). A partir des années 70, on observe un réel changement de la physionomie de la pointe Focinane, avec la création d'un hôtel qui a engendré le déversement d'une grande quantité de remblais le long de la côte, constituant des apports massifs qui ont complètement ensevelis les petits fonds et notamment le plateau du tombant des Spélugues, qui se trouve au niveau de la pointe. Entre 2002 et 2004, une grande digue flottante et une contre-digue ont été ajoutées, modifiant de manière importante l'hydrodynamisme dans ce secteur, puis en 2019 ont commencé les travaux d'extension en mer de l'Anse du Portier (Figure 24).

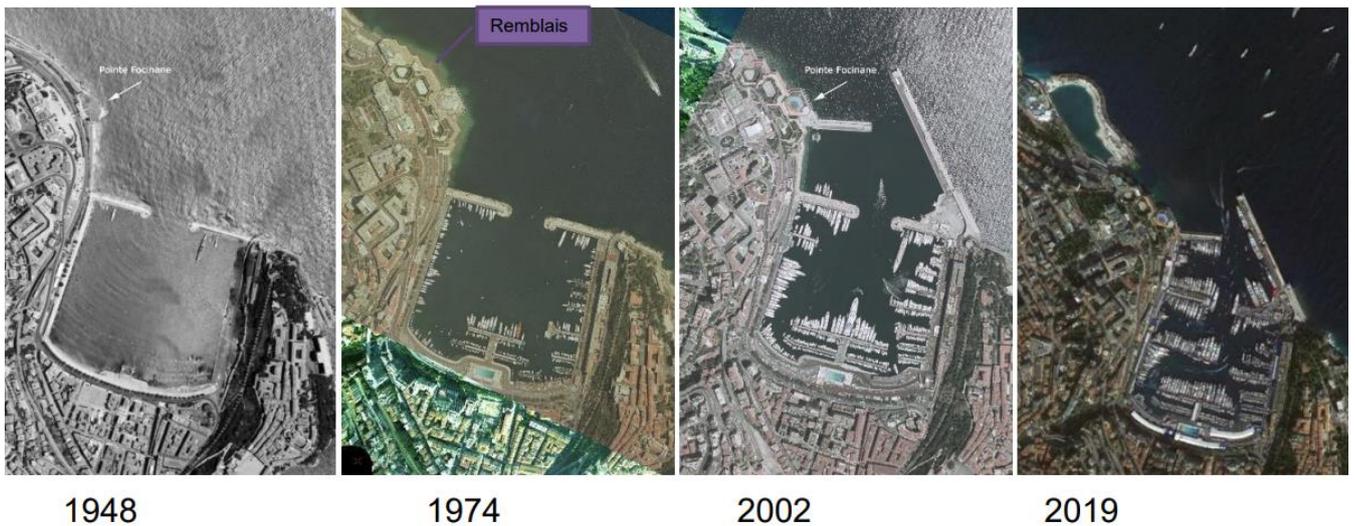


Figure 24. Evolution de l'aménagement de la Pointe Focinane de 1948 à 2019..

La pointe Focinane et le tombant des Spélugues ont progressivement été enchâssés dans les aménagements maritimes, ce qui a engendré des modifications importantes des peuplements animaux et végétaux du tombant. On peut y observer différents types d'impacts tels que des écoulements de graviers et de sable sur les parois et cavités, des dépôts sédimentaires sur les parois, l'ensevelissement des substrats rocheux sur le plateau, ou des monticules de graviers au pied du tombant.

Dans le cadre des travaux d'extension en mer de l'Anse du Portier, Andromède Océanologie a été chargé de faire un nettoyage du tombant des Spélugues entre 2020 et 2021. Il y a eu quatre phases pour la réhabilitation des substrats, qui ont duré au total 80 jours, avec plus de 1 000 plongées individuelles :

- Le pompage des matériaux du plateau à l'aide d'une pompe Toyo
- Le pompage des matériaux non accessibles du plateau à la pompe Toyo avec le système Air lift (**Figure 25**) (pour les grottes, zones de forte pente, cuvettes, etc.)
- L'arasement des monticules de graviers présents au pied du tombant par Air lift
- Le nettoyage des parois du tombant par aspiration à l'Air-lift

Les sédiments aspirés (qui étaient non pollués) ont été relargués au large, dans du sable détritique à 50 m de profondeur.

Pendant ces 80 jours, 3 000 m² de substrat rocheux ont été dégagés, et 350 m³ de sédiments et ballast enlevés. Toutes les surfaces verticales et cavités ont été nettoyées sur environ 8 000 m². Cette opération a également permis la découverte de 50 m² de matre de Posidonie sur le plateau, ainsi que des coraux et gorgones pétrifiés.

Ce type d'action peut être considéré comme de la restauration passive, étant donné qu'elle a permis de mettre en place des conditions favorables aux processus naturels de rétablissement de l'écosystème. L'idée serait de mettre ensuite en place des opérations de restauration active, telles que des transplantations de Posidonie sur le plateau, ou de gorgones/corail rouge sur les parois du tombant.

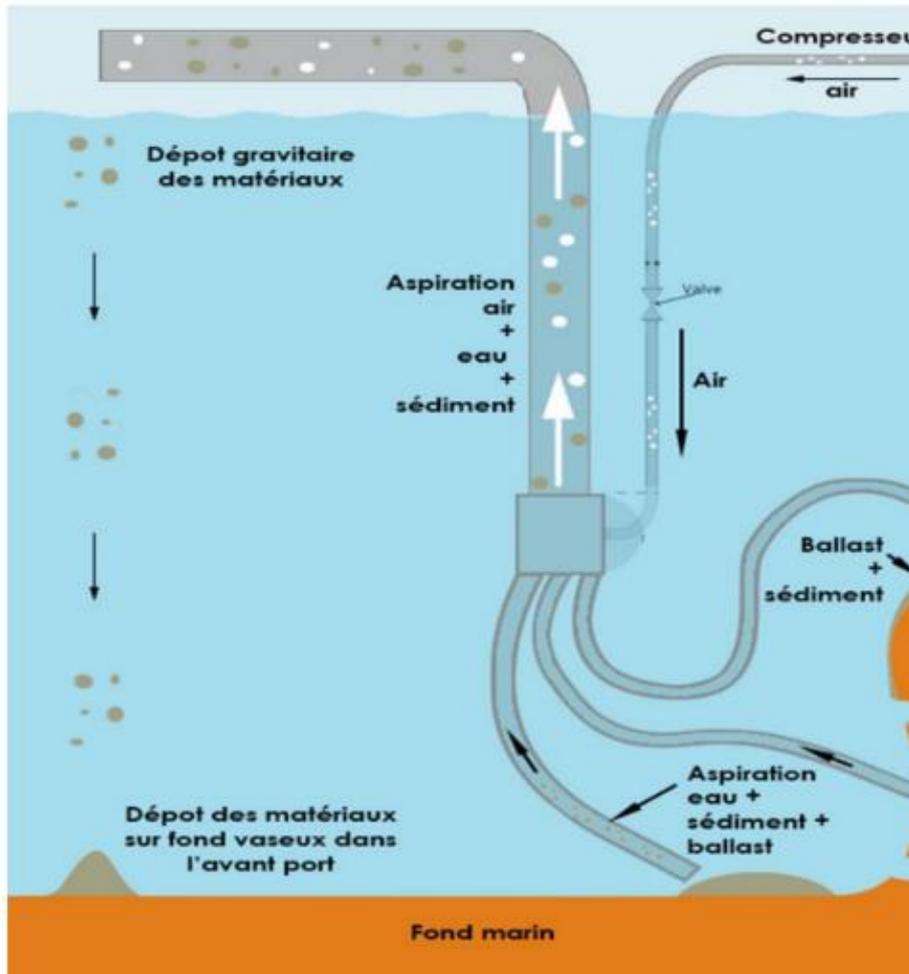


Figure 25. Schéma représentant le système Air lift. (Source : diaporama de Gwénaëlle Delaruelle lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 9 mai 2022)



Figure 26. Photographies de la paroi du tombant des Spélugues prises avant et après l'opération de nettoyage. (Source : Andromède Océanologie)

- **RESCOR (Andromède Océanologie) : Restauration des communautés des récifs coralligènes du Cap Ferrat**

En 2007, des travaux de remplacement de l'émissaire de la Causinière à Saint-Jean-Cap-Ferrat (Alpes-Maritimes) ont entraîné l'ensevelissement du massif coralligène au Sud-Est du Cap Ferrat (**Figure 27**). L'objectif du projet RESCOR était donc de restaurer les communautés des récifs coralligènes (rétablir la biodiversité, la structure et la dynamique de l'écosystème existant avant la destruction) sur une zone test au sein de ce site.

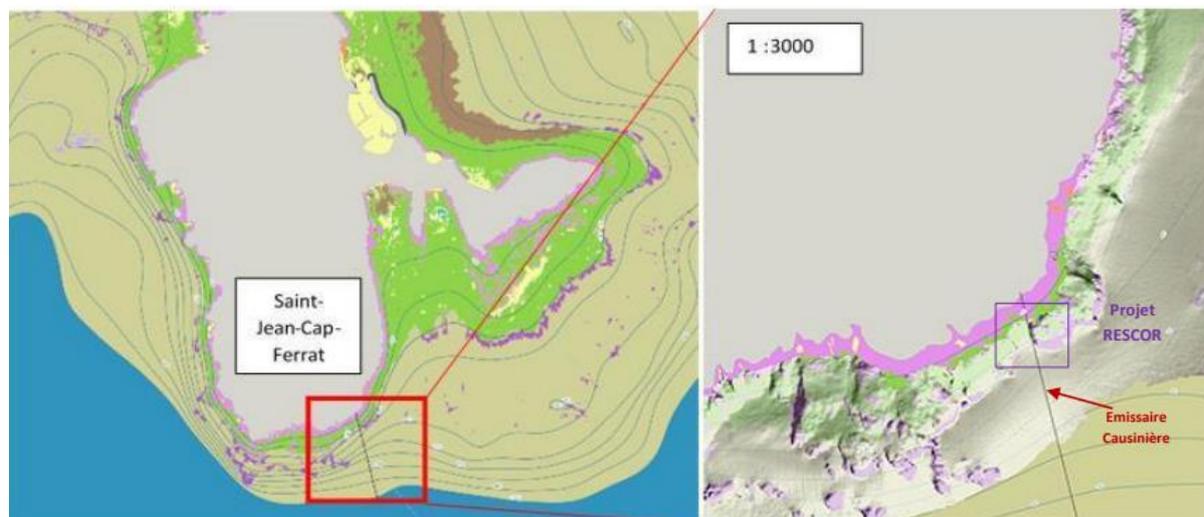


Figure 27. Localisation de la zone du projet RESCOR. (Source : www.plateforme.medtrix.fr)

Ce projet a débuté avec une cartographie de la zone de dépôt identifiée pour l'immersion des sédiments faite à partir de levés bathymétriques au sonar et de vérités terrain, et la caractérisation des sédiments de la zone du projet et de la zone de dépôt. Les sédiments ont ensuite été retirés et analysés pour s'assurer qu'ils n'étaient pollués avant d'être remis au fond, et le récif a été nettoyé. Enfin, un suivi temporel a été mis en place pour caractériser les communautés du récif coralligène, utilisant trois méthodes complémentaires : la **photogrammétrie**, les **quadrats photographiques** et les **quadrats permanents**. Ces dernières ont été utilisées avant le nettoyage du coralligène pour établir l'état zéro des communautés avant l'opération, puis une à deux fois par an, à chaque suivi scientifique du récif, soit depuis 2018 (Andromède Océanologie, 2020).

La photogrammétrie permet de modéliser la zone en trois dimensions et de produire des visuels pouvant être utilisés pour expliquer les actions de désensevelissement, communiquer sur le projet et produire des indices écologiques pour un suivi temporel objectif.

Pour les quadrats photographiques, la même méthode que le réseau de surveillance RECOR a été utilisée : 30 quadrats de 2 500 cm² réalisés par station, sur trois stations au total. Deux des stations se situent sur des zones de nettoyage de part et d'autre de l'émissaire, respectivement à 36 et 40 m de profondeur, et la troisième se trouve à 38 m sur une zone où il y a eu retrait des sédiments puis nettoyage (**Figure 28**).

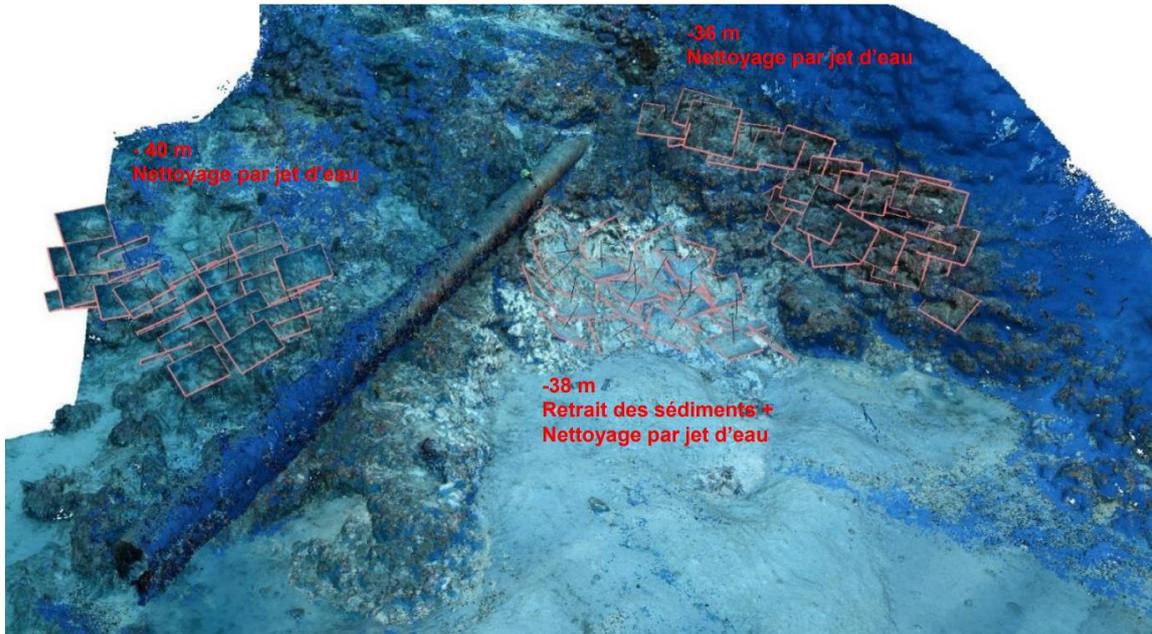


Figure 28. Représentation des zones de suivi par quadrats photographiques (en rouge). (Source : Andromède Océanologie)

C'est dans cette dernière zone plus centrale qu'ont été mis en place les 14 quadrats permanents d'1 m², chacun équipé d'une balise pour suivre finement l'évolution de la recolonisation du substrat par les organismes. Ces derniers comptent des quadrats dits « désensévelis » (retrait des sédiments et nettoyage), et « nettoyés » (nettoyage seulement). Pour chacun de ces quadrats, les différents groupes du vivant observés sont détournés à la main sous Photoshop (Figure 29).

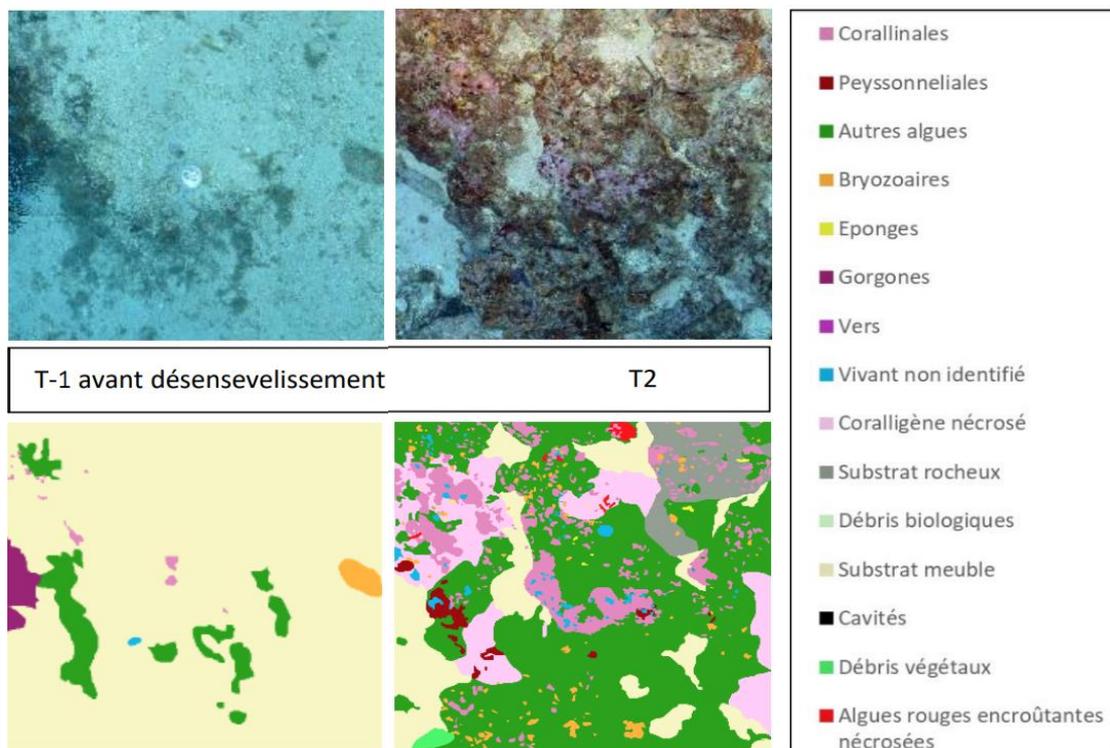


Figure 29. Exemple d'analyse de quadrats permanents désensévelis à T-1 (avant désensévelissement) et T3. (Source : Andromède Océanologie)

Le retrait des sédiments et le nettoyage de la zone du projet ont nécessité 320 heures d'intervention, pour un total de 50 m³ de sédiments retirés et 500 m² de récifs nettoyés. La configuration du site et la nature grossière des sédiments à retirer ont favorisé l'utilisation de la méthode par jet d'eau.

Le suivi par photogrammétrie a permis de rendre compte de l'évolution générale de la colonisation progressive du récif grâce aux changements de colorimétrie (**Figure 30**).

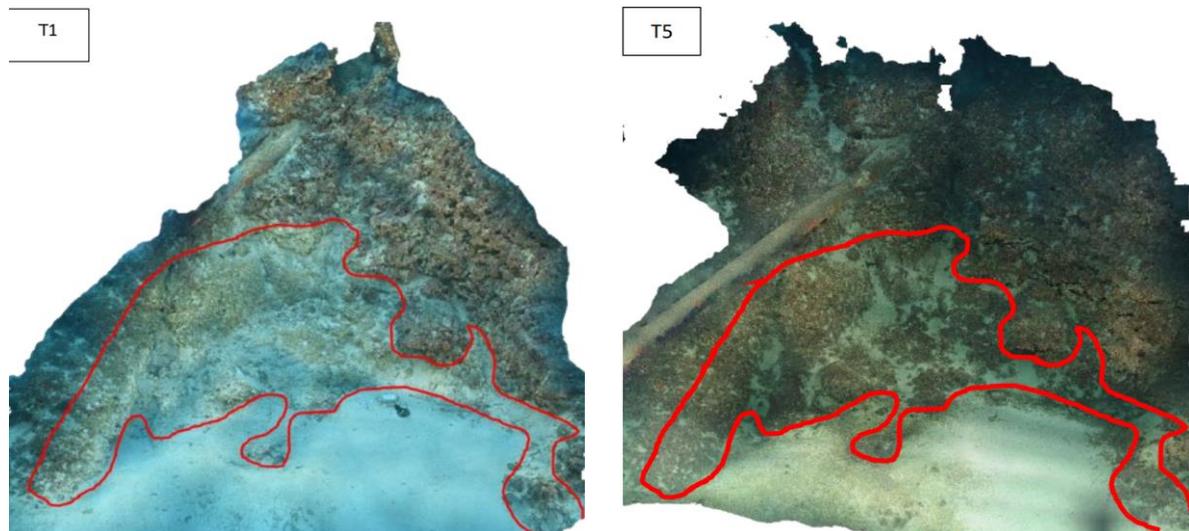


Figure 30. Suivi photogrammétrique d'une zone de nettoyage du projet RESCOR à T1 et T5. (Source : Andromède Océanologie)

L'analyse des quadrats permanents désensévelis a montré que les opérations de retrait des sédiments et de nettoyage ont permis de faire apparaître les débris biologiques et le coralligène nécrosé de l'ancien récif vivant ayant été enseveli durant les travaux. En effet, à T0, le coralligène nécrosé représentait près de 70 % de la surface de ces quadrats.

La **figure 31** montre également que le pourcentage du vivant a d'abord diminué au début car toutes les algues filamenteuses qui recouvraient les sédiments ont été aspirées, mais a ensuite augmenté à chaque suivi post-opération. Le pourcentage au T3 supérieur à celui du T1 (+15 %) montre que le substrat continu d'être colonisé naturellement. Dans le cas des quadrats nettoyés, le pourcentage de vivant diminue de la même façon au début, puis augmente jusqu'à 30 % au T2, et re-diminue au T3 pour atteindre une valeur quasiment identique à celle du T1.

Ce suivi permet de mettre en avant la complémentarité des méthodes utilisées (quadrats permanents/quadrats photographiques). En effet, les quadrats permanents permettent un suivi précis de l'évolution surfacique des différents groupes du vivant, alors que les quadrats photographiques permettent d'avoir une identification précise des espèces, et de leur succession au cours du temps.

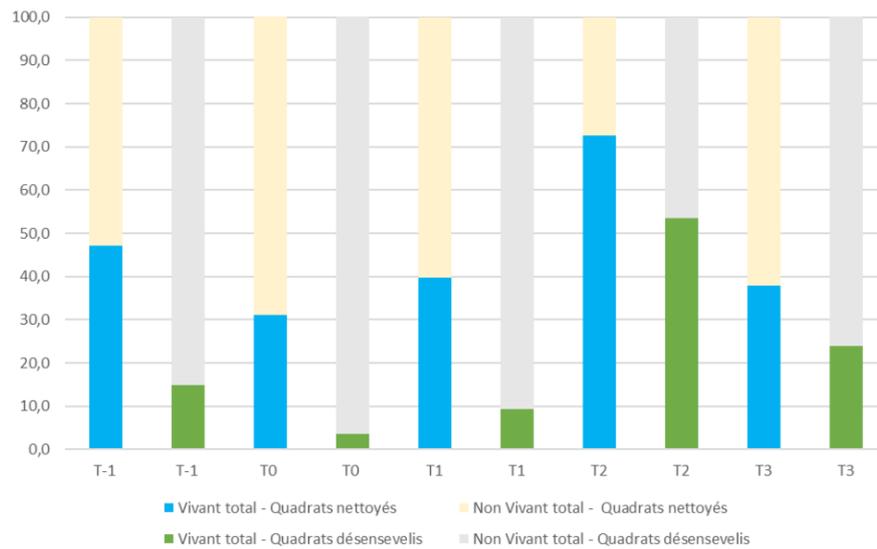


Figure 31. Analyse des proportions de vivant et non-vivant sur les quadrats permanents nettoyés et désensevelis. (Source : Andromède Océanologie)

- **TRANSCOR (Septentrion Environnement) : Programme expérimental de transplantation de corail rouge et gorgone rouge dans le Parc National des Calanques**

Le projet TRANSCOR, mené par Septentrion Environnement jusqu'à fin 2021, a expérimenté des transplantations de *Corallium rubrum* (corail rouge) et *Paramuricea clavata* (gorgone rouge) au sein du Parc National des Calanques (**Figure 32**). L'objectif global de ce programme expérimental était d'explorer les solutions permettant de préserver ou de restaurer ces populations soumises à des perturbations liées au changement global ou aux diverses pressions d'origine anthropique.

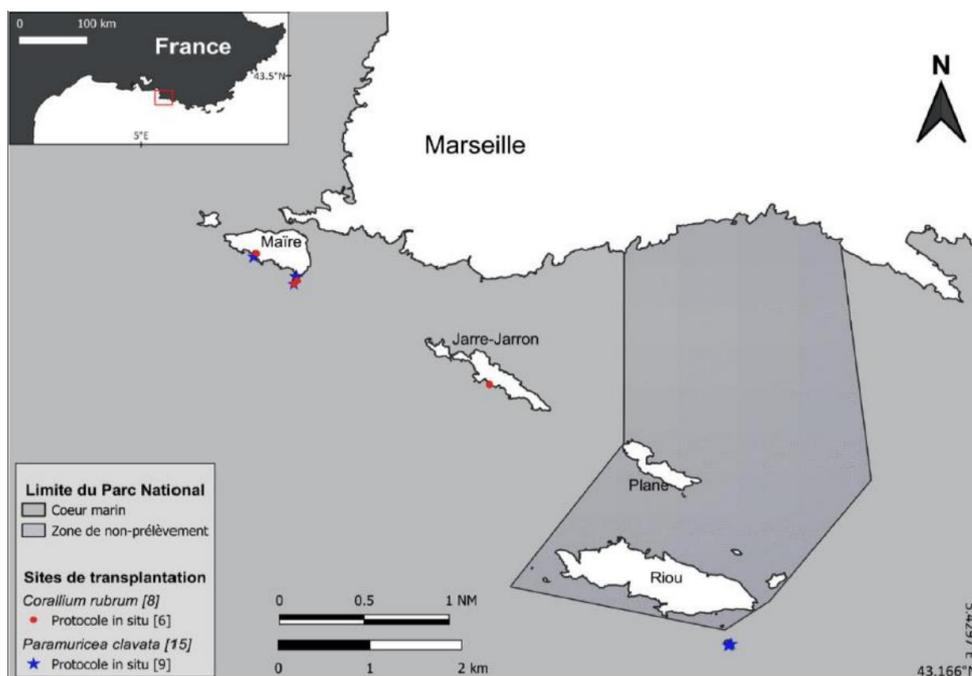


Figure 32. Sites de transplantation du protocole 1 du projet TRANSCOR (transplantation *in situ*). Les cercles rouges représentent les sites de transplantation de *C. rubrum* et les étoiles bleues les sites de transplantation de *P. clavata*. (Sources : Estaque, 2021 ; Parc National des Calanques, IGN, Septentrion Environnement)

Des prélèvements de fragments de corail et de gorgone rouge ont été effectués auprès de colonies donneuses et transplantées ailleurs pour former de nouvelles colonies et étudier leur survie dans trois situations :

- Le changement de température (lié à la profondeur) : les fragments sont transplantés à des profondeurs différentes de la colonie donneuse.
- Le changement de température et de support : les fragments sont transplantés à des profondeurs et sur des supports différents de la colonie donneuse.
- Une température constante : les fragments sont transplantés à la même profondeur que la colonie donneuse.

Ce protocole est mis en place dans l'objectif de comprendre la résistance de *C. rubrum* et *P. clavata* à la méthode de transplantation, au changement de contexte thermique (anomalies thermiques) et environnemental (pollution anthropique).

L'opération a été réalisée en plongée, en commençant par prélever le corail rouge manuellement et les gorgones rouges à l'aide d'un sécateur. La transplantation a ensuite été effectuée en insérant les fragments dans du mastic époxy bi-composant apposé sur le substrat, après l'avoir mis à nu en le nettoyant avec une petite brosse.

L'opération a totalisé 200 transplantations de *C. rubrum* et 800 transplantations de *P. clavata*, et un suivi des transplants a été mis en place à T0 + 1, 3, 6, 12 et 24 mois. Chaque session de suivi consiste en des observations visuelles de la présence ou absence des transplants et de leur taux de nécrose, et en des relevés photogrammétriques afin d'évaluer de la croissance des transplants de *C. rubrum*.

Le suivi à T+6 mois a montré les résultats suivants (Estaque, 2021) :

- 67,5 % des transplants de *C. rubrum* et 41.4 % de *P. clavata* étaient encore présents, et cette présence semblait influencée par le site ou sous-site de transplantation (présence de fort courant, grande affluence de plongeurs...).
- 96,3 % des transplants de *C. rubrum* et 89.3 % de *P. clavata* toujours présents ne montraient aucun signe de nécrose.

- **Costa Concordia (Casoli *et al.*, 2022) : Transplantation de gorgones à grande échelle en Italie**

Cette opération a été menée sur une surface de 20 000 m² sur le site du naufrage du Costa Concordia, situé près de l'île de Giglio en Italie. Durant l'été 2018 et 2019, des transplantations de gorgones jaunes (*Eunicella cavolinii*), gorgones blanches (*Eunicella singularis*), et gorgones rouges (*Paramuricea clavata*) ont été réalisées sur des récifs coralligènes entre 20 et 35 m de profondeur. Les colonies, issues de captures accidentelles par les engins de pêche (collaboration avec les pêcheurs artisanaux locaux) ou trouvées par des plongeurs autour de l'île, ont été fixées directement sur le substrat à l'aide de mastic époxy.

Au total, 135 gorgones ont été transplantées, dont 85 % d'*E. cavolinii*, et un suivi par recensements visuels sous-marins et échantillonnages photographiques a été mis en place, au cours duquel des données ont été collectées sur 14 sessions de suivi, réparties sur deux ans et demi.

Le taux de survie des gorgones était de 82,1 % au bout de deux ans et demi, avec pour chaque espèce une baisse importante au cours des deux premiers mois après la transplantation puis une stabilisation (**Figure 33**). Le suivi a également montré que 85 % des pertes étaient dues au détachement des transplants de la base en mastic, et 15 % à de la nécrose.

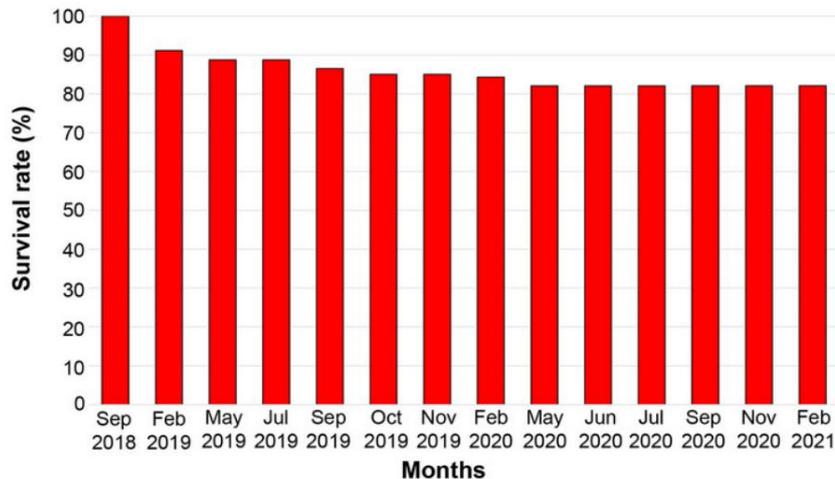


Figure 33. Evolution du taux de survie des gorgones transplantées au cours des suivis. (Source : Casoli *et al.*, 2022)

Cette étude représente un projet de restauration active efficace qui comprend la suppression des perturbations à l'origine de la perte d'habitat, la gestion du site d'intervention, les procédures de surveillance active, et la participation des acteurs locaux. Elle a démontré, au même titre que le projet TRANSCOR, la facilité de la méthode de fixation au mastic époxy pour la transplantation de colonies de gorgones sur des récifs coralligènes. Les gorgones obtenues à partir des prises accessoires de pêcheurs artisanaux se sont également avérées être un matériel de transplantation efficace.

- **MERCES (Cerrano *et al.*, 2018) : Transplantation de gorgones à grande échelle en Italie**

MERCES est un projet européen coordonné depuis 2016 par l'Université Polytechnique de Marche (Italie), qui réunit 28 institutions de 16 pays différents, pour un budget de 6 millions d'euros (<http://www.merces-project.eu/>). Il est axé sur la restauration de différents habitats marins dégradés, dans le but de :

- Evaluer le potentiel des différentes technologies et approches de restauration ;
- Quantifier les retours en termes de services écosystémiques et leurs impacts socio-économiques ;
- Définir les cadres juridiques, politiques et de gouvernance nécessaires pour optimiser l'efficacité des différentes approches de restauration.

Dans le cadre de ce projet, des transplantations de différentes espèces de spongiaires et de cnidaires ont été expérimentées.

Concernant les spongiaires (*Spongia lamella*, *Spongia officinalis*, *Petrosia ficiformis*, *Chondrilla nucula*), les fragments d'éponges à squelette dur ont été collés directement au substrat avec un mastic époxy à deux composants, et ceux d'éponges à squelette mou ont été collés au substrat par une cheville en plastique insérée à leur base. Les fragments d'éponges à structure collagénique ont été posés sur un

substrat horizontal et propre, et maintenus en place à l'aide d'une grille jusqu'à ce que la fixation naturelle se produise (ce qui prend généralement entre deux semaines et un mois).

Pour les cnidaires (*Corallium rubrum*, *Paramuricea clavata*, *Eunicella cavolinii*, *Eunicella singularis*), les espèces avec un coenenchyme rigide (*C. rubrum* et *P. clavata*) ont été collées directement au substrat avec le mastic époxy. Les fragments d'espèces au coenenchyme fin (*E. cavolinii*, *E. singularis*) ont quant à eux été renforcés à la base pour assurer un meilleur taux de survie, car le coenenchyme se dissout rapidement au contact du mastic époxy.

L'opération a notamment montré que :

- Les pourcentages de survie étaient déjà différents après un mois, tandis que les valeurs tendent à se stabiliser par la suite. L'inclinaison du substrat et son exposition aux courants sont des aspects clés au début de la procédure de restauration.
- La survie des transplants était relativement élevée.
- Une longue période est nécessaire pour récupérer complètement la complexité de l'habitat (des décennies).
- Le succès des opérations dépend des caractéristiques structurelles spécifiques de l'espèce cible et de la technique de transplantation choisie, qui doit à son tour correspondre aux caractéristiques de l'espèce sélectionnée et des sites.
- Le succès dépend également fortement de la réduction des sources de stress pendant les phases de transplantation.

4.4. Restauration écologique et biomimétisme : quelle synergie ?

4.4.1. Vers une démarche biomimétique opérationnelle pour la restauration écologique

A partir de la stratégie globale présentée précédemment, une démarche biomimétique qui soit opérationnelle et permette de gommer les verrous contenus par les deux processus existants a été proposée. Elle poursuit cinq objectifs :

- S'appuyer sur le cahier des charges du vivant, soit les principes et stratégies que le vivant développe pour concevoir des formes vivantes
- Générer des solutions soutenables
- Proposer des objets sur mesure
- Être une démarche pragmatique
- Être accessible à des non spécialistes

Pour atteindre ces objectifs, quatre étapes sont proposées :

1. Définir le **cahier des charges scientifique** de la restauration écologique et identifier les composantes du contexte. Pour cela, il est nécessaire de s'entourer de scientifiques connaissant très bien le contexte d'implantation de la solution (récif artificiel par exemple), afin de faire émerger les problématiques liées à ce contexte, et garantir une solution adaptée.
2. S'appuyer sur le **cahier des charges du vivant**, pour garantir que la solution est soutenable.

3. Générer une **importante quantité de solutions** à la manière du vivant, c'est-à-dire produire beaucoup de propositions par essais-erreurs pour répondre à ces deux cahiers des charges (scientifique et du vivant). Pour cela, des outils informatiques peuvent être utilisés.
4. Utiliser des **critères objectifs de choix et d'évaluation** pour sélectionner la solution la plus adaptée parmi les propositions. Ces critères sont ceux qui sont définis en étape une et deux.

Un troisième élément sert à la fois de guide de conception et de critères objectifs pour sélectionner la solution la plus adaptée et durable : la **quantité de services écosystémiques** que va permettre de rendre la solution proposée.

4.4.2. Généralités

Le **biomimétisme** est une notion assez large qui consiste à s'inspirer des propriétés essentielles (par exemple des formes, compositions, processus, interactions) d'un ou plusieurs systèmes biologiques, pour mettre au point des procédés et des organisations permettant un développement durable des sociétés (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique, 2022). Elle s'intègre dans la démarche de **bio-inspiration** aux côtés de la **biomimétique**, qui correspond au processus de conception s'inspirant du vivant pour résoudre une problématique anthropocentrée (**Figure 34**).

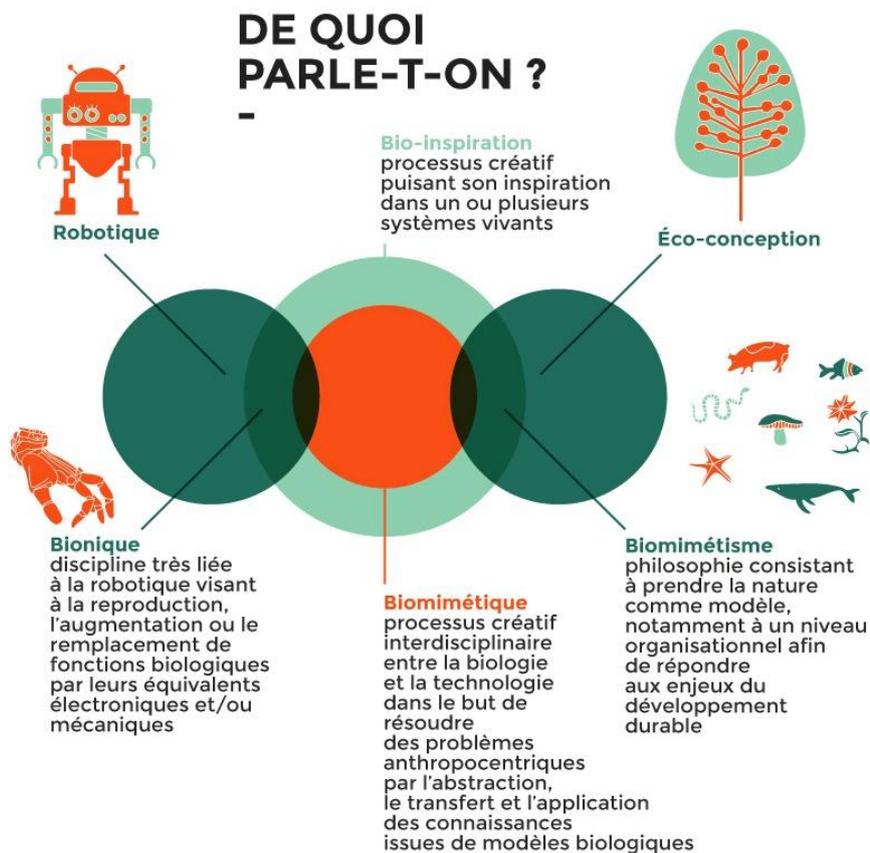


Figure 34. Définition des différentes notions gravitant autour du biomimétisme. (Source : Les techniques de l'ingénieur - <https://www.techniques-ingenieur.fr/>)

On distingue deux processus en biomimétique :

- **Orienté vers le problème** : on a un problème ou besoin technique, on va rechercher dans le vivant, analyser les systèmes biologiques, pour trouver une solution transposable à notre problème.
- **Orienté vers la solution** : on connaît déjà une solution issue d'un système biologique (la peau de requin qui limite les frottements et lui permet d'aller très vite dans l'eau par exemple), et on va rechercher des problèmes anthropiques auxquels on pourrait appliquer cette solution.

Les champs de la restauration écologique et du biomimétisme peuvent tous les deux s'intégrer dans une stratégie globale de développement soutenable. En effet, les objectifs de la restauration écologique sont de réserver et régénérer le vivant, et cela passe notamment par sa compréhension en termes de formes, structures, procédés, écosystèmes, etc. Une fois que l'on comprend bien le vivant, on peut alors faire une transposition de ce qu'il nous apprend par un processus biomimétique pour apporter des solutions (**Figure 35**).

Le biomimétisme représente un potentiel évident pour la restauration écologique, car il propose d'apporter des solutions adaptées à l'environnement, qui vont prendre en considération différents aspects comme le cycle de vie, le carbone, les économies d'énergie et de matière, etc. Il va permettre de viser la multifonctionnalité, l'organisation multi-échelles, et aussi d'adresser la question de la connectivité et de l'organisation en réseau.

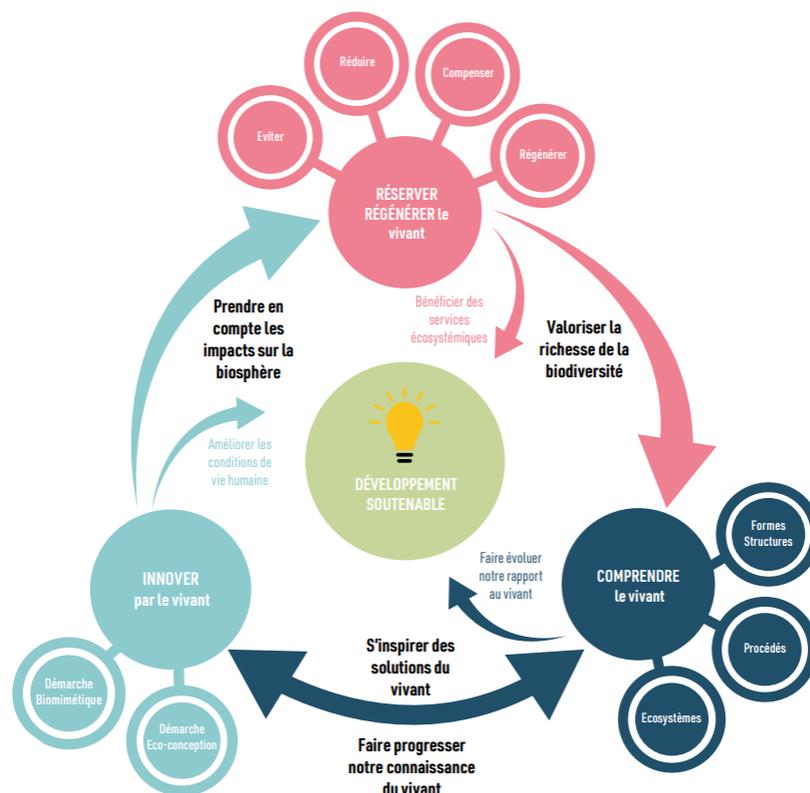


Figure 35. Stratégie globale de développement soutenable. (Source : CEEBIOS)

Il y a néanmoins des limites à l'application opérationnelle de ces processus, comme notamment le fait que cette approche vise la production industrielle en série. Or le domaine de la restauration écologique demande davantage une approche sur-mesure, au cas par cas. De plus, les processus de recherche scientifiques longs et complexes, et l'organisation d'équipes multidisciplinaires aux méthodes variées

que demande le biomimétisme, ne sont pas toujours adaptés à une opération de restauration écologique, qui a souvent des restrictions en termes de temps et de budget.

4.4.3. Exemple de projet : REMORA +

Le projet REMORA + (deuxième phase du projet REMORA) est un projet expérimental de création et mise en place d'un village de récifs artificiels bio-inspirés entre le Cap Vieux et le Cap Sicié, qui constitue un exemple d'application de la démarche présentée précédemment. Conçu par Rougerie + Tangram en réponse à une commande du Pôle Mer Méditerranée, il rassemble un conseil d'experts de l'Agence de l'Eau RMC, de l'Université de Perpignan, et de la société Ecocean.

La **figure 36** présente les cahiers des charges scientifiques et du vivant, ainsi que les services écosystèmes faisant office de ligne directrice pour ce projet

Le cahier des charges scientifique		Le cahier des charges du vivant		Les Services Écosystémiques		
Les différentes catégories		Les différentes catégories		Les différentes catégories de SE		
Implantation	Jonction herbiers et matle morte	Propriétés et caractéristiques des systèmes vivants	(Auto-)assemblé	Services d'approvisionnement	Production d'animaux pour la pêche professionnelle	Poissons, mollusques etc
	Se positionner à l'écotone		Modulaire		Support de culture alimentaire	Conchyculture / aquaculture
	Maximiser la diversité hydrodynamique		Résilient		Production de végétaux pour l'alimentation	Algues vertes, omega 3
	Adapter le mode d'accroche		Multifonctionnel		Production d'éléments minéraux pour extraction	Matériaux bruts (sable, galet, sel)
Volumétrie générale	Mettre en place un socle poreux		Adaptable		Services de régulation	Régulation de la qualité de l'eau
	Proposer une hauteur variable		Evolutif	Régulation de la diversité fonctionnelle		Herbivores, carnivores...
	Créer des points de repères et signaux d'appel		Apprenant	Régulation des interactions interspécifiques		Proie/prédateur, symbiose, parasitisme
	Diversifier les volumes pour créer des micro-courants		Forme adaptée la fonction	Protection contre l'érosion du littoral		Préserve le trait de côte, fixation du sol/sédiment
	Proposer un récif modulaire, adaptable et varié		Réparable	Protection contre les tempêtes		Vagues déferlantes/risque humain, amortissement de la houle
	Diversifier l'implantation des récifs entre-eux		Démontable	Maintien du cycle de vie des espèces marines	Etape cruciale du cycle	
Aspect de surface	Calibrer les ouvertures	Stratégies des systèmes vivants		Contrôle des espèces envahissantes	Compétition pour l'habitat, bon état écosystème	
	Mettre en place une granulométrie et une rugosité forte	Utilisation de ressources renouvelables	Utilisation de ressources compatibles avec le vivant	Recyclage nutriments et matière organique	Sédimentation + détritivores	
	Intégrer de la matière organique	Utilisation de matériaux recyclés et recyclables	Utilisation d'une chimie verte	Services socio-culturels	Support pour le tourisme, loisirs de nature et sport	Jetski, promenade en mer, plongée
	Mettre en place des percements et des cavités intérieures	Utilisation de ressources disponibles localement	Fabrication additive		Support esthétique, paysager	Paysage maritime apaisant
Proposer le plus d'ouvertures	Pas de ressources fossiles	Biodégradable	Support de recherche scientifique		SUBLIMO	
Proposer un percement biomimétique et paramétrique	Utilisation de ressources mutualisées	Fournisseur d'énergie	Support pour le développement des savoirs éducatifs		Ecole de la mer	
Assemblage	Assembler sur terre	Exportation locale	Diversité des stratégies de stockage et de distribution	Production d'animaux pour la pêche de loisirs	Hobby	
	Proposer un assemblage simple et rapide	Utilisation de ressources compatibles avec le vivant		Production d'espèces patrimoniales	Mérou, corb, hippocampe, nacre	
	Proposer un récif répliquable facilement			Support pour soins de santé	Thalasso (boue, eau de mer, algue)	
	Proposer un nombre de pièces limité					

Figure 36. De gauche à droite : tableau du cahier des charges scientifique issu du projet REMORA+, tableau du cahier des charges du vivant modifié d'après Guide KARIM (2015), tableau des services écosystémiques modifié d'après DRIVER (2015)

Le cahier des charges scientifique du projet apporte des informations sur les axes suivants :

- **Le lieu et la méthode d'implantation** : pour maximiser la diversité hydrodynamique et toucher un maximum d'espèces, le village de récifs doit être implanté de manière non-linéaire, et à l'écotone (uniquement sur les milieux dégradés). Le mode d'accroche au sol doit être adapté pour éviter le basculement, et il faut s'implanter à la jonction herbier/matte morte tout en étant vigilant sur la bonne distance à laquelle se mettre de l'herbier en bonne santé (ni trop loin, ni trop près).

- **La volumétrie générale** : l'idée est de faire un village constitué de trois à cinq récifs et de créer de la diversité au niveau des volumes, en proposant un récif modulaire et adaptable avec des formes variées. Pour cela, il faut proposer des hauteurs variables, créer des points de repères, des signaux d'appels, etc.
- **Les aspects de surface** : pour attirer la petite vie marine et les micro-invertébrés (qui sont la cible de ce projet), il est important de calibrer les ouvertures et aspérités à cette taille, mais également de maximiser leur quantité, et d'éviter les surfaces lisses en créant une forte rugosité. De la matière organique peut éventuellement être intégrée à la surface du récif pour attirer la biodiversité dans un premier temps, et il faut ensuite adapter les percements au contexte hydrodynamique afin de piéger au mieux la matière organique à l'intérieur du récif.
- **L'assemblage du récif** : il doit être le plus simple, rapide et facilement répliquable possible. Idéalement par empilement d'un nombre limité de pièces, sous l'eau. L'idée était d'apporter une solution qui soit la plus simple, pragmatique possible. D'empilement par exemple, et de ne pas le faire sous l'eau car c'est beaucoup plus compliqué.

Pour répondre à ces différents critères, plusieurs sources d'inspirations ont été prises dans le vivant, telles que :

- La **Prêle des champs** (*Equisetum arvense*), pour son système simple d'assemblage et de superposition.
- Le **Corail cerveau** (*Diploria labyrinthiformis*), pour son optimisation du rapport surface/volume (tracer la ligne la plus longue possible pour rejoindre deux points sur une surface donnée) qui permet d'avoir de nombreuses circonvolutions.
- Le **principe mathématique des fractales**, que l'on retrouve sous différentes formes dans le vivant, et qui permet d'offrir une très grande complexité et diversité d'accroche.

La conception de la solution consiste ensuite à procéder à la manière du vivant pour générer des formes adaptées à tous ces critères, au cahier des charges du vivant, et aux services écosystémiques rendus. Le plus de solutions possibles ont alors été itérées, et la solution qui semblait répondre aux plus de ces paramètres a été choisie.

Le choix de la localisation d'implantation du village a été fait sur la base des cartes DONIA, pour identifier les zones de sable et de matie morte. Un module mesurera 2,50 m de long dans sa plus grande dimension, offrant alors **37 m² de surface colonisable**, soit dix fois plus que ce qu'offre un herbier en bonne santé, à emprise au sol équivalente. Il sera imprimé en 3D en béton, et composé de plateaux à empiler (**Figure 37**).

La quatrième et dernière étape consiste à **valider la solution** en regard des critères objectifs qui ont également servi de guide pour la conception. La **figure 38** montre les critères remplis ou non par la solution dans les différents cahiers des charges. Cependant, il est important de noter que cette solution, même si elle remplit beaucoup de critères, reste théorique tant qu'elle n'a pas été testée et validée en milieu naturel. Un suivi scientifique *in situ* sera donc nécessaire après son immersion, afin de valider son efficacité.

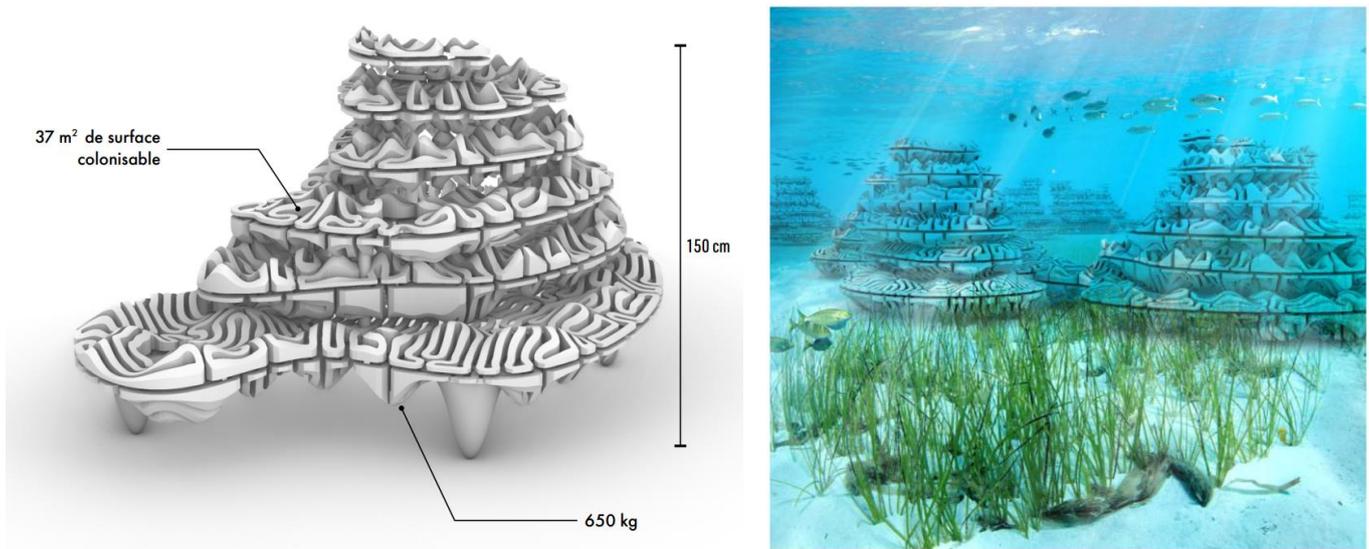


Figure 37. Modélisation informatique du projet REMORA+. (Source : diaporama d'Olivier Bocquet lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 10 mai 2022)

cahier des charges de la restauration écologique

	Les différentes catégories	Validation
Implantation	Jonction herbiers et matie morte	<input checked="" type="checkbox"/>
	Se positionner à l'écotone	<input checked="" type="checkbox"/>
	Maximiser la diversité hydrodynamique	<input checked="" type="checkbox"/>
	Adapter le mode d'accroche	<input checked="" type="checkbox"/>
Volumétrie générale	Mettre en place un socle poreux	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer une hauteur variable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Créer des points de repères et signaux d'appel	<input checked="" type="checkbox"/>
	Diversifier les volumes pour créer des micro-courants	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer un récif modulaire, adaptable et varié	<input checked="" type="checkbox"/>
	Diversifier l'implantation des récifs entre-eux	<input checked="" type="checkbox"/>
Aspect de surface	Calibrer les ouvertures	<input checked="" type="checkbox"/>
	Mettre en place une granulométrie et une rugosité forte	<input checked="" type="checkbox"/>
	Intégrer de la matière organique	<input checked="" type="checkbox"/>
	Mettre en place des percements et des cavités intérieures	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer le plus d'ouvertures	<input checked="" type="checkbox"/>
Assemblage	Proposer un percement biomimétique et paramétrique	<input checked="" type="checkbox"/>
	Assembler sur terre	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer un assemblage simple et rapide	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer un récif répliquable facilement	<input checked="" type="checkbox"/>
	Proposer un nombre de pièces limité	<input checked="" type="checkbox"/>

respecter les principes et caractéristiques du vivant

	Les différentes catégories	Validation
Propriétés et caractéristiques des systèmes vivants	(Auto-)assemblé	<input checked="" type="checkbox"/>
	Modulaire	<input checked="" type="checkbox"/>
	Résilient	<input checked="" type="checkbox"/>
	Multifonctionnel	<input checked="" type="checkbox"/>
	Adaptable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Evolutif	<input checked="" type="checkbox"/>
	Apprenant	<input checked="" type="checkbox"/>
	Forme adaptée la fonction	<input checked="" type="checkbox"/>
Stratégies des systèmes vivants	Réparable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Démontable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation de ressources renouvelables	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation de matériaux recyclés et recyclables	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation de ressources disponibles localement	<input checked="" type="checkbox"/>
	Pas de ressources fossiles	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation de ressources mutualisées	<input checked="" type="checkbox"/>
	Exportation locale	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation de ressources compatibles avec le vivant	<input checked="" type="checkbox"/>
	Utilisation d'une chimie verte	<input checked="" type="checkbox"/>
	Fabrication additive	<input checked="" type="checkbox"/>
	Biodégradable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Fournisseur d'énergie	<input checked="" type="checkbox"/>
	Diversité des stratégies de stockage et de distribution	<input checked="" type="checkbox"/>

rendre un maximum de services écosystémiques

	Les différentes catégories de SE	Validation
Services d'approvisionnement	Production d'animaux pour la pêche professionnelle	<input checked="" type="checkbox"/>
	Support de culture alimentaire	<input checked="" type="checkbox"/>
	Production de végétaux pour l'alimentation	<input checked="" type="checkbox"/>
	Production d'éléments minéraux pour extraction	<input checked="" type="checkbox"/>
Services de régulation	Régulation de la qualité de l'eau	<input checked="" type="checkbox"/>
	Régulation de la diversité fonctionnelle	<input checked="" type="checkbox"/>
	Régulation des interactions interspécifiques	<input checked="" type="checkbox"/>
	Protection contre l'érosion du littoral	<input checked="" type="checkbox"/>
	Protection contre les tempêtes	<input checked="" type="checkbox"/>
	Maintien du cycle de vie des espèces marines	<input checked="" type="checkbox"/>
Services socio-culturels	Contrôle des espèces envahissantes	<input checked="" type="checkbox"/>
	Recyclage nutriments et matière organique	<input checked="" type="checkbox"/>
	Support pour le tourisme, loisirs de nature et sport	<input checked="" type="checkbox"/>
	Support esthétique, paysager	<input checked="" type="checkbox"/>
	Support de recherche scientifique	<input checked="" type="checkbox"/>
	Support pour le développement des savoirs éducatifs	<input checked="" type="checkbox"/>
	Production d'animaux pour la pêche de loisirs	<input checked="" type="checkbox"/>
Production d'espèces patrimoniales	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Support pour soins de santé	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 38. Critères remplis par la solution dans les différents cahiers des charges. (Source : diaporama d'Olivier Bocquet lors de son intervention dans le cadre du DU RestauMer, le 10 mai 2022)

4.5. Panorama d'autres actions et cas concrets

4.5.1. [Les zones de mouillage](#)

Les actions menées pour améliorer la biodiversité au niveau des zones de mouillage ne sont pas toujours de la restauration écologique au sens propre, mais constituent des outils de non-dégradation qui en sont complémentaires.

C'est le cas notamment des **mouillages écologiques**, dont l'objectif est de proposer aux bateaux des zones de mouillage dédiées, et d'apporter une fonction écologique aux corps-morts de ces mouillages.

- **RECIF'LAB (Ville d'Agde, Seaboost) : Restauration des fonctionnalités écologiques des écosystèmes littoraux**

Le projet RECIF'LAB a été mis en place de 2018 à 2021 au sein de l'Aire Marine protégée de la Côte Agathoise. Un de ses axes de travail a consisté à immerger des récifs artificiels imprimés par imprimante 3D dans l'avant-port, pour servir de corps-morts à des étoiles d'amarrage qui permettent aux bateaux de mouiller dans cette zone. Les objectifs de cette opération étaient de réguler et gérer durablement les mouillages dans l'avant-port, et développer des corps-morts assez solides pour maintenir l'étoile d'amarrage en surface, tout en créant de nouveaux habitats pour la biodiversité marine.

- **Marina du Marin, Martinique (Ecocean) : Complexification d'une zone de mouillage et d'équipements légers (ZMEL) avec des Biohut**

Même principe, il s'agissait ici de complexifier des corps-morts existants pour leur apporter une fonction écologique, et ce par l'ajout de Biohut. Les suivis un an après l'opération (2022) ont permis l'observation de 30 fois plus d'individus (poissons) sur les corps-morts complexifiés que sur les corps-morts classiques.

4.5.2. [Fonds marins altérés ou détruits](#)

- **RECIFS PRADO (Ville de Marseille) : Réhabilitation Ecologique, Concertée et Innovante des Fonds Sableux par la Pose de Récifs Artificiels Diversifiés et Optimisés**

Dans le cadre de ce projet, 400 récifs artificiels ont été installés en 2008, sur 200 hectares dans la baie du Prado à Marseille, en faisant le plus grand site de récifs artificiels en Méditerranée et en Europe. L'objectif était de préserver la ressource tout en valorisant une ancienne prairie d'herbiers de posidonie disparue. Plusieurs types de structures artificielles (six au total) ont été installées sur cette zone, qui a ensuite été interdite à la pêche, au mouillage, et à la plongée.

Des suivis annuels ont été réalisés les cinq premières années suivant l'opération, puis un dernier suivi au bout de 10 ans. Ces derniers ont montré une forte augmentation de la richesse spécifique les premières années qui a ensuite ralenti, ainsi qu'une augmentation de la biomasse (multipliée par quatre) due à l'observation de très gros individus. Les différents étages trophiques se sont installés sur ces récifs au cours du temps (Cresson *et al*, 2019).

Ce type de projet se trouve à la limite de la restauration écologique car ils sont souvent mis en place sur des zones sableuses ou d'anciens herbiers, où il n'y avait initialement pas de fonctionnalités liées aux milieux rocheux.

- **RECIF'LAB (Ville d'Agde, Seaboost) : Restauration des fonctionnalités écologiques des écosystèmes littoraux**

Un autre axe du projet RECIF'LAB était d'immerger un récif pour la plongée permettant le déport de l'activité des récifs coralligènes vers des habitats artificiels. Ce type de projet, qui consiste à détourner la pression en la déportant sur une autre zone pour réduire l'impact sur le milieu naturel et lui laisser le temps de se reconstituer par lui-même, peut être considéré comme de la restauration passive.

- **CASCIOMAR (Ecocean) : Repeuplement de poissons côtiers à partir de la technique de PCC**

Le projet CASCIOMAR met en œuvre depuis 2015 à Cassis, La Ciotat et Marseille, le procédé BioRestore développé par Ecocean. Ce dernier consiste à capturer des poissons au stade post-larvaire lors de leur retour à la côte (travail avec des pêcheurs locaux), les faire grandir en aquarium jusqu'à ce qu'ils atteignent la taille « refuge » (taille à partir de laquelle le taux de survie est amélioré), puis les relâcher dans le milieu naturel pour qu'ils puissent y renforcer les populations. Aucune sélection n'est faite sur le nombre d'individus capturés par espèces, et des mesures de non-domestication sont appliquées durant la période en aquarium. Entre 2016 et 2020, le projet a totalisé 720 sorties de pêche, et 14 500 individus relâchés parmi 75 espèces.

4.5.3. [Les sites dégradés par un rejet](#)

On parle ici de restauration de milieux ayant été dégradés par des rejets de station d'épuration ou des rejets industriels. Ces cas très spécifiques nécessitent la diminution voire la suppression totale de la pollution, et une qualité d'eau suffisamment bonne pour mettre en place une action de restauration.

- **REMORA (AERMC) : Restauration Ecologique en Milieux Océaniques par Récifs Artificiels**

En 1997, la construction de la station d'épuration *Amphitria* par Veolia a permis de diminuer fortement la pollution due aux rejets anthropiques au Cap Sicié, grâce à un traitement physico-chimique et une filtration efficaces. Initié par l'Agence de l'Eau RMC en 2011, le projet collaboratif REMORA expérimente l'installation d'un réseau de récifs artificiels innovants, pour favoriser le retour de la vie marine sur le site de la station d'épuration du Cap Sicié. Ainsi en 2015, 36 modules ont été immergés à 15 m de profondeur, répartis dans deux villages : un au droit du rejet, et l'autre un peu plus loin, près d'habitats naturels moins soumis aux rejets de la station. Les suivis réalisés après l'immersion ont notamment montré un fort développement les premières années, suivi d'une régression.

- **REXCOR (Seaboost) : Restauration Expérimentale des petits fonds de la calanque de Cortiou**

Depuis la fin des années 1800, les eaux usées de la ville de Marseille sont rejetées dans la calanque de Cortiou, et dans les années 1970, il y a également eu un détournement de l'Huveaune dont les eaux étaient très polluées par des rejets industriels. Depuis, la construction d'une station d'épuration plus efficace et l'arrêt des rejets industriels dans l'Huveaune, ont permis de réduire ces pressions. En 2012, la zone a également intégré le Parc National des Calanques. Il était donc important d'agir pour aider la

vie marine qui avait du mal à recoloniser le milieu malgré l'amélioration des conditions environnementales.

Dans le cadre du projet expérimental REXCOR, la société Seaboost a mis en place à différentes distances du rejet, plusieurs villages de modules faits avec des formes et des matériaux différents. Durant les trois années suivant l'immersion, des suivis techniques, des poissons juvéniles et adultes, de la macrofaune, photogrammétriques et bioacoustiques ont été réalisés. Ces suivis ont montré des résultats encourageants, et notamment une colonisation hétérogène des différents modules selon leur distance au rejet, les modules les plus proches étant moins colonisés.

4.5.4. Les zones portuaires

Il s'agit ici de la typologie la plus avancée en termes de solutions éprouvées et déployées à grande échelle. Malgré les efforts d'amélioration de la qualité de l'eau faits par les ports, ces derniers subissent encore de nombreuses pressions. Ils s'avèrent néanmoins être des zones intéressantes pour la restauration car les ports représentent aujourd'hui 50 % de l'artificialisation sur la côte méditerranéenne française (MEDAM, 2022), et sont des zones où les nurseries étaient typiquement présentes auparavant (zones calmes et abritées). De plus, les quais et les pontons appartenant au port et non à l'Etat, il est possible d'agir plus rapidement et de limiter les interlocuteurs, car les autorisations doivent être demandées au maître de port directement.

- **Biohut (Ecocean) : Hutte de biodiversité, nurserie artificielle**

Développés depuis une dizaine d'années par Ecocean, les Biohuts combinent deux fonctions :

- Un abri contre les prédateurs, grâce aux grilles ayant un maillage assez petit pour empêcher les gros poissons d'entrer dans le Biohut et permettre aux post-larves et juvéniles de s'y réfugier.
- Un substrat naturel et complexe où les invertébrés et algues se développent, fournissant ainsi une source de nourriture naturelle, grâce aux coquilles d'huitres (issues des déchets de la conchyliculture) placées dans une deuxième grille à l'intérieur du Biohut.

Ces structures ont été utilisées dans de nombreux projets, et tous les suivis associés ont permis de comptabiliser 95 espèces de poissons différentes dans les modules, une faune vagile très diversifiée (plus de 200 espèces), et 63 espèces de faune et flore fixées. Au total, plus de 300 taxons différents ont été observés au sein de ces habitats, et jusqu'à 90 individus de 11 espèces de poissons ont été comptés au sein d'une seule structure.

Il existe plusieurs types de modules pour diversifier la gamme d'habitats et cibler un maximum d'espèces : les Biohuts quai, kelp, ponton, et digue.

- **ReFISH (SUEZ) : Nurserie artificielle en plastique Projet**

Le projet pilote ReFISH a consisté à concevoir et évaluer des nurseries artificielles qui imitent les herbiers de posidonies, faites en fibres plastique biopolymère brut d'origine végétale non alimentaire. Le port de plaisance de Bormes-les-Mimosas a ainsi installé 25 m² de nurseries ReFISH, conçues par SUEZ Consulting. Les suivis vidéo et en plongée réalisés en 2017 et 2018 ont montré que ces dernières

permettent de multiplier par trois à huit l'abondance de juvéniles par rapport aux zones témoin du port non équipées.

4.5.5. Exemples à l'étranger

- **Fondation Sulubaaï : projet de restauration à l'échelle d'une île aux Philippines**

Ce projet a été mis en place sur l'île Pangatalan aux Philippines, achetée par un couple de français en 2011. Ces derniers ont décidé de la restaurer intégralement, aussi bien d'un point de vue terrestre que marin, en utilisant des pratiques adaptées au contexte et en travaillant en collaboration avec les populations locales.

Après avoir restauré le milieu terrestre et les mangroves, un travail a été fait sur le milieu marin, où la pêche à la dynamite était encore pratiquée. Une concertation avec les pêcheurs a alors été menée pour leur conseiller des nouvelles techniques de pêche et les impliquer dans la création d'Aires Marines Protégées (AMP). En plus de la création de ces AMP, les objectifs étaient de restaurer les récifs coralliens et les populations de poissons de l'île.

- **World Harbour Project : Projet initié par l'institut des sciences marines de Sydney**

Le World Harbour Project est un programme initié par l'Institut des Sciences Marines de Sydney (SIMS), dans l'objectif de faire collaborer les plus grands ports du monde afin de relier, faciliter et améliorer les programmes de recherche, gestion et restauration de la vie marine, par l'échange de bonnes pratiques.

Un des premiers projets développés dans le cadre de ce programme a été les Living seawalls. Il s'agit de « panneaux habitats » conçus numériquement pour imiter des formes naturelles offrant des zones de vie à la faune et la flore marine. Imprimés en 3D, ils sont ensuite posés sur les digues et quais droits pour y apporter de la complexité.

5. Etudes de cas et bilan du DU 2022

5.1. Etudes de cas

Dans le cadre de l'évaluation pour l'obtention du DU, les 19 étudiants de la promotion 2022 ont dû rédiger un mémoire présentant une étude de cas de leur choix. Voici la liste des étudiants, de leur sujet de mémoire, et leur contact :

- Eirini APAZOGLOU - irene_apazoglou@hotmail.com
Sujet : Synthèse européenne des techniques de restauration des herbiers de posidonie.
- Lorenzo ARDUINO - lorenzo.arduino@oceanascommon.org
Sujet : Les défis liés à la restauration de l'huitre plate en France : aspect technique, changement d'échelle et gouvernance.
- Loïs BAROTIN - barotinlois@hotmail.fr
Sujet : Analyse de GIREL (Gestion des Infrastructures pour la Restauration Ecologique du Littoral) au Grand port de Marseille.
- Alexandre BELLY - alexandrebelly33@gmail.com
Sujet : Le cycle de vie des récifs en béton armé permet-il d'avoir un impact bénéfique sur l'environnement et les écosystèmes marins ?
- Felix BESSE - felix.besse@hotmail.fr
Sujet : Restaurer les herbiers de Cymodocée.
- Mathilde BOUE - mathildebouepro@gmail.com
Sujet : Restauration de l'herbier de posidonie dans la lagune du Brusç.
- Céline CAMBAS - celinesoubra@gmail.com
Sujet : Sentiers et musées sous-marins, des outils de restauration écologique ?
- Rémi CONTE - remi.conte1@gmail.com
Sujet : Restaurer l'habitat coralligène en transplantant du corail rouge.
- Hannah DAUM - hannah.daum@outlook.com
Sujet : Restauration écologique portuaire (REP) : synthèse des actions écologiques et de communication.
- Margot DENTAN - margot.dentan@gmail.com
Sujet : 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.

- Bruna GIORDANO - brunagiordano9@gmail.com
Sujet : Restauration de gorgonaires : analyse des méthodes et efficacité (anglais).
- Marin JULLIAND - marinjulliand@orange.fr
Sujet : Comment utiliser les ports pour la restauration de fonctions écologiques ?
- Juliette LANGLOIS - juliette.a.langlois@gmail.com
Sujet : Apport des actions de restauration en AMP.
- Philippe MANON - philippe.manon@portfrejus.fr
Sujet : Utiliser le port pour coupler éducation et restauration des petits fonds marins côtiers.
- Ken NOVELLAS - novellas.ken@gmail.com
Sujet : Démarche scientifique ou empirique : quels gains pour les herbiers de Zostères de l'étang de Berre ?
- Aurélie PRUNIER - aurelieprunier@yahoo.fr
Sujet : Transplantation des herbiers de posidonie.
- Mathieu SOULAYROL - mathieu.soulayrol@gmail.com
Sujet : Optimisation écologique des récifs artificiels en mer Méditerranée, complexité tridimensionnelle intérieure et hétérogénéité - focus sur les structures du Prado.
- Charlène STEINMETZ - charlene.steinmetz.57@gmail.com
Sujet : Prospective de restauration des fonds meubles en comparaison aux autres techniques de restauration écologiques (Coralligènes, posidonie...), plus développées.
- Laura THOMAS-SLEIMAN - laura.slthomas@gmail.com
Sujet : Restauration écologique des milieux lagunaires, quelles possibilités et quels résultats ?

Tous ces rapports sont présentés en Annexe, dans ce même ordre.

5.2. Bilan du DU : avis et devenir des étudiants, et perspectives d'évolution

Un premier questionnaire a été transmis aux étudiants à la suite du DU afin d'avoir leur avis sur la formation, ainsi que leurs suggestions d'améliorations. Seize personnes ont répondu à cette enquête, et les remarques émises par la majorité des étudiants ont été prises en compte dans l'organisation du DU pour l'année suivante. Pour 2023, les cours seront donc organisés sur une seule semaine complète du 6 au 10 mars, et les restitutions seront maintenues au moins de juin. Un travail de groupe a été rajouté au cours de la semaine, et quatre visioconférences sous forme de webinaires organisés par ICO Solutions sont prévues et seront ouvertes à tous (étudiants et public). Deux sorties facultatives seront également proposées aux étudiants les semaines précédant et suivant le DU : une visite de la ferme d'Ecocean à Marseille, et une sortie plongée sur récif artificiel à Carnon ou Agde.

Une deuxième enquête réalisée en octobre 2022 a permis de connaître le devenir des étudiants depuis le DU. Une partie des réponses à ce questionnaire est présentée dans la **figure 36**. On remarque que la participation au DU a été bénéfique pour 100 % des personnes ayant répondu à l'enquête actuellement en emploi, que ce soit pour la prise de poste ou pour l'évolution des missions des personnes déjà en poste. Ces réponses montrent l'utilité et l'importance des compétences acquises dans le cadre de ce DU.

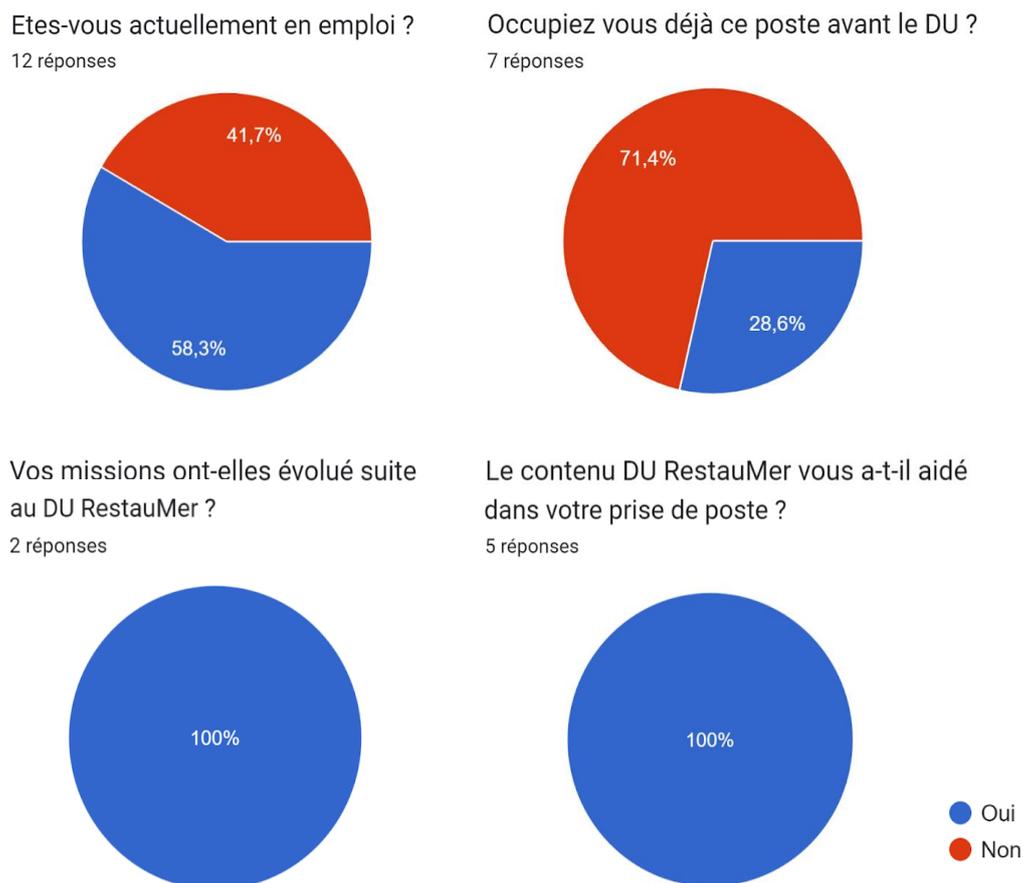


Figure 39. Extrait de réponse des étudiants à l'enquête sur leur devenir depuis le DU Restauration écologique des petits fonds marins côtiers 2022.

6. Conclusion

Au cours des quinze dernières années, d'importantes avancées ont été observées dans le domaine de la restauration écologique. En plus du développement de nouvelles méthodes et moyens techniques d'action, des évolutions sont apparues dans la prise en compte de la question de la restauration écologique dans les politiques publiques et les réglementations au niveau national et européen. Un gros travail de mutualisation des connaissances et des compétences a été fait par différentes structures publiques et privées (rédaction de guides, répertoires d'acteurs, mise en place de la démarche DRIVER, etc), et la restauration écologique se place aujourd'hui aux côtés du génie écologique et de l'éco-conception dans une filière économique en pleine émergence.

Néanmoins, malgré les importants efforts de suivi, d'évaluation de l'efficacité des solutions, et de standardisation déployés, des difficultés et questions persistent encore aujourd'hui. Elles sont principalement dues au manque de connaissances dans certains domaines, ou sur certains habitats, qui constitue une limite à l'action. C'est le cas par exemple des fonds meubles sur lesquels on ne sait pas agir pour le moment, de nombreuses fonctions que l'on ne sait pas encore bien évaluer et restaurer ou de l'efficacité des solutions proposées/mises en place que l'on ne sait pas encore bien mesurer. S'ils constituent des objectifs à long terme, ces questionnements ne doivent cependant pas devenir un frein au développement d'actions et de projets de restauration écologique.

Le DU Restauration écologique des petits fonds marins côtier proposé par l'Université de Montpellier répond à un réel besoin de montée en compétences dans le domaine de la restauration écologique. Dans les prochaines années, cette formation est vouée à subir des modifications pour évoluer au fil des connaissances, demandes et besoins dans ce domaine.

7. Bibliographie

- Acunto, S., Piazzì, L., Cinelli, F. L., De Biasi, A. M., Pacciardi, L., Ceraudo, S., & Fersini, G. (2015). Transplantation of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* through naturalistic engineering techniques : Value, weakness and further improvements [Preprint]. *PeerJ PrePrints*. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1051v1>
- Addy, C.E. (1947a). Eelgrass planting guide. *Maryland Conservationist*, USA, 24, 16-17.
- Addy, C.E. (1947b). Germination of eelgrass seed. *J. Wildl. Manag.*, USA, 11, 279.
- ANDROMEDE OCEANOLOGIE, 2020. Projet RESCOR - Restauration écologique des communautés des récifs coralligènes – Bilan 2018-2019 : nettoyage, restauration, caractérisation et suivi des communautés du récif coralligène. Contrat Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse / Métropole Nice Côte d'Azur / Andromède Océanologie. 113 pages.
- Balestri, E., Piazzì, L., & Cinelli, F. (1998). Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 228(2), 209-225. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(98\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(98)00027-6)
- Boudouresque, C.-F. (2001). 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., 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>
- Boulanger, E. (2021). Informing marine biodiversity conservation with next generation sequencing tools: from genes to communities. Thèse de doctorat en écologie et biodiversité. Sous la direction de Stéphanie Manel et David Mouillot, *Université de Montpellier*. 244 p. <https://www.theses.fr/2021MONTG035>
- 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. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1-2), 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.061>
- Casoli, E., Ventura, D., Mancini, G., Cardone, S., Farina, F., Donnini, L., Pace, D. S., Shaul, R., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2022). Rehabilitation of Mediterranean animal forests using gorgonians from fisheries by-catch. *Restoration Ecology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/rec.13465>
- Cépralmar, Région Languedoc-Roussillon (2015). Guide pratique d'aide à l'élaboration, l'exploitation et la gestion des récifs artificiels en Languedoc-Roussillon : 236 pages. <https://www.genieecologique.fr/reference-biblio/guide-pratique-daide-lelaboration-lexploitation-et-la-gestion-des-recifs>
- Chessa, L.A., Fresi, E. (1994). Conservazione e gestione delle praterie di *Posidonia*. In *La gestione degli ambienti costieri e insulari del Mediterraneo*. Monbailliu, X., Torre, A. (eds), *Edizione del Sole publ.*, Italia, 103-127.

- Cooper, G. (1976). Jardinier de la Mer. Association-Fondation G. Cooper pour la reconquête des milieux naturels détruits, Cahier, 1, 1-57.
- Cooper, G. (1982). Réimplantation de *Posidonia oceanica*. Protection des implants. *Bull. Ecol.*, 13(1), 65-73.
- Dalongeville, A. (2017). Variation génétique et persistance des populations en milieu marin : Implications pour la conservation. Thèse de doctorat en écologie, évolution, ressources génétiques, paléobiologie. Sous la direction de Stéphanie Manel et David Mouillot, *Université de Montpellier*. 244 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01693535/file/2017_DALONGEVILLE_archivage.pdf
- Da Ros, Zaira, Cinzia Corinaldesi, Antonio Dell'Anno, Cristina Gambi, Fabrizio Torsani, et Roberto Danovaro. « Restoration of *Cymodocea Nodosa* Seagrass Meadows: Efficiency and Ecological Implications ». *Restoration Ecology* 29, n° S2 (juin 2021). <https://doi.org/10.1111/rec.13313>
- Davis, R. C., & Short, F. T. (1997). Restoring eelgrass, *Zostera marina* L., habitat using a new transplanting technique : The horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59(1-2), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(97\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(97)00034-X)
- Dennison, W.C., Alberte, R.S. (1986). Photoadaptation and growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) transplants along a depth gradient. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 98, 265-282. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(86\)90217-0](https://doi.org/10.1016/0022-0981(86)90217-0)
- Direction interrégionale de la mer Méditerranée. (2012). Document stratégique pour l'implantation des récifs artificiels. https://www.dirm.mediterranee.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Recifs_V21-1.pdf
- Direction interrégionale de la mer Méditerranée. (2019). Document stratégique pour la restauration écologique en Méditerranée. PAMM Méditerranée Occidentale. 56 pages. https://www.dirm.mediterranee.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dirm_med_-_brochure_strategie_restauracion.pdf
- 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). Mémoire de Master 2 en Sciences de la Mer, Aix-Marseille Université. Sous la direction d'Adrien Cheminée, Olivier Bianchimani et Solène Basthard-Bogain, Septentrion Environnement. 42 p. <https://www.septentrion-env.com/documentation/>
- Edwards, A. J., & Gomez, E. D. (2007). Reef restoration concepts & guidelines : Making sensible management choices in the face of uncertainty. *Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*.
- Faccioli, F. (1996). The morphological restoration of the Venice lagoon. *Quaderni trimestriali, Consorzio Venezia Nuova*, Italie, suppl 3-4, 1-24.
- Fonseca, M.S., Kenworthy, W.J, Thayer, G.W. (1982a). A low-cost planting technique for eelgrass (*Zostera marina* L.). *National Marine Fisheries Service, Southeast Fisheries Center, Beaufort Laboratory publ.*, USA, 15 p. <http://hdl.handle.net/11681/2832>
- Giaccone, G., Calvo, S. (1980). Restaurazione del manto vegetale mediante trapianto di *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Risultati preliminari. *Mem. Biol. Mar. Oceanogr.*, Ital., suppl. 10, 207-2011.

- Cerrano, C., Bakran-Petricioli, T., Caroni, J., Ferretti, E., Gari, A., Gomez-Gras, D., Gori, A., Hereu, B., Kipson, S., Milanese, M., Ledoux, J.B., Linares, C., López-Sanz, S., López-Sendino, P., Montero-Serra, I., Pagès, M., Pica, D., Sarà, A., Torsani, F., Viladrich, N., Garrabou, J. https://rac-spa.org/sites/default/files/symposium/proceedings_msc2019_final.pdf#page=46
- Grenoble INP-UGA (2 juin 2021). TRL : à quoi ça sert ? *Consulté le 7 octobre 2022.* <https://www.grenoble-inp.fr/fr/recherche-valorisation/trl-a-quoi-ca-sert>
- Gudefin, A., Lenfant, P., Fonbonne, S., Boissery, P. (2022). Guide technique - Evaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique, cas des nurseries portuaires. *ICO Solutions / DRIVER / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse*, 54p.
- Javel, F., Puissant, C. (2020). CYSTORE Port Vauban - Projet pilote de restauration écologique en milieu artificiel - Bilan final. *Convention Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse n° 4096 SUEZ Consulting publ.*, Fr., 29 p.
- Jeudy de Grissac, A. (1984). Essais d'implantations d'espèces végétales marines : les espèces pionnières, les posidonies. *In International workshop on Posidonia oceanica beds.* Boudouresque, C.F., Jeudy de Grissac, A., Olivier, J. (eds), *GIS Posidonie publ.*, 1, 431-436.
- Kawasaki, Y., Iitaka, T., Goto, H., Terawaki, T., Watanabe, Y., Kikuchi, K. (1988) Study on the technique for *Zostera* bed creation. *Central Res. Inst. Electric Power Industry, Japan*, Rep. N°U-14, 231 p.
- Larkum, A.W.D. (1976). Ecology of Botany Bay. 1. Growth of *Posidonia australis* (Brown) Hook f. in Botany Bay and other bays of the Sydney Basin. *Austr. J. Mar. Freshwater Res.*, 27, 117-127. <https://doi.org/10.1071/MF9760117>
- 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., & Quenouille, B. (2015). Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes. 98 p. https://www.researchgate.net/publication/294872756_Restauration_ecologique_des_nurseries_des_petits_fonds_cotiers_de_Mediterranee_-_orientations_et_principes
- Lewis, R.R., & Phillips, R.C. (1980). Experimental seagrass mitigation in the Florida keys. *In Proc. 7th ann. conf. wetlands restor. creation.* Cole D.P. (ed.), USA, 155-173. <https://images.library.wisc.edu/EcoNatRes/EFacs/Wetlands/Wetlands07/reference/econatres.wetlands07.rlewis2.pdf>
- Maggi, P. (1973). Le problème de la disparition des herbiers à Posidonies dans le golfe de Giens (Var). *Science et Pêche*, 221, 7-20. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6662/>
- Mancini, G., Casoli, E., Ventura, D., Jona Lasinio, G., Belluscio, A., & Ardizzone, G. D. (2021). An experimental investigation aimed at validating a seagrass restoration protocol based on transplantation. *Biological Conservation*, 264, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109397>
- Mancini, G., Ventura, D., Casoli, E., Belluscio, A., & Ardizzone, G. D. (2022). Transplantation on a *Posidonia oceanica* meadow to facilitate its recovery after the Concordia shipwrecking. *Marine Pollution Bulletin*, 179, 113683. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113683>

- Meinesz, A., & Verlaque, M. (1979). Note préliminaire concernant quelques expériences de repiquage de *Caulerpa prolifera* et de *Zostera noltii* dans la zone de rejet de l'effluent thermique de la centrale électrique de Martigues-Ponteu (golfe de Fos, France). *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internat. explor. sci. Médit.*, 25-26, 209-212.
- Meinesz, A., Caye, G., Loquez, F., Macaux, D. (1990). Analyse bibliographique sur la culture des phanérogames marines. *Posidonia newsletter*, Fr., 3(1), 1-67.
- Meinesz, A., Caye, G., Loquès, F., & Molenaar, H. (1993). Polymorphism and Development of *Posidonia oceanica* Transplanted from Different Parts of the Mediterranean into the National Park of Port-Cros. *Botanica Marina*, 36(3). <https://doi.org/10.1515/botm.1993.36.3.209>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique. (28 juin 2022). La France se félicite de la publication par la Commission européenne d'un projet ambitieux en faveur de la protection et de la restauration des écosystèmes. Consulté le 28 septembre 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/france-se-felicite-publication-commission-europeenne-dun-projet-ambitieux-en-faveur-protection-et>
- Molenaar, H., & Meinesz, A. (1992). Vegetative Reproduction in *Posidonia oceanica*. : II. Effects of Depth Changes on Transplanted Orthotopic Shoots. *Marine Ecology*, 13(2), 175-185. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1992.tb00348.x>
- Molenaar, H., Meinesz, A., & Caye, G. (1993). Vegetative Reproduction in *Posidonia oceanica*. Survival and Development in Different Morphological Types of Transplanted Cuttings. *Botanica Marina*, 36(6). <https://doi.org/10.1515/botm.1993.36.6.481>
- Noten, T.M.P.A. (1983). Detached shoots of *Zostera noltii* Hornem as a means of dispersal : a transplantation experiment. In *Proceedings internat. symp. aquat. macrophytes*, Nijmegen, Netherlands, 161-164.
- Orth, R. J., Lefcheck, J. S., McGlathery, K. S., Aoki, L., Luckenbach, M. W., Moore, K. A., Oreska, M. P. J., Snyder, R., Wilcox, D. J., & Lusk, B. (2020). Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services. *Science Advances*, 6(41), eabc6434. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6434>
- Phillips, R.C. (1980a). Responses of transplanted and indigenous *Thalassia testudinum* Banks ex Königs and *Halodule wrightii* Aschers to sediment loading and cold stress. *Contrib. Mar. Sci.*, 23, 79-87. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL8110176944>
- Piazzì, L., & Cinelli, F. (1995). Restoration of the littoral sea bottom by means of transplantation of cuttings and sprouts. In *Posidonia oceanica*, a contribution to the preservation of a major mediterranean marine ecosystem. Cinelli F., Fresi E., Lorenzi C., Mucedola A. (eds). *Revista marittima publ.*, Roma, 69-71.
- Piazzì, L., Balestri, E., Magri, M., & Cinelli, F. (1998). Experimental Transplanting of *Posidonia oceanica* (L.) Delile into a Disturbed Habitat in the Mediterranean Sea. *Botanica Marina*, 41(1-6), 593-602. <https://doi.org/10.1515/botm.1998.41.1-6.593>
- Piazzì, L., Balestri, E., Balata, D., Cinelli, F. (2000). Pilot transplanting experiment of *Posidonia oceanica* (L.) Delile to restore a damaged coastal area in the Mediteranean sea. *Biol. Mar. Medit.*, 7(2), 409-411.

- Rismondo, A., CUriel, D., Solazzi, A., Marzocchi, M., Chiozzotto, E., Scattolin, M. (1995). Sperimentazione di trapianto di fanerogame marine in Laguna di Venezia : 1992-1994. *SITE Atti*, Italia, 16, 699-701.
- Sfriso, A., Buosi, A., Tomio, Y., Juhmani, A.-S., Facca, C., Sfriso, A. A., Franzoi, P., Scapin, L., Bonometto, A., Ponis, E., Rampazzo, F., Berto, D., Gion, C., Oselladore, F., Cacciatore, F., & Boscolo Brusà, R. (2019). Aquatic Angiosperm Transplantation : A Tool for Environmental Management and Restoring in Transitional Water Systems. *Water*, 11(10), 2135. <https://doi.org/10.3390/w11102135>
- Tela Botanica (7 septembre 2011) Les algues, une source de richesse insoupçonnée. Consulté le 24 octobre 2022. <https://www.tela-botanica.org/2011/09/article4569/#:~:text=Il%20y%20aurait%20environ%209,30%20000%20%C3%A0%20plusieurs%20millions%20>
- Terrados, J., Marín, A., & Celdrán, D. (2013). Use of *Posidonia oceanica* seedlings from beach-cast fruits for seagrass planting. *Botm*, 56(2), 185-195. <https://doi.org/10.1515/bot-2012-0200>
- Thorhaug, A. (1979). The flowering and fruiting of restaured *Thalassia* beds : a preliminary note. *Aquatic Botany*, 6, 189-192.
- Tomasello, A., Pirrotta, M., Calvo, S. (2019). Construction underwater landscape by using *Posidonia oceanica* transplanting combined with innovative artificial reefs. In Proceedings of the 6th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation, Antalya, Turkey, 14–15 January 2019; Langar, H., Ouerghi, A., Eds.; RAC/SPA Publications: Tunis, Tunisia, 2019; pp. 92–97
- Tuya, F., Vila, F., Bergasa, O., Zarranz, M., Espino, F., & Robaina, R. R. (2017). Artificial seagrass leaves shield transplanted seagrass seedlings and increase their survivorship. *Aquatic Botany*, 136, 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.09.001>
- Ventura, D., Mancini, G., Casoli, E., Pace, D. S., Lasinio, G. J., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2022). Seagrass restoration monitoring and shallow-water benthic habitat mapping through a photogrammetry-based protocol. *Journal of Environmental Management*, 304, 114262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114262>
- Ward, E.A., Meek, S.K., Gordon, D.M., Cameron, T.C., Steer, M.D. Miliou, A., & Tsimpidis, T. (2020). 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. 7 p.
- Williams, S. L., & Orth, R. J. (1998). Genetic Diversity and Structure of Natural and Transplanted Eelgrass Populations in the Chesapeake and Chincoteague Bays. *Estuaries*, 21(1), 118. <https://doi.org/10.2307/1352551>

RÉSUMÉ

Les petits fonds marins côtiers jouent un rôle écologique et socio-économique essentiel pour le maintien de la biodiversité et du bien-être de l'Homme. Néanmoins, ces derniers sont depuis longtemps soumis à de nombreuses pressions naturelles et anthropiques, et fortement impactés par différentes activités et aménagements terrestres et marins.

Malgré les efforts croissants déployés pour conserver ces écosystèmes, il devient nécessaire d'agir directement sur leur rétablissement, notamment par le biais de la restauration écologique. Alors que le développement de cette filière s'accélère et que les incitations financières sont de plus en plus nombreuses, les initiatives de projets sont encore assez rares en mer du fait de la complexité du milieu mais aussi d'un besoin de montée en compétences des personnes actuellement ou prochainement en poste.

C'est pour répondre à ce dernier besoin qu'a été proposé par l'Université de Montpellier le Diplôme d'Université Restauration écologique des petits fonds marins côtiers (DU RestauMer). La toute première promotion d'étudiants a assisté et participé à des cours dispensés par des intervenants de différentes structures actrices de la restauration écologique, au cours des mois d'avril, mai et juin 2022.

Ce document synthétise ces différentes interventions, ainsi que des recherches bibliographiques sur le sujet, afin de donner une vision globale de l'état des travaux sur la restauration des petits fonds côtiers en Méditerranée. Il présente également les rapports rédigés par les étudiants dans le cadre de leur évaluation pour l'obtention du DU.