



Faculté des Sciences de Montpellier



Diplôme Universitaire

« Restauration Écologique des Petits Fonds Marins Côtiers »

**RESTAURATION DE LA BIODIVERSITÉ MARINE
PAR LES RÉCIFS ARTIFICIELS DANS LES ZONES
INFLUENCÉES PAR LES REJETS DE STATIONS
D'ÉPURATION : UNE ÉTUDE DE FAISABILITÉ**

Manon MARCO

Tuteur : Pierre BOISSERY

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon tuteur de mémoire, M. Pierre BOISSERY, pour son encadrement, ses précieux conseils et son soutien au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et de partager leur expertise. Leurs remarques et suggestions permettront sans aucun doute d'enrichir davantage ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du Diplôme Universitaire "Restauration écologique des petits fonds côtiers" pour la qualité de leur enseignement et leur disponibilité. Les connaissances acquises au cours de cette formation ont été déterminantes pour mener à bien cette étude et pour la suite de mon projet professionnel.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers M. Guy HERROUIN, qui a pu me communiquer des précieux détails sur le projet REMORA et des documents qui m'ont aidé à la compréhension et à l'analyse de la situation dans le cadre de la rédaction de mon mémoire.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur présence et leur écoute ont été un véritable réconfort dans les moments de doute et de stress.

À tous, un grand merci !

RÉSUMÉ

La biodiversité marine de la mer Méditerranée est menacée par les pressions anthropiques, notamment les rejets urbains, conduisant à un déclin alarmant. Les zones côtières peu profondes sont particulièrement touchées par cette détérioration, compromettant les écosystèmes fragiles et les services qu'ils fournissent. Pour restaurer ces habitats endommagés, l'utilisation de récifs artificiels est envisagée, bien que controversée. Des projets comme REMORA et REXCOR ont montré des résultats prometteurs dans la recréation d'habitats naturels et la promotion de la biodiversité marine. Cependant, l'importance des conditions environnementales et des perturbations climatiques sur la restauration est soulignée. Pour assurer la durabilité des habitats urbains, une réflexion approfondie sur les enjeux environnementaux, sociaux et économiques est nécessaire, ainsi qu'un cadre réglementaire solide, une volonté politique forte et des ressources financières adéquates. La coopération entre les parties prenantes locales est essentielle pour le succès des projets de restauration. En résumé, ce mémoire explore l'impact des rejets urbains sur la biodiversité marine méditerranéenne et étudie les stratégies de restauration, notamment l'utilisation de récifs artificiels, pour rétablir les fonctions écosystémiques dans les zones fortement affectées.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
I. IMPACT DES REJETS URBAINS ET ÉVOLUTION DE LA SITUATION ÉCOLOGIQUE AU DROIT DES ZONES DE REJET	2
A. Caractérisation des Rejets Urbains et leurs Impacts sur le Milieu Marin	3
1. <i>Les Matières en Suspension (MES)</i>	3
2. <i>Les Nutriments</i>	3
3. <i>Les Matières Organiques (MO)</i>	4
4. <i>Les Métaux Lourds</i>	4
B. Évolution de la Situation Écologique au Droit des Zones de Rejets	6
II. LES EXPÉRIMENTATIONS REMORA ET REXCOR	8
C. Le projet REMORA (Herrouin and Huau, 2015)	8
1. <i>Description du projet</i>	8
2. <i>Analyse critique</i>	10
D. Le projet REXCOR (Cointre, 2018)	11
1. <i>Description du projet</i>	11
2. <i>Analyse critique</i>	14
III. PROMOUVOIR LA RESTAURATION DES HABITATS EN RÉPONSE AUX REJETS URBAINS : UNE PERSPECTIVE	15
A. Cadre Règlementaire	15
B. Entre Obligation et Volontariat : Enjeux de la Restauration des Habitats Marins Dégradés par les Rejets Urbains	16
C. Faisabilité Financière de la Restauration : Analyse des Coûts, des Ressources Requises et des Sources de Financements	17
D. Autorisations Nécessaires : une Synthèse des Éléments les plus Essentiels	19
E. Coopération des Parties Prenantes : la Clé du Succès	20
F. Transition vers une Restauration Écologique à Grande Échelle : Maximiser l'Impact des Projets de Récifs Artificiels	20
G. Objectifs et Stratégies de Restauration	21
1. <i>Objectifs</i>	21
2. <i>Différentes Stratégies</i>	22
CONCLUSION	24

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Développement d'algues filamenteuses sur le site de la Cassidaigne (©Andromède Océanologie, 2015)	4
Figure 2 : Représentation chronologique des effets de l'exposition aux polluants et leur concentration sur l'ensemble de la chaîne trophique – principe de bioaccumulation (modifié d'après Van der Oost et al. 2003)	5
Figure 3 : Cartographie de la pression anthropique "rejets urbains" 2021 (d'après ANDROMEDE OCEANOLOGIE, 2023)	6
Figure 4 : Emplacement des récifs expérimentaux, des récif témoins et de la station d'épuration Amphitria (d'après les données de Medtrix)	8
Figure 5 : Photos des récifs artificiels mis en place sur le projet REMORA (source : Medtrix)	9
Figure 6 : Emplacement sites A, B, C et D et de la zone de rejet (d'après les données de Medtrix)	11
Figure 7 : Plan d'expérimentation du projet REXCOR (d'après Cointre, 2018)	12
Figure 8 : Projet REXCOR, utilisation des récifs artificiels pour restaurer les zones de rejet du parc national des Calanques (Source : Parc national des Calanques)	16
Figure 9 : Succès de Restauration selon les barrières abiotique et biotique (d'après Hobbs and Harris, 2001)	22

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Estimation des ressources nécessaires et de l'estimation des coûts d'un projet de restauration par les récifs artificiels en droit des rejets en mer (Herrouin and Huau, 2015; Cointre, 2018)	18
---	----

INTRODUCTION

La mer Méditerranée, berceau de civilisations anciennes, appelée en latin « *Mare medi terraneum* », est définie comme la mer située au cœur des terres. Bordée par l'Europe au nord, l'Afrique au sud et l'Asie à l'est, la mer Méditerranée se distingue par sa vaste étendue (2 969 000 km²) qui en fait la plus grande mer intérieure mais également la plus profonde avec une profondeur maximale de 5267 m (Coll et al., 2010). Cette mer semi-fermée est caractérisée par des courants complexes et est connectée à l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar (Bas, 2009). Cet écosystème revêt une importance cruciale pour la diversité mondiale, abritant une biodiversité marine exceptionnelle, considéré comme l'un des écosystèmes marins les plus importants de la planète, jouant un rôle vital pour les populations riveraines qui en dépendent. Cependant, elle est aujourd'hui confrontée à de multiples pressions et subit un effondrement de sa biodiversité à un point tel qu'elle est l'une des régions marines suscitant le plus d'inquiétudes à l'échelle mondiale (Shannon et al., 2009; Coll et al., 2010; Galewski et al., 2021). Ses eaux abritent une multitude d'écosystèmes à l'écologie fragile, dont les petits fonds côtiers qui jouent un rôle crucial.

Ces petits fonds côtiers, eaux peu profondes près des côtes, sont des zones marines qui abritent une diversité d'habitats et jouent un rôle essentiel dans le cycle de vie des poissons, tout en étant également capital pour les activités humaines (Lenfant *et al.*, 2015). Ces zones sont considérées comme des points névralgiques en termes d'enjeux, tant sur le plan écologique que socio-économique. Leurs habitats abritent une grande diversité d'espèces marines, fournissant des aires d'alimentation et de reproduction ainsi que des nurseries pour de nombreuses espèces. Elles jouent également une fonction fondamentale dans la protection des côtes contre l'érosion et les tempêtes (Bas, 2009; Lenfant *et al.*, 2015; Stergiou *et al.*, 2015). Malheureusement, ces petits fonds sont confrontés à de multiples pressions anthropiques, notamment la pollution, l'urbanisation côtière incontrôlée, la surpêche, le tourisme non-durable, et d'autres activités humaines. Ces pressions menacent la biodiversité marine, perturbent les écosystèmes fragiles et compromettent les services écosystémiques qu'ils fournissent (Bas, 2009; Stergiou *et al.*, 2015; Aouiche *et al.*, 2017).

Parmi les multiples sources de pollution des petits fonds côtiers, les rejets urbains, qui correspondent à l'ensemble des eaux rejetées par les stations d'épurations (STEP), sont parmi les principaux acteurs de perturbation. En France, on recense plus de 200 000 STEP dont 60 rejettent directement en mer Méditerranée. La quantité totale de pollution rejetée en mer s'élève à 6,5 millions d'Équivalents Habitants (EH), dont 79 % proviennent des grandes agglomérations méditerranéennes (Andral *et al.*, 2011). De plus, 65 % des eaux usées arrivant dans ces stations sont traitées (Boissery *et al.*, 2012). Les rejets urbains sont des déversements directs ou indirects d'eaux usées et de déchets provenant des activités humaines dans les eaux côtières. Ils comprennent les eaux usées domestiques, des effluents industriels, des hydrocarbures, etc. qui a été défini par le Commissariat général au développement durable (2016) et par l'Arrêté du 31 juillet 2020. Ils sont soumis à des réglementations strictes visant à limiter leur impact sur l'environnement marin : par exemple, la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) impose l'atteinte du bon état écologique des eaux en rejet mais aussi un état des lieux de la qualité aquatique et une recherche de pressions (UE water directive). Les différentes réglementations peuvent inclure des normes de qualité de l'eau, des restrictions sur les substances chimiques dangereuses, des exigences de traitement des eaux usées, des mesures de surveillance et d'évaluation de la qualité de l'eau. Cependant, les réglementations ne prennent pas en compte la qualité et l'état écologique des habitats.

Les rejets urbains peuvent avoir des effets dévastateurs sur les petits fonds côtiers. Ils introduisent des polluants toxiques dans l'écosystème marin, compromettent la qualité de l'eau, la turbidité, perturbent les habitats naturels, peuvent entraîner des proliférations d'algues nuisibles, une diminution de la biodiversité marine et des risques pour la santé humaine (Seidl, 1997; Boissery *et al.*, 2012; Ferro, 2013; Chiban, 2014).

En outre, les rejets urbains contribuent à la dégradation générale de l'environnement côtier et compromettent sa capacité à fournir des services écosystémiques vitaux. Cela nécessite des efforts concertés pour réduire les pressions anthropiques, mais aussi la restauration des milieux dégradés par les rejets lorsque les pressions ont disparu ou sont extrêmement réduites (Andral *et al.*, 2011; Boissery *et al.*, 2012; Ferro, 2013).

Dans ce contexte et aux vues de la dégradation des habitats due aux pressions des rejets des STEP, et au-delà des actions de gestion et/ou de protection (comme ici l'obligation de recouvrir un bon état des rejets), la restauration écologique est un outil qui permet d'aider un écosystème endommagé à recouvrir un état d'équilibre acceptable (Hobbs and Cramer, 2008; Lenfant *et al.*, 2015). Parmi celles-ci, l'implantation de structures artificielles, également connue sous le nom de récifs artificiels, se démarque comme l'une des plus controversées. L'objectif est de mimer l'habitat naturel marin en remplissant certaines fonctions écologiques, ainsi les organismes peuvent trouver un point d'accroche qui va leur permettre de retrouver des fonctions écologiques (nursérie, protection, etc.) puis développer des écosystèmes plus complexes (Bocquet *et al.*, 2022). En Méditerranée, on recense 2 projets expérimentaux utilisant l'implantation de structures artificielles afin d'étudier leur faisabilité pour y restaurer les milieux dégradés : REMORA et REXCOR.

L'objectif de ce rapport est d'étudier si les fonctions écosystémiques de ces milieux fortement impactées voire détruites par les rejets des STEP peuvent revenir à un état satisfaisant par des solutions de restauration comme l'utilisation de récifs artificiels :

Peut-on restaurer la biodiversité marine au droit d'une zone altérée par un rejet urbain ? Afin de répondre à cette question et d'établir un axe de perspective, ce mémoire va aborder plusieurs sujets. En premier lieu, nous allons traiter le sujet de l'impact des rejets urbains et de l'évolution de la situation écologique au droit des zones de rejet. Ensuite, nous allons faire une description et une analyse critique des projets REMORA et REXCOR qui utilisent des récifs artificiels en sortie de STEP et pour finir une réflexion de réparer les habitats aux zones de rejets urbains, en apportant des perspectives et des stratégies de restauration.

I. IMPACT DES REJETS URBAINS ET ÉVOLUTION DE LA SITUATION ÉCOLOGIQUE AU DROIT DES ZONES DE REJET

Afin de restaurer les fonctions écosystémiques et les milieux, il est nécessaire d'identifier, connaître et maîtriser les pressions à l'origine de la dégradation (Boissery, 2014; Lenfant *et al.*, 2015; Gudfin *et al.*, 2021; Bocquet *et al.*, 2022). Plusieurs pressions impactant négativement l'état biotique et abiotique des milieux ont été recensées par la directive cadre eau et la directive cadre stratégie pour le milieu (Andral *et al.*, 2011). Parmi ces pressions, les rejets d'eaux urbaines constituent une pression importante sur les milieux marins. Les zones fermées comme les baies sont particulièrement vulnérables, avec des phénomènes d'externalités permanentes des différentes activités humaines (DAO *et al.*, 2003). Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques des rejets urbains, leurs impacts sur le milieu marin mais aussi d'étudier les évolutions de la situation écologique au droit des zones de rejet avec la mise en place de gestion et de surveillance des rejets urbains.

A. CARACTÉRISATION DES REJETS URBAINS ET LEURS IMPACTS SUR LE MILIEU MARIN

Les eaux usées provenant des zones urbaines, qu'elles soient traitées ou non, sont généralement déversées dans les milieux marins côtier et peuvent exercer une forte pression sur ces écosystèmes. Ces impacts varient selon l'importance et la situation des rejets, et selon la configuration du site côtier (Andral *et al.*, 2011). Les rejets se caractérisent principalement par les apports de substances endogènes à effet néfaste arrivant à la mer et peuvent être d'origines diverses. Ceux provenant des STEP contiennent généralement un mélange de nutriments, de matières organiques et de polluants (Ferro, 2013). Les principaux sont les matières en suspension (MES), les nutriments, les matières organiques (MO), et les métaux lourds. Ces éléments entraînent une dégradation de la qualité de l'eau et des sédiments à proximité des zones de rejet mais pas seulement. Les impacts potentiels des rejets d'eaux usées urbaines doivent être évalués non seulement en termes de qualité de l'eau (baignade, aquaculture, conchyliculture, etc.), mais aussi et surtout pour préserver les espèces et les écosystèmes marins à long terme, comme l'altération des fonds réduisant les fonctions d'habitats aux zones de rejet (Thouvenin, 1992; Andral *et al.*, 2011; Ferro, 2013; Chiban, 2014; Morin-Crini *et al.*, 2017).

1. LES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES)

Les rejets urbains en mer peuvent contenir une quantité significative de **matières en suspension** (MES), comprenant des particules minérales, organiques et/ou biologiques, allant des particules grossières visibles à l'œil nu aux particules fines (Andral *et al.*, 2011; Chiban, 2014; Morin-Crini *et al.*, 2017). Ces MES proviennent à la fois de sources naturelles telles que l'érosion du sol et la décomposition de la matière végétale ou animale, mais aussi de sources anthropiques comme les surfaces urbaines lors des événements pluvieux.

Une fois rejetées en mer, les MES peuvent avoir un impact néfaste sur les milieux marins récepteurs en fonction de leur concentration (Seidl, 1997; Chocat, Bertrand-Krajewski and Barraud, 2007; Andral *et al.*, 2011; Chiban, 2014). Elles peuvent se déposer autour d'un point de rejet, créant une zone très polluée avec un risque de colmatage et d'envasement (Thouvenin, 1992; Seidl, 1997). Elles réduisent la pénétration de la lumière dans l'eau, limitant ainsi la croissance des plantes aquatiques et peuvent être à l'origine de problèmes de turbidité de couleur de l'eau (Morin-Crini *et al.*, 2017). De plus, les MES peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes marins, en particulier au niveau du benthos et de l'infralittoral (Andral *et al.*, 2011).

2. LES NUTRIMENTS

Les rejets urbains sont une source importante d'apports de **nutriments**, notamment d'azote et de phosphore, dont le ratio est un indicateur de qualité de l'eau du milieu (Guillaud and Romana, 1992). Ils proviennent notamment des activités agricoles, de déchets organiques, de détergents, etc. (Pinay *et al.*, 2022). Les eaux de ruissellements urbains charrient des nutriments issus des engrais utilisés pour l'entretien des espaces verts, des déchets végétaux, et plus encore (Ferro, 2013).

Les principaux impacts des nutriments issus des rejets urbains sont le risque d'eutrophisation dans les zones côtières (Guillaud and Romana, 1992; Pinay *et al.*, 2022). L'eutrophisation se traduit par une augmentation de la biomasse végétale (phytoplancton, macroalgues) pouvant conduire à des chutes d'oxygène dans l'eau et des changements dans la composition des communautés biologiques. Certaines de ces proliférations végétales peuvent être toxiques pour la faune marine et la santé humaine (Agence des aires marines protégées et Ifremer 2012; Pinay *et al.* 2022). Cependant, l'impact des rejets urbains dépend beaucoup des caractéristiques du milieu récepteur. Les zones ouvertes et oligotrophes, ne semblent pas entraîner de graves

problèmes d'eutrophisation (Guillaud and Romana, 1992). À l'inverse, dans les zones plus confinées comme les étangs ou les baies, les rejets de nutriments peuvent avoir des effets plus néfastes. Dans les lagunes méditerranéennes (comme l'étang de Thau situé à Sète), ces proliférations peuvent entraîner des crises anoxiques (raréfaction voire consommation totale d'oxygène) mortelles pour les animaux et les végétaux (Pinay *et al.*, 2022).



Figure 1: Développement d'algues filamenteuses sur le site de la Cassidaigne (©Andromède Océanologie, 2015)

3. LES MATIÈRES ORGANIQUES (MO)

Les **matières organiques** (MO) constituent une part importante des rejets urbains, représentant environ 65 % de ces déversements. Ces composés organiques proviennent de diverses sources telles que les eaux domestiques, les déchets végétaux d'origine agricole ou non, les hydrocarbures, les résidus alimentaires, et les déjections (Bodennec, Quemeur and Marty, 1991; Andral *et al.*, 2011; Chalghmi, 2017). Les MES sont présentes dans les MO, principalement sous forme de demande chimique en oxygène (DCO) et de demande biologique en oxygène (DBO), qui sont respectivement des indicateurs de la pollution organique de l'eau et de la quantité de matière organique biodégradable (Andral *et al.*, 2011).

Lorsque ces rejets sont déversés en mer, les MO peuvent avoir divers impacts. Elles peuvent causer une eutrophisation et une prolifération d'algues en raison de l'apport excessif de nutriments (Andral *et al.*, 2011; Pinay *et al.*, 2022). La dégradation bactérienne de la matière organique, mesurée par des valeurs élevées de DCO et de DBO, peut entraîner une diminution de l'oxygène dissous, conduisant à des zones mortes ou à une désoxygénation du milieu récepteur, mettant ainsi en danger les organismes aquatiques (Andral *et al.*, 2011; Chalghmi, 2017). De plus, les rejets de MO entraînent une accumulation de contaminants organiques tels que les hydrocarbures et les pesticides dans les sédiments et le long de la chaîne trophique étant considérés comme des bioaccumulateurs (Fig.2) (Chalghmi, 2017). La biodégradabilité des MO varie en fonction de leur origine, généralement moins élevée par temps de pluie.

4. LES MÉTAUX LOURDS

Les **métaux lourds**, comme le plomb, le cadmium et le mercure, sont parmi les polluants les plus préoccupants pour le milieu marin (Bernard and Gravez, 2013; Messai, 2014; Ifremer, 2023). Ils proviennent de diverses sources, notamment les rejets industriels, les eaux usées urbaines et le ruissellement des zones agricoles (Boissery *et al.*, 2012; Messai, 2014). En Méditerranée, les apports de métaux lourds à la mer proviennent principalement du Rhône (68 % des apports totaux), mais les rejets urbains et portuaires sont aussi des sources importantes (Boissery *et al.*, 2012).

Les métaux lourds ont tendance à s'accumuler dans les organismes marins, se concentrant tout au long de la chaîne alimentaire (Duquesne, 1992; Casas, 2005; Boissery *et al.*, 2012; Ouro-Sama *et al.*, 2014; Taibi and Reguieg, 2021), ayant de potentiels effets toxiques sur la faune marine, notamment, les poissons, les mollusques et les crustacés. La contamination peut perturber l'équilibre des écosystèmes marins, en affectant la diversité et la production des organismes (*Fig.2*) (van der Oost, Beyer and Vermeulen, 2003; Ouro-Sama *et al.*, 2014), diminuant l'abondance et la qualité des ressources halieutiques (Casas, 2005; Ouro-Sama *et al.*, 2014).

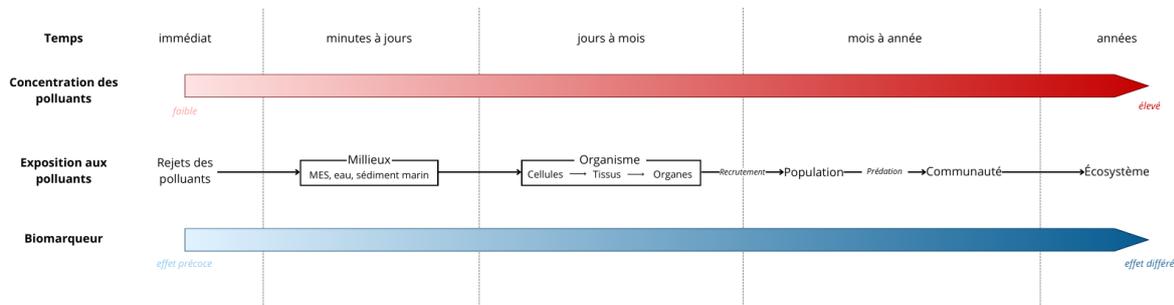


Figure 2 : Représentation chronologique des effets de l'exposition aux polluants et leur concentration sur l'ensemble de la chaîne trophique – principe de bioaccumulation (modifié d'après Van der Oost *et al.* 2003)

Les impacts, localisés aux zones de droit des rejets de la composition des rejets urbains sont nombreux, et il est difficile de dresser une liste exhaustive. Ils ont des effets néfastes importants et cumulés sur le milieu marin (*Fig.3*), en modifiant son fonctionnement écologique (Brelot and Chocat, 1996) et peuvent entraîner des phénomènes de pollution organique, d'eutrophisation, de toxicité, de bioaccumulation des polluants (*Fig.2*), et de dégradation des habitats.

La dégradation des habitats marins a des répercussions graves sur la biodiversité marine. Les rejets altèrent également les populations naturelles, en particulier au niveau des sédiments, du médiolittoral et de l'infralittoral, entraînant une diminution de la diversité spécifique et la création de conditions abiotiques pour la faune benthique. Les modifications du substrat induites par des changements dans la circulation océanique ou l'apport en nutriments, favorisant l'envasement, peuvent entraîner une altération des fonctions écosystémiques des habitats. De plus, certaines espèces, désignées comme « ingénieurs », altèrent physiquement leur environnement, créant ainsi de nouveaux habitats complexes pour d'autres espèces, offrant refuge, nourriture et sites de reproduction. Les habitats construits par ces espèces, tels que les récifs coralliens, sont extrêmement sensibles aux perturbations et peuvent mettre plusieurs décennies à se régénérer. Leur disparition entraîne donc une perte majeure de biodiversité perturbant l'équilibre de la chaîne trophique ; cela peut conduire à une fragmentation et à un morcellement des espaces naturels et côtiers, ayant des effets néfastes sur la biodiversité en perturbant les connexions entre les habitats.

En somme, les rejets provenant des STEP des eaux usées entraînent une dégradation et une destruction des fonctions écologiques des habitats marins et côtiers. Cette dégradation entraîne la disparition d'espèces et perturbe le fonctionnement des écosystèmes, affectant d'abord le niveau le plus bas de la chaîne trophique puis l'ensemble de celle-ci (effet "bottom up"), ce qui se traduit par un appauvrissement significatif de la biodiversité marine. Les caractéristiques particulières de la Méditerranée, comme sa profondeur et son hydrodynamisme, rendent ce milieu particulièrement vulnérable aux rejets urbains (Andral *et al.*, 2011; Chalghmi, 2017). La surveillance et la gestion des rejets urbains est donc nécessaire pour en limiter les impacts.

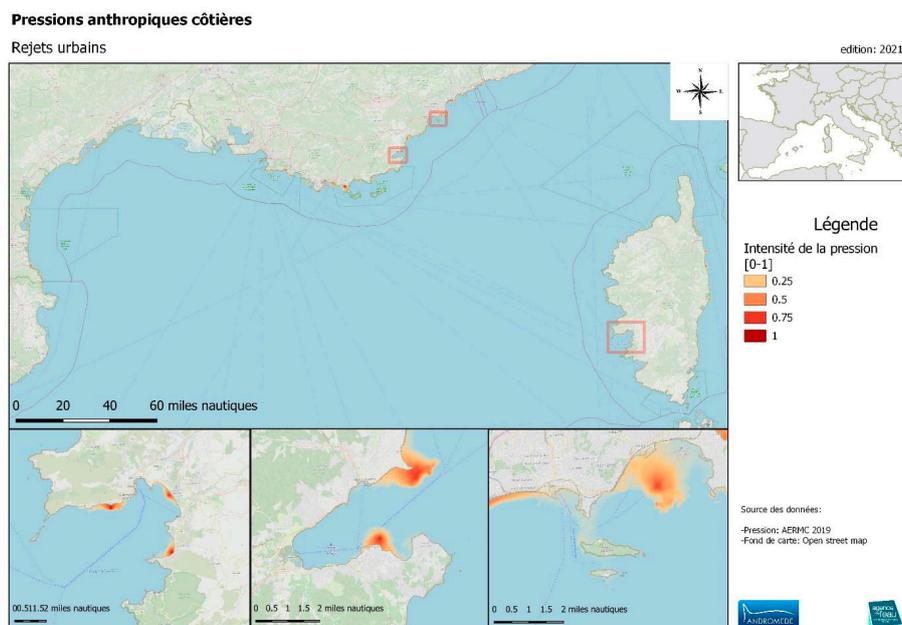


Figure 3 : Cartographie de la pression anthropique "rejets urbains" 2021 (d'après ANDROMÈDE Océanologie, 2023)

B. ÉVOLUTION DE LA SITUATION ÉCOLOGIQUE AU DROIT DES ZONES DE REJETS

La gestion des rejets urbains est une composante essentielle pour minimiser leur impact environnemental sur les écosystèmes marins. Elle implique le respect de normes strictes et d'exigences épuratoires pour limiter la pollution. Ces normes incluent des valeurs seuils pour des paramètres tels que la DCO, la DBO, les MES, l'azote et le phosphore, en fonction de la taille de la commune ou de l'agglomération, de la sensibilité de la zone de rejet à l'eutrophisation (soit du degré de fermeture du milieu récepteur). L'objectif de ces protocoles est d'apprécier les effets écologiques sur le milieu marin des systèmes d'assainissement, notamment des rejets *via* les émissaires en mer, permettant ainsi de mettre en œuvre un suivi écologique opérationnel suivant des méthodes normalisées (Jouvenel, 2017). Comme il a été vu précédemment, les rejets de stations de traitement des eaux usées peuvent avoir un impact négatif sur la qualité des eaux réceptrices. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'une agglomération est située sur le littoral, où les masses d'eau sont souvent de qualité moyenne à mauvaise en raison de la concentration en habitations et d'activités (Deroo, 2022). La situation écologique sur ces zones fait l'objet de nombreuses réglementations et initiatives, tant au niveau européen que national.

Au niveau européen, la Directive sur les Eaux Résiduaires Urbaines (DERU 91/271/CEE) de 1991 impose aux États membres de l'UE des obligations de collecte et de traitement des eaux usées (UE water directive, 1991). Elle vise à prévenir et réduire la pollution des eaux de surface, estuariennes et côtières par les rejets des STEP. Selon la taille de l'agglomération, et la sensibilité de la zone réceptrice, les niveaux de traitement et les échéances de mise en conformité varient (Andral *et al.*, 2011; Deroo, 2022). La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000 établit un cadre juridique destiné à protéger et à remettre en état les eaux sur le territoire de l'UE, ainsi qu'à assurer leur exploitation durable (UE water directive, 2023). Elle fixe en particulier des objectifs de bon état écologique et chimique des eaux de surfaces et souterraines à atteindre d'ici 2027.

Au niveau national, des efforts ont été réalisés par les communes pour réduire les apports en polluants dans les milieux naturels, comme la mise en service ou en conformité de stations d'épuration (Deroo, 2022). Le gouvernement français a donné un nouvel élan à la gestion quantitative de la ressource en eau avec des projets

de territoire pour la gestion de l'eau. De plus, des programmes de surveillance ont été mis en place pour dresser un tableau cohérent et fiable de l'état des eaux souterraines.

Avec ces réglementations et efforts, la situation écologique au droit des zones de rejets en mer a connu des améliorations significatives au cours des 20 dernières années, mais des défis persistent. La qualité des eaux de baignade en mer s'est légèrement améliorée sur la période 2016-2018, avec 95 % des sites contrôlés présentant une qualité « excellente » ou « bonne », malgré qu'une pression soit encore exercée sur ces zones bien précises (*Fig. 3*).

Au fil des années, d'importants progrès ont été réalisés dans les domaines des technologies de traitement de l'eau et de la réglementation environnementale. Ces avancées ont permis de réduire considérablement l'impact des rejets urbains sur la qualité de l'eau. Les technologies de traitement de l'eau ont évolué pour devenir plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement, permettant ainsi de minimiser les rejets polluants dans l'eau. Parallèlement, des réglementations plus strictes ont été mises en place pour contrôler et limiter la quantité et la qualité des rejets urbains. La sensibilisation à l'égard des problèmes environnementaux, tels que la pollution marine, a augmenté, incitant les gouvernements, les entreprises et les citoyens à adopter des pratiques plus durables. La restauration des zones de rejet urbain en mer peut être perçue comme une démarche responsable visant à réduire l'impact environnemental des activités humaines.

De ce fait, la qualité de l'eau n'est plus un élément limitant dans la restauration des zones de rejet en mer. Ces efforts de restauration peuvent désormais se concentrer sur la réparation des dommages passés plutôt que sur la lutte contre la pollution en cours. Cela nous permet d'envisager sérieusement la question de la restauration des zones de rejet en mer qui ont vu leurs fonctions écosystémiques d'habitats côtiers fortement réduite si ce n'est détruite. Il s'agit d'une étape importante vers la réalisation de nos objectifs de protection et de restauration des écosystèmes côtiers, qui ont un temps de résilience long. Nous pouvons désormais nous concentrer sur le retour à un état proche de l'initiale ou répondant aux fonctions écologiques perdues et plus sain de ces écosystèmes.

L'efficacité des mesures prises ouvre la voie à de nouvelles initiatives pour la sauvegarde des écosystèmes marins. Les progrès dans le domaine de la restauration écologique permettent désormais de restaurer les écosystèmes marins endommagés de manière plus efficace. Des techniques telles que la création d'habitats artificiels et la régénération des écosystèmes côtiers peuvent être utilisées pour restaurer les zones de rejet urbain en mer tout en favorisant la biodiversité marine.

Récemment, les projets expérimentaux REMORA (Herrouin and Huau, 2015) et REXCOR (Cointre, 2018) ont été lancés afin de démontrer que la qualité de l'eau n'est plus un facteur limitant au retour de la vie marine et pour explorer la faisabilité d'utiliser des récifs artificiels comme nouveaux substrats favorisant la colonisation. L'objectif est de recréer des habitats complexes qui offrent refuge, nourriture et sites de reproduction à une grande diversité d'espèces marines. Ces initiatives visent à restaurer les fonctions d'habitats dégradés et à encourager le développement de communautés écologiques diversifiées.

II. LES EXPERIMENTATIONS REMORA ET REXCOR

C. LE PROJET REMORA (HERROUIN AND HUAU, 2015)

1. DESCRIPTION DU PROJET

Le projet REMORA (Restauration Écologique en Milieux Océaniques par Récifs Artificiels) visait principalement à tester l'hypothèse selon laquelle la qualité de l'eau n'est plus un facteur limitant pour le développement de la vie marine en raison de l'action d'assainissement côtier. Il cherchait également à démontrer que cette limitation est due à l'absence d'un substrat sain et solide propice à la fixation d'organismes marins et au retour des fonctions écologiques perdues dans un site précédemment très dégradé. Le site d'étude est situé dans la zone du Cap Sicié et du rocher des Deux Frères proche de Toulon (83), à proximité de la station d'épuration AmphitriA (Fig. 3). Le projet fait partie du projet méditerranéen de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et a pour thème « Restauration des habitats dégradés ».

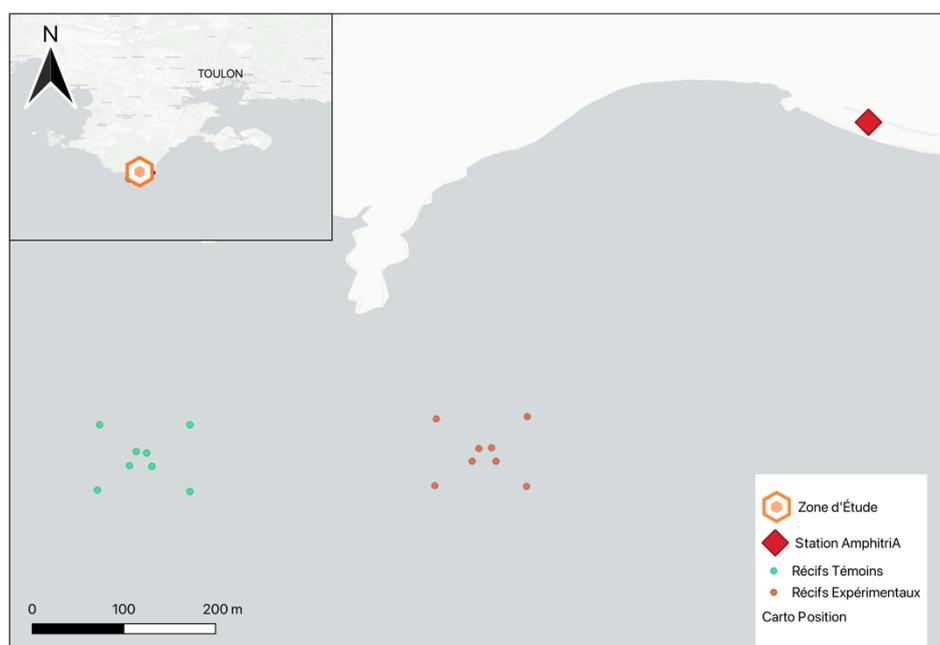


Figure 4 : Emplacement des récifs expérimentaux, des récifs témoins et de la station d'épuration AmphitriA (d'après les données de Medtrix)

Pour valider son hypothèse, le projet met en place deux sites de récifs artificiels (Fig. 4) : un site avec récifs principaux situé à proximité de la station d'épuration urbaine et sous l'influence de ses rejets ; et un site avec récifs témoins situé en dehors de l'influence directe des rejets d'eaux usées traitées. Les fonctions écologiques suivies sont : les habitats (ou protection), la chaîne alimentaire et la nutrition, les nurseries et la reproduction. L'étude a débuté en 2013 après l'obtention des autorisations administratives nécessaires. Une autorisation d'occupation temporaire expérimentale (AOT) a été délivrée par la direction départementale des territoires et de la mer (DDTM) du Var pour les 5 années d'expérimentation *in situ* sur le site REMORA ainsi qu'un arrêté (APP221/2104) pour limiter ou interdire la zone du projet à certains usages, tels que la pêche ou le mouillage, pendant la période d'expérimentation.

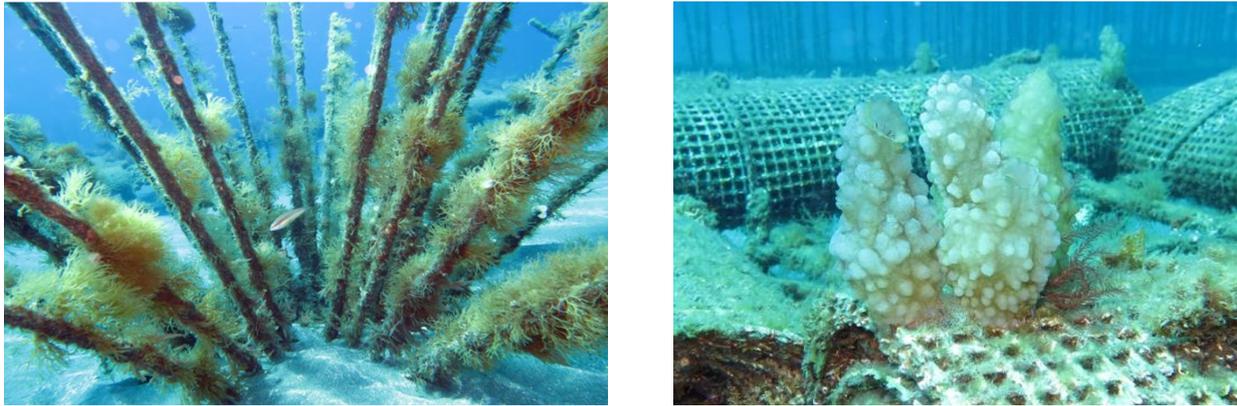


Figure 5 : Photos des récifs artificiels mis en place sur le projet REMORA (source : Medtrix)

Le protocole de suivi scientifique, étalé sur 5 ans, a porté sur : la résistance et la tenue des matériaux récifaux (en hiver), la biomasse fixée (faune et flore), la colonisation des récifs, les populations de poissons (au printemps et à l'automne), la qualité des fonds (sédiments et benthos), la colonisation des récifs et enfin les conditions environnementales (température, pluviométrie, événements exceptionnels). Pour réaliser les différents suivis, des campagnes ont été menées 4 fois par an par iXBlue pour l'étude des sédiments, de la macrofaune benthique et des espèces fixées ; et par l'Institut Océanographique Paul Ricard (IOPR) pour l'étude de l'ichtyologie et le suivi patrimonial. Aucun suivi n'a été réalisé en 2018 malgré le plan initial.

Dans les résultats, deux périodes ont été observées :

- La première, de 2015 à 2017, a montré une croissance forte et rapide, avec des tendances positives sur le redémarrage des fonctions écologiques. La connectivité entre les récifs artificiels a été assurée pour les communautés ichtyologiques. Une croissance positive et dynamique de la faune et de la flore a été observée jusqu'en 2017.
- La seconde, après 2017, a montré une régression brutale et durable de toutes les fonctions sur les deux récifs expérimentaux, dont la cause est difficile à identifier.

En termes de conditions environnementales, un panache d'eaux usées traitées déversant de l'eau douce affecte également le récif témoin dans une moindre mesure que le récif principal en raison du courant Ligure. En termes de conditions climatiques, 2018 a été une année particulièrement pluvieuse alors que 2017 a été qualifiée de sèche. Le facteur limitant qui entraîne les régressions observées après 2018 est difficile à déterminer. Les auteurs ont suggéré que l'origine pourrait être liée à un excès de matière organique particulaire (MOP) provenant du ruissellement des importantes eaux pluviales de 2018, avec des contournements de STEP normaux et conformes mais plus importants à partir de janvier de la même année. Une autre campagne de l'IOPR a observé que les fonds rocheux et les organismes fixés étaient également recouverts d'une couche de MOP et qu'un grand nombre d'oursins étaient morts ou sénescents. Les auteurs ont supposé une forme de fuite d'eau due à la conception et au fonctionnement (conforme) du système d'égouts pour passer les pics de ruissellement des eaux pluviales. Le récif témoin est également impacté par l'hydrodynamisme.

Une augmentation des dynamiques de colonisation, des abondances et des richesses spécifiques a été observée depuis le début de l'immersion jusqu'à la fin de l'année 2017. Cependant, l'apport de MOP favorise l'installation d'organismes filtreurs et détritivores, tels que les huîtres plates, les ascidies simples ou coloniales, sur les récifs expérimentaux les plus proches du rejet. Des différences de niveau de valeur des fonctions écologiques ont été observées entre le récif principal et le récif témoin, liées au contexte patrimonial différent et

à l'hydrodynamisme plus marqué pour le récif témoin. Néanmoins, les fonctions écologiques demeurent similaires.

Les auteurs du projet concluent que l'expérience a permis de tirer des enseignements sur l'utilisation des récifs artificiels pour restaurer l'écologie des zones côtières peu profondes. Ils estiment que le choix de la stratégie de récifs artificiels dans des modules combinés est pertinent pour reconstituer la chaîne alimentaire perdue en raison de la mauvaise qualité de l'eau. Cependant, le choix des modules doit tenir compte des conditions hydrodynamiques côtières, qui auront un impact sur le choix des emplacements, de la profondeur d'implantation et du type de module. Le processus de restauration des fonds écologiques reste fragile dans les environnements complexes et côtiers sous l'influence des perturbations climatiques. Ils ont également noté qu'il semble important de travailler dans une logique plus intégrée de la mer.

En conclusion, les récifs artificiels montrent un intérêt pour réhabiliter certaines fonctions écologiques (nutrition, nurserie et reproduction) en créant un habitat naturel, permettant l'installation et l'augmentation rapide de l'abondance et de la diversité des populations. La qualité de l'eau ne semble pas ici être un facteur limitant pour la restauration des fonctions dans des conditions normales. Cependant, comme le suggèrent les auteurs, la position des sites et les conditions climatiques extrêmes semblent être un frein à l'intérêt principal des récifs artificiels, les empêchant de remplir leur fonction première en raison de la qualité de l'eau en période exceptionnelle.

L'institut océanographique Paul Ricard a donc fait une demande de la remise en état initiale du site conformément à la réglementation, en raison de la dégradation du site après l'épisode pluvieux, qui ne permet pas d'apprécier et de fournir un réel bénéfice environnemental.

2. ANALYSE CRITIQUE

L'expérimentation REMORA a permis d'acquérir des connaissances précieuses sur l'utilisation des récifs artificiels pour restaurer l'écologie des petits fonds côtiers. Nonobstant, les résultats obtenus soulèvent plusieurs points critiques :

1. Régression Post-2017 et Excès de MOP : après une croissance rapide des communautés benthiques et ichtyologiques jusqu'en 2017, une régression significative a été observée à partir de 2018. Les causes de cette régression, potentiellement liées à des apports excessifs de MOP dus aux rejets pluviaux de la station d'épuration, restent difficiles à identifier avec certitude. La forte pluviosité de 2018 a probablement contribué à cette situation.

2. Différences entre les Récifs : les récifs principaux, proches du rejet de la station d'épuration, a montré des niveaux de fonctions écologiques plus élevés que les récifs témoins, mais ont également été plus impactés par la régression post-2017. Ces disparités sont attribuées au contexte patrimonial et à l'hydrodynamisme différencié entre les deux sites.

3. Fragilité du Processus de Restauration : le projet a souligné la fragilité du processus de restauration écologique face aux perturbations induites par les apports terrigènes, notamment lors de fortes précipitations. Une approche plus intégrée, prenant en compte le continuum terre-mer, est recommandée pour renforcer la résilience des écosystèmes côtiers.

4. Nécessité d'un Suivi Continu : l'absence de la campagne de suivi initialement prévue en 2018 limite la compréhension de la dynamique de régression observée. Des données complètes sur la durée et l'intensité des perturbations par les apports de MOP sont essentielles pour évaluer pleinement l'impact des facteurs environnementaux.

Malgré ces défis, le projet REMORA a contribué de manière significative à l'avancement des connaissances sur l'utilisation des récifs artificiels pour la restauration écologique des fonds côtiers. Pour améliorer l'efficacité de telles opérations, il est recommandé d'adopter une approche plus holistique, intégrant les interactions terre-mer, et de mettre en place un suivi rigoureux et continu pour mieux comprendre les facteurs de succès ou d'échec de ces initiatives de restauration. Cependant, l'expérimentation souligne tout de même que les STEP restent un facteur limitant à échelle de temps court comme leur incapacité à fonctionner normalement pendant les événements extrêmes.

D. LE PROJET REXCOR (COINTRE, 2018)

1. DESCRIPTION DU PROJET

Le projet REXCOR (Restauration EXpérimentale des petits fonds de la calanque de CORtiou) vise à restaurer les fonctions écologiques des petits fonds côtiers rocheux de la calanque de Cortiou, dans le Parc National des Calanques proche de Marseille (13), qui ont été historiquement dégradés par les rejets de la station d'épuration de Marseille et provenant du cours d'eau de l'Huveaune (*Fig. 5*). Pour ce faire, le projet consiste à immerger différents types de récifs artificiels à plusieurs distances du rejet, afin d'évaluer dans quelle mesure l'apport d'un substrat sain et de nouveaux habitats peut contribuer au retour à un état écologique satisfaisant. L'objectif principal du projet est de vérifier que l'apport de substrats durs et complexes permet d'accroître la fonctionnalité écologique de la zone.



Figure 6 : Emplacement sites A, B, C et D et de la zone de rejet (d'après les données de Medtrix)

Le projet repose sur 4 sites test réalisés (A, B, C et D) situés à différentes distances de la zone de rejet (respectivement 100, 1000, 1500 et 700 m) sur la complémentarité de 4 récifs principaux, avec des *designs* et des matériaux innovants (*Fig. 7&8*) :

- Le récif Fractal[®] (Architeuthis) qui multiplie les orientations pour offrir à chaque espèce fixée son contexte d'installation préférentiel.

- Le récif Ragues® qui reproduit un habitat caractéristique des petits fonds rocheux méditerranéens pour les espèces vagiles cryptiques.
- La nurserie Connectivité® en béton poreux bas carbone qui associe de nombreux micro-habitats pour abriter les stades juvéniles.
- Les Roselières® artificielles et des herbiers biomimétiques ont également été déployés pour reproduire la micro-complexité structurelle des habitats naturels.

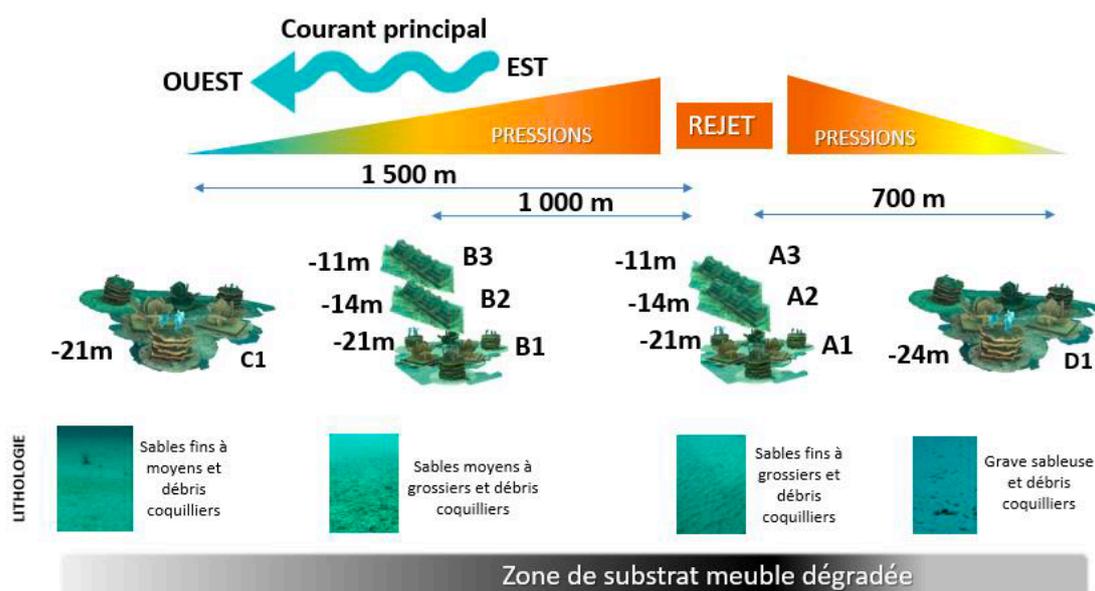


Figure 7 : Plan d'expérimentation du projet REXCOR (d'après Cointre, 2018)

Le suivi scientifique des Calanques nationales est effectué deux fois par an pendant l'été et l'automne, grâce à une synthèse des données initiales fournies par Andromède Océanologie. Il a été réalisé un comptage de poissons et de macrofaunes mobiles, une étude de comparaison de matériaux et de l'effet de l'orientation (3 orientations) sur la colonisation benthique et la réalisation de modèles photogrammétriques complets des villages récifaux. Ce comptage a été effectué lors de chaque campagne afin de statuer sur l'intégrité physique des ouvrages. Le laboratoire CHORUS va, quant à lui, réaliser des suivis nocturnes de biophonie acoustique pendant 11 campagnes d'écoute de 5 nuits pour chacune des 4 saisons. Des indicateurs tels que la diversité et l'intensité des sons sont étudiés et comparés avec ceux des zones sableuses avoisinantes et des données disponibles sur des secteurs de référence étudiés dans le cadre du réseau CALME (Caractérisation Acoustique du Littoral Méditerranéen et de ses Écosystèmes).

Les résultats initiaux démontrent que la macrofaune mobile peut coloniser efficacement les nouveaux habitats, y compris à proximité des zones de rejet, comme en témoigne l'observation de 62 espèces sur une période de 19 mois. Parmi ces espèces, 48 sont des poissons, notamment des prédateurs de haut niveau trophique tels que les mérours (*Epinephelus caninus* et *Epinephelus marginatus*), ce qui constitue une observation inédite en moins de 2 ans sur un site historiquement dégradé. Les espèces observées présentent une diversité considérable en termes de fonctions écologiques et de niveaux trophiques, allant des crustacés comme les langoustes (*Macrura Reptentia*) et les homards (*Homarus gammarus*) aux poissons prédateurs tels que les loups (*Dicentrarchus labrax*), les dentis (*Dentex dentex*), les barracudas (*Sphyrna viridensis*) et les mérours

(*Epinephelus sp.*). De plus, 80 % des espèces ont été repérées à l'intérieur des cavités des récifs artificiels ou sur leurs structures, ce qui suggère leur utilisation comme habitat. En outre, 60 % des espèces observées sont associées à une guildes de déplacement nectobenthique à forte sédentarité, indiquant qu'elles résident dans les nouveaux récifs plutôt que d'être simplement attirées par eux.

Concernant la fonction alimentaire des récifs, cinq espèces ont été observées en train de se nourrir directement sur les structures, telles que le sar à tête noire (*Diplodus vulgaris*), le sar commun (*Diplodus sargus*), le rouget de roche (*Mullus surmuletus*), la girelle (*Coris julis*) et le poulpe commun (*Octopus vulgaris*). En considérant les guildes trophiques et/ou de déplacement, les auteurs estiment que 80 % des espèces sont susceptibles de se nourrir dans les habitats récifaux, et que 18 espèces piscivores de haut niveau trophique telles que le loup (*Dicentrarchus labrax*), le mérou (*Epinephelus sp.*), le congre (*Conger conger*) et la murène (*Muraena helena*) sont présentes, ce qui témoigne de la productivité de la zone. De plus, un mérou gris (*Epinephelus caninus*) a présenté une résidence prolongée d'au moins 7 mois, soulignant la fonction à long terme des récifs en tant que zone de chasse pour cette espèce territoriale cryptique.

La fonction de nurserie a été réhabilitée, avec des stades juvéniles repérés sur chaque site, y compris près du rejet. En tout, 365 jeunes individus ou recrues de l'année ont été dénombrés, appartenant à 16 espèces de poissons et 23 espèces de macro-invertébrés. Des juvéniles de mérou brun (*E. marginatus*) de moins de 10 cm ont été repérés dans les nurseries de Connectivité. De plus, des juvéniles de gorgones jaunes (*Eunicella cavolinii*) ont été observés dans les récifs de Ragues ainsi que sur les récifs les plus profonds, jusqu'à -24 mètres.

Pour la fonctionnalité de reproduction, des pontes ont été constatées sur tous les sites, incluant celle près du rejet, pour 5 espèces telles que la seiche (*Sepia officinalis*), le poulpe (*Octopus vulgaris*), le calamar (*Logilo vulgaris*), le rocher fascié (*Hexaplex trunculus*) et le murex épineux (*Bolinus brandaris*). De plus, 40% des espèces observées à l'âge adulte sont connues pour pondre leurs œufs sur le substrat ou dans des cavités, comme le poulpe, la seiche, le homard, la langouste, l'apogon (*Apogon*), le castagnole (*Chromis chromis*) ou les labres (*Labridae*).

La colonisation benthique dans chaque village atteint un taux de recouvrement proche de 100% en seulement 15 mois. Cependant, il existe un gradient de colonisation en fonction de la distance par rapport au rejet, le village le plus éloigné (1,5 km) se colonisant plus rapidement que celui situé à seulement 100 m du rejet. L'orientation des substrats joue un rôle crucial, avec une colonisation moins importante sur les surfaces horizontales sujettes à l'ensablement. Les surfaces verticales sont préférables pour favoriser l'installation des espèces fixées de manière durable. Les différentes formulations de béton ont un impact significatif sur la structure des communautés benthiques. Les bétons poreux à faible teneur en carbone favorisent davantage l'établissement des algues rouges encroûtantes, qui sont des espèces pionnières du coralligène. En outre, la couverture vivante est plus développée sur les bétons poreux par rapport aux bétons marins standards, même près du rejet. Cette observation souligne l'importance du choix des matériaux dans la promotion de la biodiversité benthique et la santé des écosystèmes marins.

L'approche bioacoustique a permis d'analyser 688 heures d'écoute, soit en moyenne 35 heures par village et par session. Cette méthode permet de distinguer les sons associés aux poissons de ceux produits par les invertébrés benthiques. Des sons sont émis au sein de chaque village de récifs, y compris celui au droit du rejet. L'intensité sonore augmente au cours du temps, ce qui montre une maturation progressive de l'ensemble des villages malgré la présence du rejet. Il n'y a donc pas eu de mortalité brutale des invertébrés en deux ans de suivi. Il existe cependant un gradient de pression associé à la distance au rejet. Au niveau du site le plus impacté, la part du son provenant uniquement des récifs est maximale, indiquant peu de vie autour des récifs.

Les résultats initiaux du projet REXCOR sont très encourageants. La macrofaune mobile a colonisé efficacement les nouveaux habitats, y compris à proximité des zones de rejet, dont l'observation de nombreux prédateurs de haut niveau trophique. Les récifs artificiels remplissent diverses fonctions écologiques clés, servant d'abri, de zone d'alimentation, de nurserie et de site de reproduction pour une grande diversité d'espèces. La colonisation benthique est également très rapide, bien que le gradient de distance au rejet influence la vitesse de colonisation. Le choix des matériaux s'avère déterminant pour favoriser l'installation des espèces pionnières du coralligène et maximiser la couverture vivante, y compris à proximité du rejet.

Ces résultats préliminaires démontrent le potentiel des récifs artificiels pour restaurer les fonctions écologiques des petits fonds côtiers dégradés, ouvrant la voie à des applications plus larges de ce type d'approche de génie écologique en milieu marin.

2. ANALYSE CRITIQUE

Le projet REXCOR semble avoir atteint des résultats très positifs en termes de restauration écologique des petits fonds côtiers de la calanque de Cortiou, malgré les défis historiques de dégradation de ce site. On peut y déceler plusieurs points forts et points faibles qui pourraient améliorer notre compréhension et nos connaissances dans l'utilisation des récifs artificiels en zone de rejet, ainsi que leur capacité de réhabilitation ou de recréation des fonctions écologiques sur les zones dégradées.

L'objectif du projet était clair et pertinent dans la restauration écologique des petits fonds côtiers dégradés par les rejets dans ce parc national. Cela a permis de mettre en avant leur approche innovante utilisant différents types de récifs artificiels conçus spécifiquement pour remplir diverses fonctions écologiques. Une approche expérimentale et pluridisciplinaire a été employée pour évaluer diverses technologies de récifs artificiels (telles que les nurseries, les ragues, les roselières, etc.) ainsi que des matériaux innovants (comme les bétons poreux, en 3D, etc.), dans le but de restaurer les fonctions écologiques du site. Le suivi scientifique rigoureux mené sur 19 mois a permis d'évaluer les résultats en termes de colonisation, de diversité spécifique et de fonctionnalités écologiques. Les résultats préliminaires montrent que la macrofaune mobile et la colonisation benthique se développent de manière satisfaisante, y compris au droit du rejet, indiquant que la qualité de l'eau n'est plus un facteur limitant. L'analyse de l'influence des matériaux et de l'orientation des substrats sur la colonisation benthique apporte aussi des enseignements concrets pour optimiser la conception des récifs. La conclusion du projet souligne le potentiel de cette approche pour la restauration écologique en milieu marin sur les zones dégradées.

Quelques points de vigilance peuvent être soulevés : bien que le projet soit en phase de validation, des études pluriannuelles seront nécessaires pour évaluer la durabilité à long terme des solutions mises en place. Certaines différences significatives ont été observées en fonction de l'orientation et des matériaux utilisés, soulignant l'importance de poursuivre les comparaisons pour optimiser les conceptions. Le gradient de pression lié à la distance du rejet reste un facteur à prendre en compte, nécessitant peut-être des ajustements dans la répartition spatiale des récifs.

Dans l'ensemble, le projet REXCOR semble être une initiative ambitieuse et prometteuse pour la restauration écologique des petits fonds côtiers dégradés, en s'appuyant sur une approche scientifique rigoureuse et innovante. Les résultats préliminaires sont encourageants et mériteraient d'être suivis sur le long terme.

III. PROMOUVOIR LA RESTAURATION DES HABITATS EN REPONSE AUX REJETS URBAINS : UNE PERSPECTIVE

La restauration des zones de rejet en mer est une avancée majeure pour protéger l'environnement marin. Les progrès en restauration écologique permettent une réhabilitation plus efficace des écosystèmes endommagés, notamment par la création d'habitats artificiels. Parallèlement, l'obligation de réparer les habitats impactés par les rejets urbains est devenue cruciale, nécessitant des mesures contraignantes pour préserver la biodiversité et la qualité de vie. Cette question soulève des enjeux environnementaux, sociaux et économiques qui exigent une réflexion approfondie sur les responsabilités des acteurs et les actions à entreprendre pour assurer la durabilité des habitats urbains.

A. CADRE RÉGLEMENTAIRE

Le cadre réglementaire actuel en France impose aux communes certaines obligations en matière de gestion des eaux usées, mais ne les oblige pas directement à réparer les habitats marins dégradés par ces rejets.

La Directive Eaux Résiduaires Urbaines (DERU) et la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) au niveau européen encadrent les obligations des États membres en matière de collecte, de traitement et de rejet des eaux usées. Ces directives visent à protéger l'environnement contre la détérioration due aux rejets d'eaux usées. En droit français, ces obligations ont été transcrites par la Loi sur l'eau de 1992 et des arrêtés techniques sur l'assainissement collectif comme l'Arrêté du 31 juillet 2020.

Il est essentiel de souligner que la responsabilité de la réparation des habitats marins dégradés par les rejets urbains peut varier en fonction des structures de gestion locale, telles que les parcs nationaux ou les communautés urbaines. Dans le cas des parcs nationaux, ces espaces protégés ont pour mission de préserver la biodiversité et les écosystèmes marins qui s'y trouvent. Les parcs nationaux, tels que le Parc National des Calanques en France, ont des compétences spécifiques en matière de gestion et de préservation des habitats marins. Ils peuvent mettre en place des programmes de restauration des écosystèmes dégradés par les rejets urbains, en collaboration avec d'autres acteurs locaux et nationaux (Boissery, 2014). Les communautés urbaines peuvent également jouer un rôle important dans la restauration des habitats marins. En tant qu'entités locales responsables de la gestion de l'environnement et du développement durable, les communautés urbaines peuvent intégrer la préservation des écosystèmes marins dans leurs politiques environnementales. Elles peuvent mettre en place des actions de sensibilisation, de surveillance et de restauration des habitats marins dégradés, en collaboration avec les acteurs locaux et les autorités compétentes (Boissery, 2014).

Le cadre réglementaire européen pour la restauration écologique des zones de rejets comprend principalement la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000 et la directive-cadre "Stratégie pour le Milieu Marin". La DCE vise à atteindre un bon état écologique des eaux de surface et souterraines en Europe. Elle établit un cadre pour la protection et la restauration des écosystèmes aquatiques, y compris les zones de rejets, en mettant l'accent sur la préservation de la qualité de l'eau et la restauration des habitats naturels. En France, la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006 transpose les directives européennes relatives à l'eau. Elle fixe des objectifs de reconquête de la qualité de l'eau et de restauration des milieux aquatiques, en favorisant la continuité écologique des cours d'eau et en limitant les pollutions. La directive-cadre "Stratégie pour le Milieu Marin" vise à garantir un bon état écologique des eaux marines et à prévenir leur détérioration. Elle encourage la restauration des écosystèmes marins et côtiers, y compris dans les zones de rejets, pour assurer la durabilité des écosystèmes marins.

Les stratégies de gestion durable et intégrée des domaines publics maritimes, comme la Stratégie nationale Mer et Littoral 2030, sont essentielles pour promouvoir la préservation et restauration des écosystèmes marins et littoraux et la gestion durable des ressources maritimes (Ruyssen, 2019; Direction départementale des territoires et de la mer, 2021; Secrétariat d'État chargé de la Mer-Stratégie nationale mer et littoral 2030, 2023).

Il faut prendre également en compte le code de l'environnement, qui pose le principe général de la protection de l'environnement en rappelant que les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, les espèces végétales et animales, la diversité et les équilibres biologiques font partie du patrimoine commun de la nation. Les principes fondamentaux qui s'appliquent à l'évaluation environnementale sont : le principe de précaution, d'action préventive et corrective, pollueur-payeur, et de participation. Ces principes visent à prévenir les risques environnementaux, utiliser les meilleures techniques disponibles, responsabiliser les pollueurs, et garantir la participation citoyenne dans les décisions environnementales.



Figure 8 : Projet REXCOR, utilisation des récifs artificiels pour restaurer les zones de rejet du parc national des Calanques (Source : Parc national des Calanques)

En somme, les parcs nationaux et les communautés urbaines peuvent être des acteurs clés. Leur implication et leur collaboration avec d'autres parties prenantes peuvent contribuer à la préservation et à la restauration des écosystèmes marins affectés par les activités humaines. Ainsi, bien que les communes aient l'obligation d'améliorer la qualité de l'eau, la réparation des habitats marins dégradés par les rejets urbains n'est pas une obligation légale qui leur incombe directement. Cette responsabilité peut impliquer d'autres structures de gestion locale, en fonction du cadre réglementaire et institutionnel en vigueur (UE water directive 1991). Les stratégies de gestion durable et les principes environnementaux sont essentiels pour protéger l'environnement et promouvoir le développement durable.

B. ENTRE OBLIGATION ET VOLONTARIAT : ENJEUX DE LA RESTAURATION DES HABITATS MARINS DÉGRADÉS PAR LES REJETS URBAINS

La question de l'obligation *versus* le volontariat pour réparer les habitats marins dégradés par les rejets urbains est cruciale pour la préservation de la biodiversité marine. Mettre en place une obligation légale de réparation pourrait garantir la préservation des écosystèmes marins affectés par les effluents urbains. En

parallèle, le volontariat joue un rôle essentiel en encourageant l'implication de la société civile, des entreprises et des ONG dans la restauration des habitats marins. Le débat entre ces deux approches soulève des questions sur l'efficacité, la durabilité et l'équité des mesures de restauration marine. Alors que l'obligation assure une action formelle, le volontariat favorise l'engagement communautaire et des approches plus souples. Trouver le meilleur cadre, qu'il soit obligatoire, volontaire ou mixte, nécessite une analyse approfondie des avantages et inconvénients de chaque approche pour restaurer la biodiversité marine dégradée par les rejets urbains.

La restauration écologique des zones de rejets nécessite avant tout une forte volonté politique et sociétale. En effet, ces projets ambitieux impliquent souvent des changements de pratiques et d'aménagements coûteux pour les entreprises et les collectivités. Ils requièrent donc un engagement ferme des décideurs et des parties prenantes pour être menés à bien. Au-delà des aspects financiers, la volonté est cruciale pour surmonter les défis techniques et scientifiques de la restauration écologique. Celle-ci fait appel à des connaissances pointues en écologie, hydrologie, génie civil etc. Les porteurs de projet doivent donc être convaincus de l'intérêt de ces démarches pour mobiliser les expertises nécessaires et relever ces défis. Enfin, la volonté politique et citoyenne est indispensable pour assurer l'acceptabilité sociale des projets de restauration. Ceux-ci peuvent bousculer les usages établis et susciter des craintes ou des oppositions qu'il faut savoir anticiper et gérer. Un portage volontariste et une concertation étroite avec les riverains sont alors essentiels.

En plus de l'aspect volontaire et/ou obligatoire, la restauration écologique des zones de rejets ne peut se faire sans une volonté forte et durable de la part des décideurs et de la société. C'est à ce prix que ces projets ambitieux pourront voir le jour et atteindre leurs objectifs de reconquête de la biodiversité et de la qualité des milieux.

C. FAISABILITÉ FINANCIÈRE DE LA RESTAURATION : ANALYSE DES COÛTS, DES RESSOURCES REQUISES ET DES SOURCES DE FINANCEMENTS

Le coût de la restauration écologique en milieu marin peut être significatif en fonction du projet mené. Les coûts peuvent inclure 3 parties :

1. La collecte et l'élimination des déchets marins dans le but de non-dégradation et d'élimination des pressions. Dans notre cas, cela comprend la réglementation sur la qualité des eaux sortantes dans les milieux récepteurs.
2. La réhabilitation des écosystèmes avec par exemple la conception, la construction et la mise en place des récifs artificiels.
3. La surveillance continue et détaillée des zones restaurées qui peut contribuer à d'importants coûts.

Les coûts nécessaires varient en fonction de l'ampleur du projet, de sa localisation géographique et des méthodes de restauration employées.

Bien évidemment, la restauration écologique en milieu marin nécessite diverses ressources essentielles pour sa conception et sa mise en œuvre, ainsi que pour son suivi et son évaluation (Ruyssen, 2019; WWF France, 2023). Ces ressources comprennent notamment :

- L'expertise scientifique : les scientifiques spécialisés jouent un rôle crucial dans la planification, la mise en œuvre et l'évaluation des projets de restauration. Leur expertise permet de concevoir des projets adaptés aux écosystèmes dégradés, d'évaluer l'impact des activités humaines sur ces

écosystèmes et de proposer des solutions durables pour leur restauration. Ils collaborent souvent avec des spécialistes d'autres domaines pour garantir une approche holistique.

- Les matériels et équipements spécialisés : un ensemble d'équipements spécialisés est nécessaire pour mettre en place et suivre les projets de restauration pouvant inclure des bateaux, des outils de surveillance, des matériaux pour la construction de récifs artificiels, etc.
- La main-d'œuvre qualifiée : la restauration écologique requiert une main-d'œuvre composée de biologistes marins, plongeurs, techniciens spécialisés et gestionnaires locaux. Chacun de ces professionnels apporte une expertise spécifique nécessaire pour mener à bien les différentes phases des projets de restauration.
- Les sources de financement : les initiatives de restauration écologique nécessitent des sources de financement adéquates pour couvrir les coûts liés à la conception, à la mise en œuvre et au suivi des projets.

Toutes ces ressources nécessitent des fonds plus ou moins importants en fonction des projets. Il est donc essentiel d'assurer des sources de financement stables et durables pour assurer leur continuité. Parmi les options disponibles pour soutenir ces projets, les financements innovants sont mentionnés, bien qu'ils soient encore peu développés (WWF France, 2023). En France, certaines alternatives sont évoquées, telles que le mécénat, les paiements pour services environnementaux (PSE), et les sites naturels de renaturation et de restauration (SNRR). Aucune de ces options n'a encore été testée en Méditerranée. De plus, il existe des fonds dédiés, comme ceux gérés par l'Agence de l'Eau, tels que ceux en Bretagne Sud, alimentés par les opérations de la filière éolienne offshore. Ces fonds dédiés, qui impliquent la participation du secteur privé, offrent une opportunité de financement durable des projets. Dans le secteur privé, les Schémas Territoriaux de Restauration Écologique (STERE) (Ruyssen, 2019; WWF France, 2023) peuvent être introduits, offrant un outil de planification permettant la participation du secteur privé au financement des opérations de restauration. Il est crucial de mettre en avant l'optimisation des coûts et l'utilisation efficace des ressources pour réduire le coût global des projets, notamment par la mutualisation des opérations (WWF France, 2023).

Par exemple : un projet de restauration impliquant l'utilisation de récifs artificiels en sorties de zones de rejets. L'estimation budgétaire pourrait inclure plusieurs composantes (*Tbl.3*). Sur cette base, le budget total estimé se situerait donc entre 260 000 € et 680 000 €.

RESSOURCES	DISPENSES PAR	ESTIMATION DES COÛTS
Évaluation des zones à restaurer	Scientifique / bureaux d'études	20 000 - 50 000 €
Main-d'œuvre, équipements, matériaux	Ingénieurs écologiques	50 000 - 150 000 €
Dépollution, remise en état des sols, réhabilitation des écosystèmes	Bureaux d'études / ingénieurs écologiques	100 000 - 300 000 €
Surveillance à long terme, maintenance et entretien	Bureaux d'études	20 000 - 50 000 € / an
Ressource humaine pour le suivi	Bureaux d'études	30 000 - 80 000 € / an
Gestion de projet, coordination des parties prenantes, communication	Chef de projet, maître d'ouvrage	20 000 - 50 000 €
Imprévus		20 000 - 75 000 €

Tableau 1 : Estimation des ressources nécessaires et de l'estimation des coûts d'un projet de restauration par les récifs artificiels en droit des rejets en mer (Herrouin and Huau, 2015; Cointre, 2018)

Il est important de souligner que ces estimations sont approximatives et dépendent de divers facteurs tels que l'étendue réelle des zones à restaurer, la complexité des travaux et le niveau de suivi requis. Une planification détaillée et une analyse approfondie des besoins seraient essentielles pour affiner le budget final du projet.

La restauration écologique en milieu marin nécessite des investissements conséquents. Bien que son coût puisse être significatif, elle est souvent plus économique à long terme que les solutions mises en place pour lutter contre les pressions à l'origine de la dégradation (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2022). Les coûts et les ressources nécessaires varient selon l'ampleur du projet, sa localisation géographique et les méthodes employées. Par exemple, le coût de l'opération de restauration des récifs de Marseille a été estimé à moins de 1% du montant des dépenses engagées pour réduire les pollutions.

D. AUTORISATIONS NÉCESSAIRES : UNE SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS LES PLUS ESSENTIELS

Bien que visant à restaurer, les projets de restauration écologique utilisant des récifs artificiels dans des zones de droits des rejets nécessitent des autorisations. Elles sont essentielles pour garantir la conformité aux réglementations environnementales et assurer la protection des écosystèmes marins.

L'évaluation environnementale, encadrée par le code de l'environnement, guide les décisions dès les débuts d'un projet en tenant compte des préoccupations environnementales. Elle informe les parties prenantes sur les impacts potentiels du projet et justifie les choix en fonction des enjeux identifiés, et garantit la participation du public. Cette évaluation, couvrant l'intégralité du projet, est réalisée dès que possible. Certains projets sont automatiquement soumis à cette évaluation, tandis que d'autres, comme les récifs artificiels, sont examinés au cas par cas. La liste des projets concernés est définie à l'article R. 122-2 du code de l'environnement. L'autorité environnementale compétente mène cette analyse en se basant sur des critères relatifs aux caractéristiques et à l'emplacement du projet, ainsi qu'aux impacts potentiels.

Les autorisations délivrées par l'État pour les travaux de restauration écologique sont sujettes à diverses réglementations en vigueur. Différents types d'autorisations sont requis selon la nature et l'ampleur des projets. La déclaration au titre de la loi sur l'eau a traditionnellement été utilisée pour certains travaux de restauration riveraine. Toutefois, des ajustements ont été apportés pour certains projets présentant des impacts significatifs sur la sécurité publique, nécessitant ainsi une autorisation environnementale spécifique. Les projets impliquant la mise en place de récifs artificiels dans des zones de droit des rejets peuvent exiger une autorisation environnementale distincte. En outre, pour les projets axés sur la restauration de la biodiversité, une autorisation de l'État peut être requise pour garantir la légalité et la conformité du projet.

Un plan de gestion des déchets doit être mis en place pour gérer les déchets générés par le projet, notamment les matériaux utilisés pour la construction des récifs artificiels. C'est un outil essentiel pour promouvoir une gestion durable des déchets en favorisant la prévention, le recyclage, la valorisation, et en s'inscrivant dans une transition vers une économie circulaire. En résumé, le plan vise à réduire l'impact environnemental des déchets en favorisant leur transformation en ressources et en prolongeant leur durée de vie.

E. COOPÉRATION DES PARTIES PRENANTES : LA CLÉ DU SUCCÈS

La coopération des parties prenantes et convaincre des acteurs locaux sont essentielles pour le succès d'un projet de restauration écologique impliquant l'utilisation des récifs artificiels dans les zones de droit des rejets. Cependant, pour que ces récifs soient efficaces, il est essentiel de convaincre les acteurs locaux de l'importance de ce type de projet et de les impliquer dans le processus de planification et d'exécution.

Les parties prenantes incluent les gouvernements locaux, les organisations non gouvernementales, les entreprises, les scientifiques, et les communautés locales. Chacune de ces parties prenantes apporte une perspective unique et des compétences spécifiques qui sont essentielles pour le succès du projet. Les gouvernements locaux peuvent fournir des ressources financières et des autorisations nécessaires pour le projet. Les organisations non gouvernementales peuvent apporter leur expertise en matière de conservation et de gestion des écosystèmes. Les entreprises peuvent fournir des ressources techniques et des compétences spécifiques. Les scientifiques peuvent fournir des connaissances sur les écosystèmes et les effets des récifs artificiels sur la biodiversité. Enfin, les communautés locales peuvent fournir une compréhension profonde des besoins et des préoccupations locales, ainsi qu'une participation active dans le processus de planification et d'exécution. La coopération entre les parties prenantes constitue un élément fondamental pour consolider les fondations du projet et ainsi atteindre efficacement les objectifs et les stratégies de restauration écologique. En travaillant ensemble, les différents acteurs impliqués peuvent combiner leurs connaissances, leurs ressources et leurs expertises pour élaborer des solutions complètes et adaptées aux défis spécifiques de la restauration des écosystèmes marins.

Pour convaincre les acteurs locaux de l'importance de ce type de projet, il est essentiel de montrer les avantages environnementaux et économiques. Les récifs artificiels peuvent non seulement restaurer la biodiversité dans les zones de droit des rejets, mais également contribuer à la protection des côtes contre les érosions et les dégâts causés par les vagues. Ils peuvent également offrir des opportunités pour le tourisme et l'activité économique, en créant des sites de plongée et de snorkeling attractifs.

F. TRANSITION VERS UNE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE À GRANDE ÉCHELLE : MAXIMISER L'IMPACT DES PROJETS DE RÉCIFS ARTIFICIELS

La transition d'un projet expérimental de restauration écologique par les récifs artificiels aux zones de rejets en mer, comme REMORA et REXCOR, à une opération de restauration grandeur nature est un pas crucial pour maximiser l'impact environnemental et économique de ces initiatives. Les projets expérimentaux, bien que nécessaires pour valider les concepts et les technologies, ont des limites en termes de taille et de durée d'implantation. Cependant, pour atteindre les objectifs de restauration écologique à grande échelle, il est essentiel de passer à des opérations de restauration plus vastes et plus durables.

Les projets expérimentaux, tels que REMORA et REXCOR, ont permis de valider les principes de base de la restauration écologique par les récifs artificiels. Ils ont montré que ces structures peuvent accueillir une biodiversité plus élevée et contribuer à la protection des côtes contre les érosions et les dégâts causés par les vagues. Cependant, pour que ces résultats soient généralisés et durables, il est nécessaire de passer à des opérations de restauration plus vastes et plus durables. Les opérations de restauration grandeur nature impliquent la mise en place de récifs artificiels plus larges et plus complexes, qui peuvent couvrir des surfaces plus importantes et offrir des habitats plus variés pour les espèces marines. Ces opérations nécessitent une planification soignée, une coordination efficace entre les parties prenantes, et des ressources financières et techniques importantes.

La transition à des opérations de restauration grandeur nature offre également des opportunités pour intégrer d'autres éléments de restauration écologique, tels que la réhabilitation des habitats naturels, la gestion des espèces invasives, et la promotion du tourisme durable. Cela peut non seulement améliorer l'impact environnemental des projets, mais également générer des revenus et des emplois locaux.

Pour réussir cette transition, il est essentiel de mettre en place des mécanismes de suivi et d'évaluation efficaces pour mesurer l'impact des opérations de restauration. Cela permettra de détecter les problèmes potentiels, d'adapter les stratégies de restauration, et de maximiser l'efficacité des investissements.

Passer d'un projet expérimental de restauration écologique par les récifs artificiels aux zones de rejets en mer à une opération de restauration grandeur nature est essentiel pour optimiser l'impact environnemental et économique de ces initiatives. Les opérations à grande échelle permettent d'intégrer divers aspects de la restauration écologique, de créer des retombées économiques locales, et d'assurer une utilisation efficace des investissements. Il est essentiel de mettre en œuvre des stratégies clairement définies avec des objectifs précis.

G. OBJECTIFS ET STRATÉGIES DE RESTAURATION

L'importance des stratégies et des objectifs de restauration est cruciale pour tout projet de restauration écologique. Ces stratégies bien définies et ces objectifs clairs sont essentiels pour orienter efficacement les actions de restauration, maximiser l'efficacité des opérations, et garantir des résultats durables. En effet, la planification minutieuse et la définition précise des objectifs permettent d'assurer une approche cohérente, de prioriser les actions en fonction des besoins spécifiques du milieu, et de mesurer de manière rigoureuse l'impact des interventions de restauration.

1. OBJECTIFS

Les objectifs principaux de restauration en zone de rejets en mer sont de stopper la dégradation de l'environnement marin et de promouvoir un avenir durable où l'homme coexiste harmonieusement avec la nature (Gann *et al.*, 2019; Ruysen, 2019; WWF France, 2023). Une fois les pressions identifiées et réduites, l'objectif est de rétablir l'écosystème marin et les fonctions écologiques essentielles endommagées par les activités humaines, telles que la pollution de l'eau, les changements dans la qualité du sédiment et la destruction des habitats naturels. Cela implique de restaurer l'équilibre des écosystèmes marins perturbés, en favorisant la biodiversité et en rétablissant les processus écologiques clés pour la santé à long terme de ces milieux (Gann *et al.*, 2019; Ruysen, 2019; WWF France, 2023). Enfin, pour limiter d'autres impacts, il est essentiel de préserver la biodiversité marine et de restaurer les populations d'espèces spécifiques en limitant les activités dans les zones de restauration (Gann *et al.*, 2019; Ruysen, 2019; WWF France, 2023). En atteignant ces objectifs, on peut réhabiliter les fonctions écosystémiques dégradées par l'activité humaine, permettant ainsi une gestion durable de ces zones.

Tout d'abord, il est important de réhabiliter les zones dégradées par la restauration physique et chimique des milieux perturbés pour favoriser la recolonisation naturelle. Il ne sera pas possible que la biodiversité se fixe sur les sites dégradés sans l'établissement de paramètres physico-chimiques acceptables (*barrières abiotiques, fig.9*). Au droit des rejets, le rétablissement passe par des rejets de meilleures qualités régulés par la réglementation, comme nous l'avons vu précédemment. Après rétablissement de la barrière abiotique et pour franchir la barrière biotique (*fig.9*), il est nécessaire de passer par des méthodes de

restauration, ici la création d'habitats artificiels. Comme nous l'avons vu avec les projets expérimentaux REMORA et REXCOR (Herrouin and Huau, 2015; Cointre, 2018), nous pouvons utiliser la création d'habitats artificiels avec la construction de récifs ou d'autres structures pouvant recréer des niches écologiques. Il est crucial de mettre en place une meilleure gestion de ces zones pour éviter de retomber dans les pressions passées ou de développer de nouvelles pressions, telles que la surpêche ou les activités extractives invasives, qui pourraient être liées aux nouvelles conditions biotiques.

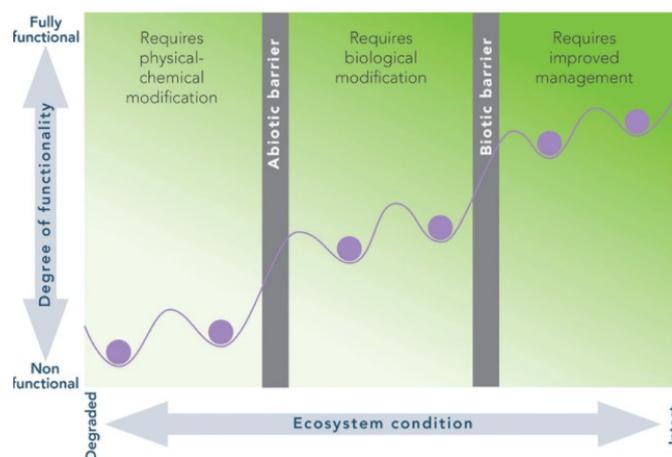


Figure 9 : Succès de Restauration selon les barrières abiotique et biotique (d'après Hobbs and Harris, 2001)

2. DIFFERENTES STRATEGIES

La restauration écologique offre des solutions cruciales pour réhabiliter les écosystèmes dégradés et préserver la biodiversité. Parmi les stratégies disponibles, on peut aborder le choix de se focaliser sur certaines zones de rejets très dégradées ou réaliser une intervention généralisée sur l'ensemble de ces zones ou encore faire le choix entre la restauration passive ou active. Comprendre les nuances et les applications de ces méthodes est essentiel pour promouvoir une gestion efficace des écosystèmes en détresse.

La stratégie de restauration au droit de rejets peut se concentrer sur les zones les plus significatives ou opter pour des interventions généralisées. Les approches ciblées sur les zones les plus critiques peuvent être plus efficaces pour maximiser l'impact de la restauration, tandis que les interventions généralisées peuvent être nécessaires pour traiter des problèmes plus répandus. Le choix entre ces deux approches dépend des objectifs de restauration, des ressources disponibles et des priorités environnementales spécifiques à chaque zone de rejet (Véron *et al.*, 2008; Ruysen, 2019). Une étude approfondie des caractéristiques du site à restaurer (hydrodynamique, sédimentologie, biologie, écologie) est cruciale pour optimiser la restauration. Une entente entre les différents acteurs et des contextes locaux dans la restauration est indispensable pour un bon fonctionnement et la réalisation des objectifs. La Direction interrégionale de la mer Méditerranée (DIRM) a élaboré un document stratégique pour la restauration écologique en Méditerranée, qui met en avant l'importance de la valorisation des zones artificielles existantes. Cette stratégie vise à restaurer les habitats naturels dégradés et à promouvoir la résilience des milieux naturels soumis à des rejets. Elle recommande une approche intégrée, qui combine des actions de non-dégradation et de restauration, pour maximiser l'efficacité des interventions (Ruysen, 2019).

Une approche ciblée sur les zones de rejets les plus problématiques peut sembler plus praticable sur le plan organisationnel en raison du nombre élevé de communes impliquées. Cependant, cette approche risque de négliger d'autres zones nécessitant également une restauration (Ruysen, 2019). La taille de la zone restaurée

et celle impactée par les rejets peuvent limiter les efforts de restauration, réduisant ainsi la connectivité avec les milieux naturels et compromettant les chances de réhabilitation des milieux ou des fonctions écologiques.

L'intervention généralisée de la restauration aux zones de rejet implique une organisation et une intervention de plusieurs communes et les cadres institutionnels en vigueur. Cependant, des interventions généralisées sur un plus large éventail de zones de rejet peuvent être bénéfiques pour restaurer de manière plus globale l'écosystème, notamment lorsque les dommages sont répandus (Hobbs and Cramer, 2008; Ruysen, 2019). Cette approche peut s'avérer pertinente pour atteindre des objectifs de restauration à grande échelle (Hobbs and Cramer, 2008; Ruysen, 2019), mais elle présente une organisation et des ententes qui peuvent être complexes. La stratégie de restauration dans les zones de rejets en mer varie selon les contextes locaux et les objectifs spécifiques. Les approches ciblées sur les zones les plus critiques peuvent être plus efficaces pour maximiser l'impact de la restauration, tandis que des interventions plus généralisées peuvent être nécessaires pour traiter des problèmes répandus.

La stratégie adoptée entre la restauration passive ou active en zone de rejet dépend de divers facteurs tels que l'état du milieu, les objectifs de restauration et les ressources disponibles. La restauration passive consiste à laisser la nature se régénérer naturellement en réduisant les pressions qui ont causé la dégradation, tandis que la restauration active implique des interventions humaines directes pour accélérer le processus de restauration (Hobbs and Cramer, 2008).

La restauration passive peut être efficace dans certains cas, surtout lorsque les écosystèmes peuvent se rétablir naturellement après la réduction des pressions. Cependant, des événements extrêmes tels que de fortes crues ou des pluies intenses peuvent entraîner un retour des pressions, comme observé dans le projet REMORA (Herrouin and Huau, 2015). Dans de tels cas, la restauration passive seule peut ne pas suffire à relancer l'écosystème, nécessitant plutôt une réhabilitation des milieux pour restaurer la stabilité du système. Cette approche vise à renforcer la résistance et la résilience de l'écosystème face aux perturbations. Les rejets peuvent altérer voire détruire des fonctions écologiques cruciales et entraver le rétablissement de la biodiversité dans ces zones, rendant la restauration passive insuffisante.

La restauration active peut surmonter les obstacles spécifiques à la récupération et atteindre les objectifs de restauration, notamment dans les zones fortement dégradées comme les zones de rejet. Elle permet de réhabiliter voire de recréer des fonctions écologiques dégradées ou détruites, comme les habitats et les zones de repos, et d'accélérer le processus de restauration. L'utilisation de récifs artificiels, comme illustré par le projet REXCOR (Cointre, 2018) et le projet REMORA (Herrouin and Huau, 2015), peut répondre à ces objectifs. Le choix des techniques de restauration doit être adapté aux objectifs et au contexte local, avec une évaluation rigoureuse de leur efficacité et un suivi attentif des interventions. Le rétablissement rapide et/ou complet du système ne peut pas aboutir sans la cessation des pressions comme constaté avec le projet REMORA qui n'avait pas consolidé sa stabilité avant d'être soumis aux premières pressions, et qui a ensuite subi une régression des avancées réalisées (Herrouin and Huau, 2015).

Le choix entre la restauration passive et active en zone de rejet dépend de l'état initial de l'écosystème, des objectifs de restauration et des ressources disponibles. Lorsque l'écosystème n'est plus résilient, la restauration active est souvent plus efficace. Cela peut nécessiter des techniques telles que la création de récifs artificiels, avec une allocation stratégique des ressources et une évaluation rigoureuse de l'efficacité des interventions. Pour un rétablissement complet, il est essentiel de mettre fin aux pressions continues. Ainsi, une approche intégrée, combinant restauration active et passive, adaptée au contexte local, peut être nécessaire pour promouvoir la résilience des écosystèmes dans les zones de rejet.

CONCLUSION

Les rejets urbains, provenant de diverses sources, sont caractérisés par un mélange de nutriments, de matières organiques et d'autres polluants. Leurs impacts potentiels sont nombreux sur les petits fonds côtiers, entraînant des altérations dans la qualité bio-physico-chimique du milieu, ainsi qu'une dégradation des habitats dans ces zones de rejets. Cette dégradation des fonctions dans ces zones a un impact négatif sur l'ensemble de la chaîne trophique, réduisant ainsi la biodiversité. La destruction de la chaîne trophique initiale entraîne des répercussions à l'échelle de tout l'écosystème.

Les habitats côtiers, souvent incapables de retrouver leur état initial ou de le maintenir après dégradation, suscitent l'idée d'une restauration dans les zones de rejets urbains. Cette initiative vise à stimuler une nouvelle dynamique de repeuplement des habitats en introduisant de nouvelles structures pour restaurer les fonctions d'habitats perdues, en parallèle à une amélioration de la qualité des eaux résultant d'une meilleure gestion des rejets urbains. Dans ce contexte, des projets expérimentaux comme REMORA et REXCOR ont joué un rôle crucial dans la restauration des habitats marins, mettant en avant l'efficacité des récifs artificiels pour restaurer la biodiversité marine affectée par les rejets d'eaux usées en sortie de STEP. Ces initiatives soulignent l'importance d'atteindre un équilibre des différents systèmes pour garantir la résilience et la résistance des écosystèmes restaurés face à d'autres pressions. Elles mettent en lumière la nécessité d'une approche holistique, intégrant les interactions terre-mer, et d'un suivi continu pour évaluer l'efficacité à long terme de telles initiatives.

Les projets expérimentaux ont été cruciaux pour déterminer les étapes nécessaires à la restauration des zones après la gestion de la qualité des rejets. Passer de l'expérimentation à une opération à grande échelle est maintenant essentiel. Cela implique un engagement des parties prenantes, notamment des autorités locales, une vision à long terme, et une résolution face aux défis techniques et réglementaires. La réglementation européenne, comme la directive-cadre sur l'eau, peut jouer un rôle clé en imposant des obligations de résultats. Des financements publics et privés sont nécessaires, avec des mécanismes innovants comme les paiements pour services écosystémiques. L'implication des acteurs locaux est essentielle pour convaincre de la valeur environnementale, sociale et économique de la restauration. Une gestion efficace des autorisations administratives est cruciale pour éviter les retards. En identifiant les problèmes environnementaux spécifiques et en comprenant les besoins écologiques des écosystèmes affectés, les stratégies de restauration peuvent être adaptées pour maximiser leur efficacité. La définition d'objectifs de restauration précis permet d'évaluer les progrès réalisés et de s'assurer que les efforts de restauration sont alignés avec les normes et les réglementations environnementales en vigueur. Cela contribue à garantir la durabilité à long terme des écosystèmes restaurés et à minimiser les impacts négatifs sur l'environnement marin. En somme, une stratégie bien pensée et des objectifs clairs de restauration sont essentiels pour garantir le succès d'un projet écologique de restauration à grande échelle dans les zones de rejets, en favorisant la récupération des écosystèmes marins et en assurant leur santé future.

Reconnaître notre impact sur l'environnement marin et agir pour restaurer les écosystèmes endommagés est crucial. Cela exige une action collective à tous les niveaux pour mettre en place des politiques et des pratiques durables. Investir dans la restauration des zones de rejets profitera à la fois à la biodiversité marine et aux communautés humaines. Notre responsabilité collective de réparer les dégâts causés à l'environnement marin est essentielle pour garantir un avenir durable pour la planète et ses habitants.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (2022) 'Rapport d'activité 2021'.
- Agence des aires marines protégées and Ifremer (2012) *Évaluation initiale des eaux marines Sous-région marine golfe de Gascogne : ANALYSE DES PRESSIONS ET IMPACTS*. Available at: <https://www.cbd.int/doc/meetings/mar/mcbem-2014-01/other/mcbem-2014-01-submission-bay-en.pdf> (Accessed: 8 April 2024).
- Andral, B. *et al.* (2011) *Surveillance des rejets urbains et des systèmes assainissement en Méditerranée - Guide méthodologique*. Available at: https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2017-06/guide_rejets_urbains_2011.pdf (Accessed: 25 March 2024).
- ANDROMEDE OCEANOLOGIE (2023) 'Suivi des pressions anthropiques en Méditerranée française - Réseau IMPACT 2021-2023'. Available at: https://medtrix.fr/wp-content/uploads/2024/03/Reseau-impact_2021_2023.pdf (Accessed: 9 May 2024).
- Aouiche, I. *et al.* (2017) 'Dynamique morpho-sédimentaire de la baie d'Agadir : Caractérisation sédimentologique et évolution des petits fonds', *Revue Marocaine de Géomorphologie*, (1), pp. 31–46.
- Arrêté du 31 juillet 2020 (no date) *Arrêté du 31 juillet 2020 modifiant l'arrêté du 21 juillet 2015 modifié relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5 - Légifrance*. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042413404> (Accessed: 29 April 2024).
- Articles R1331-14 à R1331-78 (no date) *Section 3 : Salubrité et hygiène des locaux d'habitation (Articles R1331-14 à R1331-78) - Légifrance*. Available at: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000047945216/ (Accessed: 29 April 2024).
- Bas, C. (2009) 'The Mediterranean: A synoptic overview', *Contributions to Science; Vol. 5, Num. 1 (2009); 25-39, 5*.
- Bernard, G. and Gravez, V. (2013) 'Pollutions marines : les définitions – GIS Posidonie', 18 March. Available at: <https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=352> (Accessed: 10 April 2024).
- Bocquet, O. *et al.* (2022) 'LE BIOMIMÉTISME AU SERVICE DES OPÉRATIONS DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE ET DE NON-DÉGRADATION DES PETITS FONDS CÔTIERS - ÉTATS DES LIEUX, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES'.
- Bodennec, G., Quemeur, M. and Marty, Y. (1991) *Projet REJET URBAINS : La matière organique extractible et les lipides - Composition des effluent*. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00165/27577/25820.pdf> (Accessed: 10 April 2024).
- Boissery, P. *et al.* (2012) 'PRESSIONS CHIMIQUES ET IMPACTS ASSOCIÉS Contamination par des substances dangereuses'.
- Boissery, P. (2014) 'RESTAURATION DU MILIEU MARIN MEDITERRANEE Etat des travaux en cours et perspectives'.
- Brelot, E. and Chocat, B. (1996) 'Impact des rejets sur les milieux récepteurs', *La Houille Blanche*, 82(1–2), pp. 16–21. Available at: <https://doi.org/10.1051/lhb/1996001>.

Casas, S. (2005) *Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, Mytilus galloprovincialis, en milieu méditerranéen*. phdthesis. Université du Sud Toulon Var. Available at: <https://theses.hal.science/tel-00009551> (Accessed: 10 April 2024).

Chalghmi, H. (2017) 'Etude de la pollution marine par les hydrocarbures et caractérisation de leurs effets biochimiques et moléculaires sur la palourde de Ruditapes sp.'

Chiban, S. (2014) *Modélisation de la déposition des particules solides dans les rejets urbains conduits à la mer par émissaires marins*.

Chocat, B., Bertrand-Krajewski, J.-L. and Barraud, S. (2007) *Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie, Techniques de l'Ingénieur*. Available at: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-technologies-de-l-eau-tiaw0/archive-1/eaux-pluviales-urbaines-et-rejets-urbains-par-temps-de-pluie-w6800/> (Accessed: 8 April 2024).

Cointre, L. (2018) 'Projet REXCOR : Restauration Écologique Expérimentale des petits fonds côtiers de la calanque de CORTiou (Parc National des Calanques)'.

Coll, M. *et al.* (2010) 'The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats', *PLoS One*, 5(8), p. e11842. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>.

Commissariat général au développement durable (2016) *Chiffres repères sur l'eau et les milieux aquatiques, Eaufrance*. Available at: <https://www.eaufrance.fr/chiffres-reperes-sur-leau-et-les-milieux-aquatiques> (Accessed: 24 March 2024).

DAO, J.-C. *et al.* (2003) 'Etude préalable à l'aménagement intégré de la zone côtière : site atelier de la baie du Robert/Martinique - Rapport final Synthèse'.

Deroo, M. (2022) 'Étude de l'impact des rejets des systèmes d'assainissement sur le milieu récepteur: bassin Rhône Méditerranée Occitanie'.

Direction départementale des territoires et de la mer (2021) 'Stratégie de gestion du domaine public maritime naturel des Pyrénées-Orientales'. Available at: https://www.pyrenees-orientales.gouv.fr/content/download/34049/244103/file/20210727_Strategie_gestion_DPMn_Pyrenees-Orientales-VALIDE.pdf (Accessed: 3 May 2024).

Duquesne, S. (1992) *Bioaccumulation métallique et métallothionéines chez trois espèces de poissons provenant du littoral Nord-Pas-de-Calais*. These de doctorat. Lille 1. Available at: <https://theses.fr/1992LIL10089> (Accessed: 10 April 2024).

Ferro, Y. (2013) *Évaluation de l'impact des rejets urbains de temps de pluie sur le compartiment algal des écosystèmes aquatiques : Mise au point d'outils pour la surveillance des milieux récepteurs*. These de doctorat. Lyon, INSA. Available at: <https://theses.fr/2013ISAL0091> (Accessed: 4 April 2024).

Galewski, T. *et al.* (2021) *Living Mediterranean Report – Monitoring species trends to secure one of the major biodiversity hotspots*. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15878.29763>.

Gann, G.D. *et al.* (2019) 'International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition', *Restoration Ecology*, 27(S1). Available at: <https://doi.org/10.1111/rec.13035>.

Gudfin, A. *et al.* (2021) 'Evaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique. Cas des nurseries portuaires'.

Guillaud, J.F. and Romana, A. (1992) 'Les rejets urbains en mer', *Hydroécologie Appliquée*, 4, pp. 159–172. Available at: <https://doi.org/10.1051/hydro:1992213>.

Herrouin, G. and Huau, M.-C. (2015) *Rapport final projet REMORA*. Cham: Springer International Publishing, pp. 363–365. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-13878-7_40.

Hobbs, R.J. and Cramer, V.A. (2008) 'Restoration Ecology: Interventionist Approaches for Restoring and Maintaining Ecosystem Function in the Face of Rapid Environmental Change', *Annual Review of Environment and Resources*, 33(Volume 33, 2008), pp. 39–61. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.020107.113631>.

Ifremer (2023) *Évaluer l'état de santé du milieu marin pour mieux le préserver | Ifremer*. Available at: <https://www.ifremer.fr/fr/actualites/evaluer-l-etat-de-sante-du-milieu-marin-pour-mieux-le-preserver> (Accessed: 10 April 2024).

Jouvenel, J.-Y. (2017) *Etat et surveillance écologique du milieu marin au droit du rejet de la station d'épuration de Saint-Cyr-sur-Mer / Pointe-Grenier pour l'année 2017*. Available at: https://www.provence-alpes-cote-d-azur.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/f09320p0070_surveillanceecologique2017.pdf (Accessed: 10 April 2024).

Lenfant, P. *et al.* (2015) 'Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée'.

Martin, G. (2021) 'Les obligations réelles environnementales au service d'une protection des zones humides', *Les Cahiers de droit*, 62(4), pp. 1091–1132. Available at: <https://doi.org/10.7202/1084259ar>.

Messai, K. (2014) *ETUDE DE LA POLLUTION MARITIME PAR LES METAUX LOURDS (Pb , Zn) DANS LA COTE DE JIJEL*. Available at: <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/biblio/mmf/2014/75-2014.pdf> (Accessed: 10 April 2024).

Morin-Crini, N. *et al.* (2017) 'Chapitre IV. Paramètres chimiques de l'eau et rejets industriels', in *Eaux industrielles contaminées : Réglementation, paramètres chimiques et biologiques & procédés d'épuration innovants*. Besançon: Presses universitaires de Franche-Comté (Pratiques & techniques), pp. 103–144. Available at: <https://doi.org/10.4000/books.pufc.10972>.

van der Oost, R., Beyer, J. and Vermeulen, N.P.E. (2003) 'Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review', *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13(2), pp. 57–149. Available at: [https://doi.org/10.1016/s1382-6689\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/s1382-6689(02)00126-6).

Ouro-Sama, K. *et al.* (2014) 'Évaluation et risques sanitaires de la bioaccumulation de métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais', *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [Preprint], (Volume 14 Numéro 2). Available at: <https://doi.org/10.4000/vertigo.15093>.

Pinay, G. *et al.* (2022) 'Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité'. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00408/51903/52526.pdf> (Accessed: 8 April 2024).

Ruysen, M. (2019) 'Document stratégique pour la restauration écologique en Méditerranée'.

Secrétariat d'État chargé de la Mer-Stratégie nationale mer et littoral 2030 (2023) 'STRATÉGIE NATIONALE MER ET LITTORAL 2030'. Available at: https://mer.gouv.fr/sites/default/files/2023-08/SNML%20DOC%20A4-WEB-PAGE-BD-ok_compressed.pdf (Accessed: 3 May 2024).

Seidl, M. (1997) *Caractérisation des rejets urbains de temps de pluie et de leurs impacts sur l'oxygénation de la Seine*. phdthesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Available at: <https://pastel.hal.science/tel-00523123> (Accessed: 8 April 2024).

Shannon, L.J. *et al.* (2009) *Comparing data-based indicators across upwelling and comparable systems for communicating ecosystem states and trends | ICES Journal of Marine Science | Oxford Academic*. Available at: <https://academic.oup.com/icesjms/article/67/4/807/678850> (Accessed: 23 March 2024).

Stergiou, K. *et al.* (2015) 'Trends in productivity and biomass yields in the Mediterranean Sea Large Marine Ecosystem during climate change', *Environmental Development*, 17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.001>.

Taibi, S. and Reguieg, A. (2021) *Evaluation de la bioaccumulation des métaux lourds chez les poissons dulçaquicoles de barrage Bougara Tiaret*. Thesis. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Available at: <http://dspace.univ-tiaret.dz:80/handle/123456789/5964> (Accessed: 10 April 2024).

Thouvenin, B. (1992) 'Transport et mélange d'un rejet urbain dans le milieu marin - Mer Méditerranée'.

UE water directive (1991) *Directive Eaux Résiduaires Urbaines, Eaufrance*. Available at: <https://www.eaufrance.fr/glossaire/directive-eaux-residuaires-urbaines> (Accessed: 25 April 2024).

UE water directive (2023) *Protection et gestion des eaux | Fiches thématiques sur l'Union européenne | Parlement européen*. Available at: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/74/protection-et-gestion-des-eaux> (Accessed: 25 April 2024).

UE water directive (no date) *La bonne qualité de l'eau en Europe (directive-cadre sur l'eau) | EUR-Lex*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/good-quality-water-in-europe-eu-water-directive.html> (Accessed: 24 March 2024).

Véron, G. *et al.* (2008) 'Les récifs artificiels - Etat des connaissances et recommandations'.

WWF France (2023) *Pour une restauration effective en mer et en milieux côtiers en Méditerranée Française*. Available at: https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2024-03/WWF%202023%20-%20Rapport%20Restauration%20Ecologique%20en%20Mer%20Me%CC%81diterrane%CC%81e%20-%20final_COM%20%281%29.pdf (Accessed: 3 May 2024).