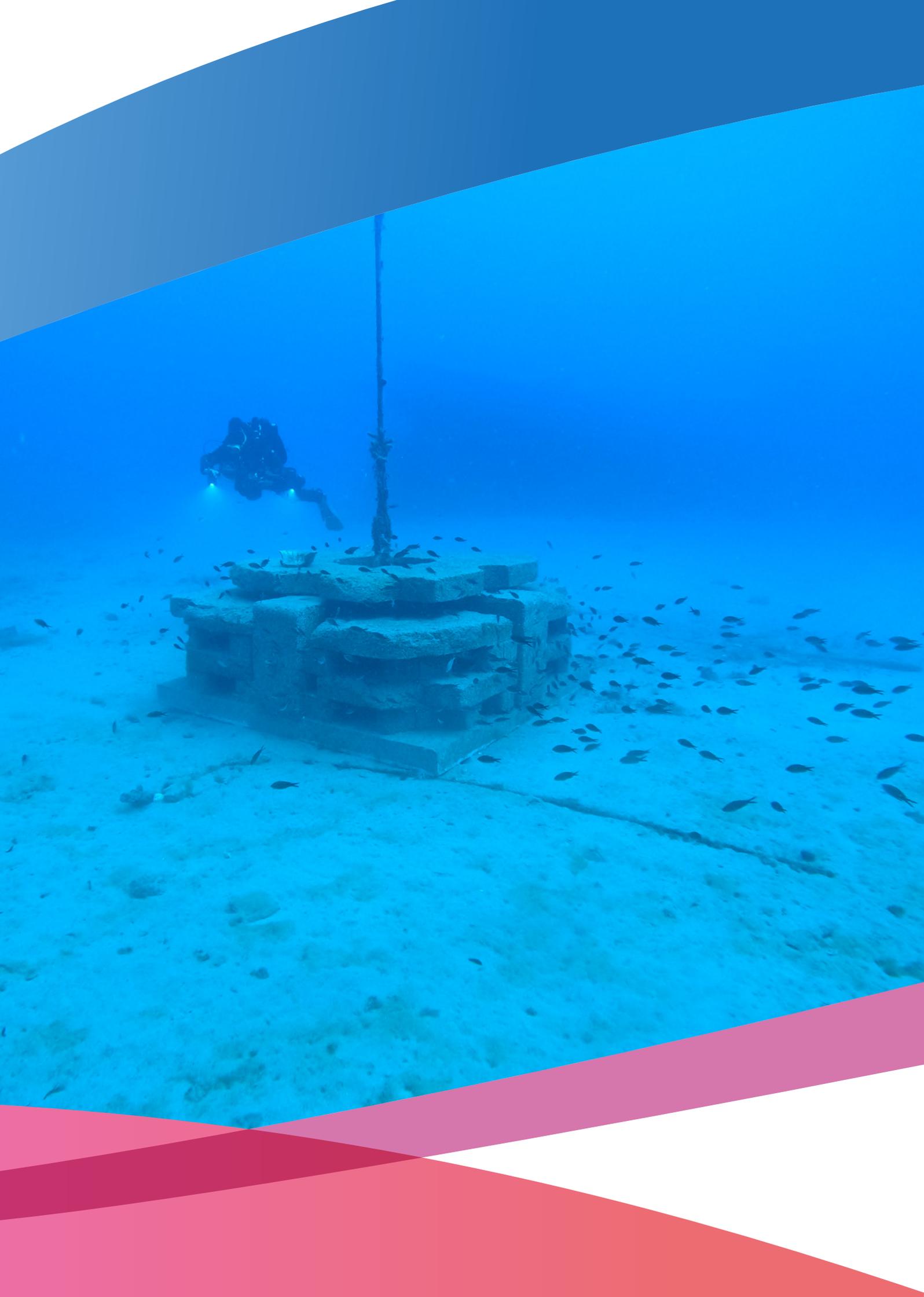


# Guide pour L'ÉCOCONCEPTION DES OUVRAGES MARITIMES

Développer des solutions fondées sur la nature en génie civil maritime



Gouvernement Princier  
PRINCIPAUTÉ DE MONACO



# Guide pour L'ÉCOCONCEPTION DES OUVRAGES MARITIMES

Développer des solutions fondées sur la nature en génie civil maritime



<b>1. ENJEUX STRATÉGIQUES DE L'ÉCOCONCEPTION DES OUVRAGES MARITIMES : UNE NÉCESSITÉ D'AVENIR</b>	<b>9</b>
1.1. Impacts négatifs des ouvrages maritimes classiques	10
1.2. Définition et bénéfices des ouvrages éco-conçus	11
1.2.1. Généralités	11
1.2.2. Un nouveau paradigme dans la construction : l'écoconception avec les solutions fondées sur la nature	12
1.2.3. Bénéfices potentiels de l'écoconception d'ouvrages côtiers	12
<b>2. PRINCIPALES ÉTAPES DU PROCESSUS D'ÉCOCONCEPTION</b>	<b>15</b>
2.1 Prise en compte de l'écologie des espèces	18
2.2 Influence du site d'installation	19
2.3 Place centrale du biomimétisme	21
<b>3. ÉLÉMENTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA MÉTHODOLOGIE D'ÉCOCONCEPTION</b>	<b>25</b>
3.1 Exemples d'ouvrages éco-conçus	26
3.1.1 Monaco et Corse : caisson et chambre jarlan, lest de coffre d'amarrage	27
3.1.2 Mayotte, Mamoudzou : canalisation sous-marine	30
3.1.3 États-Unis, Seattle : quai promenade en front de mer	31
3.1.4 États-Unis, Floride, brise lame et brise clapot « sea-hive »	33
3.2 Comment dimensionner un ouvrage éco-conçu adapté à l'environnement monégasque	35
3.2.1 Dimensionner des ouvrages en fonction des besoins des espèces cibles prioritaires	35
3.2.2 Préconisations pour l'accueil d'autres espèces locales	39

<b>3.3</b>	<b>Ouvrages et matériaux candidats à l'écoconception</b>	<b>40</b>
3.3.1	Les ouvrages candidats à l'écoconception	40
3.3.2	Les matériaux adaptés pour l'écoconception	41
<b>3.4</b>	<b>Focus sur deux écosystèmes sensibles et options d'écoconception pour la posidonie et le coralligène</b>	<b>42</b>
3.4.1	L'herbier de posidonie de Monaco et les options d'écoconception spécifiques à ce milieu	42
3.4.2	Le coralligène de Monaco et les options d'écoconception spécifiques à ce milieu	44
<b>3.5</b>	<b>Importance du suivi des performances écologiques des ouvrages éco-conçus</b>	<b>45</b>
<b>3.6</b>	<b>Risques de greenwashing et précautions à prendre</b>	<b>48</b>
<b>4.</b>	<b>SYNTHÈSE ET PROPOSITIONS D'ÉCOCONCEPTION DES FUTURS PROJETS D'AMÉNAGEMENT MONÉGASQUES</b>	<b>49</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>63</b>



## PRÉAMBULE

Ce guide s'insère dans la **Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB)**, document cadre fixant des orientations de politique générale de Monaco en matière de biodiversité d'ici à 2030 (cf. Figure 1).

Il répond notamment à l'orientation stratégique n° 1 de la SNB :

- Faire de la **biodiversité une composante clé du cadre de vie** de la population.
- « **Renaturer** » Monaco tant dans l'espace public que privé.
- Développer des solutions pour **renforcer la résilience écologique** du territoire.
- **Mieux vivre** avec les animaux et les plantes en ville et en mer.

Ce guide s'adresse plus particulièrement aux Services du Gouvernement en charge de l'aménagement, aux bureaux d'études et aux entreprises de travaux publics mais aussi à la population désireuse de mieux comprendre les actions concrètes menées par le Gouvernement Princier de Monaco.

Il développe 4 grands axes :

1. Enjeux stratégiques de l'écoconception des ouvrages maritimes : une nécessité d'avenir.
2. Définition et principales étapes du processus d'écoconception.
3. En pratique : dimensionner un ouvrage éco-conçu adapté à l'environnement monégasque.
4. Synthèse et carte des propositions d'écoconception des futurs projets d'aménagement monégasques.

Il y a une **réelle prise de conscience mondiale de l'intérêt d'éco-concevoir les aménagements terrestres comme maritimes**.

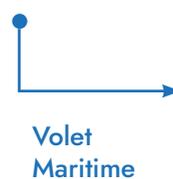
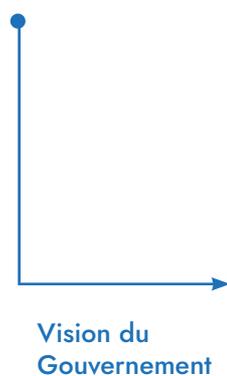
**Le littoral monégasque, par la concentration et la diversité de ses ouvrages maritimes, pourrait être un site stratégique mondial d'écoconception en appliquant des solutions fondées sur la nature.**

## Accord cadre international



1 - Monaco signataire des objectifs de la Convention sur la Diversité Biologique (CDB)

2 - Stratégie Nationale pour la Biodiversité horizon 2030



3 - Feuille de route



La vision du Gouvernement en matière d'environnement, portée par la Direction de l'Environnement, est liée aux engagements internationaux issus de la Convention sur la Diversité Biologique (COP15). Ces engagements se sont traduits depuis 2021 par le document cadre « **Stratégie Nationale pour la Biodiversité à 2030** » et son application au littoral monégasque avec le **Schéma Monégasque d'Ingénierie Littorale Écologique (SMILE)**, décliné opérationnellement à travers des formations, un **Cahier des Prescriptions et Recommandations Techniques pour l'Écoconception des ouvrages maritimes (CPRT)** et ce **Guide pratique pour développer l'écoconception** des ouvrages maritimes.

#### 4.1 - Formation sensibilisation des services



#### 5.1 - Guide d'écoconception des ouvrages maritimes



Stratégie  
d'aménagement  
maritime

Outils supports

#### 4.2 - Note de synthèse



#### 5.2 - CCTP incluant l'écoconception

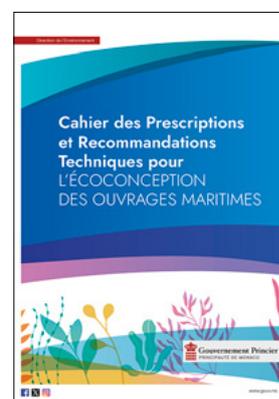


Figure 1 : Logique d'insertion du guide dans la Stratégie Nationale pour la Biodiversité à horizon 2030



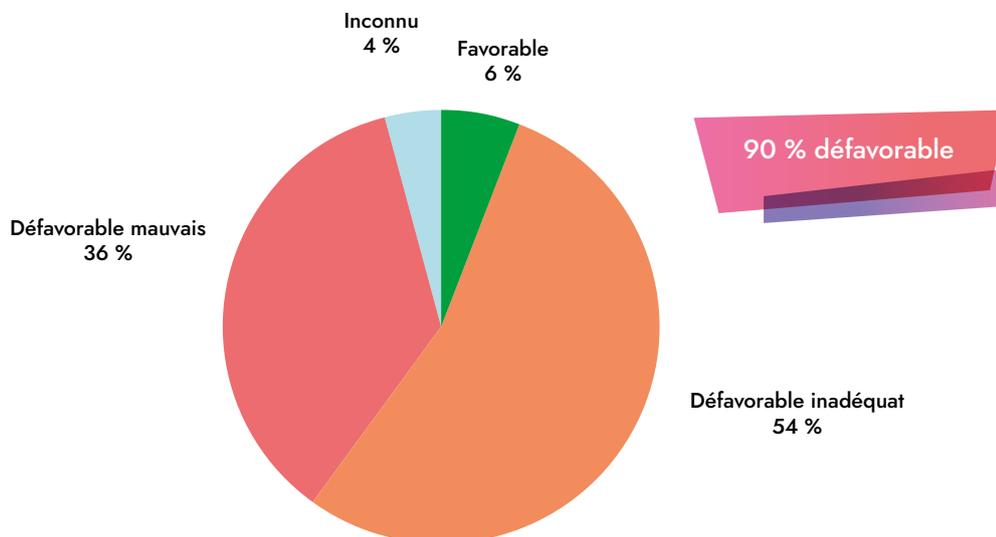


**ENJEUX STRATÉGIQUES  
DE L'ÉCOCONCEPTION  
DES OUVRAGES MARITIMES :  
UNE NÉCESSITÉ D'AVENIR**



En 50 ans **la planète a vu baisser de 69 % ses populations animales** de mammifères, oiseaux, poissons, reptiles et amphibiens (Indice Planète Vivante, 2022).

Au niveau marin, en France, **90 % des habitats d'intérêts communautaires côtiers sont dans un état défavorable ou mauvais**, 4 % ne peuvent être classés par manque de données et seulement 6 % sont en état favorable (Figure 2).



Note : Résultats toutes régions biogéographiques confondues (49 évaluations)



Visuel ONB, d'après :  
Origines des données : Rapportage DHFF, UMS PatriNat (OFB/CNRS-MNHN), janvier 2020  
Traitements : UMS PatriNat - Tour du Valat - SDES, 2020

Figure 2 : État de conservation des habitats marins et côtiers d'intérêt communautaire en métropole (période 2013-2018) (MNHN – UMS PatriNat, 2020)

Les causes de cette situation sont bien connues, dans l'ordre, **(1) l'artificialisation et les modifications des sols et mers**, (2) la surexploitation des ressources, (3) les effets du changement climatique, (4) les pollutions et (5) l'introduction d'espèces invasives (IPBES, 2023). Rappelons ici que la diminution de la biodiversité et la dégradation de l'environnement ont des conséquences avérées sur la santé humaine (Romanello et al., 2022).

## 1.1. Impacts négatifs des ouvrages maritimes classiques

L'arrêt de l'artificialisation est l'une des principales solutions pour lutter contre l'érosion de la biodiversité dans un horizon à long terme. En effet, à court et moyen termes, l'artificialisation par urbanisation est en forte croissance dans le monde, avec +185 % prévus d'ici à 2030 (Meijer et al., 2018). Ce taux sera de + 25% en mer en 2030, avec 40 000 km<sup>2</sup> de zones côtières artificialisées (Bugnot et al., 2021).

A la différence des ouvrages terrestres, tout ouvrage immergé subit une colonisation proportionnelle à sa surface. Bien que ces ouvrages de génie civil maritime « classiques » soient colonisés, apparemment de manière « naturelle », ils entraînent d'une part, **une baisse de la biodiversité locale** et d'autre part, une **rupture de connectivité écologique** en réduisant les continuités entre fonds naturels et artificiels (Bulleri et Chapman, 2010 ; Mac Manus et al., 2018 ; Jackson et al. 2008).

Les structures artificielles créent des fonds uniformes, sans complexité, entraînant une banalisation des fonds et l'installation d'espèces ubiquistes, invasives, de bas niveau trophique (colonisation par quelques espèces résistantes aux pollutions ou au milieu perturbés). Ce phénomène exclut les espèces locales, adaptées à la complexité des substrats naturels locaux.

Des publications ont également démontré que les infrastructures côtières qui ne mimaient pas les substrats naturels locaux favorisaient le **développement d'espèces exotiques invasives** (Dafforn et al., 2012 ; Gauff et al., 2023).

**Le lien entre zones artificialisées et foyers d'infestation d'espèces invasives**, responsables de mortalité par ricochet sur les zones naturelles proches, est avéré par des suivis scientifiques indépendants (Airoldi et Bulleri 2011 ; Schaeffer et al., 2023).

**Ces risques environnementaux sont largement ignorés.** Aujourd'hui, la responsabilité des aménageurs est désormais engagée. Les pistes proposées pour réduire les conséquences négatives des ouvrages maritimes sur l'environnement sont multiples, ce guide s'intéresse à l'une d'elle : **l'écoconception du design des ouvrages.**

## 1.2.

## Définition et bénéfices des ouvrages éco-conçus

Un ouvrage éco-conçu poursuit un double objectif technique et écologique. Sa définition est **« le fait de concevoir des projets d'aménagement maritimes durables avec des fonctions techniques et écologiques précises/spécifiques, qui génèrent des co-bénéfices socio-écosystémiques, sans générer de surcoût pénalisant à terme »**.

L'aspect esthétique est également important pour rechercher une meilleure intégration au paysage sous-marin naturel. Soulignons que la durée de vie des objectifs écologiques est identique à la durée de vie de l'ouvrage.

### 1.2.1. Généralités

Dans le cadre de l'écoconception, les **futurs aménagements doivent réduire leurs impacts négatifs et générer des gains pour la biodiversité**. Dans cet objectif, les maîtres d'ouvrages disposent de deux outils :

- Le premier est une obligation réglementaire : celle de réaliser une **Étude des Incidences sur l'Environnement (EIE)** dont le cœur est le respect de la séquence Éviter, Réduire et Compenser (ERC) (Loi n° 1.456 du 12 décembre 2017, portant Code de l'Environnement de Monaco).
- Le second est volontaire et repose sur **l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)** de l'ouvrage (voir pour l'ACV du projet d'extension en mer : Langlois et al., 2020). Cette analyse consiste à « inventorier tous les flux de matières dont la production de GES et d'énergies entrants et sortants, à chaque étape de la vie d'un produit : extraction de matières premières, fabrication, distribution, utilisation, fin de vie » (AFNOR). Dans un de ses volets, l'ACV peut également étudier l'impact de l'ouvrage sur la biodiversité.

L'approche d'ingénierie écologique en écoconception permet d'apporter des nouvelles dimensions à l'ouvrage, sans pour autant avoir un impact majeur sur le coût. Les principaux impacts positifs et bénéfiques d'un ouvrage éco-conçu sont :

- Intégration de l'ouvrage dans un écosystème préexistant.
- Création de biodiversité locale et intégration d'objectifs écologiques.
- Intégration paysagère.
- Limite l'installation d'espèces invasives.

- Possibilité d'intégration de techniques douces (solutions fondées sur la nature).
- Réduction et dans certains cas compensation d'impacts en respect de la séquence ERC.
- Support de communication et d'éducation environnementale sur les écosystèmes côtiers.

L'écoconception<sup>1</sup> implique que les ouvrages soient conçus en **intégrant des objectifs écologiques dès la phase de conception des infrastructures côtières, dans un but de réduction des impacts négatifs, voire de gains écosystémiques** pendant leur phase d'exploitation (Figure 3). L'aspect esthétique est un élément pris en compte afin d'intégrer l'ouvrage aux paysages sous-marins (design visuel biomimétique).

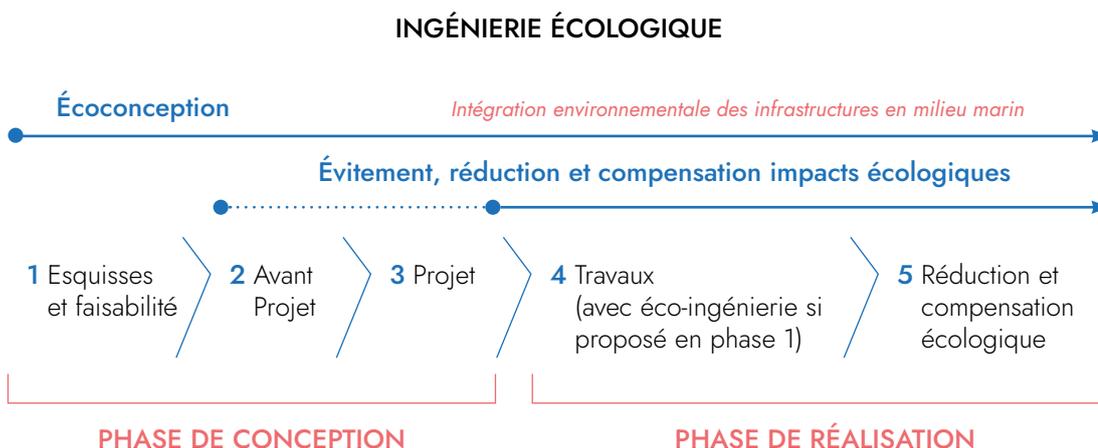


Figure 3 : Différence d'approche entre l'écoconception aux stades d'esquisses/faisabilités et l'approche actuelle réglementaire de la séquence « Éviter Réduire et Compenser » intégrant des objectifs écologiques au stade d'Avant-Projet (Pioch et Souche, 2021).

### 1.2.2. Un nouveau paradigme dans la construction : l'écoconception avec les solutions fondées sur la nature

Les ouvrages d'art éco-conçus peuvent être considérés comme des Solutions Fondées sur la Nature (SFN) dans la mesure où ils font appel à des compétences en ingénierie écologique<sup>2</sup> et qu'ils ont des objectifs clairs de restauration ou de protection de l'écosystème. Ils répondent ainsi à la définition suivante des SFN : « actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés [...] qui assurent le bien-être humain et offrent des avantages pour la biodiversité » (IUCN, 2006). Il s'agit de solutions de type « gagnant/gagnant » pour l'homme et l'environnement (Salgues et al., 2020).

Ces ouvrages d'art mixant objectifs sociotechniques et écologiques relèvent, dans la classification des SFN, du type 3 « Conception et gestion de nouveaux écosystèmes » (Eggermont et al., 2015). Les bénéfices de l'écoconception en tant que SFN doivent être valorisés tant aux niveaux technique et socio-économique qu'écologique. Les outils nécessaires pour mesurer ces bénéfices sont présentés dans ce guide (chapitre 3.5).

### 1.2.3. Bénéfices potentiels de l'écoconception d'ouvrages côtiers

Les bénéfices de l'écoconception doivent être envisagés d'un point de vue écologique (gains pour la biodiversité et les paysages sous-marins) mais également pour l'ouvrage lui-même (sa durabilité, son efficacité et ses performances).

<sup>1</sup> Pour les produits manufacturés industriels l'écoconception optimise « du berceau à la tombe » l'impact sur l'environnement de la vie d'un produit, notamment à partir des résultats de l'ACV.

<sup>2</sup> Ensemble de techniques issues de l'ingénierie classique et de l'écologie, se définit par la finalité des actions menées, qui ont comme objectif de contribuer à la résilience de l'écosystème.

### a) Bénéfices pour l'homme : les services écosystémiques

Il s'agit des bénéfices que les humains reçoivent des écosystèmes. Il faut distinguer les « **services écosystémiques** » des « **fonctions écologiques** » qui les produisent : les fonctions écologiques sont les processus naturels de fonctionnement et de maintien des écosystèmes, alors que les services écosystémiques sont le résultat de ces fonctions. L'écoconception a pour but de développer ou de protéger des fonctions écologiques que les ouvrages classiques ne prenaient pas en compte, jusqu'ici. Le développement de fonctionnalités écologiques entraîne une augmentation des services écosystémiques :

- **Les services d'approvisionnement** : pêcheries, molécules biomédicales, chimie...
- **Les services de soutien** : maintien du cycle de vie pour la faune et la flore, production primaire et secondaire (ex : photosynthèse), cycle des éléments et des nutriments...
- **Les services de régulation** : séquestration et stockage du carbone (herbier de posidonie, coralligène), prévention de l'érosion, traitement des eaux usées, modération des phénomènes météorologiques extrêmes (tampon climatique) ;
- **Les services culturels** : tourisme (plongée, plaisance, pêche loisir), loisirs, bénéfices esthétiques et spirituels.

La mesure des services de régulation peut être réalisé par la matrice de l'ACV (e.g. logiciel SYMAPRO) qui fait l'objet d'une normalisation ISO 14040. Les services de soutien peuvent être renseignés grâce au suivi écologique. Enfin, des études socio-économiques, basées sur des enquêtes de perception et d'évaluation en économie de l'environnement, peuvent renseigner les services culturels et d'approvisionnement.

### b) Gains apportés par l'écoconception pour la durabilité des ouvrages

Le principe de l'écoconception repose sur la notion de co-bénéfices et non sur une approche binaire qui considère d'un côté des ouvrages destinés à l'homme, et de l'autre des ajouts indépendants pour la biodiversité.

L'un des principaux avantages à favoriser la colonisation d'un ouvrage en béton porte sur l'amélioration de sa durabilité. Ce phénomène de bio-protection fait l'objet d'un nombre croissant de recherches. Ainsi, *Iwanami et al. (2002)*, *Maruya et al. (2003)* ou *La Marca et al. (2014)* ont démontré comment les concrétions (*fouling*) sur des ouvrages de type brise-lames peuvent prolonger la durée de vie des bétons. *Kawabata et al. (2012)* ont prouvé que la migration des ions chlorure (un des principaux facteurs du phénomène de vieillissement des bétons marins) est considérablement ralentie lorsque ceux-ci sont colonisés par des huîtres ou des vers calcaires, barrière physique et donc isolant naturel pour la structure. *Firth et al. (2013)* ont démontré les effets positifs de la colonisation favorisée par le concept d'écoconception pour des ouvrages de protection des côtes destinés à l'amortissement des houles, ou à la lutte contre l'érosion des plages : les algues et herbiers (posidonie pour Monaco) présents sur les ouvrages amortissent l'effet des houles ; celles qui sont arrachées ajoutent des matériaux solides qui améliorent la fixation du sable sur les plages (lutte contre l'érosion).

Enfin, *Combes et al. (2015)* ont souligné les opportunités « éco-technologiques » (ou d'éco-ingénierie) pour le développement de béton remanié comme support de biodiversité pour la lutte contre le réchauffement climatique et ses effets : meilleure résistance des ouvrages aux épisodes climatiques extrêmes récurrents, absorption du CO<sub>2</sub>, filtration et recyclage générés par les écosystèmes développés et amélioration de la résilience du milieu naturel.

### c) Atteinte des objectifs réglementaires environnementaux

L'écoconception permet de réduire les impacts négatifs d'un projet et dans certains cas particuliers, compenser en équivalence les pertes écologiques liées aux ouvrages. En ce sens, cette démarche répond aux exigences de la séquence « Éviter », « Réduire » et « Compenser », et l'évaluation des incidences sur l'environnement. La difficulté réside dans la quantification des gains<sup>3</sup>, afin de mesurer la performance écologique apportée par un ouvrage éco-conçu, en comparaison avec un ouvrage « classique ».

<sup>3</sup> Voir la méthode MERCI préconisée par le Ministère de la Transition Ecologique en France, dans le guide publié en juin 2021 : [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Approche\\_standardis%C3%A9e\\_dimensionnement\\_compensation\\_%C3%A9cologique.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Approche_standardis%C3%A9e_dimensionnement_compensation_%C3%A9cologique.pdf)

Il ne s'agit pas ici d'un problème économique car le surcoût d'un projet d'écoconception est en général inférieur à 1 à 2 % du coût du projet (Pioch et Souche, 2021).

Nous rappelons que les objectifs et les performances de ces ouvrages éco-conçus **doivent être annoncés avant leur installation**. Le suivi et l'évaluation doivent valider, ou non, leur efficacité en regard d'objectifs définis ex-ante.

#### d) Amélioration de la résilience de l'environnement marin

Les liens entre biodiversité et résilience sont complexes et difficiles à établir précisément. Cependant, de nombreuses études montrent qu'une forte biodiversité (complexité et complémentarité des relations entre les espèces de la biocénose) permet à un écosystème de se rétablir plus vite après une perturbation (vagues de chaleur, pressions mécaniques...) (Isbell et al., 2017). Les travaux de Joubert et al., (2023) ont démontré que certaines nurseries artificielles portuaires multipliaient par 2,4 fois le nombre de juvéniles que sur des quais « classiques » en diminuant significativement la prédation. De même, la disparition d'espèces importantes (protégées ou non) peut mettre en danger la récupération des écosystèmes.

La diversité des fonctions écologiques présentes et des espèces améliore la résilience des écosystèmes. Cette diversité peut permettre à un écosystème de se régénérer après une perturbation, car la stabilité et la résistance d'un écosystème augmentent avec l'augmentation de sa biodiversité (Isbell et al., 2017). C'est pourquoi les écosystèmes riches en biodiversité résisteront mieux aux perturbations naturelles ou anthropiques.

**La diversité génétique**, assurée par des milieux naturels diversifiés (fonctions écologiques, espèces et habitats) est donc primordiale pour que les espèces disposent d'un pool d'allèles suffisant pour faire face à des changements, notamment liés aux changements climatiques. **La connectivité**, grâce aux corridors écologiques, offre également aux espèces la possibilité d'effectuer des migrations vers des zones plus propices, lors, par exemple, de vagues de chaleur sous-marine (migrations bathymétriques).

De plus **l'écoconception**, en ciblant des espèces sensibles, rares ou endémiques permet de mieux gérer la biodiversité remarquable en offrant des habitats et des fonctions écologiques adaptés à des espèces cibles comme le mérour, le corb ou la posidonie.

Enfin, en créant **une diversité de substrat** (état de surface) et **d'habitats** (dimensionnement des ouvrages) plus importante, les niveaux trophiques peuvent rester élevés (si les pressions, comme la pêche, sont gérées). Des hauts niveaux trophiques permettent un meilleur fonctionnement des écosystèmes (Vandewalle et al., 2010). L'uniformisation des substrats, apportés par les ouvrages « classiques » non éco-conçus et non biomimétiques, entraîne la prolifération d'espèces ubiquistes non spécialistes envahissantes.

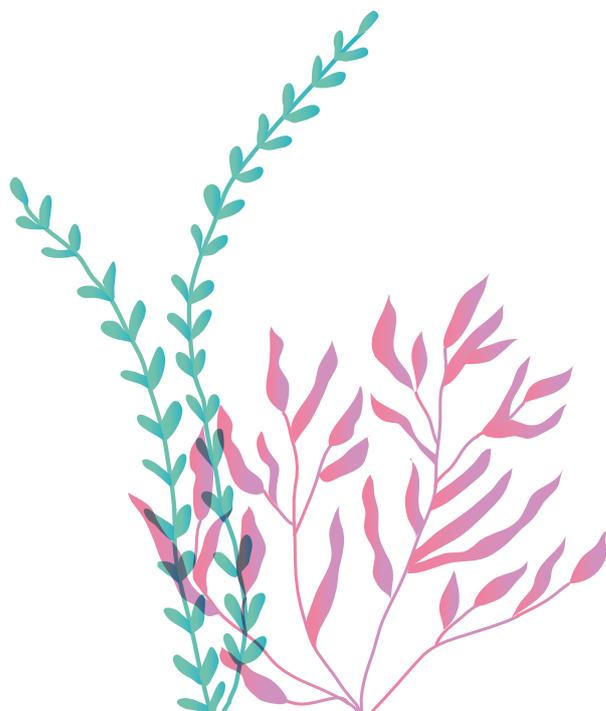


Figure 4 : Bloc de digue, mimant les cuvettes naturelles, destiné à l'accueil d'une algue brune la cystoseire, en béton imprimé 3D à Monaco (photo : Direction de l'Environnement)



# 2

PRINCIPALES ÉTAPES  
DU PROCESSUS  
D'ÉCOCONCEPTION



Le principe méthodologique d'écoconception des ouvrages, en tant que nouveaux supports de biodiversité, repose sur une double expertise en ingénierie civile et écologique. Concrètement, il s'agit d'associer des connaissances techniques sur le fonctionnement d'un écosystème (habitats, fonctions écologiques, espèces) et sur l'ingénierie d'un ouvrage (matériaux, calculs, moyens de fabrication) pour des solutions constructives adaptées, à des coûts maîtrisés et pour une durabilité améliorée (Figure 5).

### MÉTHODOLOGIE D'ÉCOCONCEPTION D'OUVRAGE

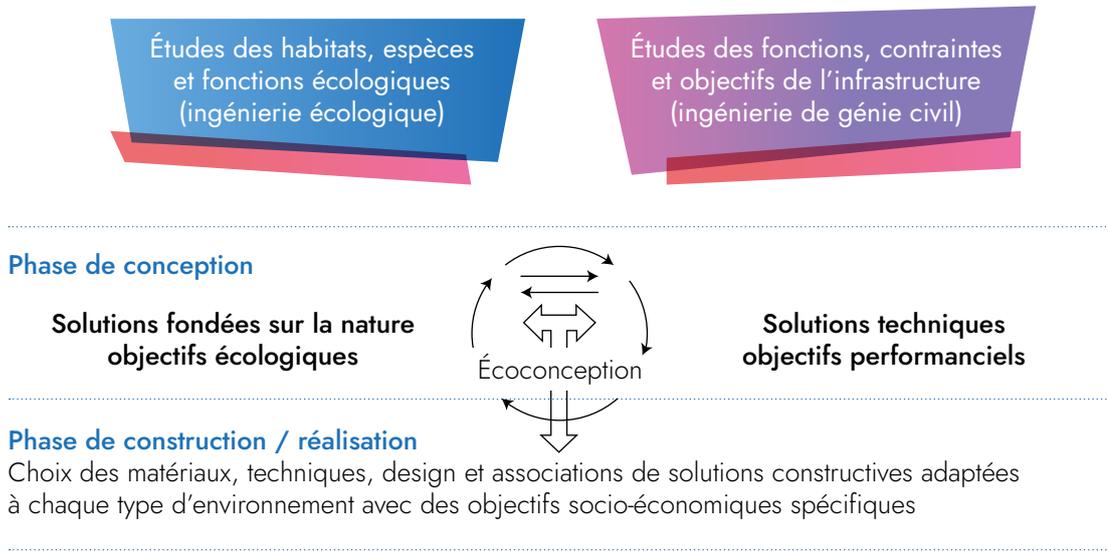


Figure 5 : Méthodologie d'écoconception (Pioch et Souche, 2021)

Les étapes nécessaires **pour la maîtrise d'œuvre d'un projet éco-conçu** impliquent le renforcement de l'interdépendance entre les acteurs clefs de l'acte de construire : maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprise (Figure 6).

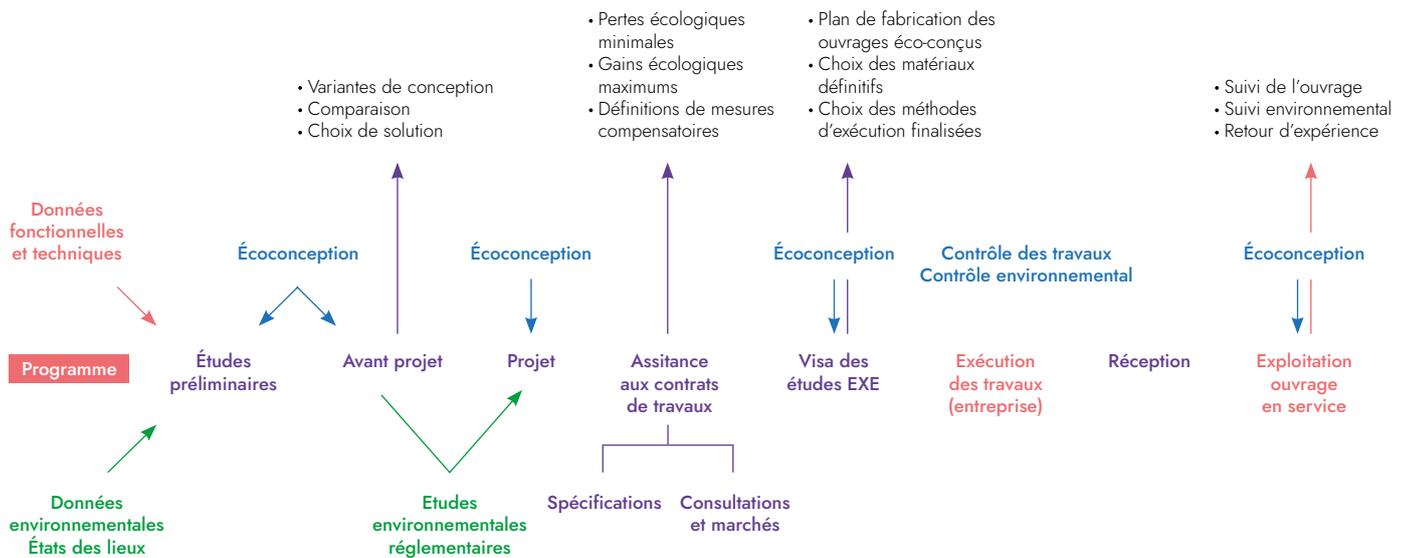


Figure 6 : Missions de maîtrise d'œuvre d'écoconception (Pioch et Souche, 2021)

Plus précisément, les étapes de maîtrise d'œuvre d'un projet en phase de conception sont toutes concernées par un volet d'écoconception.

En **phase préliminaire** (études d'opportunités, d'esquisses ou de faisabilités), il s'agit de proposer une ou plusieurs solutions d'ensemble, avec des délais de réalisation et des coûts adaptés en fonction des contraintes techniques et environnementales du projet. Dès cette phase, il est crucial d'identifier les pistes majeures pour éco-concevoir le projet, par exemple à partir d'un benchmark des ouvrages similaires ou d'une expertise sur la faisabilité technico-écologique.

Lors des phases **d'Avant-Projet (AVP)** et **Projet (Pro)**, il s'agira de déterminer les surfaces et plans détaillés, les principes constructifs, les matériaux et le coût prévisionnel du projet. Lors de ces phases, les solutions techniques d'écoconception seront construites, en étroite collaboration entre les ingénieurs en génie-civil et les ingénieurs écologues. C'est dans cette phase que seront évalués les gains en termes de réduction des impacts et dans certains cas de compensation écologique, valorisés dans le dossier d'études d'impact (séquence ERC).

La phase PRO sert à la production du **Dossier de Consultation des Entreprises (DCE)** pour l'appel d'offre, il est dès lors important de préciser les performances écologiques attendues et les process techniques (rugosités des bétons, principes constructifs...) demandés aux entreprises de travaux.

En phase de réalisation ou d'exécution du projet, le **VISA** consiste à vérifier les plans d'exécution réalisés et à s'assurer de leur bonne conformité par rapport à l'étude de conception menée. Le VISA permet ainsi d'émettre un avis sur les solutions d'écoconception proposées par l'entreprise travaux et de vérifier si elles ont été bien comprises. Enfin, lors de la phase **d'exploitation**, après le contrôle sur le chantier du respect des propositions d'écoconception construites par l'entreprise de travaux, le suivi des ouvrages éco-conçus débute avec d'éventuelles mesures de corrections (prévues lors de la phase d'AVP).

L'expérience démontre que l'investissement en temps, sur de nouvelles tâches d'ingénierie écologique en phase d'études préliminaires et d'avant-projet, est récupéré lors de l'EIE (mesures de réduction et dans certains cas de compensation acquises), d'instruction pour autorisation environnementale, lors des phases chantiers, puis de suivis écologiques. Le **surcoût est inférieur, en moyenne, à 1 à 2 % du coût total des projets** (Pioc et Souche, 2021). Enfin, la **communication sur les performances écologiques** de l'ouvrage permet de fédérer et de rallier plus largement les usagers des territoires aménagés, demandeurs d'actions concrètes face à la crise environnementale.

Les cadres méthodologiques pour l'écoconception d'infrastructures maritimes se développent depuis une quinzaine d'années. Au niveau international, l'Association Internationale des Ports et Canaux Navigables avec le groupe de travail « Working with Nature<sup>4</sup> » (PIANC, 2008), et au niveau Français l'Association Française de Génie Civil et le groupe de travail « Écoconception des ouvrages de Génie Civil<sup>5</sup> » (AFGC, 2021), proposent deux documents techniques de références. Ces deux outils, bien que très détaillés d'un point de vue du génie civil ou de la maîtrise d'œuvre projet, **ne présentent pas les éléments permettant de dimensionner des infrastructures adaptées aux espèces, habitats et fonctions écologiques cibles**. Nous développerons ces éléments clés, pour les cahiers des charges travaux et le programme performanciel, dans la partie du guide.

Enfin, signalons le réseau mondial « *Global Green-Gray Community of Practice*<sup>6</sup> » de partage d'expériences et de connaissances sur des projets éco-conçus au niveau des zones côtières, porté par l'ONG *Conservation internationale* et la *Duke University* aux États-Unis.

<sup>4</sup> Guidance on Applying Working with Nature to Navigation Infrastructure Projects. EnviCom 16. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 <https://www.pianc.org/working-with-nature/>

<sup>5</sup> Kit d'Écoconception des ouvrages de Génie Civil. Association Française de Génie Civil, sous la direction de Patrick Guiraud. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 : <https://www.afgc.asso.fr/ressources/kit-ecoconception-des-ouvrages-de-genie-civil/>

<sup>6</sup> <https://www.conservation.org/projects/global-green-gray-community-of-practice>

## La prise en compte des objectifs écologiques pour la conception des ouvrages

Le point clé est de comprendre le fonctionnement naturel du site de projet pour réussir à y intégrer un ouvrage dont le dimensionnement (*design*) réponde à un cahier des charges technique et écologique. Les éléments de références pour la rédaction du cahier des charges dans le cadre d'un appel d'offres, sont développés dans le « **Cahier des Prescriptions et Recommandations Techniques** » (CPRT, DE-Monaco, 2022). Ce document fournit l'argumentaire et les objectifs constructifs dans l'approche opérationnelle pour éco-concevoir des ouvrages maritimes ou pour adapter les structures existantes (entretien et réhabilitation). Le dimensionnement technique, bien que complexe, est en général maîtrisé par les aménageurs, mais le volet écologique est nouveau. Les éléments présentés ci-après ont pour objectif d'expliquer la logique pour mettre en œuvre et réussir, d'un point de vue environnemental, cette nouvelle approche d'écoconception d'ouvrage. Pour cela, trois éléments de connaissance des écosystèmes sont incontournables (cf. *Annexe 1*) : **Comprendre le fonctionnement de l'écosystème, identifier les biotopes<sup>7</sup>** initiaux ou de référence du site d'installation (naturels ou artificiels si travaux d'entretien), **lister les espèces cibles** et leur stade de développement.

Classiquement, ces études d'état initial de l'environnement sont réalisées après l'avant-projet, lors des études réglementaires (EIE). Ce déphasage élimine toute option d'écoconception adaptée de l'ouvrage. Seules des « greffes » ou rajouts, a posteriori, peuvent tenter d'habiller le projet, avec une efficacité limitée et une durabilité faible due à des problématiques d'entretien ou de coût pénalisantes à long terme. Les chapitres ci-dessous mettent en avant les spécificités de Monaco afin de rendre ce Guide plus opérationnel dans cet environnement particulier.

## 2.1. Prise en compte de l'écologie des espèces

La majorité des organismes marins montrent des migrations ou déplacements liés à divers besoins en abris, alimentation et reproduction. Ainsi, les invertébrés fixés (coraux, gorgones, éponges...) ont des larves pélagiques qui assurent leur dispersion. De la même façon, les poissons en période de reproduction se rassemblent pour optimiser la fécondation des œufs. Les larves issues de cette reproduction se dispersent au gré des courants en milieu pélagique. Les post-larves vont alors coloniser une zone côtière, on parle de recrutement. Ces post-larves vont grandir dans ces « nurseries » côtières qui leur fourniront nourriture et abri, jusqu'à atteindre le stade de juvéniles à partir de laquelle leur taux de mortalité diminuera fortement (Figure 7).

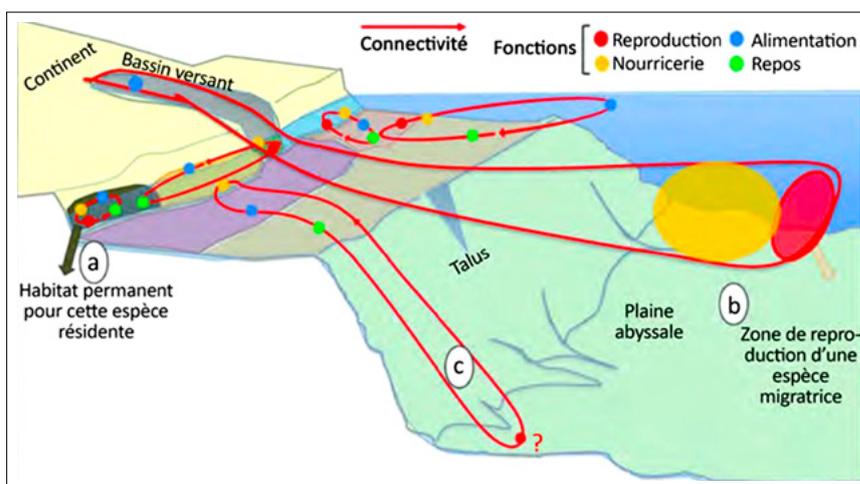


Figure 7 : Organisation et connectivité des habitats essentiels liés au repos-protection, l'alimentation et la reproduction chez les organismes marins (Cheminée et al. 2014).

<sup>7</sup> Milieu défini par des caractéristiques physicochimiques stables et abritant une communauté d'êtres vivants (ou biocénose). Le biotope et sa biocénose constituent un écosystème.

L'achèvement de ces cycles est indispensable pour la survie des espèces. Il repose sur un ensemble clé de 5 grands types d'habitats spécifiques bien différenciés « nurserie / corridor / zone de reproduction / nourricerie / abris (protection ou repos) » :

- **Nurserie** : habitat où les juvéniles peuvent trouver de la nourriture et des cachettes adaptées à leur taille dans des petits fonds entre 0 et 20 m.
- **Corridor** : Habitats assurant la connectivité et les déplacements des espèces entre les phases de leur cycle de vie. Les bons corridors écologiques permettent aux espèces de se déplacer en lien avec les abris (protection) et les nourriceries (alimentation) : herbiers de posidonies, zones intermédiaires de substrats durs (éboulis, cailloutis, récifs artificiels, épaves...).
- **Zone de reproduction** : Habitats plus profond de type coralligène où les espèces peuvent se reproduire, en particulier les espèces emblématiques (e.g. mérours, langoustes, chapons, dentis, sérioles...). Ces zones doivent proposer des habitats spécifiques au comportement des espèces au moment du frai (exposition au courant, profondeur, cavités spécifiques...).
- **Nourricerie** : Habitats variables et réparties sur plusieurs types de substrats en fonction des besoins des espèces et de l'écosystème : stades de développement, saisons, apports trophiques des bassins versants, productivité primaire...
- **Abris** : Habitats propices à la protection ou au repos des espèces. Les abris sont souvent dispersés sur les aires de vie des espèces, mais doivent avoir des dimensions adaptées à l'accueil et à leur défense (mise hors d'atteinte d'un prédateur).

D'autres fonctionnalités écologiques existent (filtration, fixation du sédiment, bioconstruction, minéralisation de la matière organique, etc.) et peuvent être associées aux objectifs d'un projet d'ouvrage éco-conçu, selon les enjeux locaux.

Les territoires occupés par les espèces évoluent au cours des différents stades de développement, des juvéniles aux jeunes adultes puis adultes (*Cheminée et al., 2014*). Il est important de bien vérifier que ces habitats et fonctions correspondent aux nécessités : créer un ouvrage adapté aux juvéniles benthiques côtier en haute mer n'aurait en effet aucun sens. C'est pourquoi il est important d'évaluer la connectivité (« traversabilité » ou niveau de frein au déplacement) entre les habitats artificiels et naturels. Le SMILE précise ces éléments en détaillant les objectifs prioritaires (cf. [Annexe 2](#)).

## 2.2. Influence du site d'installation

Les biotopes où sont installés la majorité des infrastructures monégasques correspondent aux petits fonds côtiers et aux fonds côtiers du médio à l'infralittoral (0m à - 30/50 m de fond). Ces infrastructures immergées créent de nouveaux habitats correspondants à des fonctions écologiques, attirant ainsi des espèces (*Le Diréach et al., 2003 ; Lapinsky et al., 2014*).

En ingénierie classique, les dimensions et la rugosité (aspérités et cavités) ne sont pas adaptées aux besoins de ces espèces, favorisant des espèces invasives ou ubiquistes, à faible valeur écologique (non spécialistes et de bas niveau trophique). Une uniformisation des peuplements et une baisse de biodiversité, sur les ouvrages artificiels non éco-conçus, est observée. L'écoconception a pour but de rendre tout ouvrage immergé propice aux espèces cibles locales, selon leurs stades de développement (juvéniles et/ou adultes).

Certains types d'habitats sont optimisés en fonction du biotope. Ils conditionnent la présence d'espèces à différents stades de leur développement (adultes, juvéniles / post-larves) recherchant des caractéristiques biotiques et physico-chimiques spécifiques. Par exemple, les adultes seront plus présents sur les ouvrages exposés à des conditions d'agitation élevées (brise lame ou digues jouant le rôle de « récifs » artificiels), alors que les juvéniles seront attirés par des conditions d'agitation faibles, dans les secteurs les plus abrités par petits fonds (milieu de type lagunaire) (cf. [Tableau 1](#)).

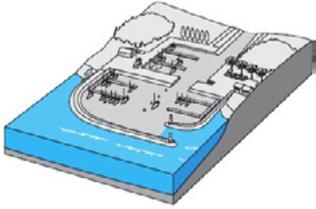
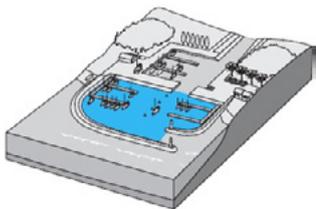
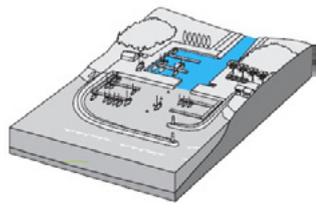
Sites d'installation des ouvrages et conditions d'agitation	Conditions d'agitation	Habitat préférentiel pour juvénile	Habitat préférentiel pour adulte	Taille des habitats (rugosité ou cavité)
<p>1</p> 	Exposé		●	Grande (dm à m) 
<p>2</p> 	Peu agité à calme	●	●	Moyenne (cm à dm) 
<p>3</p> 	Très calme	●		Petite (mm à cm) 

Tableau 1 : En fonction des sites d'installation, les conditions d'agitation sont différentes, attirant ainsi des espèces à divers stades de développement en fonction de leurs besoins (photos Direction de l'environnement).

**Rappel :** les sites doivent être de qualité d'un point de vue physico-chimique avec des usages présentant un faible risque de pression négative sur les espèces.

En conséquence, les équipements éco-conçus doivent être disposés et dimensionnés pour optimiser leur rôle d'habitat en offrant les fonctions écologiques adaptées aux besoins des espèces locales, à des stades juvéniles ou adultes, selon certaines périodes ou conditions favorables à leur installation.

## 2.3. Place centrale du biomimétisme

Le biomimétisme est une approche conceptuelle interdisciplinaire prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (*social, environnemental et économique*, cf. <https://ceebios.com/biomimetisme/>).

L'écoconception des ouvrages s'inscrit dans cet objectif afin de conserver une continuité structurelle (connectivité paysagère) avec les substrats naturels ainsi qu'une dimension esthétique.

L'objectif est de mimer les fonctions naturelles du milieu afin de reproduire leur usage pour les espèces. Par exemple, le tombant des Spélugues abrite une population remarquable protégée de corail rouge. La forme des cavités, leur orientation aux courants dominants, la profondeur, la luminosité et la rugosité des cavités naturelles abritant ces populations peut être reproduite pour mimer ce que la nature a créé (Figure 8).

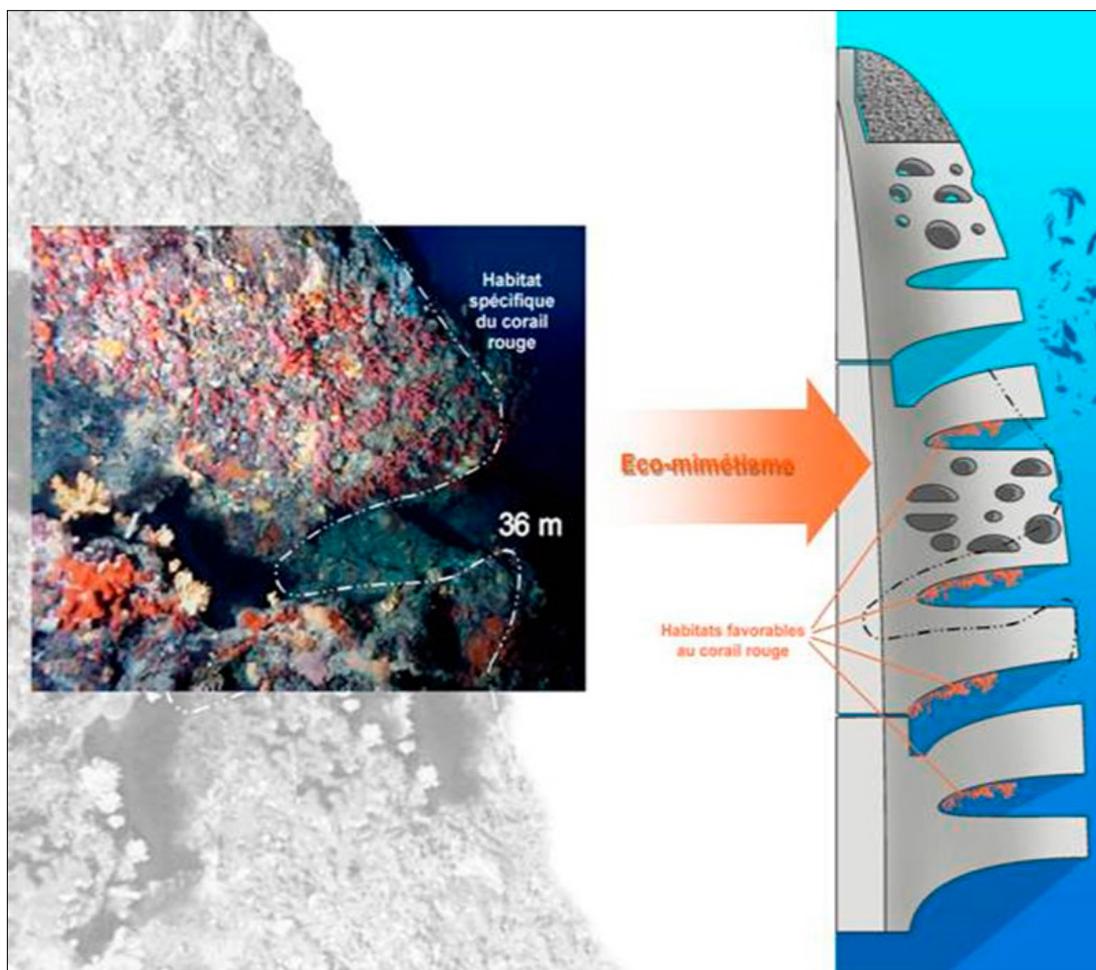


Figure 8 : A gauche le tombant des Spélugues, cavité naturelle abritant une colonie de corail rouge, à droite une paroi en béton biomimétique, éco-conçue mimant (en pointillé noir) les caractéristiques naturelles favorables au corail : forme, profondeur...

Il est actuellement possible de **mimer les roches naturelles et les caractéristiques visuelles des paysages** sous-marins. Mais le biomimétisme doit être conduit de façon rigoureuse et scientifiquement justifiée, pour éviter les solutions purement esthétiques qui ne rempliraient aucune fonction naturelle et s'apparenteraient à du greenwashing. Pour illustration, des opérations de substrats biomimétiques sont visualisées ci-après.

- **Effet obtenu avec des peaux en silicone utilisées en contre-moule** pour imprimer à la surface des bétons la rugosité millimétrique à centimétrique imitant la surface des roches naturelles. Golfe d'Ajaccio, Office de l'Environnement Corse, (Figure 9).

28/09/2021

29/06/2022

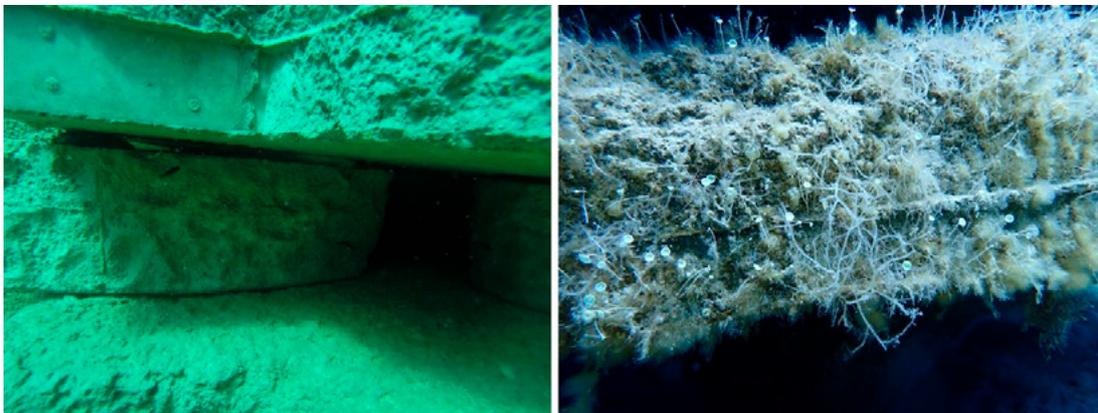


Figure 9 : Exemple de substrats biomimétiques installés en Corse et colonisation après 9 mois (Photo : S. Pioch)

- **Blocs de carapace de digue de protection** éco-conçus pour créer des failles et des dépressions naturelles propices à la faune et à la flore locales (Figure 10). Headland Park, baie de Sidney (Australie) 2012.

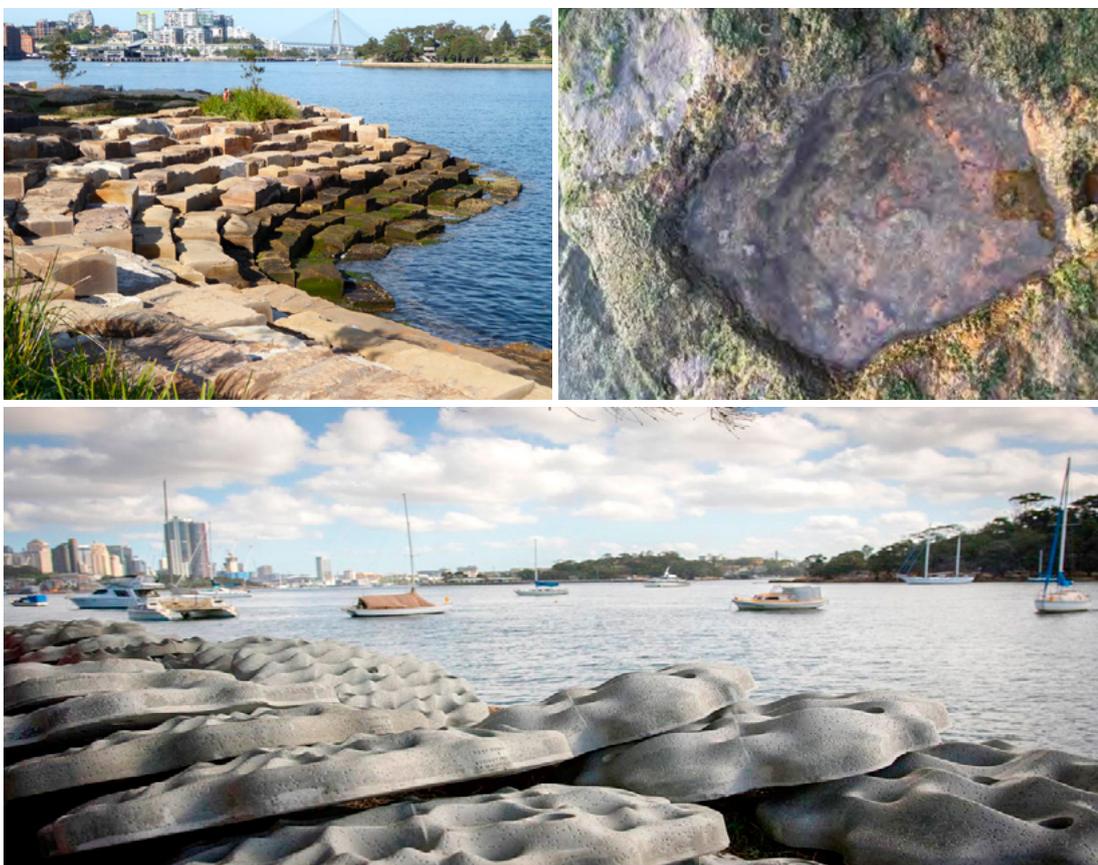


Figure 10 : Haut à gauche intégration esthétique de la digue de protection d'Headland Park (Sydney, Australie) ; haut à droite détail d'un bassin éco-conçu ; en bas détail des panneaux de quais en béton (photos : K. Dafforn)

- **Création de blocs biomimétiques expérimentaux imprimés 3D** (essais réalisés à Monaco), ces blocs reproduisent les formes des roches coralligènes naturelles présentes à Monaco (d'après les observations en plongée de la Direction de l'Environnement – Raphaël Simonet).

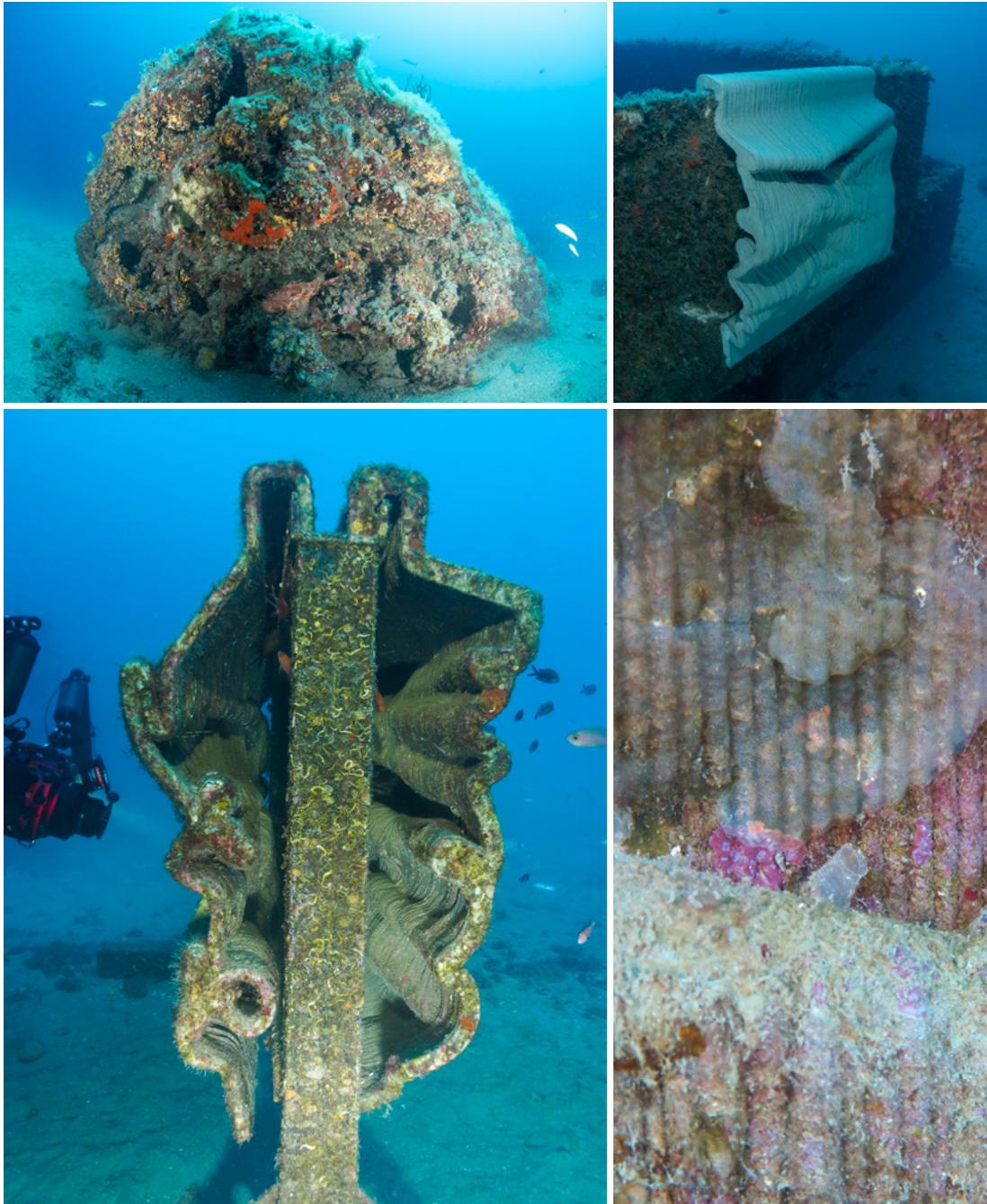


Figure 11 : Reproduction d'un habitat coralligène par mimétisme, à haut à gauche roches naturelles, haut droit bloc imprimé 3D avant colonisation ; en bas bloc imprimé 3D après 3 ans, à gauche vue de côté, à droite détail de la colonisation © Direction de l'Environnement



A large, stylized number '3' is the central graphic element. It is composed of several overlapping shapes in shades of blue, purple, and red. The top part is a purple-to-blue gradient, the middle is a solid blue, and the bottom is a red-to-pink gradient. The number '3' is cut out from the center, revealing the white background.

ÉLÉMENTS  
ENVIRONNEMENTAUX  
DE LA MÉTHODOLOGIE  
D'ÉCOCONCEPTION



L'écoconception relève d'une approche systémique. Un dialogue entre écologue et génie civiliste doit s'établir au démarrage du projet (cf. Figure 5). Du point de vue environnemental, le dimensionnement d'ouvrages artificiels doit répondre à des besoins éthologiques (fonctions et habitats) d'espèces cibles au sein d'un biotope naturel à maintenir (courantologie, luminosité, substrat). L'aménagement maritime peut dès lors devenir un outil de développement durable inséré dans une politique de gestion et de préservation de la biodiversité. Cette politique d'aménagement repose sur deux axes :

- 1. Gestion et arrêt des pressions** : l'installation ne peut se faire qu'après vérification de la qualité biophysique des zones de projet : arrêt des mouillages sur les herbiers ou le coralligène, enlèvement ou séquestration des vases polluées, gestion des apports d'eaux polluées (eaux grises et noires, eaux de ruissellement des parkings, aires de carénage, aire d'avitaillement non équipées...) et enfin minimisation de l'exposition aux antifoulings biocides (phtalates, cuivre, cadmium...) grâce à une politique d'utilisation de produits écologiques (e.g. protection des coques par ultrasons, film siliconé autocollant (« SilicOne© » proposés par les fabricants Hempel ou Mc Glide), nettoyage à flot ou antifouling écologique (Nc-coat©)). Ainsi, la gestion intégrée des déchets solides et liquides, l'arrêt de la destruction des fonds sensibles et une bonne qualité de l'eau sont des préliminaires indispensables.
- 2. Gérer la biodiversité** : la Stratégie Nationale pour la Biodiversité vise à renforcer ou restaurer les écosystèmes monégasques. Les ouvrages naturels sont en relation avec les ouvrages naturels. Les infrastructures éco-conçues peuvent désormais participer à renforcer la résilience écologique côtière.

### 3.1. Exemples d'ouvrages éco-conçus

Après une phase expérimentale jusqu'en 2010, **les projets se développent du fait d'incitations financières, d'obligations réglementaires ou d'exigences sociales écologiques** exprimées avec force. De nombreux pays et entreprises commencent à communiquer sur les quelques projets réalisés comme à Monaco, France, Angleterre, Etats-Unis, Mexique, Panama, Italie, Australie, Emirats Arabes Unis, Koweït, Vietnam, etc. **Les surcoûts sont en général de quelques %** (1 à 2 en moyenne), pour l'écoconception mise en œuvre dès la phase d'étude de faisabilité. Ce **coût augmente** plus si cette approche est mise en place tardivement. Il est donc important que l'écoconception intervienne au niveau de la conception du projet et non après que celui-ci ait été défini, ou pire déjà mis en œuvre.

À Monaco et en France, y compris les territoires français d'outre-mer, on pouvait dénombrer en 2020 au total 18 ouvrages éco-conçus de différente nature : mouillage, lest, pipeline, émissaire, digue, caisson, brise-lame et récif artificiel (cf. Figure 12).

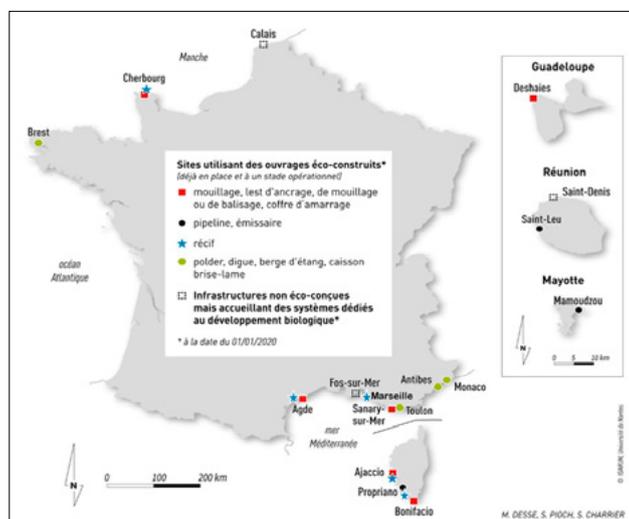


Figure 12 : Localisation des sites littoraux et maritimes français et monégasques utilisant des ouvrages éco-conçus à un stade opérationnel (non expérimental) au 1/01/2020 (Pioch et Desse, 2023)

De nombreux ouvrages ont déjà été réalisés, nous en présentons synthétiquement quelques-uns.

### 3.1.1 Monaco et Corse : caisson et chambre jarlan, lest de coffre d'amarrage

Exemple du projet réalisé à Monaco de caisson jarlan (extension en mer) et d'un coffre d'amarrage pour bateau de plongée sur le site de l'épave du Toulonnais en 2022 :

Objectif technique des ouvrages	Objectif écologique ou biomimétique	Matériaux et techniques	Coût	Résultats
Caissons : chambre de caisson jarlan et parois externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nurserie et abris</li> <li>Nourricerie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rugosité par moulage élastomère (<math>\mu\text{m}</math> à <math>\text{cm}</math>), panneaux et habitats artificiels intégrés à l'ouvrage, béton BFUP.</li> <li>Matricage, rainurage et ponçage des parois externes</li> </ul>	Non comm.	Suivi par Mareterra en cours
Lest de coffre d'amarrage 10 t. (le Toulonnais)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coralligène</li> </ul>		7 500 € / lest idem ouvrage classique	Suivi par la DE en cours

**NB** : d'autres ouvrages éco-conçus ont été immergés à Monaco dans un objectif expérimental : blocs de carapace de digue « rock-pool » (Fontvieille), blocs de digue équipés de support pour la colonisation d'herbier de posidonie (Fontvieille), paroi de quai imprimé 3D (Fontvieille), récif artificiel coralligène imprimé 3D, bioprotection d'ouvrage par électrolyse (extension en mer). Ces ouvrages sont des tests très intéressants, mais il n'ont pas fait l'objet d'une conception ex-ante, ni d'une utilisation lors de la mise en place des ouvrages supports, ils n'ont pas d'usage technique fonctionnel.

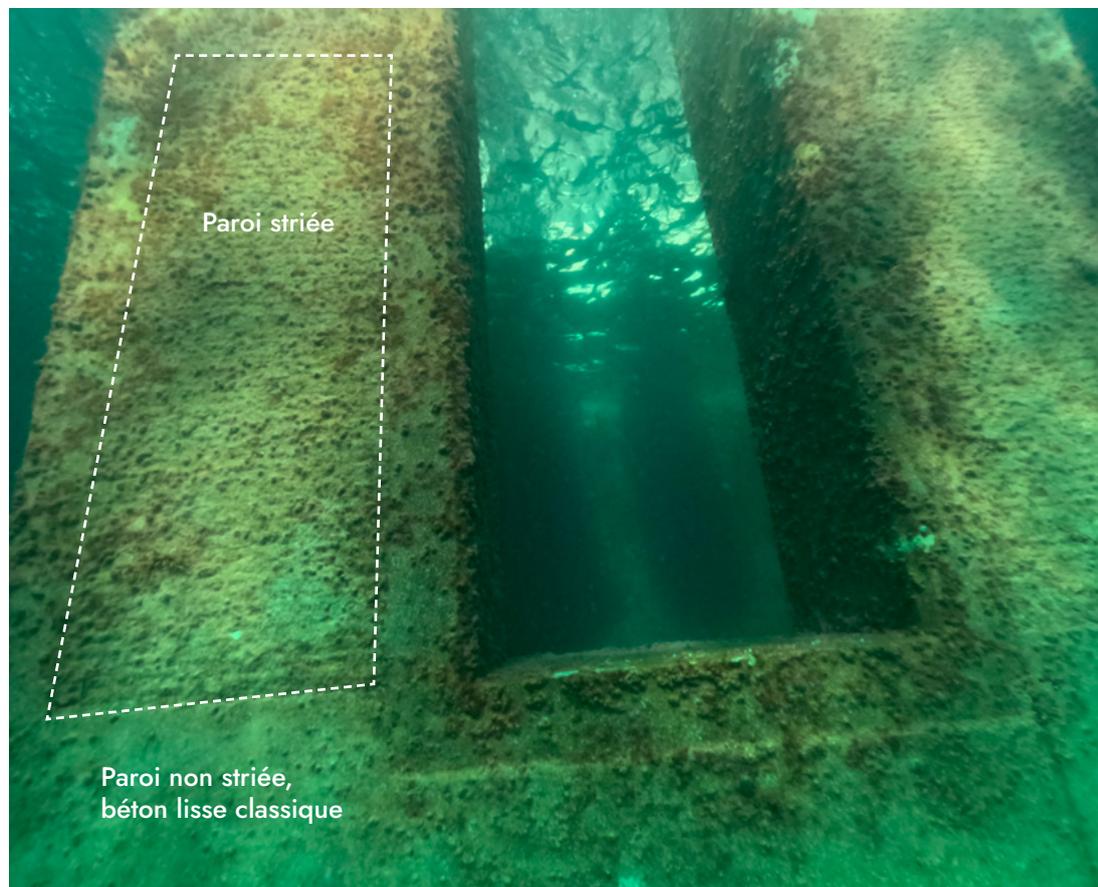


Figure 13 : Photo des parois externes (façades) des caissons jarlan. Différence nette de colonisation entre les parois striées (éco-conçues) et celles lisses en béton (classique), photo : Direction de l'Environnement-Monaco



Figure 14 : A gauche coralligène (habitat cible) et à droite photogrammétrie 3D du lest biomimétique du Toulonnais (photo : Direction de l'Environnement-Monaco)



Figure 15 : A gauche l'ancien coffre, ouvrage cubique « classique » à droite le lest éco-conçu, noter les bancs de poissons présents sur la structure éco-conçue qui fournit un habitat de type coralligène (photo : Direction de l'Environnement-Monaco)

**Exemple du projet réalisé en Corse, Bonifacio, baie de Sant'Amanza avec la mise en place de mouillages organisés (ZMEL) de grande plaisance (Yacht de 20 à 60 m de long) en 2021 :**

Objectif technique des ouvrages	Objectif écologique ou biomimétique	Matériaux et techniques	Coût	Résultats
Lest de coffre d'amarrage 45 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coralligène, abris et nurserie</li> <li>• Protection herbier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rugosité par moulage peau silicone (<math>\mu\text{m}</math> à <math>\text{cm}</math>), béton bas carbone.</li> <li>• Habitats inspirés des fonds locaux et espèce protégée (mérou)</li> </ul>	Idem ouvrage classique	Suivi par la STARESO : positif

Les cavités ont pour objectif d'abriter des espèces protégées comme les jeunes mérous bruns ou le corb, et des espèces halieutiques comme le sar, le denti, le chapon ou le rouget.

Le suivi est en cours, mais les plongées réalisées en juin 2022 et septembre 2023 ont permis d'identifier les espèces cibles comme le mérou, le denti, les sars, le chapon, la sérieole et le rouget sur les ouvrages éco-conçus (suivi réalisé par la Stareso et l'Université de Corte).

### Lest classique (non éco-conçu)



### Lest éco-conçu avec béton mimétique



3 semaines après l'immersion (sept. 2021)

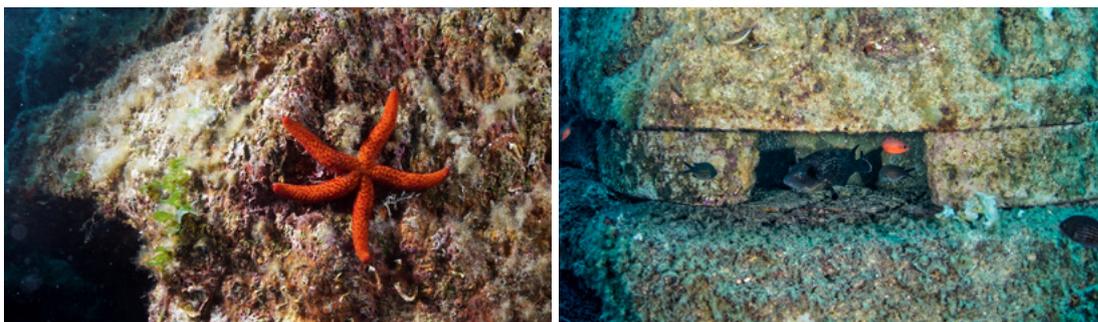


Figure 16 : Deux photos du haut, lests classiques, deux photos du milieu en dessous, lest éco-conçu avec béton rugueux mimant la roche naturelle du micron au cm lors de l'immersion sept 2021 (photo : S. Pioch), deux photos du bas lest éco-conçu 2 ans après immersion, présence d'un jeune mérou brun (*Epinephelus marginatus*) à trou, (photos : S. Pioch, Direction de l'Environnement)

### 3.1.2 Mayotte, Mamoudzou : canalisation sous-marine

Exemple de pose d'émissaire sous-marin dans le lagon de Mayotte, reliant Mamoudzou à Petite Terre, avec des lests éco-conçus, en 2009 :

Objectif technique des ouvrages	Objectif écologique ou biomimétique	Matériaux et techniques	Coût	Résultats
Canalisation sous-marine (AEP) écoconception des cavaliers de lestage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abris et nurserie d'habitats corallien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rugosité par désactivation du béton en surface (mm à cm), habitats artificiels intégrés à l'ouvrage.</li> </ul>	+ 1% sur les 6 millions d'€	Suivi par Marex : positif

Le suivi, après 36 mois, a mis en évidence des familles appartenant aux espèces cibles (com. pers. Wickel). Les comptages ont établi **jusqu'à 40 poissons par lest éco-conçu**, alors que sur l'ancienne canalisation seuls 1 à 3 poissons étaient comptabilisés par lest (cf. photos).

**La durabilité et l'entretien de l'ouvrage après 14 ans sont identiques à ceux d'une canalisation classique**, sans aucune dégradation constatée (discussion avec la SIEAM) tout en assurant des fonctions écologiques importantes. Le design de ce lest est strictement adapté aux espèces tropicales de l'océan indien. Pour la méditerranée, les espèces et les habitats sont différents, nécessitant une adaptation de la structure morphologique du cavalier.

Lest classique



Colonisation faible



Lest éco-conçu



Colonisation importante



## Colonisation d'un lest éco-conçu après 14 ans



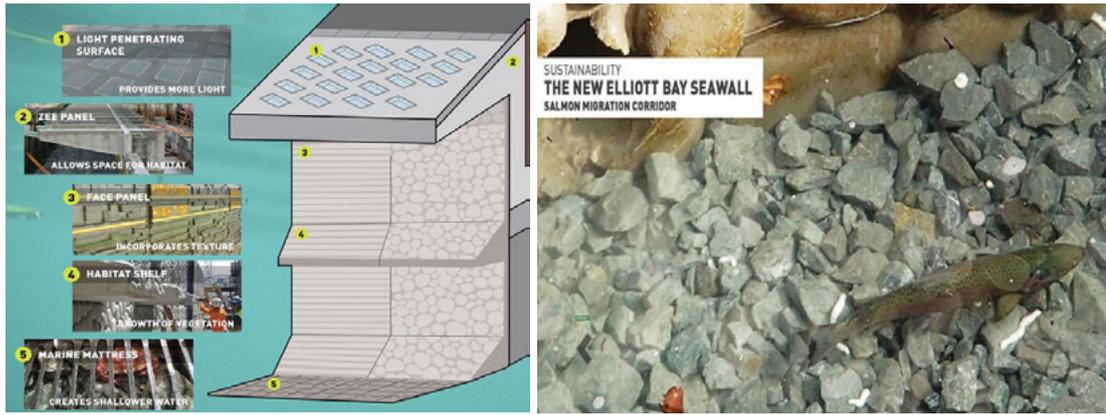
Figure 17 : Haut, lests en béton classiques (photos : NEGRI et DE), bas gauche lest éco-conçu avant immersion avec béton rugueux et une fonction d'habitat dégagée entre les deux parties du bloc, bas droite lest colonisé après 13 ans (photos : Egis eau et M. Pinault)

### 3.1.3 Etats-Unis, Seattle : quai promenade en front de mer

Exemple de promenade de front de mer (quai et parapet) réalisée à Seattle, avec écoconception des quais et des fondations de soutènements, en 2012 :

Objectif technique des ouvrages	Objectif écologique ou biomimétique	Matériaux et techniques	Coût	Résultats
Quai et promenade de front de mer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corridor (pour saumon), nurserie et abris</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rugosité par moulage (paroi moulée et texturation), béton bas carbone.</li> <li>Habitats inspirés des fonds locaux et espèce protégée (mérrou)</li> </ul>	< 2% sur les 410 million \$US	Suivi par l'université : positif

Le quai de la promenade centrale d'Elliott bay à Seattle a été réalisé avec un **double objectif de protection contre les submersions marines et de corridor de migration des saumons juvéniles** (Toft et al. 2013).



Avant

Après

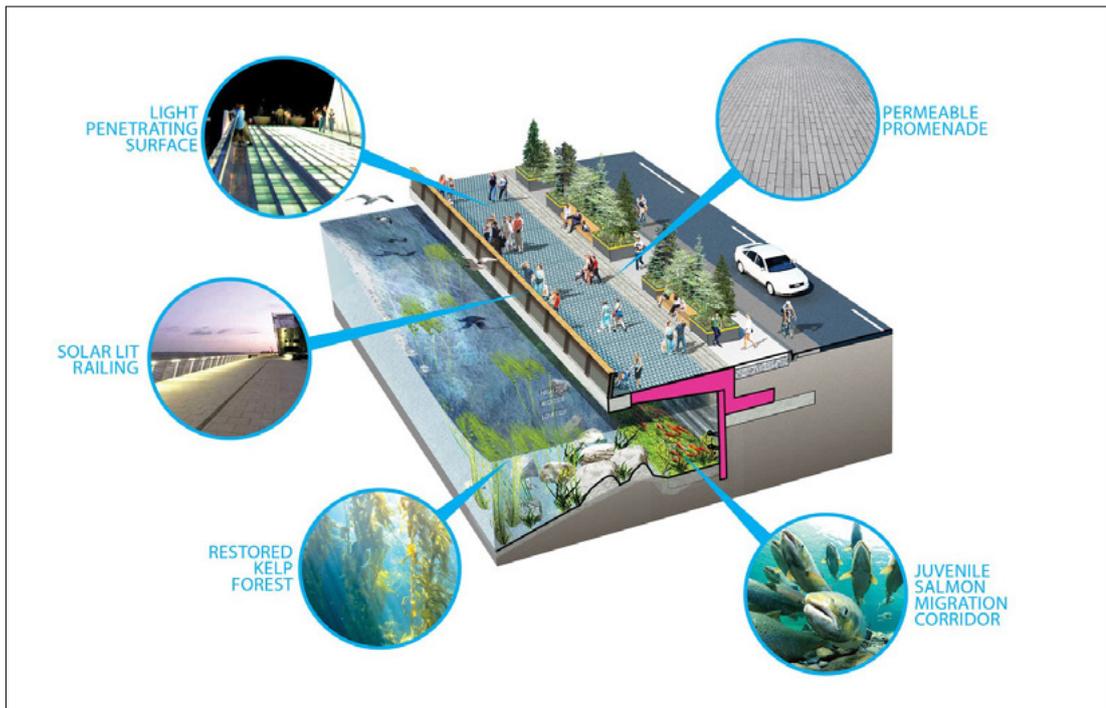


Figure 18 : Quai promenade éco-conçu de la ville de Seattle (photos : Office of the waterfront and civic projects, <https://waterfrontseattle.org/waterfront-projects/seawall> et Sawyer et al. 2020).

Des essais à petite échelle de quais et de bétons mimétiques ont d'abord été testés pour évaluer l'intérêt des approches éco-conçues (Cordell *et al.* 2017). Ils ont permis de valider la possibilité de créer des habitats en eau peu profonde et d'offrir des fonctions d'abris et de nurserie, grâce à la présence de proies pour les saumons juvéniles en migration. Le projet, après ces essais concluants, a intégré dès la phase de faisabilité le design adapté aux objectifs de nurserie et d'abris ainsi que de corridor migratoire pour saumons juvéniles (Sawyer *et al.*, 2020).

Il est intéressant de noter que ces techniques ont ensuite été étendues sur plus d'un kilomètre de nouvelles digues éco-conçues, avec des améliorations comme l'ajout de puits de lumière pour augmenter la pénétration de la lumière dans le couloir de migration.

Les suivis réalisés ont démontré l'efficacité de ces infrastructures éco-conçues qui sont aujourd'hui la nouvelle norme pour les aménagements côtiers dans l'Etat de Washington (Accola *et al.*, 2022).

### 3.1.4 Etats-Unis, Floride, brise lame et brise clapot « sea-hive »

Exemple de brise lame et d'un brise clapot éco-conçu, réalisé à Pompano Beach, Wahoo bay, Floride en 2022 :

Objectif technique des ouvrages	Objectif écologique ou biomimétique	Matériaux et techniques	Coût	Résultats
<ul style="list-style-type: none"> <li>Brise lame pour lutter contre l'érosion côtière en mer</li> <li>Protection de quai front de mer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protection et nourricerie poissons.</li> <li>Supports pour coraux et mangroves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cavités réalisées dans le béton et tunnel traversant pour optimiser la circulation des espèces (poissons).</li> <li>Biomimétisme de la structure pour la colonisation par la mangrove (graines et racines dans les cavités)</li> </ul>	Expérimentation	Suivi par l'université de Miami en cours

#### Protection de quai classique (pal-planche ou quai béton lisse)



Figure 19a : Deux photos en haut, ouvrage classique en palplanche de protection de quai (promenade), six photos en dessous, ouvrage éco-conçu de type © Sea-Hive, à noter colonisation naturelle par des graines de mangrove des failles disposées pour leur accueil (photos : S. Pioch).

Protection de quai éco-conçu

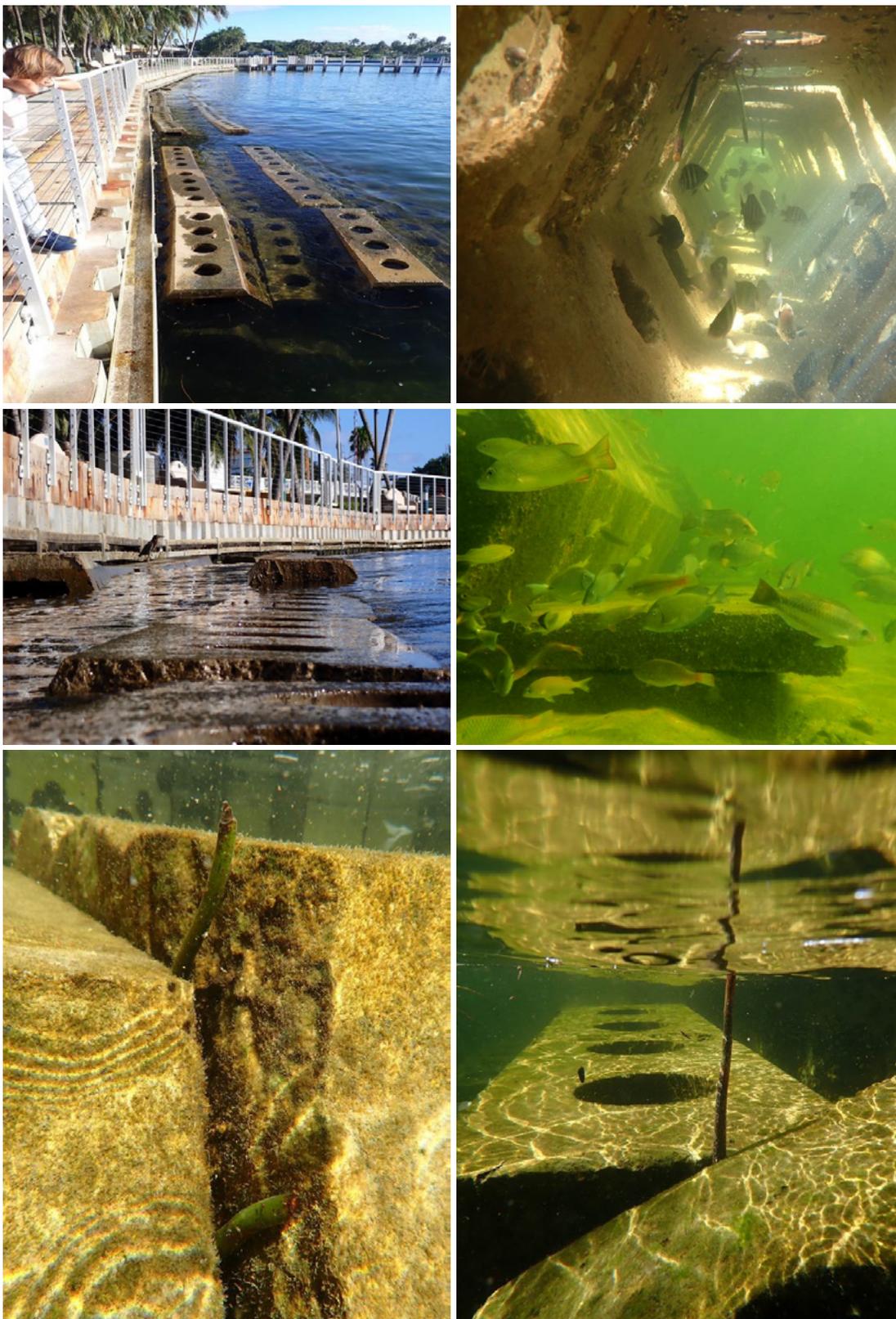


Figure 19b : Deux photos en haut, ouvrage classique en palplanche de protection de quai (promenade), six photos en dessous, ouvrage éco-conçu de type © Sea-Hive, à noter colonisation naturelle par des graines de mangrove des failles disposées pour leur accueil (photos : S. Pioch).

La finalité est de proposer une alternative aux quais en palplanche pour les ouvrages portuaires (Fontvieille, Port Hercule) et aux boudins géotextiles, en mer, pour les ouvrages de type brise lame côtiers de lutte contre l'érosion (utilisation possible dans la baie du Larvotto).

## 3.2.

## Comment dimensionner un ouvrage éco-conçu adapté à l'environnement monégasque

### 3.2.1 Dimensionner des ouvrages en fonction des besoins des espèces cibles prioritaires

#### 3.2.1.1 Généralités sur les espèces cibles

L'écoconception des ouvrages doit être adaptée en priorité à la liste d'espèces cibles déterminée à partir des enjeux locaux et favoriser une faune et une flore indigène. Dès lors, il s'agit de déterminer les besoins en habitats de ces espèces. Les premières études éthologiques montrent que la satisfaction des besoins vitaux des espèces a une influence directe sur leur croissance et leur survie (Kuroki, 1952). Ces besoins vitaux conditionnent la colonisation, à certains stades de développement, de certains habitats (ou biotopes).

Pour concevoir des habitats artificiels adaptés aux espèces cibles, il s'agit d'abord de les classer en fonction de leur groupe éthologique, en relation avec leurs besoins en habitat selon la proposition faite par Nakamura (1985) (Figure 20).

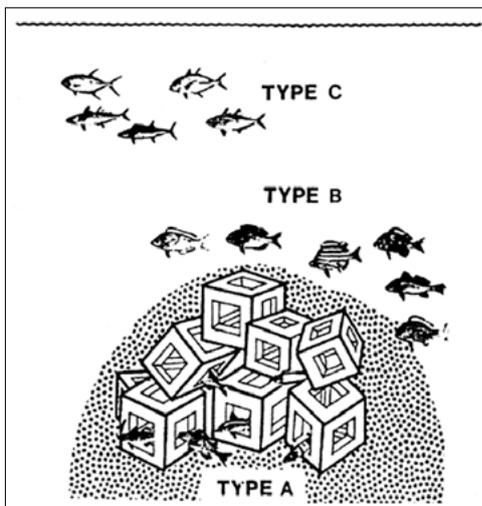


Figure 20 : Types d'espèces cibles A, B ou C en fonction de leur relation avec un habitat artificiel (d'après Nakamura, 1985)

Afin de faciliter le dimensionnement d'ouvrages éco-conçus, les espèces sont définies d'un point de vue éthologique selon trois groupes homogènes appelés « types d'espèces cibles », déterminés en fonction de leur relation avec un habitat artificiel (ou naturel) :

- **Espèces benthiques Type A (ou I)** ou cryptiques vivant sur le fond et dont l'habitat naturel est un substrat dur présentant généralement des cavités sombres et complexes, et avec lequel elles sont en contact.
- **Espèces démersales Type B (ou II)** côtières vivant sur ou à proximité du fond, dont l'habitat naturel est un substrat dur ou meuble présentant dans le cas du substrat dur un relief et une ou des cavités de taille moyenne à grande. Ces espèces restent en contact visuel ou sonore avec les substrats durs et à proximité du fond.
- **Espèces pélagiques Type C (ou III)** vivant en pleine eau et recherchant la proximité des remontées abruptes du fond ou présentant un très fort relief (créant des courants d'upwelling<sup>8</sup> ou micro-upwelling).

<sup>8</sup> Upwelling : courants ascendants d'eaux profondes riches en nutriments.

La forme, ou "design", des ouvrages d'art immergés doit donc prendre en compte ces caractéristiques éthologiques issues d'observations empiriques scientifiques (Nakamura, 1985 ; Pioch, 2008). Le **Tableau 2** définit les formes des ouvrages adaptés aux besoins de ces 3 catégories d'espèces.

Types d'espèces cibles	Comportements	Habitats naturels recherchés	Catégories d'HA adaptés	Complexité du module éco-conçu			Besoin des espèces
<b>A</b>	<b>Benthiques</b>  Faible déplacement Échelle locale	Substrats durs présentant des cavités sombres et complexes	1	Abris nombreux et complexes	Hauteur faible Cavités $\geq$ espèces cibles	Espaces internes proches de la taille des espèces benthiques (cavités étroites et souvent cryptiques)	Majorité ou partie du corps en contact avec l'habitat artificiel
<b>B</b>	<b>Démersales</b>  Déplacement moyen à important Échelle régionale et nationale	Substrats durs présentant des cavités moyennes à grandes	2	Abris peu complexes	Hauteur moyenne Cavités > hauteur et largeur espèces cibles	Espaces internes suffisamment grands pour que les poissons démersaux puissent visuellement s'identifier entièrement et se déplacer dans les cavités sans entrer en contact avec l'HA	Peu de contact physique avec l'habitat artificiel Mais nage à proximité
<b>C</b>	<b>Pélagiques</b>  Grands déplacements migrateurs Echelle internationale	La pleine eau et la proximité des remontées de fond abruptes ou présentant un très fort relief ( <i>upwelling</i> )	3	Pas d'abris	Hauteur grande Cavités ou non	Forme créant des perturbations courantologiques et/ou une position entre la surface et la moitié de la colonne d'eau au-dessus de la thermocline moyenne	Éloignée de l'HA et vivant en pleine eau

Tableau 2 : Relation entre les types d'espèces cibles et les designs des habitats artificiels (HA) créés par des ouvrages éco-conçus

Le design des ouvrages éco-conçus devra donc spécifier quelle(s) fonction(s) est/sont privilégiée(s) et pour quelle(s) espèce(s), à quel(s) stade(s) et dans quel(s) secteur(s) de l'ouvrage ou de la zone aménagée.

L'écoconception repose sur l'idée qu'un ouvrage peut non seulement diminuer les impacts de l'ouvrage sur l'environnement mais également optimiser l'accueil de la biodiversité. Il s'agit d'identifier les caractéristiques biotiques et abiotiques de l'écosystème marin dont on souhaite s'inspirer, pour tenter de les reproduire. Pour cela les ouvrages sont dimensionnés en fonction des besoins des espèces locales.

Certaines espèces présentent un intérêt particulier sur la base d'enjeux écologiques (espèces ingénieurs, parapluie, clé de voute) et / ou sociaux-environnementaux (pêche, puits à CO<sub>2</sub>, écotourisme...). Localement, les espèces en danger, sous pressions anthropiques fortes et qui soutiennent des fonctions écosystémiques importantes, en particulier liées au changement climatique (e.g. l'herbier de posidonies cf. chapitre 3.4.1) sont à prioriser.

Toutes les espèces de poissons, crustacés, algues, bryozoaires, mollusques, hydriaires, vers, etc. sont importantes pour le bon fonctionnement d'un milieu naturel et pourraient être ciblées pour dimensionner les ouvrages. Mais il faut noter que certaines espèces subissent de plus fortes pressions du fait notamment de prélèvements liés à la pêche, ou à cause de leur croissance lente.

### 3.2.1.2 Spécificités méditerranéennes et monégasques

D'après les inventaires et suivis réalisés en Principauté, les populations d'espèces Nord-occidentales méditerranéennes côtières semblent stables<sup>9</sup>, sauf pour les espèces cibles de la pêche du fait de pressions locales et extérieures à Monaco (pêches de loisir et professionnelle). Les besoins de ces espèces sont donc importants à considérer pour l'écoconception.

Ces principales espèces halieutiques et leurs habitats sont proposées ci-dessous (cf. Figure 21). Les noms scientifiques<sup>10</sup> sont précisés au Tableau 3.

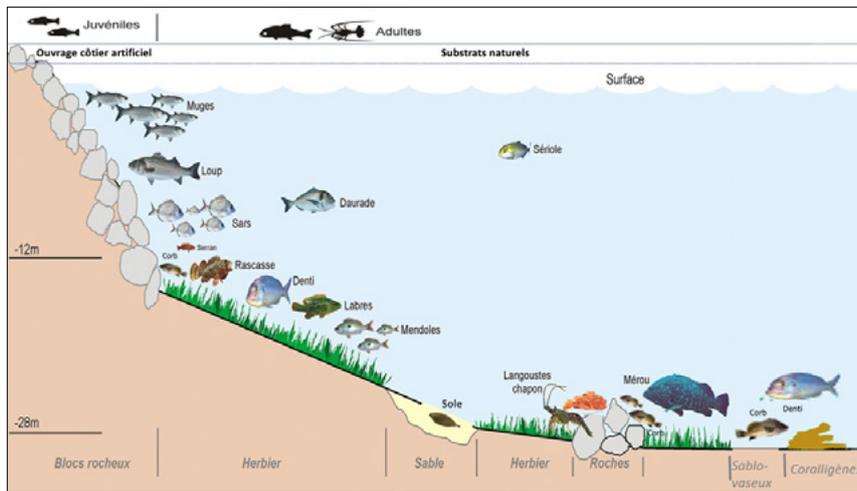


Figure 21 : Exemple de distribution des espèces monégasques, selon la bathymétrie et les types de fonds marins artificiel et naturels (conception : S. Pioch et dessin : J.L. Feron)

A noter qu'un gradient juvéniles / adultes s'opère entre les zones côtières peu profondes et celles plus profondes en mer, confirmant le rôle de nurserie des infrastructures artificielles côtières, notamment portuaires, déterminé par les travaux de Bouchouca (2017) (cf. Figure 22).



Figure 22 : Exemples d'espèces intra-portuaires rencontrées en méditerranée d'en haut à gauche, en bas à droite : banc de chinchards (*Trachurus trachurus*) et de sars (*Diplodus vulgaris*), jeune langouste (*Palinurus elephas*) et (photos : S. Pioch et G. Pergent)

<sup>9</sup> Algues et phanérogames : Verlaque et Bernard (1998), Soltan (2002) ; invertébrés de substrats durs (notamment des grandes espèces épigées), dont les Spongiaires, les Cnidaires, les Bryozoaires et les Echinodermes, ainsi que des indicateurs biologiques : Francour et al. (1999), Harmelin (2003), Perez et al. (1999, 2003, 2005) ; poissons et recensements des espèces protégées (mérou, corbs) : Francour (1998, 2005), « Groupe d'Etude du Mérou » (Anonyme, AMPN, 1998a, 1998b).

<sup>10</sup> D'après : Louisy P., 2002 « Guide d'identification des poissons marins, Europe et méditerranée », ed. Ulmer, 430p.

Les pressions anthropiques sur certaines espèces côtières permettent d'effectuer un classement d'espèces cibles plus ou moins prioritaires car leurs stocks sont en déclin ou surexploités (Tableau 3, en gras).

Compartiment (type éthologique)	Espèces	Pression
<b>Benthique</b>	<b>Langouste</b> ( <i>Palinurus elephas</i> )	+++
	Seiche ( <i>Sepia officinalis</i> )	-
	<b>Poulpe</b> ( <i>Octopus vulgaris</i> )	++
	<b>Chapon</b> ( <i>Scorpaena scrofa</i> )	+++
	Rascasse ( <i>Scorpaena notata</i> )	+
	Murène ( <i>Muraena helena</i> )	-
	Congre ( <i>Conger conger</i> )	-
	<b>Grande cigale</b> ( <i>Scyllarides latus</i> ) <b>protégé</b>	<b>Protection</b>
<b>Démersal</b>	<b>Rouget</b> ( <i>Mullus surmuletus</i> )	++
	Muge ( <i>Chelon labrosus, Liza aurata et L. ramada</i> )	-
	<b>Calamar</b> ( <i>Loligo vulgaris</i> )	++
	Pageots ( <i>Pagellus erythrinus et P. acarne</i> )	+
	<b>Sar</b> ( <i>Diplodus sargus</i> )	++
	<b>Mérou</b> ( <i>Epinephelus marginatus</i> ) <b>protégé</b>	<b>Protection</b>
	<b>Corb</b> ( <i>Sciaena umbra</i> ) <b>protégé</b>	<b>Protection</b>
	<b>Loup</b> ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	+++
	<b>Daurades (royale et grise)</b> ( <i>Sparus aurata et Spondyliosoma cantharus</i> )	++
<b>Denti</b> ( <i>Dentex dentex</i> )	+++	
<b>Pagre</b> ( <i>Pagrus pagrus</i> )	++	
<b>Pélagiques</b>	Baraccuda ( <i>Sphyræna viridensis</i> )	-
	Maquereau ( <i>Scomber scombrus</i> )	-
	<b>Sérieole</b> ( <i>Seriola dumerili</i> )	+++

Tableau 3 : Liste des espèces cibles présentes dans, ou à proximité, des infrastructures maritimes monégasques et niveau de pression anthropique.

**NB** : Les espèces pélagiques comme le thon rouge, l'espadon, les bonites ou la coryphène (non listées dans le tableau ci-dessus) peuvent être présentes dans ou à proximité des infrastructures côtières. Cette présence est exceptionnelle, car leur zone d'évolution préférentielle reste le large (pélagique). Ces espèces ne seront donc pas ciblées. Les sérieoles et les barracudas, espèces pélagiques fréquentant régulièrement les biotopes côtiers, présentent un intérêt pour l'écoconception. Le barracuda étant une espèce faiblement ciblée, seule la sérieole (*Seriola dumerili*) sera retenue pour dimensionner des ouvrages selon ses besoins éthologiques.

Les pressions les plus fortes, symbolisées par le signe «+++», et «++» permettent d'identifier **les espèces cibles** : langouste (*Palinurus elephas*), poulpe (*Octopus vulgaris*), chapon (*Scorpaena scrofa*), rouget (*Mullus surmuletus*), calmar (*Loligo vulgaris*), sar (*Diplodus vulgaris*), loup (*Dicentrarchus labrax*), daurades (*Sparus aurata* et *Spondyliosoma cantharus*), denti (*Dentex dentex*), pagre (*Pagrus pagrus*), sériole (*Seriola dumerili*).

Le mérour (*Epinephelus marginatus*), la grande cigale (*Scyllarides latus*) et le corb (*Sciaena umbra*) font l'objet d'une protection spéciale, ils sont donc inclus à la liste des cibles prioritaires.

D'autres espèces et habitats s'ajoutent à cette liste d'espèces à cibler pour le dimensionnement des ouvrages. L'herbier de posidonie (*Posidonia oceanica*) est un **habitat prioritaire et une espèce protégée** (la grande nacre étant strictement inféodées aux herbiers marins, protéger l'herbier favorise cette espèce). Même si aucun projet n'a à ce jour été conduit, des essais innovants peuvent être réalisés par exemple sur des lests éco-conçus (future Zone de mouillage de la baie du Larvotto), les ouvrages portuaires des digues de Fontvieille ou les enrochements situés à l'Est de l'extension en mer ([voir tous les sites sur la carte du chap. 4](#)). Les travaux de Gérard Pergent, encourageants sur la question de la restauration des herbiers, peuvent servir de base à l'écoconception de futurs ouvrages adaptés à la posidonie ([cf. chapitre 3.4.1](#)).

D'autres espèces sont importantes localement. Il s'agit du corail rouge et des algues rouges (calcaires coralligènes et *Lithophyllum byssoides*) ou brunes (cystoseires). Le corail rouge fait l'objet d'une étude dédiée réalisée par Denis Allemand ([cf. annexe 3](#)).

A noter que le coralligène, constitué de plusieurs espèces d'algues encroûtantes (algues calcaires capables de bio-construire des massifs), abrite une biodiversité remarquable constituant un réservoir d'adultes reproducteurs très important à Monaco.

**Sur la base de ces éléments, les espèces cibles prioritaires qui pourront guider le dimensionnement des ouvrages éco-conçus monégasques** se répartissent selon 3 types :

- **Benthiques** : langouste, chapon, poulpe, grande cigale, corail rouge, posidonie, algues (coralligène, lithophyllum et cystoseire).
- **Démersales** : rouget, sar, mérour, corb, loup, daurades, denti, pagre, calmar.
- **Pélagiques** : sériole.

Rappelons qu'à ces espèces cibles prioritaires, doit s'ajouter un objectif de biomimétisme avec les substrats naturels locaux pour favoriser le développement d'autres espèces présentes localement.

### 3.2.2 Préconisations pour l'accueil d'autres espèces locales

En complément de cette liste d'espèces cibles prioritaires (sous pression, protégées ou remarquables à Monaco et en PACA) nous préconisons également de favoriser l'installation de toutes espèces sessiles (éponges, coraux, anémones...) ou vagiles (et crevettes, crabes, gastéropodes...) inféodées aux petits fonds côtiers monégasques grâce à des substrats artificiels mimant les fonds naturels. Pour cela il convient de proposer des **rugosités variées** (micromètre à décimètre) et des **habitats diversifiés** (petites, moyennes et grandes cavités) pour mimer, selon les sites et besoins : grottes, surplombs, éboulis, cailloutis, dalles...

Les travaux sur la rugosité et les habitats offerts par les ouvrages immergées ont démontré que la diversité spécifique était assurée par une rugosité à large spectre (micromètre à plusieurs centimètres voire décimètres) et des habitats **reproduisant par biomimétisme les substrats naturels, adaptés aux espèces colonisatrices locales**.

### 3.3.

## Ouvrages et matériaux candidats à l'écoconception

### 3.3.1 Les ouvrages candidats à l'écoconception

Tous les ouvrages « classiques » peuvent faire l'objet d'écoconception. Le [Tableau 4](#) récapitule les principaux types d'ouvrages maritimes, leurs fonctionnalités dominantes, les matériaux usuels de construction, les principes structurels ou de réalisation et, à titre d'exemple le ou les références de réalisation(s) avec une méthodologie d'écoconception.

Types d'ouvrages	Fonctionnalités et description sommaire	Matériaux usuels	Exemples de projets écoconçus
<b>Brise-lames</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ouvrage de défense longitudinal pour protéger le port des actions de la mer en amortissant la houle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enrochements</li> <li>Blocs en béton</li> <li>Géo tubes</li> <li>Remblais et enrochements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brise-lames de Staten Island, New-York, EConcrete, 2022</li> <li>Brise lame côtier d'East Darling Harbour, Port of Sydney, 2018</li> </ul>
<b>Digue, jetée, môles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ouvrage de protection des zones portuaires contre la houle et les courants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remblais et blocs de béton (blocs cubiques, tétrapodes, acropodes, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'expérience de <i>Concrete Layer Innovation (CLI)</i> en matière de carapaces de digues en béton.</li> <li>Écoconception de la digue d'enclosure du port de Brest, SAFEGE SAS</li> </ul>
<b>Épis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ouvrage de défense perpendiculaire à la côte, pour la protéger des actions de l'érosion et du transport solide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enrochements, pieux, géo tubes et palplanches en acier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Epis éco-conçu, Grande jetée du port de Toulon, 2019</li> <li>Protection contre l'Erosion du littoral « PEGASE », Seaboost, 2021</li> </ul>
<b>Ponton lourd brise-clapot</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure flottante permettant de protéger les aménagements portuaires de la houle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pontons en béton armé ou en métal, tenus sur pieux en acier ou corps-morts en béton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lests écoconçus pour habitats flottant au port de plaisance de Gruissan, AMARECO, 2019 <a href="https://www.gruissan-mediterranee.com/dormir-sur-leau-dans-un-lodgeboat/">https://www.gruissan-mediterranee.com/dormir-sur-leau-dans-un-lodgeboat/</a></li> </ul>
<b>Ancrages, lests pour mouillages (ZMEL)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structures sous-marines pour l'ancrage d'un navire ou d'une infrastructure flottante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Béton armé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'écoconception de mouillages pour navires de plaisance en Guadeloupe SAFEGE-AMARECO, 2013</li> <li>L'écoconception de mouillages pour la grande plaisance en Corse BRLi-AMARECO, 2021</li> </ul>
<b>Récifs artificiels</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structures sous-marines destinées à la faune benthique ou pélagique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Béton armé, acier, matériaux divers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Récifs artificiels biomimétiques Corse, OEC, 2017</li> <li>Béton coquillé, Seaboost, Agde, 2009</li> </ul>
<b>Canalisations, câbles sous-marins et émissaires en mer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Canalisations, câbles sous-marins dont le but est de transporter un fluide, de l'électricité/signal ou de canaliser un flux d'effluents au large de la côte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Canalisations généralement en polyéthylène, lests et ancrages en acier ou en béton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Canalisation sous-marine « sealine » de Mayotte, Egis (2009)</li> <li>Écoconception des coquilles de protection de câbles électriques, Fort Salonga, New-York</li> </ul>
<b>Eolien offshore</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure située en mer ouverte pour un champ éolien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastructures en béton armé ou en acier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En développement sur la base des concepts de Lacroix et Pioch, 2011</li> </ul>
<b>Quais écrans ou quais caissons /</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ouvrage continu à un terre-plein permettant l'accostage des bateaux et leur chargement ou déchargement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caissons en béton armé</li> <li>Gabions de palplanches en acier</li> <li>Rideaux de palplanches ou rideaux mixtes (palplanches et pieux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quai du port de Sète en paroi moulée, Soletanche Bachy-Balineau (2016)</li> <li>Port de Rotterdam, mur de soutènement d'un quai en palplanche, EConcrete, 2022</li> </ul>
<b>Caissons en béton armé posés sur ballast</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caisson flottant immergé pour création de terre-plein ou de digue de protection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Béton armé de type paroi moulée ou glissée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mega-caisson de l'extension en mer à Monaco, au niveau du rainurage et du matriçage des façades et des chambres des caissons jarlan, SAM Anse du portier / Bouygues TP (2019)</li> </ul>
<b>Ponton</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure flottante permettant l'amarrage et l'accostage des bateaux dans un port</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En métal ou en béton armé, tenus sur corps-morts en béton ou pieux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ponton de la marina de Malaga, IGY Malaga Marina, 2022</li> </ul>
<b>Pieux</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Pieux du port d'apparat de Balaruc-Les-Bains, AMARECO, 2022</li> </ul>

Tableau 4 : Les principaux ouvrages utilisés en sites maritimes et leurs réalisations selon une méthodologie d'écoconception (Pioch et Souche, 2023)

### 3.3.2 Les matériaux adaptés pour l'écoconception

Au niveau des matériaux, le principe d'innocuité doit guider le choix des aménageurs. L'utilisation de matériaux en plastique, de polluants ou d'ingrédients chimiques nocifs (huiles de synthèse pétrochimiques, additifs, peintures antifouling...) et de métaux lourds sont à proscrire. Les principaux matériaux utilisés pour la réalisation d'ouvrage en milieu marin restent le béton, le métal et la roche brute.

De nombreux travaux indiquent clairement que la nature du matériau affecte la cinétique de bio-colonisation (Hayek et al., 2023). Les différences observées entre matériaux peuvent être induites par leur nature chimique, mais surtout par leurs propriétés physico-chimiques ou leur topographie (Hayek et al., 2023).

Le béton étant le matériau le plus utilisé, les propriétés physico-chimiques cimentaires influençant la bio-réceptivité sont : composition chimique, rugosité, porosité, pH et hydrophobicité de surface (Ibid).

De tous ces paramètres, **la rugosité est l'un des principaux facteurs physiques influençant la bio-réceptivité**. Les études ont montré que les surfaces cimentaires rugueuses ont une bio-réceptivité plus importante que les surfaces lisses dans des conditions contrôlées de laboratoire ou dans des conditions naturelles.

Le biomimétisme avec les substrats durs naturels associé à la connaissance des besoins en habitat des espèces locales permettent de définir une rugosité et des cavités adaptées (cf. chap 3.2).

Selon l'échelle structurelle, du micromètre au mètre, l'aspect des ouvrages est modifié, selon les objectifs écologiques et des caractéristiques techniques précises (cf. Tableau 5).

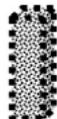
Echelle structurelle	Aspect	Caractéristiques - objectifs
Micro-structure ( $\mu$ )		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formulation du béton</li> <li>• Composition physico-chimique</li> <li>• Type de colonisation (bactéries, algues)</li> </ul>
Meso-structure (cm)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moule rugueux</li> <li>• Type de colonisation (faune/flore/sessiles)</li> <li>• Bio mimétisme (paysager)</li> </ul>
Macro-structure (cm à dm)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moule et mise en œuvre (matériaux bio-sourcés, durables, naturels)</li> <li>• Hydrodynamisme</li> <li>• Type d'habitat (espèces cibles, stade de développement)</li> <li>• Bio mimétisme (paysager)</li> </ul>

Tableau 5 : Echelle structurelle de l'ouvrage et aspects obtenus selon les objectifs écologiques et techniques disponibles

Le CPRT détaille les performances attendues au niveau des matériaux utilisés pour les projets éco-conçus.

## 3.4.

## Focus sur deux écosystèmes sensibles et options d'écoconception pour la posidonie et le coralligène

### 3.4.1 L'herbier de posidonie de Monaco et les options d'écoconception spécifiques à ce milieu

Avec plus de 2 millions d'hectares, les herbiers de posidonie jouent un rôle essentiel en Méditerranée (services écosystémiques, écologie du paysage...). Ces herbiers sont fortement impactés, notamment lors des aménagements littoraux (enfouissement sous les structures, modification de la colonne d'eau et de l'environnement en général). Plusieurs techniques de transplantation de ces herbiers ont été testées avec des résultats très variables en fonction des techniques utilisées et surtout des sites récepteurs (*synthèse in Bacci et La Porta, 2021 ; Boudouresque et al., 2021*). Ces expérimentations concernent essentiellement les fonds meubles et sont généralement réalisées à distance des ouvrages maritimes. Au cours des dernières décennies, la possibilité d'intégrer les herbiers marins aux aménagements littoraux a été envisagée. Si les premières expérimentations, basées sur la mise en place de plantes marines plastiques artificielles (*Artificial Seagrass Systems - ASS*) se sont soldées par des échecs après quelques années, de nouvelles stratégies d'installation de plantes « vivantes » sur substrat rocheux ont vu le jour (*Alagna et al., 2019 ; Calvo et al., 2021*). En effet, la posidonie se développe naturellement sur substrat meuble mais également sur substrat dur, où elle présente une meilleure résistance à l'hydrodynamisme. D'autre part, la « recolonisation naturelle » des substrats durs par l'herbier s'avère plus efficace et rapide que prévue (*Cotugno et al., 2019*).

L'installation de boutures de posidonies sous de simples grilles métalliques recouvrant l'ouvrage ne donne pas de résultats probants (*Ventura D. communication personnelle*). Deux autres techniques ont été testées avec succès : l'installation de boutures au sein de gabions (*Alagna et al., 2019*) ou directement sur le substrat à l'aide de structures en étoiles (*Calvo et al., 2021*).

La première technique s'avère plus complexe et nécessite l'installation de gabions au pied des ouvrages, la seconde technique peut constituer une alternative intéressante. Cette approche est d'autant plus intéressante qu'elle permettrait de recouvrir tout ou partie des structures artificielles (base de digue, canalisation, cavaliers, ...) ou être associée à des récifs artificiels « classiques » dans la tranche bathymétrique favorable à la croissance des posidonies (*Tomasello et al., 2019*).

D'autres techniques basées sur l'installation de graines sur des petits amas rocheux posés sur le substrat sont en cours d'expérimentation et semblent très prometteurs (*Figure 23*). Une expérimentation est en cours au niveau de la risberme de Fontvieille à Monaco, avec une fixation de ces structures en étoile sur les bords de la jardinière et sur le ballast présent à l'intérieur (*Figure 23*). La mise en place, réalisée au printemps 2023, sur ce site particulièrement exposé, devrait apporter des informations dans les prochains mois. Ce retour d'expérience pourrait alors permettre d'envisager de nouvelles applications au niveau d'autres ouvrages.



Figure 23 : Germination de graines sur des petits amas de roches (à gauche) et modules en étoile sur la risberme (bord et ballast) au pied de la digue de Fontvieille (à droite) (photos : Direction de l'Environnement)

Si l'installation de boutures de posidonie vivantes peut constituer une alternative séduisante (restauration de l'ensemble des fonctionnalités de l'herbier, reconstitution de paysages sous-marins) plusieurs éléments devront être pris en compte au préalable, à travers un « indice d'aptitude à la transplantation » intégrant notamment :

- La pertinence du ou des sites d'accueil.
- La mise en place préalable d'expérimentations limitées (nombre de boutures, superficie), accompagnées d'un suivi temporel d'au moins trois ans.
- L'origine des transplants.
- L'existence de conditions environnementales favorables, attestée par la présence et la persistance de boutures naturelles de posidonie.

Aussi, à l'instar de la séquence « Éviter, Réduire, Compenser », une séquence plus spécifique « Posidonie » pourrait être mise en place lors d'un aménagement en milieu littoral, si cette espèce est présente sur le site identifié ou à proximité (Figure 24).

Enfin, même en cas de succès, au regard de la vitesse de croissance de la plante, une restauration de l'herbier ne saurait être effective avant plusieurs décennies d'où l'intérêt d'associer cette stratégie à une protection efficace des herbiers existants.

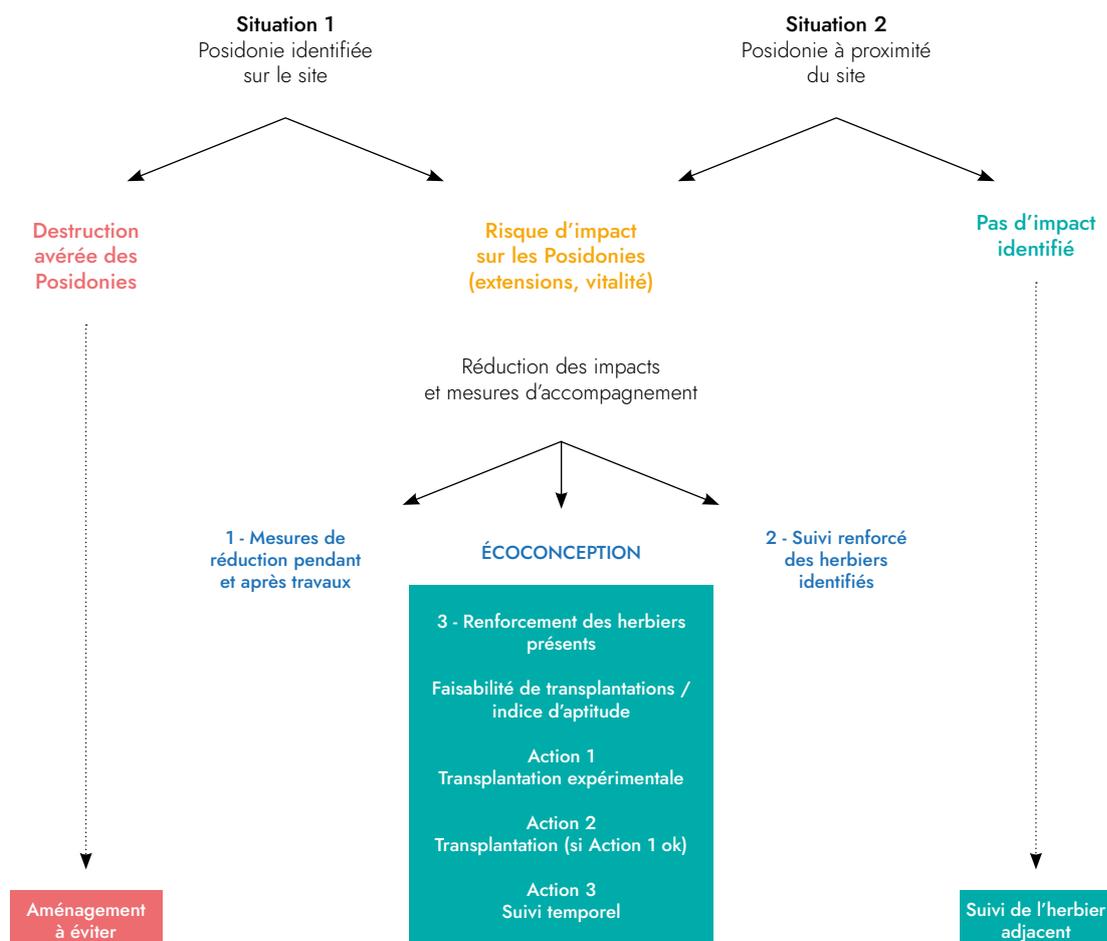


Figure 24 : Séquence « Posidonie » dans le cadre d'une approche d'écoconception.

### 3.4.2 Le coralligène de Monaco et les options d'écoconception spécifiques à ce milieu

Le coralligène est un écosystème original de la Méditerranée (*Ballesteros 2006*). Ce nom a été proposé par Marion (1883) pour décrire les fonds durs bio-concrétionnés de Méditerranée, typiquement entre 20 et 70 m de profondeur, sous l'herbier de Posidonie, c'est donc un écosystème sciaphile.

Le nom signifie « producteur de corail », en référence à l'abondance de corail rouge (*Corallium rubrum*), même si les algues corallinacées en sont les principaux constructeurs.

Parmi les habitats marins méditerranéens, le coralligène est le plus riche en biodiversité, juste après l'herbier de Posidonie (*Boudouresque 2004*).

Tout comme les récifs coralliens, le coralligène est constitué d'espèces sessiles qui fournissent abris et nourriture pour de multiples espèces, appelées pour cela espèces ingénieurs.

La production annuelle de carbonate de calcium varie entre 100 et près de 500 g CaCO<sub>3</sub>/ m<sup>2</sup> (*Canals & Ballesteros 1997*). Ces écosystèmes produisent des bénéfices écosystémiques, encore mal évalués, mais importants particulièrement dans le domaine du tourisme (plongée sous-marine) ou de la pêche (dont le corail rouge) (*Thierry de Ville d'Avray et al. 2019*).

En Principauté, le coralligène est situé sur le tombant des Spélugues (pointe Focinane), aujourd'hui mis sous statut de réserve sous-marine, ainsi que sur les zones de roches profondes comme les roches Saint-Martin, situées au droit de la digue flottante, les roches Saint-Nicolas à l'est de la jetée sud du port de Fontvieille et plus au large sur plusieurs dizaines d'îlots plus ou moins grands et isolés (cf. *Dalias et al. 2014*), photos à la [Figure 25](#).



Comme expliqué en préambule, la connaissance de la restauration d'écosystèmes coralliens est liée principalement aux nombreuses expériences réalisées sur les coraux constructeurs de récifs (coraux tropicaux) : cela tient à la fois aux grandes capacités de régénération de ces organismes qui facilite leur bouturage et à leur grande vitesse de croissance (une dizaine de cm par an pour les espèces branchues, cf. *Hein et al. 2020* pour revue). Quelques essais ont été réalisés sur des coraux profonds (*Montseny et al. 2021*). Concernant le coralligène, des expériences sont réalisées en Méditerranée sur le corail rouge (*Corallium rubrum*).

Figure 25 : Photo de coralligène monégasque  
(photo : Direction de l'Environnement-Monaco)

Les Gorgones, autres organismes caractéristiques de cet écosystème et appartenant au même groupe zoologique des Cnidaires, font également l'objet d'expériences de restauration en Méditerranée et dans le monde (Casoli et al. 2021 ; Estaque 2021 ; Kumagai et al. 2004 ; Linares et al. 2008 ; Montseny et al. 2019 ; Smith et al. 2021). La transplantation d'éponges a également fait l'objet de quelques travaux (Bierwirth et al. 2022). Il est à noter que les éponges constituent le seul groupe zoologique appartenant au coralligène faisant l'objet de cultures à but commercial (Osinga et al. 1999).

Le coralligène à Monaco a fait spécifiquement l'objet d'ouvrages éco-conçus tests dans le cadre de 3 projets : des lests éco-conçus sur le site du Toulonnais, des panneaux de béton et des récifs artificiels en béton imprimés 3D (voir la partie « exemples »).

Soulignons ici **l'importance de créer des zones de mouillages pour la grande plaisance avec des lests éco-conçus, afin de supprimer la pression sur cet écosystème** (cf. chap. 4). Le projet de récifs artificiels imprimés 3D, en dolomite, a été immergé à Monaco en 2017 (Laboratoire EcoMar et société Boskalis, suivi réalisés par les sociétés Thalassa et Aquanaute). La complexité des cavités du coralligène a guidé le dimensionnement de cet ouvrage, dédié à la restauration écologique (Figure 26).

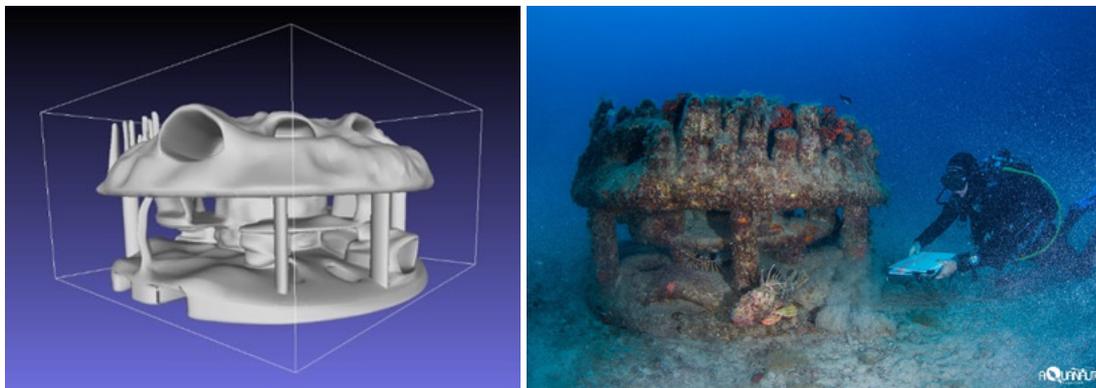


Figure 26 : Récif artificiel mimant le coralligène conçu par Boskalis et photo après 3 ans (Elisabeth Riera et Aquanaute).

Les suivis<sup>11</sup> semblent concluants au niveau de la colonisation par les espèces cibles : chapon, langouste, nombreuses éponges et autres espèce sessiles. La durabilité de la dolomite en impression 3D reste encore à valider en comparaisons avec un ouvrage en béton maritime standard.

### 3.5. Importance du suivi des performances écologiques des ouvrages éco-conçus

Le suivi a une place importante dans le processus associé à l'écoconception afin d'évaluer les gains performanciers, de rectifier en cas de problème l'ouvrage et de communiquer sur la base d'articles scientifiques et de données vérifiables (suivi standardisé).

Dans une mer oligotrophique, peu riche en nutriment, le suivi écologique est recommandé pour une durée minimale de 5 ans.

Les projets éco-conçus s'apparentent à des projets d'ingénierie écologique, car il s'agit de s'inspirer et de développer les fonctions écologiques et l'habitat du site de projet en connaissance des besoins des espèces locales. Dès lors, les suivis peuvent être basés sur l'évaluation de l'atteinte d'objectifs de réparation écologique.

<sup>11</sup> <https://thalassa-env.com/suivi-2021-des-peuplements-de-poissons-sur-les-recifs-3d-de-monaco>

D'après Elliott (2007), l'évaluation de projets d'ingénierie écologique en mer se base sur 12 catégories d'indicateurs aux objectifs bien précis :

- 1/ L'étendue spatiale des biotopes, des habitats et / ou des écosystèmes est telle qu'attendue et est autosuffisante dans les conditions physico-chimiques naturelles et par rapport aux conditions de référence.
- 2/ La diversité et la structure de la communauté, l'abondance et la reproduction de la population et la répartition des espèces sont telles qu'attendues dans les conditions naturelles et sont résilientes aux perturbations naturelles.
- 3/ Les espèces menacées / protégées sont en bon état.
- 4/ La diversité génétique des ressources halieutiques (poissons et crustacés d'élevage et sauvage) n'est pas compromise.
- 5/ La surface d'aires protégées est maintenue.
- 6/ La zone de gestion des activités aquacoles et de pêche est aussi vaste que possible compte tenu des contraintes sociétales et environnementales.
- 7/ La dynamique des éléments nutritifs est conforme aux conditions hydrographiques existantes et est peu modifiée par les activités anthropiques.
- 8/ Les espèces envahissantes, exotiques ou introduites sont absentes ou peu nombreuses et n'ont pas affecté l'intégrité d'autres espèces, de l'habitat ou de l'écosystème.
- 9/ Les menaces potentielles internes et externes à l'écosystème ont été éliminées, minimisées, atténuées ou compensées et il n'y a pas de changement détectable de la biodiversité par le changement climatique.
- 10/ Le fonctionnement de la communauté et les groupes fonctionnels (ex. indice trophique) sont tels qu'attendus et durables à long terme.
- 11/ Il n'y a pas de perturbation physique ou chimique au niveau de la connectivité entre et au sein des écosystèmes.
- 12/ Il existe un potentiel d'exploitation durable d'espèces et / ou de matériaux (ex. produits biopharmaceutiques d'origine marine).

Sur la base de ces 12 objectifs d'évaluation d'un projet éco-conçu en mer, 3 catégories d'indicateurs peuvent être proposées : structure physico-chimique, structure biologique et fonctionnalités écologiques. Ces indicateurs permettent d'évaluer l'écosystème qui se développera sur l'ouvrage et son fonctionnement (niveau de vitalité, performance écologique...) (cf. [Tableau 6](#)).

Types d'ouvrages	Matériaux usuels	Exemples de projets écoconçus
<b>STRUCTURE PHYSICO-CHIMIQUE</b>		
<b>Conditions morpho-dynamiques</b>	Morphologie des fonds	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structure et substrat des fonds, bathymétrie, granulométrie, intégrité des fonds</li> </ul>
	Dynamique hydro-sédimentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Courants, régimes des vagues et des marées, transport des sédiments (érosion)</li> </ul>
<b>Qualité du sédiment</b>	Niveau de pollution en contaminants chimiques organiques et métaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contamination au cadmium, mercure, plomb, HAP, PCB et retardateurs de flammes bromés</li> </ul>
	Matière organique dans le sédiment	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taux en matière organique, concentrations en azote et phosphore</li> </ul>
<b>Qualité de l'eau</b>	Niveau de pollution en contaminants chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentrations en cadmium, mercure, plomb, HAP, PCB et retardateurs de flammes bromés</li> </ul>
	Niveau de contamination bactériologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentration d'<i>E. coli</i>, autres contaminations microbiologiques</li> </ul>
	Niveau d'eutrophisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentration en nutriments, ratios d'éléments nutritifs, concentration en chlorophylle, turbidité, teneur en oxygène dissous</li> </ul>
	Conditions générales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conditions thermales, salinité, turbidité</li> </ul>
<b>STRUCTURE BIOLOGIQUE</b>		
<b>Etat des communautés benthiques (hors espèces « ingénieur »)</b>	Structure et composition faunistique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse, abondance pour un maximum d'espèces, richesse spécifique, densité pour un maximum d'espèces, etc.</li> <li>Indices de diversité (Shannon, Pielou), indices biotiques (AMBI, M-AMBI, BENTIX, Benthic Response Index) pour les habitats pertinents (i.e. comportant de la vase), etc.</li> <li>Aire couverte par les espèces</li> <li>Structure par taille et/ou âge, répartition par sexe pour identifier des modifications dans le taux de renouvellement des populations, etc.</li> <li>Taux de fécondité, taux de survie/mortalité pour les espèces commerciales pour observer une modification de la pression de pêche après projet, etc.</li> </ul>
<b>Etat du coralligène</b>	Structure générale, bioconstruction et composition faunistique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Porosité, limites de profondeur, coloration, etc.</li> <li>Taille, couverture totale, etc.</li> <li>Diversité, abondance, couverture pour un maximum d'espèces, etc.</li> <li>Surface couverte par les espèces</li> </ul>
<b>Etat de l'ichtyofaune / mammifères marins / reptiles marins</b>	Structure et composition faunistique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse, abondance pour un maximum d'espèces, richesse spécifique, fréquence d'observation, etc.</li> <li>Structure par taille et/ou âge, sexe ratio, taux de fertilité, taux de survie/mortalité pour identifier des modifications dans le taux de renouvellement des populations, etc.</li> </ul>
<b>FONCTIONNALITÉS ÉCOLOGIQUES</b>		
<b>Espèces prolifératrices ou exotiques (bloom phytoplanctonique, etc.)</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Abondance et/ou surface recouverte</li> </ul>
<b>Niveau de connectivité écologique/ fragmentation</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Présence d'ouvrages affectant le niveau de connectivité, niveau de fragmentation de l'habitat</li> </ul>
<b>Réseau trophique</b>	Niveau fonctionnel délivré par la zone étudiée	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre de niveau trophique</li> <li>Courbe d'abondance/biomasse</li> <li>Diversité des groupes trophiques chez les consommateurs primaires</li> </ul>
<b>Zones de frayères, nurseries</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Présence/absence, surface et intégrité</li> </ul>
<b>Zone d'alimentation</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Présence/absence, surface et intégrité</li> </ul>
<b>Zone de repos, abri, refuge</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Présence/absence, surface et intégrité</li> </ul>

Tableau 6 : Indicateurs, critères et exemples de métriques pour réaliser un suivi écologique complet des structures physico-chimique, biologique et des fonctionnalités écologiques d'un ouvrage éco-conçu

**3.6.**

## Risques de greenwashing et précautions à prendre

Comme toute nouveauté dans le domaine de l'ingénierie et de l'environnement un fort **risque de greenwashing**, faisant de l'écoconception un cheval de Troie d'aménagement non durable, est à redouter (Firth et al., 2020).

Certains aménagements restent mal conçus bien que labellisés « éco » et peuvent desservir les efforts de la profession du milieu de l'écoconception et de l'aménagement d'ouvrages mieux intégrés. Bien que de nombreux exemples existent d'impacts positifs de l'écoconception, certaines publications soulignent les impacts négatifs de projets de type greenwashing.

Les suivis scientifiques montrent qu'il y a greenwashing lorsque les ouvrages dits « éco » ne sont pas conçus pour cibler ou mimer des habitats, fonctions et espèces locales.

De plus, l'article de Gauff publié en 2023 (Gauff et al., 2023) montre que des ouvrages dits « écologiques », installés dans le port de Toulon, **avaient favorisé l'installation d'espèces invasives, alors que ce n'était pas le cas pour les ouvrages portuaires « classiques »**.

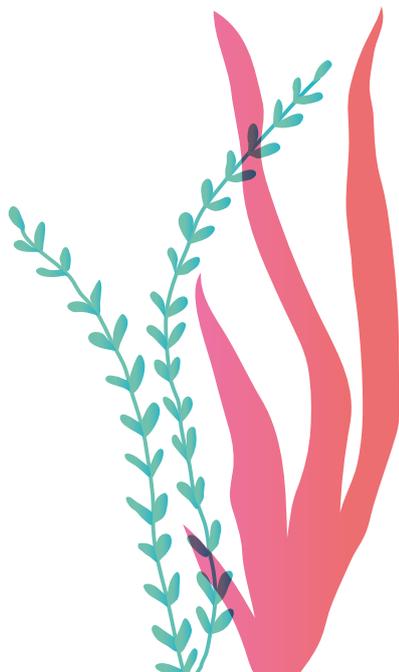
Des ouvrages mal éco-conçus peuvent même **devenir des pièges écologiques**, favorisant la prédation de juvéniles en les concentrant dans des zones non connectées à des zones de refuges ou les exposant à des pollutions humaines (Schwartz, 2020).

Il est nécessaire de vérifier que l'écoconception réponde bien à des objectifs écologiques réels, d'intérêt pour l'écosystème considéré, précis, évaluables, si possible déjà testés ou documentés du point de vue de leur coût/efficacité économique et écologique.

Enfin soulignons que **l'écoconception n'est pas LA solution unique**. Elle permet de réduire les impacts négatifs sur l'environnement d'un ouvrage et dans certains cas les compenser, en plus d'un ensemble de mesures et de dispositions définies dans l'EIE.



**SYNTHÈSE ET  
PROPOSITIONS  
D'ÉCOCONCEPTION  
DES FUTURS PROJETS  
D'AMÉNAGEMENT  
MONÉGASQUES**

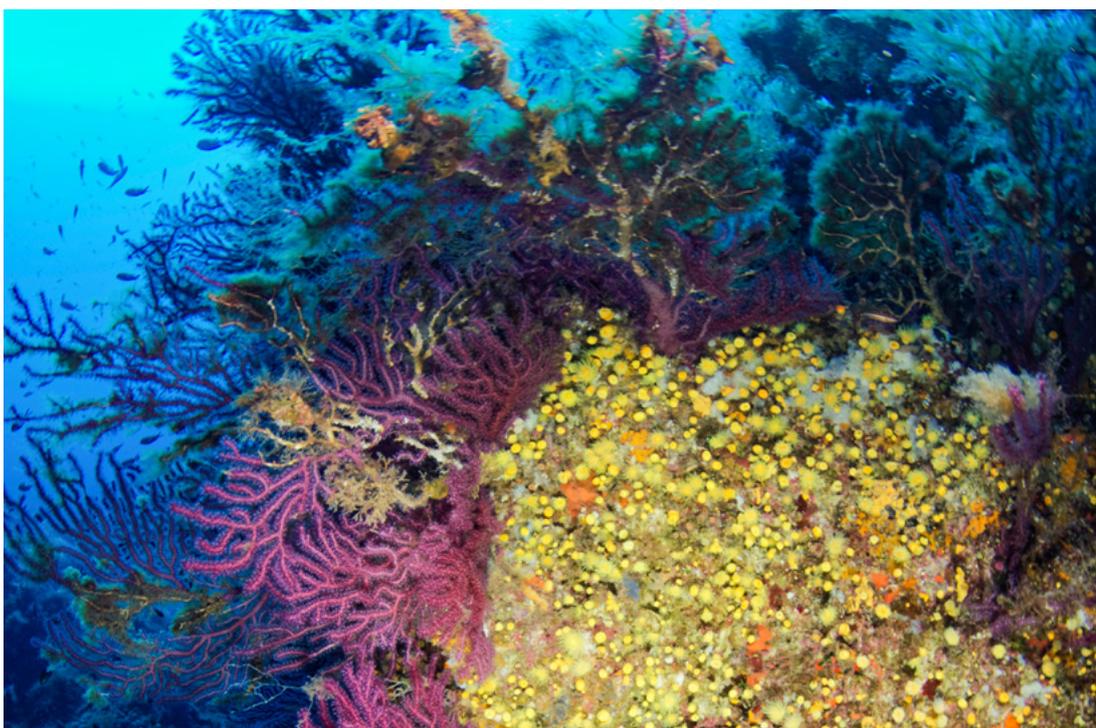


**Les entités fonctionnelles côtières les plus importantes à restaurer à Monaco sont les :**

- **PETITS FONDS** : ils sont primordiaux par leurs fonctions de nurserie et de nourricerie pour les larves et juvéniles de nombreuses espèces. À Monaco, ils sont constitués principalement d'herbiers de posidonie, de fonds sableux, falaise, éboulis et cailloutis (non artificiels) ;
- **LES CORALLIGÈNES** : ils sont des réservoirs écologiques de premier ordre à Monaco, sur des profondeurs plus importantes (au-delà de 15/20m) avec une structure tridimensionnelle complexe ;
- **CONNECTIVITÉS** : les couloirs de déplacements des espèces entre les petits fonds et les zones profondes renforcent la résilience écologique. Ces corridors de déplacement, entre habitats naturels et artificiels, doivent être créés et renforcés.

**L'écoconception des ouvrages monégasques, par le dimensionnement, les espèces cibles et l'emplacement des projets, doit en priorité participer au développement :**

- des **FONCTIONS DE PROTECTION/REPOS ET DE NURSERIE** des petits fonds côtiers;
- des **FONCTIONS DE REPRODUCTION ET DE NOURRICERIE** des zones profondes de coralligène;
- de **CONNECTIVITÉS** entre les différentes zones fonctionnelles (naturelles et artificielles) de la côte jusqu'aux zones profondes.



La [Figure 27](#) propose les objectifs d'écoconception, à l'échelle du territoire monégasque, des travaux de réhabilitation, de remplacement ou de nouveaux projets d'aménagement selon les sites et les types d'ouvrages.

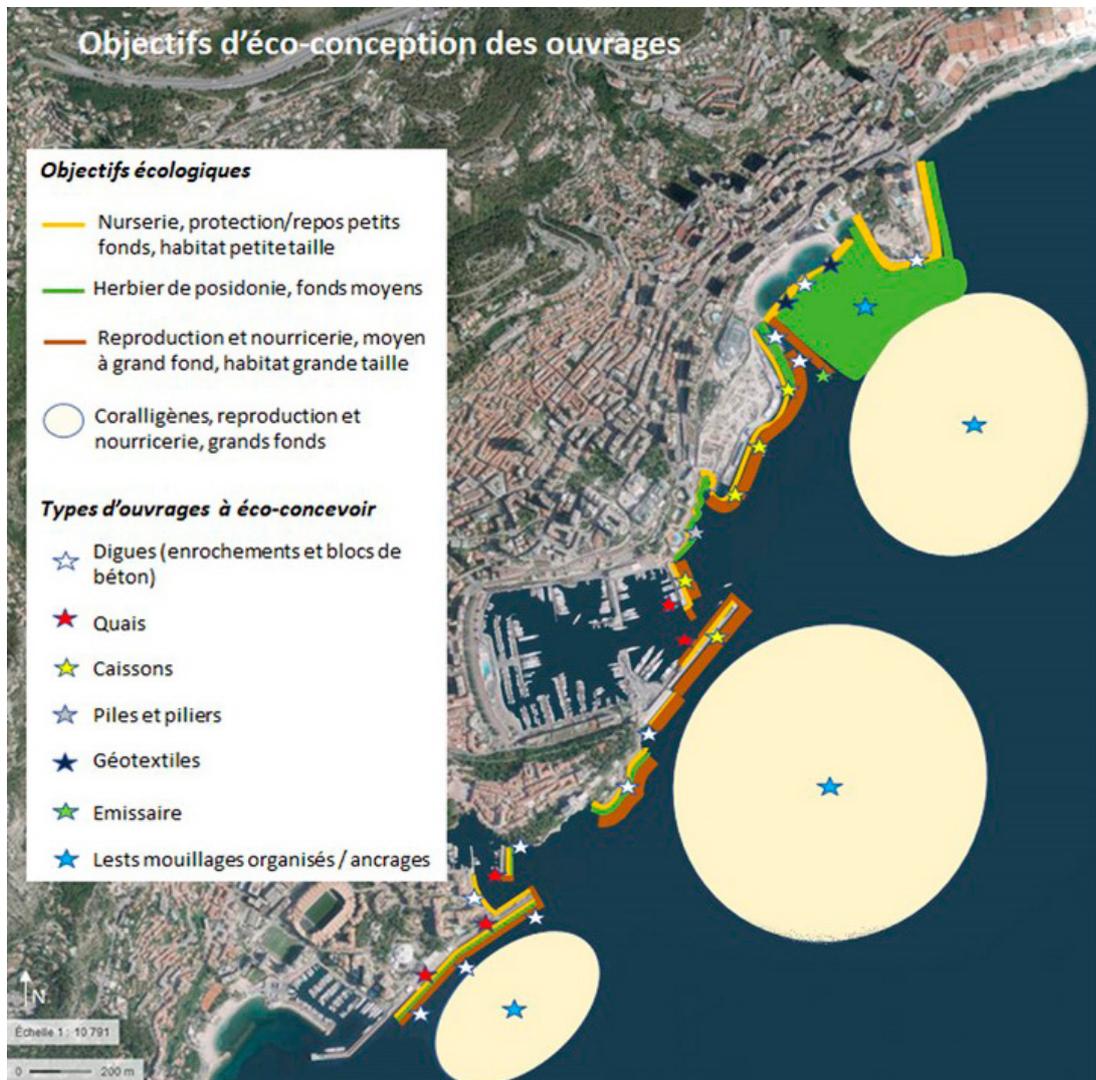


Figure 27 : Préconisation d'objectifs d'écoconception pour les ouvrages monégasques  
(crédit : Fond de carte Géoportail (IGN, Conseil départemental des Alpes-Maritimes, CRIGE-PACA, GEBCO)

Les parties de l'ouvrage qui peuvent être éco-conçues ainsi que les techniques que certaines entreprises ont déjà réalisées en France et à Monaco, sont proposées au [Tableau 7](#).

Types d'ouvrages	Partie de l'ouvrage à éco-concevoir	Techniques et entreprises ou expertise de référence
Digue et brise lame (enrochements et blocs de béton)	État de surface du béton (µm à cm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peaux silicones pour rugosité biomimétique (AMARECO)</li> <li>• Blocs de carapace avec cavités adaptées creusées, « rock pool » ou imprimés 3D (AMARECO, SeaBoost, Line-up Océan, Vinci Construction maritime et fluvial)</li> <li>• Blocs cuvettes en zone intertidale mixés (EConcrete, SeaBoost, Suez Environnement, Gaïa environnement, LineUp Ocean)</li> <li>• Enrochements avec granulométrie variable selon les stades visés (BRLi, GIS posidonie, Egis, Creocean, Suez Environnement)</li> <li>• Support pour posidonie intégré aux ouvrages (G. Pergent)</li> <li>• Supports pour greffe d'algues (P2A, Andromède océanologie, Suez Environnement)</li> </ul>
	Design de l'ouvrage (mm à dm)	
	Enrochements et blocs	
Quai	État de surface du béton (µm à cm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peaux silicones pour rugosité biomimétique (AMARECO)</li> <li>• Insertion d'électrode pour encroûtement calcaire protecteur (Géocorail)</li> <li>• BFUP rugueux (Bouygues TP)</li> <li>• Ouvrages complexes imprimés 3D (SeaBoost, Line-up Océan)</li> <li>• Ouvrages avec cavités adaptées (cm à dm) (AMARECO)</li> <li>• Encorbellement de quai (Bournemouth University, Vinci Construction maritime et fluvial, AMARECO)</li> </ul>
	Design de l'ouvrage (mm à dm)	
Caisson	Chambres caisson jarlan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caissons récifs artificiels, plancher et paroi (Andromède océanologie, Bouygues TP)</li> <li>• Planchers en substrats meubles (Bouygues TP)</li> <li>• Bétons surface rugueuse et rainurée (Rekli, AMARECO, Bouygues TP)</li> </ul>
	État de surface du béton (µm à cm)	
Piles et piliers	Bétons avec cavités et abris (cm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peaux silicones pour rugosité biomimétique (AMARECO)</li> <li>• Insertion d'électrode pour encroûtement calcaire protecteur (Géocorail)</li> <li>• Cavités et abris en parement de piles béton (AMARECO, Egis, Archeuthis)</li> </ul>
	État de surface du béton (µm à cm)	
Géotextile (L'emploi de géotextile sans matière plastique est recommandé)	Bio-protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Support en surface adapté pour le développement de la posidonie (G. Pergent)</li> <li>• Insertion d'électrode pour encroûtement calcaire protecteur (Géocorail)</li> <li>• Support pour organismes bio-constructeurs (AMARECO, Seaboost)</li> </ul>
	État de surface (µm à cm)	
Emissaire (canalisation et lests)	État de surface du béton (µm à cm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peaux silicones pour rugosité biomimétique (AMARECO)</li> <li>• Insertion d'électrode pour encroûtement calcaire protecteur (Géocorail)</li> <li>• Ouvrages complexes imprimés 3D (SeaBoost, Line-up Océan)</li> </ul>
	Design de l'ouvrage (mm à dm)	
Lests mouillages organisés / ancrages	État de surface du béton (µm à cm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peaux silicones pour rugosité biomimétique (AMARECO)</li> <li>• Ouvrages complexes imprimés 3D (SeaBoost, Line-up Océan, P2A)</li> <li>• Ouvrages avec cavités adaptées (mm à dm) (AMARECO, Seaboost, Vinci Construction maritime et fluvial, ESITC Caen)</li> </ul>
	Design de l'ouvrage (mm à dm)	

Tableau 7 : Types et parties d'ouvrages pouvant être éco-conçues avec des exemples de techniques et d'entreprises

Exemples des sites et des types d'ouvrages qui pourraient être éco-conçus sur le littoral monégasque :

## FONTVIEILLE

---

Blocs de carapaces  
et pied de butée



## PORT HERCULE

---

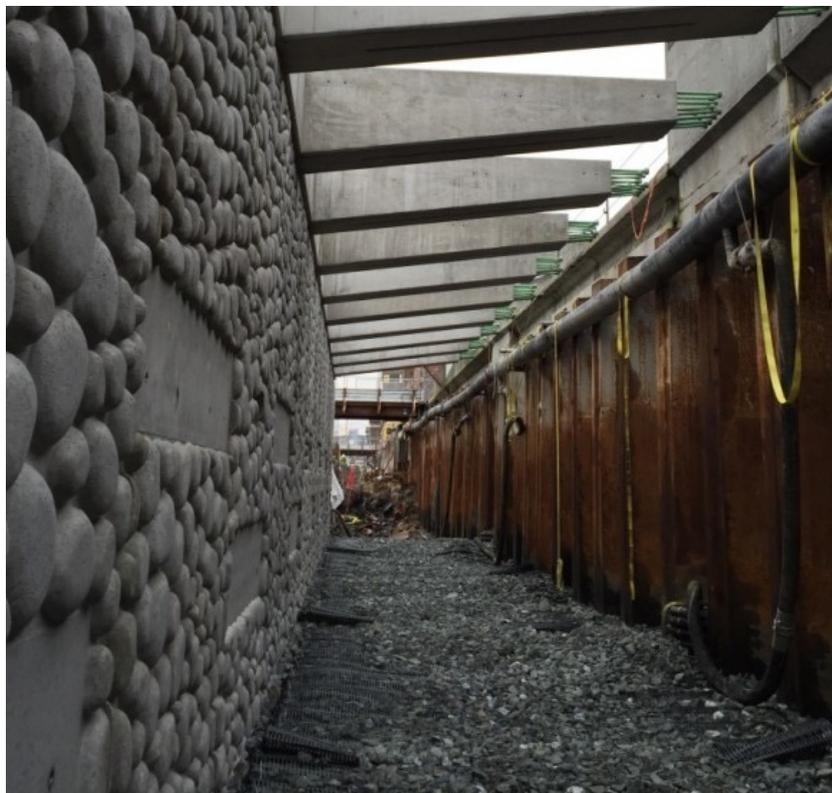
Quai portuaire



## MEGA-CAISSON

---

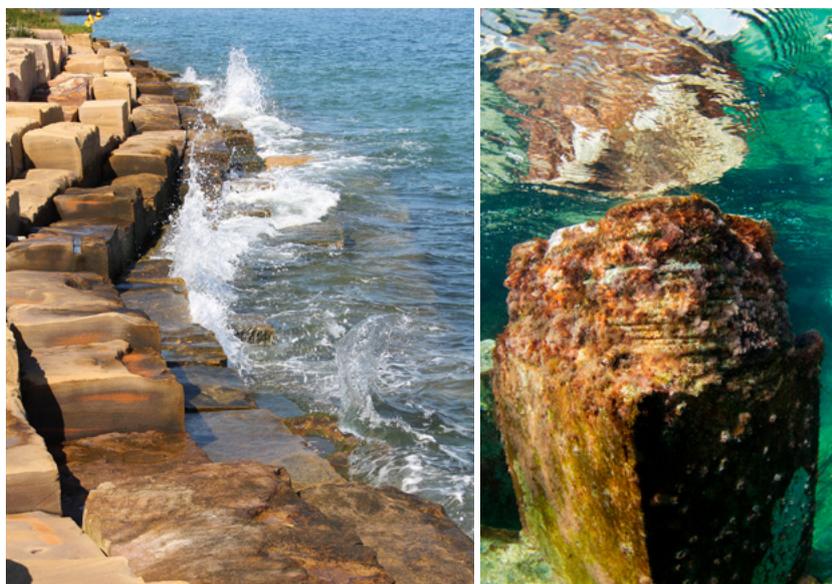
Parois et façades



## ASSISE DE LA GRANDE DIGUE DEVANT LE SOLARIUM

---

Blocs de carapace  
et ouvrages semi  
immergés



## ZONE DE MOUILLAGE BAIE DE MONACO (LARGE LARVOTTO)

---

Lests éco-conçus



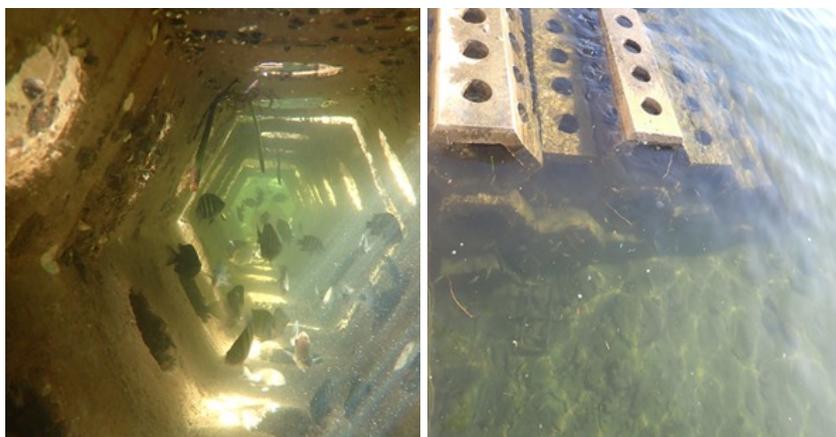
Emissaire et pipe-line



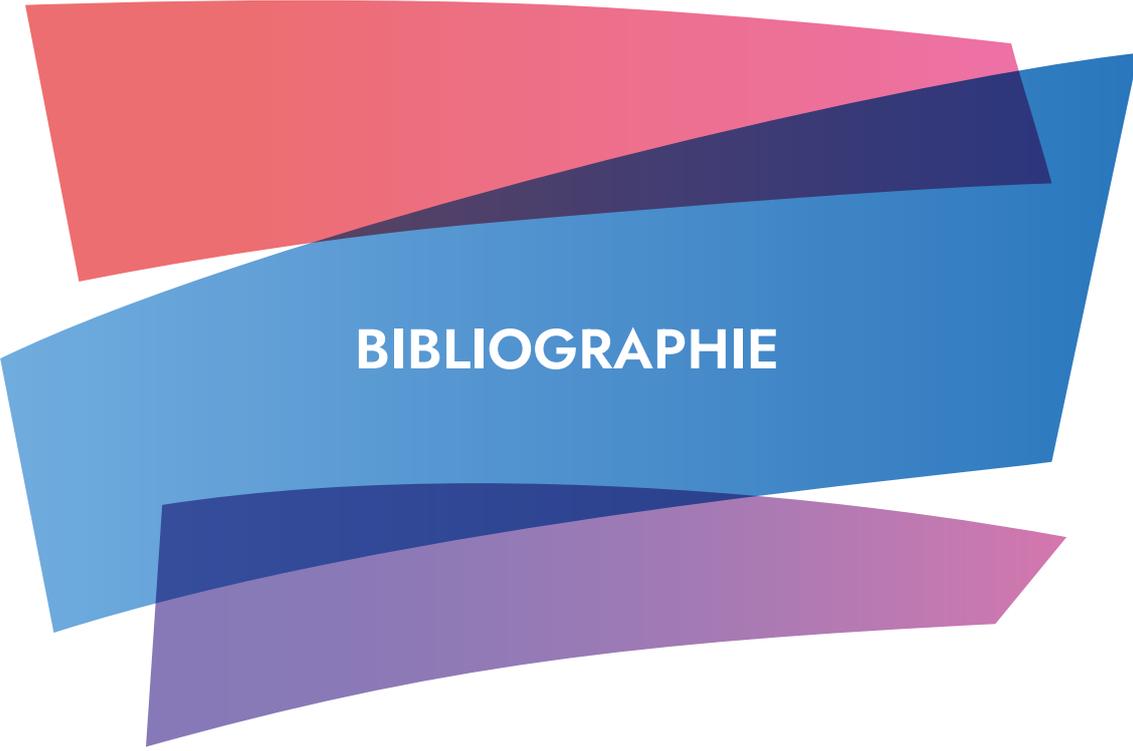
## BAIE DU LARVOTTO

---

Brise lame de protection des plages







# BIBLIOGRAPHIE



- Accola, K.L., Horne, J.K., Cordell, J.R. and Toft, J.D., (2022). Nocturnal distributions of juvenile Pacific salmon along an eco-engineered marine shoreline. *Marine Ecology Progress Series*, 687, pp.113-123.
- AFGC (2021). Kit d'Écoconception des ouvrages de Génie Civil. Association Française de Génie Civil, sous la direction de Patrick Guiraud. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 : <https://www.afgc.asso.fr/ressources/kit-ecoconception-des-ouvrages-de-genie-civil/>
- Airoldi, L., & Bulleri, F. (2011). Anthropogenic disturbance can determine the magnitude of opportunistic species responses on marine urban infrastructures. *PLoS One*, 6(8), e22985.
- Alagna A., D'Anna G., Musco L., Vega Fernández T., Gresta M., Pierozzi N., Badalamenti F., (2019). Taking advantage of seagrass recovery potential to develop novel and effective meadow rehabilitation methods. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 110578. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X1930726X>
- Bacci T., La Porta B. (2021). Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. life seposso (life 16 gie/it/000761), Rome.: pp 119.
- Bulleri, F., & Chapman, M. G. (2010). The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments. *Journal of Applied Ecology*, 47(1), 26-35.
- Bugnot, A. B., Mayer-Pinto, M., Airoldi, L., Heery, E. C., Johnston, E. L., Critchley, L. P., Dafforn, K. A. (2021). Current and projected global extent of marine built structures. *Nature Sustainability*, 4(1), 33-41.
- Bouchoucha, M. (2017). Les zones portuaires peuvent-elles servir de nurseries alternatives pour les poissons marins côtiers?: cas des sars en Méditerranée Nord-occidentale (Doctoral dissertation, Université de Perpignan)
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006). Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE pub. : 202p
- Boudouresque C.F., Blanfuné A., Pergent G., Thibaut T., (2021). Restoration of Seagrass Meadows in the Mediterranean Sea: A Critical Review of Effectiveness and Ethical Issues. *Water*, 13, 1034. <https://doi.org/10.3390/w13081034>
- Calvo S., Calvo R., Raimondi V., Assenzo M., Pipitone G., Tomasello A., (2021). Radial structures in reinforced concrete. In Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE 16 GIE/IT/000761) : 69-78.
- CGDD, (2021). Guide méthodologique de dimensionnement des mesures compensatoires. Ministère de la transition écologique.
- Cheminée, A., Feunteun, E., Clerici, S., Cousin, B., Francour, P. (2014). Management of infralittoral habitats: towards a seascape scale approach. In *Underwater Seascapes* (pp. 161-183). Springer, Cham.
- Coombes, M. A., La Marca, E. C., Naylor, L. A., & Thompson, R. C. (2015). Getting into the groove: opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures. *Ecological Engineering*, 77, 314–323.
- Cordell, J.R., Toft, J.D., Munsch, S.H. and Goff, M., (2017). Benches, beaches, and bumps: how habitat monitoring and experimental science can inform urban seawall design. *Living shorelines*, pp.421-438.
- Cotugno, M.; Lorenti, M.; Scipione, M.B.; Buia, M.C., (2019). Spontaneous *Posidonia oceanica* recovery. In *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences Engineering, Management and Conservation, Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019*: 287–296.
- Dafforn, K. A., Glasby, T. M., & Johnston, E. L. (2012). Comparing the invasibility of experimental “reefs” with field observations of natural reefs and artificial structures. *PLoS One*, 7(5), e38124.
- David, C. L., Marzloff, M. P., Knights, A. M., Cugier, P., Nunes, F. L., Cordier, C., LB Firth, Dubois, S. F. (2022). Connectivity modelling informs metapopulation structure and conservation priorities for a reef-building species. *Diversity and Distributions*.
- Descamp P., Bianchimani O., (2021). CO ENV-6 Plan de restauration écologique du Tombant des Spélugues Rapport Andromède Océanologie, Bouygues Travaux Publics et Infrastructure Maritime : 1-58.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., ... & Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological perspectives for science and society*, 24(4), 243-248.
- Elliott, M., Burdon, D., Hemingway, K. L., Apitz, S. E. (2007). Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: confusing management and science—a revision of concepts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(3), 349-366.
- Firth, L. B., Thompson, R. C., White, F. J., Schofield, M., Skov, M. W., Hoggart, S. P., ... & Hawkins, S. J. (2013). The importance of water-retaining features for biodiversity on artificial intertidal coastal defence structures. *Diversity and Distributions*, 19(10), 1275—1283.
- Firth, L. B., Airoldi, L., Bulleri, F., Challinor, S., Chee, S. Y., Evans, A. J., & Hawkins, S. J. (2020). Greening of grey infrastructure should not be used as a Trojan horse to facilitate coastal development. *Journal of Applied Ecology*, 57(9), 1762-1768.
- Gauff, R. P., Joubert, E., Curd, A., Carlier, A., Chavanon, F., Ravel, C., Bouchoucha, M. (2023). The elephant in the room: Introduced species also profit from refuge creation by artificial fish habitats. *Marine Environmental Research*, 185, 105859.

- Hayek, M., Salgues, M., Souche, J. C., De Weerd, K., Pioch, S. (2023). How to Improve the Bioreceptivity of Concrete Infrastructure Used in Marine Ecosystems? Literature Review for Mechanisms, Key Factors, and Colonization Effects. *Journal of Coastal Research*, 39(3), 553-568.
- IPBES (2023). Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., Renard Truong, T., Bacher, S., Galil, B. S., Hulme, P. E., Ikeda, T., Sankaran, K. V., McGeoch, M. A., Meyerson, L. A., Nuñez, M. A., Ordonez, A., Rahlao, S. J., Schwindt, E., Seebens, H., Sheppard, A. W., and Vandvik, V. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430692>
- Isbell, F., Gonzalez, A., Loreau, M., Cowles, J., Díaz, S., Hector, A., Larigauderie, A. (2017). Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. *Nature*, 546(7656), 65-72.
- IUCN (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. IUCN: Gland, Switzerland, 97, 2016-2036.
- IUCN, 2021. Manual for the creation of Blue Carbon projects in Europe and the Mediterranean. Otero, M. (Ed.), 144 pages
- Iwanami, M., Yokota, H., Hamada, H., Yamaji, T., Watanabe, H. (2002). Can marine fouling organisms extend the life of concrete structures ? in: Proceeding of the IABSE Symposium on Towards a Better Built Environment — Innovation, Sustainability, Information Technology, Paper n° PAP164
- Jackson, A. C., Chapman, M. G., & Underwood, A. J. (2008). Ecological interactions in the provision of habitat by urban development: whelks and engineering by oysters on artificial seawalls. *Austral Ecology*, 33(3), 307-316.
- Joubert, E., Gauff, R. P., de Vogüé, B., Chavanon, F., Ravel, C., Bouchouca, M. (2023). Artificial fish nurseries can restore certain nursery characteristics in marine urban habitats. *Marine Environmental Research*, 190, 106108.
- Kuroki, T., 1952. The shape of a reef and its function as a habitat for fish. *Japan Fisheries Magazines* 18(1)
- Lacroix, D., Pioch, S. (2011). The multi-use in wind farm projects: more conflicts or a win-win opportunity?. *Aquatic Living Resources*, 24(2), 129-135.
- La Marca, E.C., Coombes, M.A., Viles, H.A., Naylor, L.A. (2014). The bioprotective role of a biological encrustation. *Biologia Marina Mediterranea*, 21(1), pp. 345–346.
- Langlois, J., Junqua, G., Souche, J. C., Pioch, S. (2020). Environmental assessment of an offshore infrastructure using a beltline of concrete caissons and impact of logistical decisions. *Revue Paralia*, 451-458.
- Lapinski, M., Perrot, M., Le Direach, L., Rouanet, E., Astruch, P. (2015). Support to nursery functionalities of the port of Marseilles-Fos given by artificial micro-habitats. In RECIF Congress on Artificial Reefs: from Materials to Ecosystems. ESITC, Caen, France-27-29 January.
- Le Diréach, L., de Monbrison, D., Astruch, P., Cantou, M., Ruitton, S., Guilloux, L., Fourt, M. (2015). Contribution of small Mediterranean harbours to coastal fish biodiversity. In RECIF Congress on Artificial Reefs: from Materials to Ecosystems. ESITC, Caen, France-27-29 January.
- Living Planet Index, (2022). Disponible sur le site consulté le 8/09/2023 : <https://www.livingplanetindex.org/>
- Maruya, T., Iwanami, M., Sakai, E., Mashimo, M., Hamada, H. (2003). Durability enhancement of RC structures covered with a dense layer formed by marine fouling aquatic organisms. *Journal of Materials. Concrete Structures. Pavements*, 739 (60):, 61–74
- Mac Manus, R. S., Archibald, N., Comber, S., Knights, A. M., Thompson, R. C., & Firth, L. B. (2018). Partial replacement of cement for waste aggregates in concrete coastal and marine infrastructure: a foundation for ecological enhancement? *Ecological Engineering*, 120, 655-667.
- Meijer, J. R., Huijbregts, M. A., Schotten, K. C., Schipper, A. M. (2018). Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064006.
- Molenaar H., 2023. Suivi des boutures de *Posidonia oceanica* transplantées en février 2021 par l'AMPN et suivi des transplants de novembre 2018 d'Andromède Océanologie. Rapport Association Monégasque pour la Protection de la Nature : 1-35.
- Nakamura, M. (1985). Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan. *Bulletin of marine science*, 37(1), 271-278.
- Ollivier G., (1929). Etude de la Flore Marine de la Côte d'Azur. *Annales de l'Institut Océanographique*, 7(3) : 53-176.
- ONU (2023). Cadre mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 : <https://www.unep.org/fr/resources/cadre-mondial-de-la-biodiversite-de-kunming-montreal>
- Pastor, J. (2008). Rôle des enrochements côtiers artificiels dans la connectivité des populations, cas du sar commun (*Diplodus sargus*, Linné, 1758) en Méditerranée nord-occidentale. Doctoral dissertation, Université de Perpignan ; Ecole pratique des hautes études-EPHE PARIS
- Pergent G., (2023). Rapport de mission : État de référence des touffes de *Posidonia* présentes sur le plateau de la Réserve des Spélugues. Direction de l'Environnement : 1-11.

- Pergent-Martini C., Pergent G., Monnier B., Boudouresque C.F., Mori C., Valette-Sansevin A., 2021. Contribution of *Posidonia oceanica* meadows in the context of climate change mitigation in the Mediterranean Sea. *Marine Environmental Research*, 165, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105236>
- Perkol-Finkel, S., & Sella, I. (2015). Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 168, No. 3, pp. 102-110). Thomas Telford Ltd.
- PIANC (2018). *Guidance on Applying Working with Nature to Navigation Infrastructure Projects*. EnviCom 16. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 <https://www.pianc.org/working-with-nature/>
- Pinault, M., Pioch, S., Pascal, N. (2017). Méthode MERCI-COR pour le dimensionnement des mesures compensatoires en milieu corallien. Ministère de l'Énergie, de l'Environnement et de la Mer – Ifreco (éd.), 76 p.
- Pioch, S. (2008). Les « habitats artificiels » : élément de stratégie pour une gestion intégrée des zones côtières ? Essai de méthodologie d'aménagement en récifs artificiels adaptés à la pêche artisanale côtière. Doctoral dissertation, Université Paul Valéry-Montpellier 3; Tokyo University of Marine Science and Technology.
- Pioch, S., Kilfoyle, K., Levrel, H., & Spieler, R. (2011). Green marine construction. *Journal of Coastal Research*, (61 (10061)), 257-268. <https://theses.hal.science/tel-01971993>
- Pioch, S., Souche, J. C. (2021). L'écoconception des infrastructures maritimes : Vers un aménagement intégré à l'environnement. ISTE Group, Londres, 275p. Disponible sur le site consulté le 21/08/2023 : <https://www.istegroup.com/fr/produit/lecoconception-des-infrastructures-maritimes/>
- Pioch S., Souche J.C. (2023). Écoconception des ouvrages maritimes : de la théorie aux exemples appliqués. *Techniques de l'Ingénieur*, GE 1 024, pp. 1-21. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ge1024>
- Pioch, S., Desse, M. (2023). L'aménagement des littoraux touristiques français et la perte de biodiversité : l'heure des grands choix. *Norois*, 266, 91-112.
- Rigo I., Paoli C., Dapuzo G., Pergent-Martini C., Pergent G., Oprandi A., Montefalcone M., Bianchi C.N., Morri C., Vassallo P., (2021). The natural capital value of the seagrass *Posidonia oceanica* in the North-Western Mediterranean. *Diversity*, 13, 499, doi:10.3390/d13100499
- Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619-1654.
- Salgues, M., Pioch, S., Souche, J. C., de Weerd, K. (2020). L'écoconception maritime : une révolution pour les maîtres d'ouvrages. *Revue Paralia*, 13, n01-1.
- Sawyer, A.C., Toff, J.D. and Cordell, J.R., (2020). Seawall as salmon habitat: Eco-engineering improves the distribution and foraging of juvenile Pacific salmon. *Ecological Engineering*, 151, p.105856.
- Schaefer, N., Sedano, F., Bishop, M. J., Dunn, K., Haeusler, M. H., Yu, K. D., Dafforn, K. A. (2023). Facilitation of non-indigenous ascidian by marine eco-engineering interventions at an urban site. *Biofouling*, 39(1), 80-93.
- Schwartz, T. (2020). Les dispositifs artificiels au service de la restauration et de la compensation écologique : de l'évaluation du risque de piège écologique aux recommandations de bonnes pratiques. Doctoral dissertation, Université Paris sciences et lettres, CEFE.
- Tomasello A., Pirrotta M., Calvo S., (2019). Construction underwater landscape by using *Posidonia oceanica* transplanting combined with innovative artificial reefs. In: *Proceedings of the 6th Mediterranean Symposium on Marine vegetation*, Antalya, Turkey: 92–96.
- Traganos D., Lee C.B., Blume A., Poursanidis D., Čížek H., Deter J., Mačić V., Montefalcone M., Pergent G., Pergent-Martini C., Ricart A.M., Reinartz P., (2022). Spatially explicit seagrass extent mapping across the entire Mediterranean. *Frontiers in Marine Science*, 9: 871799. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.871799>
- Vandewalle, M., De Bello, F., Berg, M. P., Bolger, T., Dolédec, S., Dubs, F., Woodcock, B. A. (2010). Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms. *Biodiversity and Conservation*, 19, 2921-2947.

#### **Déclaration de conflits d'intérêts :**

Certains membres du Comité de Suivi Environnemental déclarent avoir eu des relations d'expertise ou de collaboration scientifique avec plusieurs entreprises citées dans le présent rapport, en voici la liste : BRLi, Egis Eau, Creoclean, Suez Environnement, AMARECO, Gaia environnement, SeaBoost, Econcrete, Bouygues TP, Line-up Ocean et Géocorail.

Néanmoins, l'objectivité et l'impartialité dans les recommandations ont, autant que faire se peut, guidés la rédaction de ce guide.

# Table des figures

<b>Figure 1</b> : Logique d'insertion du guide dans la Stratégie Nationale pour la Biodiversité à horizon 2030	<b>6-7</b>
<b>Figure 2</b> : Etat de conservation des habitats marins et côtiers d'intérêt communautaire (MNHN – UMS PatriNat, 2020)	<b>10</b>
<b>Figure 3</b> : Différence d'approche entre l'écoconception aux stades d'esquisses/faisabilités et l'approche actuelle réglementaire de la séquence « Eviter Réduire et Compenser » intégrant des objectifs écologiques au stade d'Avant-Projet (Pioch et Souche, 2021).	<b>12</b>
<b>Figure 4</b> : Bloc de digue, mimant les cuvettes naturelles, destiné à l'accueil d'une algue brune la cystoseire, en béton imprimé 3D à Monaco (photo : Direction de l'Environnement)	<b>14</b>
<b>Figure 5</b> : Méthodologie d'écoconception (Pioch et Souche, 2021)	<b>16</b>
<b>Figure 6</b> : Missions de maîtrise d'œuvre d'écoconception (Pioch et Souche, 2021)	<b>16</b>
<b>Figure 7</b> : Organisation et connectivité des habitats essentiels liés au repos-protection, l'alimentation et la reproduction chez les organismes marins (Cheminée et al. 2014).	<b>18</b>
<b>Figure 8</b> : A gauche le tombant des Spélugues, cavité naturelle abritant une colonie de corail rouge, à droite une paroi en béton biomimétique, éco-conçue mimant (en pointillé noir) les caractéristiques naturelles favorables au corail : forme, profondeur...	<b>21</b>
<b>Figure 9</b> : Exemple de substrats biomimétiques installés en Corse et colonisation après 9 mois (Photo : S. Pioch)	<b>22</b>
<b>Figure 10</b> : Haut à gauche intégration esthétique de la digue de protection d'Headland Park (Sydney, Australie) ; haut à droite détail d'un bassin éco-conçu ; en bas détail des panneaux de quais en béton (photos : K. Dafforn)	<b>22</b>
<b>Figure 11</b> : Reproduction d'un habitat coralligène par mimétisme, à haut à gauche roches naturelles, haut droit bloc imprimé 3D avant colonisation ; en bas bloc imprimé 3D après 3 ans, à gauche vue de côté, à droite détail de la colonisation © Direction de l'Environnement	<b>23</b>
<b>Figure 12</b> : Localisation des sites littoraux et maritimes français et monégasques utilisant des ouvrages éco-conçu à un stade opérationnel (non expérimental) au 1/01/2020 (Pioch et Desse, 2023)	<b>26</b>
<b>Figure 13</b> : Photo des parois externes (façades) des caissons jarlan. Différence nette de colonisation entre les parois striées (éco-conçues) et celles lisses en béton (classique), photo : Direction de l'Environnement-Monaco	<b>27</b>
<b>Figure 14</b> : A gauche coralligène (habitat cible) et à droite photogrammétrie 3D du lest biomimétique du Toulonnais (photo : Direction de l'Environnement-Monaco)	<b>28</b>
<b>Figure 15</b> : A gauche l'ancien coffre, ouvrage cubique « classique » à droite le lest éco-conçu, noter les bancs de poissons présents sur la structure éco-conçue qui fournit un habitat de type coralligène (photo : Direction de l'Environnement-Monaco)	<b>28</b>
<b>Figure 16</b> : Deux photos du haut, lests classiques, deux photos de droite en dessous, lest éco-conçu avec béton rugueux mimant la roche naturelle du micron au cm lors de l'immersion sept 2021 (photo : S. Pioch), deux photos de gauche présence d'un jeune mérrou brun à trou, dans les lests éco-conçus 2 ans après (photos : S. Pioch, G. Pergent et Stareso)	<b>29</b>
<b>Figure 17</b> : Haut, lests en béton classiques (photos : NEGRI et DE), bas gauche lest éco-conçu avant immersion avec béton rugueux et une fonction d'habitat dégagée entre les deux parties du bloc, bas droite lest colonisé après 13 ans (photos : Egis eau et M. Pinault)	<b>30-31</b>
<b>Figure 18</b> : Quai promenade éco-conçu de la ville de Seattle (photos : Office of the waterfront and civic projects, <a href="https://waterfrontseattle.org/waterfront-projects/seawall">https://waterfrontseattle.org/waterfront-projects/seawall</a> et Sawyer et al. 2020).	<b>32</b>
<b>Figure 19</b> : Deux photos en haut, ouvrage classique en palplanche de protection de quai (promenade), six photos en dessous, ouvrage éco-conçu de type © Sea-Hive, à noter colonisation naturelle par des graines de mangrove des failles disposées pour leur accueil (photos : S. Pioch).	<b>33-34</b>
<b>Figure 20</b> : Types d'espèces cibles A, B ou C en fonction de leur relation avec un habitat artificiel (d'après Nakamura, 1985)	<b>35</b>
<b>Figure 21</b> : Exemple de distribution des espèces monégasques, selon la bathymétrie et les types de fonds marins artificiel et naturels (conception : S. Pioch et dessin : J.L. Feron)	<b>37</b>
<b>Figure 22</b> : Exemples d'espèces intra-portuaires rencontrées en méditerranée d'en haut à gauche, en bas à droite : banc de juvéniles de mendole ( <i>Spicara maena</i> ), jeunes adultes d'oblade ( <i>Oblada melanura</i> ), juvénile de langouste ( <i>Palinurus elephas</i> ) et sars ( <i>Diplodus sargus</i> ) (photos : S. Pioch et G. Pergent)	<b>37</b>

- Figure 23** : Germination de graines sur des petits amas de roches (à gauche) et modules en étoile sur la risberme (bord et ballast) au pied de la digue de Fontvieille (à droite) (photos : Gérard Pergent) **42**
- Figure 24** : Séquence « Posidonie » dans le cadre d'une approche d'écoconception. **43**
- Figure 25** : Photo de coralligène monégasque (photo : Direction de l'Environnement-Monaco) **44**
- Figure 26** : Récif artificiel mimant le coralligène conçu par Boskalis et photo après 3 ans (Elisabeth Riera et Aquanaute). **45**
- Figure 27** : Préconisation d'objectifs d'écoconception pour les ouvrages monégasques **51**
- Figure 28** : Subdivisions verticales des fonds marins (extrait de Doré A., Horellou A., Herard K., Tourout J., 2015. ZNIEFF MARINES - Pratiques et mise en oeuvre sur les substrats durs. Rapport SPN 2015 – 47. MNHN, Paris, 55 p.). **65**
- Figure 29** : Localisation des différentes zones de roches profondes à peuplement coralligène (modifié de Thomassin & Gourbesville 2006). Les flèches rouges indiquent les étapes de migration des juvéniles à partir des nurseries côtières (cf. 2.3). **66**

## Table des tableaux

- Tableau 1** : En fonction des sites d'installation, les conditions d'agitation sont différentes, attirant ainsi des espèces à divers stades de développement en fonction de leurs besoins (Photos : Direction de l'environnement). **20**
- Tableau 2** : Relation entre les types d'espèces cibles et les designs des habitats artificiels (HA) créés par des ouvrages éco-conçus **36**
- Tableau 3** : Liste des espèces cibles présentes dans, ou à proximité, des infrastructures maritimes monégasques et niveau de pression anthropique. **38**
- Tableau 4** : Les principaux ouvrages utilisés en sites maritimes et leurs réalisations selon une méthodologie d'écoconception (Pioch et Souche, 2023) **40**
- Tableau 5** : Echelle structurelle de l'ouvrage et aspects obtenus selon les objectifs écologiques et techniques disponibles **41**
- Tableau 6** : Indicateurs, critères et exemples de métriques pour réaliser un suivi écologique complet des structures physico-chimique, biologique et des fonctionnalités écologiques d'un ouvrage éco-conçu **47**
- Tableau 7** : Types et parties d'ouvrages pouvant être éco-conçues avec des exemples de techniques et d'entreprises **52**
- Tableau 8** : Liste des expériences de transplantation de Corail rouge (*Corallium rubrum*) **69**



**ANNEXES**



# Annexe 1

## Les caractéristiques des biocénoses de la mer de Monaco

L'étude des écosystèmes de la mer de Monaco a réellement débuté au début du XX<sup>e</sup> siècle avec les travaux de Nathansohn sur le plancton, publiés dans le Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco. Dans le domaine des communautés benthiques, il faut citer les travaux d'Émile Topsent sur les éponges, de Gilat et surtout de Christian Carpine sur les gorgonaires, travaux également publiés dans le Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco. Pour une synthèse des connaissances, on peut citer l'ouvrage «XX ans au service de la Nature» (AMPN, 1995), l'étude de Fredj et al. (1993) réalisée à la demande du Département des Travaux Publics ou la synthèse de Thomassin & Gourbesville (2006) réalisée à la demande de la Direction de la Prospective et des Etudes d'Urbanisme. La faune marine de Monaco est très riche en comparaison avec les zones proches, cet état de fait pouvant être du à deux phénomènes : une grande diversité de milieux et la présence depuis 1976 d'une importante réserve sous-marine enrichie en 1986 par une réserve plus modeste en taille, mais importante par le coralligène qu'elle protège (Francour et al. 1999).

Dans leur synthèse, Fredj et Di Geronimo (1985) estiment que la surface du plateau continental, *i.e.* la zone comprise entre 0 et 100 m de profondeur, c'est-à-dire celle sur laquelle peuvent porter des aménagements écoconçus, est d'environ 770 ha, dont seulement 50 sont inclus dans les deux réserves sous-marines que compte la Principauté, soit un pourcentage de 6,5%, loin des 30 % de l'objectif des Nations Unies. Le linéaire côtier est de 4,1 km.

Tout comme des étages de végétation peuvent être observés en montagne, les écosystèmes caractéristiques de la mer de Monaco peuvent être classés selon leur profondeur, c'est-à-dire selon les caractéristiques du milieu (lumière, température, substrat, hydrodynamisme...), selon une terminologie définie par Peres & Picard (1964). Nous pouvons suivre pour la Principauté, le descriptif de Fredj et al. (1993) :

### Écosystèmes de lumière, appelés étage infralittoral

Ils se situent de la zone toujours immergée à la profondeur limite compatible avec la vie des algues photophiles et des phanérogames marines, soit entre 30 et 40 m. Les principaux écosystèmes de cet étage sont :

**La biocénose des herbiers de Posidonies** Ils sont présents dans presque toute la Méditerranée où ils couvrent plus de 2 millions d'hectares (Pergent-Martini et al., 2021 ; Traganos et al., 2022). Les rôles et services écosystémiques assurés par ces herbiers sont multiples (biologiques, physiques ou économiques). L'importance des herbiers en milieu littoral est souvent comparée aux forêts en milieu terrestre. Les services écosystémiques associés sont estimés à plusieurs dizaines de milliers d'euros par hectares et par an (Rigo et al., 2021). Les herbiers de posidonie sont également considérés comme des puits de carbone majeurs à l'échelle de la biosphère, à l'instar des tourbières ou des mangroves et jouent donc un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique (fixation et séquestration du Carbone ; IUCN, 2021).

La Réserve du Larvotto, créée en Août 1976, abrite l'essentiel des 140 000 m<sup>2</sup> d'herbiers de posidonie de la Principauté de Monaco (cf. carte ci-après). Dans le cadre de l'extension de l'Anse du Portier, les travaux, réalisés en mer, entre 2017 et 2020, ont entraîné une dégradation de l'environnement dans la partie Ouest de la Réserve (augmentation de la turbidité, dépôt de particules fines). Ces modifications sont à l'origine d'une baisse de la vitalité des posidonies, principalement en limite inférieure (partie la plus profonde de l'herbier) et à proximité de la zone des travaux. Trois années après la fin des travaux, l'herbier de posidonie montre une résilience importante, avec un arrêt de la régression et une stabilisation des principaux paramètres de vitalité (ex. densité, recouvrement, vitesse de croissance) aussi bien au niveau de l'herbier en place qu'au niveau des transplantations (Molenaar, 2023). D'autre part, suite à la réhabilitation du tombant de la Réserve des Spélugues, entre 2020 et 2021, 45 m<sub>2</sub> de mattes mortes « reliques », témoignant d'une extension passée de l'herbier dans ce secteur, ont été mis à jour, ainsi que plusieurs faisceaux vivants de posidonie (Descamp &

*Bianchimani, 2021*). Deux années après ces premières observations, les faisceaux de posidonie sont toujours présents et forment des touffes de 3 à 30 plantes, entre 9,7 et 12,4 m de profondeur, et font l'objet d'un suivi précis (*Pergent, 2023*).

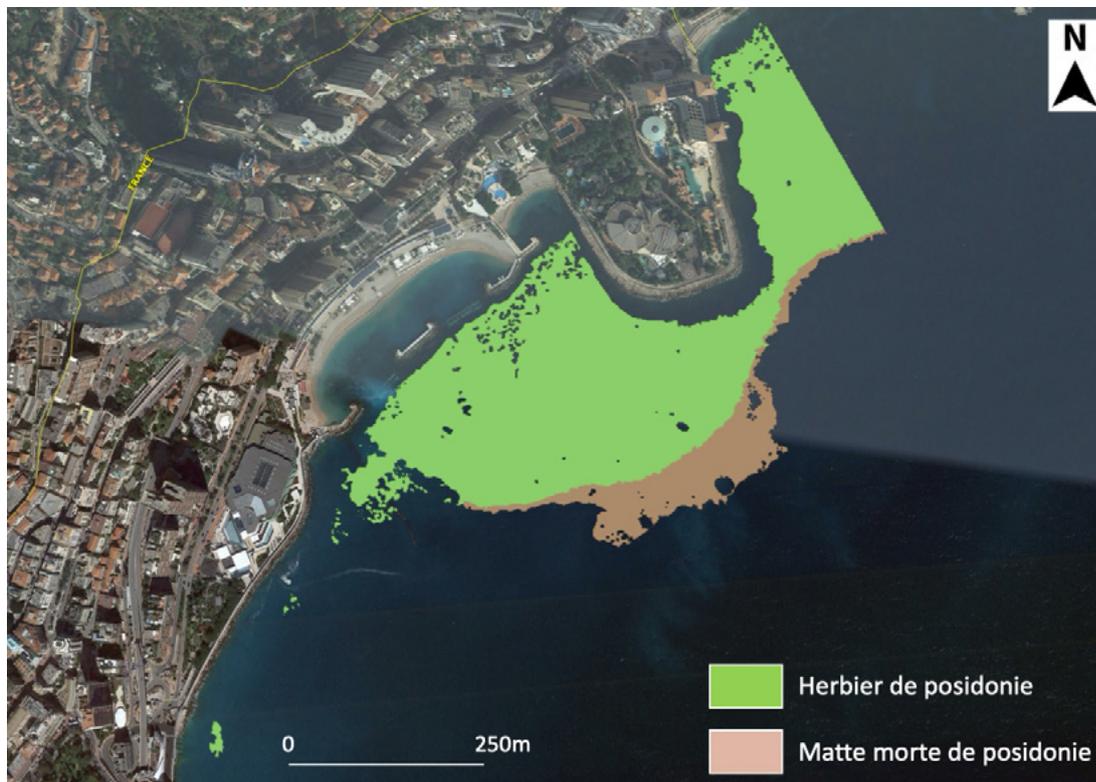


Figure 28 : Localisation des herbiers à *Posidonia oceanica* le long du littoral monégasque (d'après *Andromède océanologie, 2014*).

**La biocénose des algues photophiles** : cette biocénose, dominée par des algues rouges, occupe près des  $\frac{3}{4}$  du littoral sur les enrochements naturels ou artificiels. Dans cette catégorie entre les trottoirs à *Lithophyllum* formés par des algues calcaires (dont l'algue coralline, *Lithophyllum byssoides*). Situées autour du Sporting et sous le rocher de Monaco, ces structures aident à la protection de la côte. Anciennement présents sur le site de l'Anse du Portier, des blocs de ce trottoir ont été déplacés et relocalisés dans les enrochements sous le Parking des Pêcheurs où l'exposition et l'orientation sont similaires au site d'origine.

**Les biocénoses de sables et graviers** : très présente devant le port de Fontvieille ou le rocher, cette biocénose est riche d'animaux enfouis, filtreurs, détritivores ou simples prédateurs (Bryozoaires, Annélides, Mollusques, Échinodermes, Crustacés, poissons).

### Écosystèmes de fond, appelés étage circalittoral

A Monaco, ils se situent de 40 m à 150 m de profondeur (limite de la présence des algues) :

- **Le Coralligène sur substrat dur** (falaise et roches profondes) : écosystème iconique de la Méditerranée avec les herbiers de Posidonie, cet écosystème est spécifique de la Méditerranée. Il est caractérisé par la présence d'organismes fixés dit ingénieurs qui construisent réellement l'écosystème : Cnidaires, dont le corail rouge et les gorgones, Bryozoaires, Éponges, tuniciers, algues calcaires... On le trouve verticalement sur le tombant des Spélugues et dans les rochers profonds (roches Saint-Martin situées au droit de la digue flottante et roches Saint-Nicolas, à l'est de la jetée sud du port de Fontvieille, cf. *Dalias et al. 2014*).

- **La biocénose du détritique côtier** : cet écosystème fait suite à la biocénose de sables et graviers, on la retrouve donc devant le port de Fontvieille entre 45 et 75 m de profondeur, devant le Musée océanographique jusqu'au droit de l'entrée du port, ainsi qu'au large du Larvotto. Cet écosystème a tendance à s'envaser.
- **La biocénose du détritique envasé** : débutant vers 50 m de profondeur, cette biocénose s'étend jusqu'à 85 m à l'est de la Principauté. Elle occupe une grande partie du plateau continental monégasque.

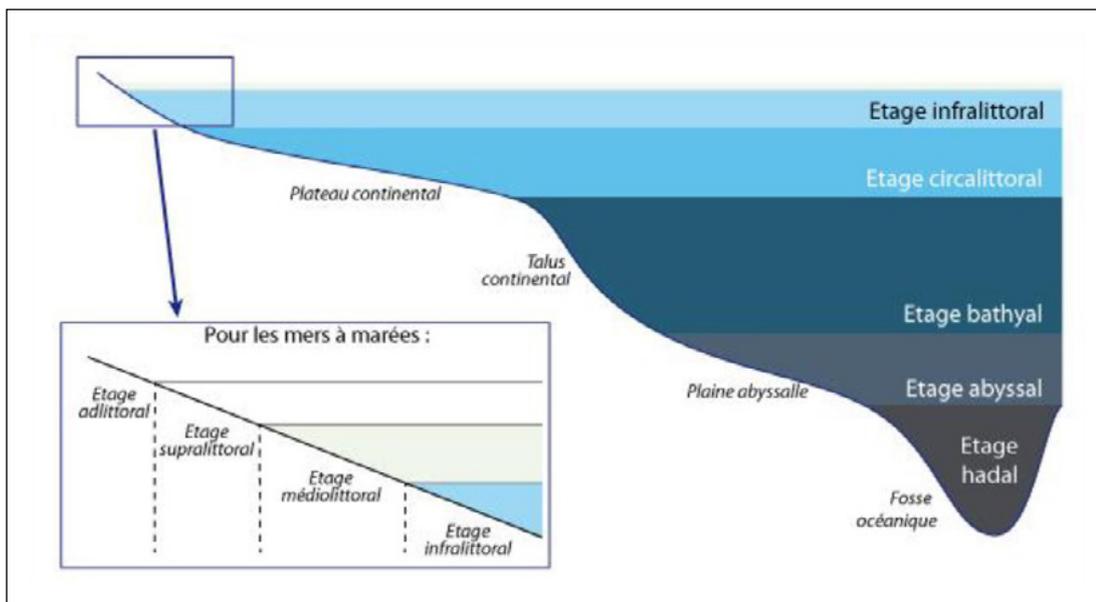


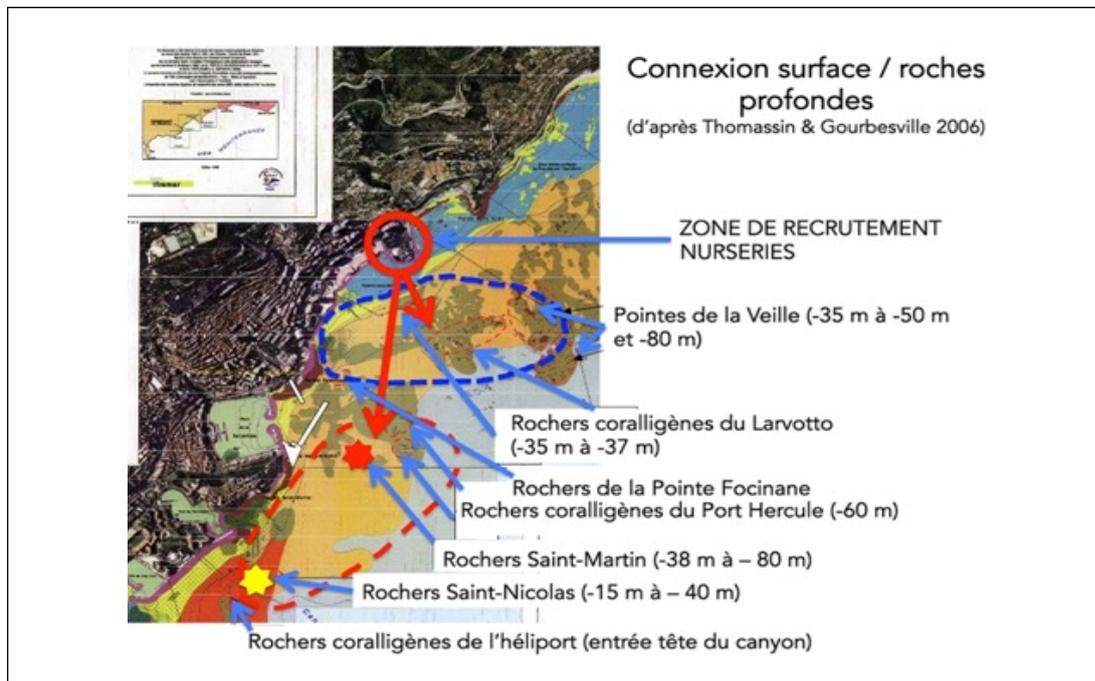
Figure 29 : Subdivisions verticales des fonds marins (extrait de Doré A., Horellou A., Herard K., Touroult J., 2015. ZNIEFF MARINES - Pratiques et mise en œuvre sur les substrats durs. Rapport SPN 2015 – 47. MNHN, Paris, 55 p.).

## Annexe 2

### Importance de la connectivité entre roches profondes et ouvrages côtiers

Les eaux côtières monégasques recèlent plusieurs zones rocheuses à haute valeur patrimoniale situées entre 20/30 et 80 m de profondeur. Celles-ci ont fait l'objet d'un inventaire (Thomassin & Gourbesville 2006). Parmi ces zones profondes, sept présentent un intérêt particulier (Figure 4) :

- Les roches de « la Pointe de la Veille », qui prolongent vers le large la pointe du même nom et qui se répartissent en deux ensembles, l'un localisé entre 35 et 50 m de profondeur et émergeant de fonds « détritiques envasés », l'autre situé plus au large et plus profond (70 à 80 m environ),
- Les roches du « Larvotto », qui prolongent la Pointe du Sporting et qui se situent en limite de la « Réserve sous-marine du Larvotto » pour les moins profondes (35 à 37 m),
- Les roches « Focinane », par le travers Sud-Est de la Pointe du même nom,
- Les roches « Saint-Martin », par le travers Sud-Est de l'extrémité de la digue flottante sud du port Hercule qui s'étendent au milieu du plateau continental par 52 à 60 m environ de profondeur,
- Les roches « Saint-Nicolas », par le travers de la jetée sud du port de Fontvieille au pied de la digue, de 15 m à 40 m
- Les roches « de la digue de Fontvieille », par le travers Sud-Est de ce quartier, et situées à proximité de la tête du canyon de Monaco.



Les écosystèmes de ces roches sont caractéristiques du coralligène méditerranéen : corail rouge (*Corallium rubrum*), gorgones (*Eunicella cavolinii*, *E. singularis*, *E. verrucosa*, *Leptogorgia sarmentosa*, *Paramuricea clavata*), coraux Scléactiniaires (*Cladocora caespitosa*, *Leptopsammia pruvoti*), Alcyonaires, Hydriaires, éponges (*Crambe crambe*, *Axinella polypoides*, *Clathrina...*), vers tubicoles, Bryozoaires, etc.

Ces îlots sont alimentés par des courants de fonds, assez soutenus, favorisant leur colonisation par de nombreux poissons qui y trouvent refuge et nourriture. Cette connectivité est un élément très important à prendre en compte pour optimiser le fonctionnement entre les zones artificialisées côtières et ces roches profondes, véritables poumons écologiques des fonds monégasques.

## Annexe 3

### Focus sur le corail rouge de Monaco : retours d'expériences et recommandations

Les premières expériences de transplantation de corail rouge ont été réalisées par Weinberg dès la fin des années 1970 à Banyuls (*Weinberg 1979*) : le corail était fixé par des vis de serrage sur des supports à différentes profondeurs. Malheureusement, pour diverses raisons (compétition avec les algues, irradiance, envasement...) la totalité des colonies transplantées n'ont pas survécu à l'expérience. D'autres expériences furent tentées dans les années 1980 en Corse et en Italie sans grande amélioration de la durée de vie des organismes transplantés. Il faut attendre les années 1990 pour que des expériences réalisées dans les réserves sous-marines de Monaco (Spélugues et Larvotto) par l'AMPN avec le concours scientifique du CSM et de l'Institut de Zoologie de l'Université de Gênes donnent enfin des taux de survie proche de 100% (*Allemand et al. 2000*). Pour assurer ce succès, les colonies ont été transplantées aux profondeurs où le corail vit naturellement. Son environnement a été recréé sous la forme de grottes artificielles en béton (poids unitaire de 8 t immergée en janvier 1989). Les colonies ont été fragmentées à l'aide d'une pince à os puis collées à l'aide d'une résine époxy (Devcon) sur des supports en polypropylène horizontaux (de telle sorte que les colonies transplantées avaient la « tête » en bas). Devant le succès de cette première expérience, l'AMPN mit au point un second prototype de grotte artificielle réalisée en fibres de verre et résine polyester, matériau plus léger, et donc plus facilement positionnable sur le fond. Afin de tester les capacités de régénération des colonies de corail rouge, les « boutures » ont été réalisées à partir de fragments d'apex, de bases ou même de section de colonies. Dans tous les cas, la croissance a été effective démontrant de grandes capacités de régénération par fragmentation du corail rouge.

Afin d'améliorer ces méthodes de coralliculture, de nouvelles expériences ont été tentées en 2021, avec cette fois à l'esprit l'idée d'optimiser la reproduction de ces animaux. Pour cela, 6 petites grottes (environ 1 m<sup>3</sup>) ont été immergées à 35 m de profondeur dans les eaux monégasques (proches du Solarium), avec pour chacune des rapports de colonies mâles / femelles différents. L'objectif : tester le sex-ratio idéal pour améliorer la reproduction de cet animal emblématique. Cette expérience, effectuée dans le cadre de l'Unité de Biologie des Coraux Précieux élaborée entre le Centre Scientifique de Monaco et la Maison Chanel, est réalisé en collaboration avec l'Observatoire Océanologique de Banyuls (laboratoire Arago) et fait l'objet d'un soutien financier de la Fondation Prince Albert II de Monaco. Par la suite d'autres expériences ont été réalisées en utilisant les mêmes méthodes par des groupes italiens (Carlo Cerrano à l'Université de Gênes et Lorenzo Bramanti à l'Observatoire Océanologique de Banyuls avec un bon succès (cf. [Tableau 8](#) pour une liste des principales expériences sur le corail rouge). Il est important maintenant d'améliorer le taux de reproduction des colonies transplantées (c'est le paramètre testé dans l'expérience réalisée actuellement dans les eaux monégasques) et le taux de fixation des larves (dans la nature, plus de 90% des larves ne se fixent jamais et meurent dans la colonne d'eau). En cela les grottes artificielles servent de pièges à larve, les obligeant à se fixer au plafond.

Une fois validées, ces expériences pourront être appliquées à l'écoconception des ouvrages. Bien entendu, une écoconception réussie devra utiliser non seulement du corail rouge mais aussi d'autres organismes sessiles (gorgones, éponges par exemple).

Référence	Date du début de l'expérience	Lieu	Technique	Profondeur (m)	Résultat
Weinberg 1979	1976	Banyuls-sur-Mer	Vissage	10	10% mortalité
Bianconni al., 1988	1986	Sandola	Fixation par des fils métalliques	36 - 39	100%
Giacomelli et al. 1989	1986	Naples, station zoologique	Fixation par des fils de cuivre	-	?
Allemand et al. 2000	1989	Monaco	Résine	27 - 35	100 % de survie
Pais et al. 1992	1990	Alghero	Ciment	25	100 % de survie
Cerrano et al. 1997		Île de Gallinara	Époxy, ciment	20 - 25	100 % de survie
Cerrano et al. 2000		Portofino & Île de Gallinara	Époxy	24 - 35	?
Bramanti et al. 2005, 2007	2003	Italie	Fixation par vissage sur une plaque de Marbre	25 - 35	Fixation de larves
Ledoux et al., 2015		Île du Riou, Marseille	Fixation sur disque	20 - 40	100 % de survie
Estaque 2021	2020	Calanques de Cassis	Époxy	10 - 27	96 % de survie
Villechanoux et al. 2022		Île de Gallinara & Portofino	Époxy	30	> 60% mortalité
Koido et al., 2022	2016 - 2017	Kochi, Japon	Époxy	100	81 % survie

Tableau 8 : Liste des expériences de transplantation de Corail rouge (*Corallium rubrum*)

**Ce guide est à citer sous la référence :**

« Guide pour l'écoconception des ouvrages maritimes - Développer des solutions fondées sur la nature en génie civil maritime ».

*Direction de l'Environnement - Gouvernement Princier de Monaco et son Comité de Suivi Environnemental composé de Pioch, S., Pergent, G., Allemand, D., Simard, F., De Monbrison D., (2023).*



*Juvenile de mérou brun (Epinephelus marginatus) espèce protégée en méditerranée, en pied d'ouvrage de l'extension en mer Mareterra en 2023 (photo : Direction de l'Environnement de Monaco)*









**Direction de l'Environnement**

Le Triton  
5, avenue du Gabian  
98000 Monaco  
Tél : +377 98 98 81 79  
Fax : +377 92 05 28 91  
environnement@gouv.mc  
[www.gouv.mc](http://www.gouv.mc)