



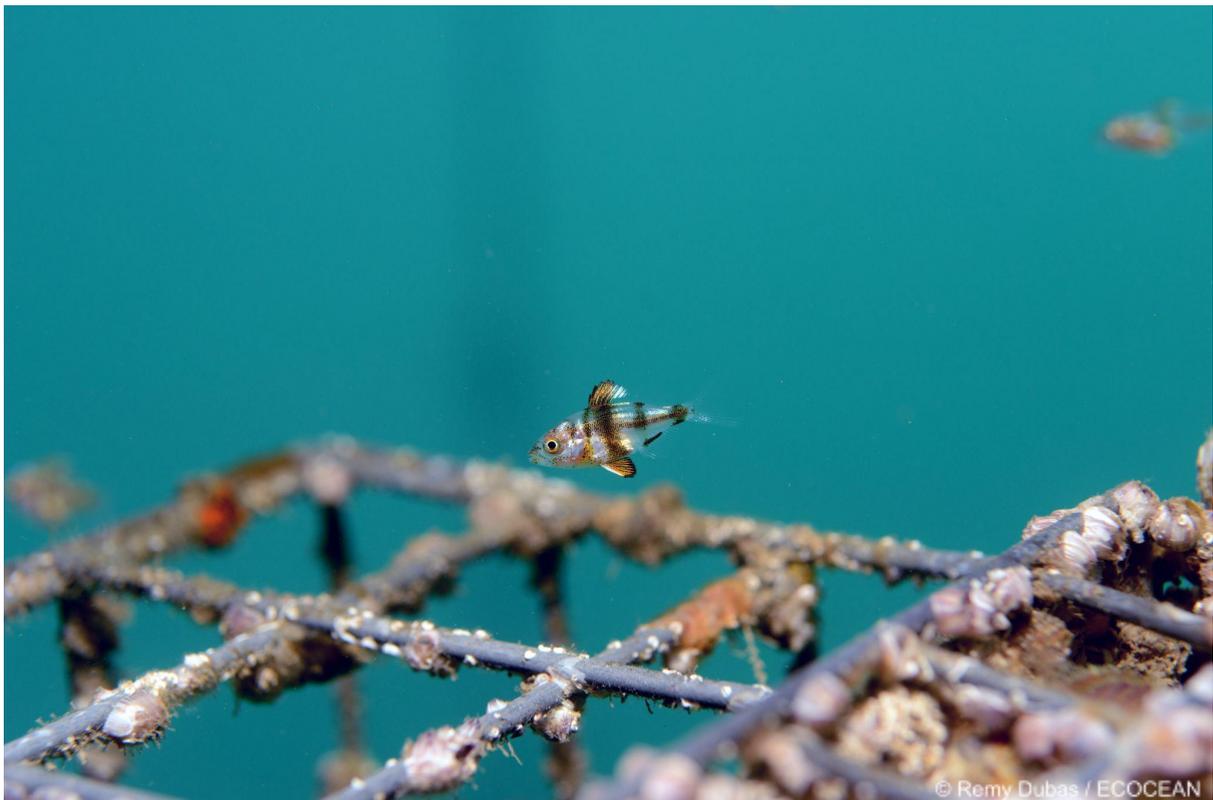
Faculté des Sciences
de l'Université de Montpellier



Diplôme d'Université (DU)
« Restauration écologique des petits fonds marins côtiers »

Année 2023

Evaluation des solutions existantes de restauration des fonctions nurseries des zones portuaires



Samuel JEGLOT

Sous la tutelle de Gilles LECAILLON

RÉSUMÉ

Les petits fonds côtiers abritent un habitat essentiel pour le cycle de reproduction des poissons : les nurseries. Elles vont fournir nourriture et abri aux larves qui vont y grandir à l'abri des prédateurs.

Cependant, l'artificialisation du littoral et le développement des infrastructures portuaires ont entraîné la disparition des nurseries côtières, conduisant à une concentration des jeunes poissons dans les ports, qui offrent un habitat moins complexe, les rendant plus vulnérables à la prédation.

Dans ce contexte, la restauration écologique des petits fonds côtiers est devenue une politique complémentaire à la lutte contre la pollution et à la préservation des habitats côtiers. Elle vise à recréer les fonctions des nurseries en utilisant des habitats artificiels dans les ports. Des études pilotes ont montré des résultats encourageants, avec une augmentation de la biodiversité et de l'abondance des espèces sur les structures artificielles par rapport aux habitats naturels.

Le rapport se concentre sur l'état des lieux des différentes solutions de restauration écologique de la fonction nurserie disponibles sur le marché. Il présente les solutions proposées par des sociétés spécialisées telles qu'Ecocean, Suez, Seaboost, P2A Développement et Architeuthis. Le niveau de maturité des solutions varie, certaines étant déjà opérationnelles, leur efficacité étant validée scientifiquement, tandis que d'autres sont encore au stade expérimental.

L'évaluation de l'efficacité des solutions de restauration écologique est essentielle, mais elle présente encore des défis. Les opérations sont souvent basées sur des études pilotes à court terme, et les solutions proposées restent souvent au stade de prototype. Des retours d'expérience solides et indépendants sont nécessaires pour quantifier l'efficacité réelle de ces opérations et dissiper tout scepticisme quant à leur impact environnemental.

En conclusion, la restauration écologique des nurseries côtières dans les ports offre des perspectives prometteuses pour maintenir la biodiversité côtière. Cependant, il est important de continuer à évaluer et à améliorer les solutions existantes afin d'assurer leur efficacité et leur durabilité à long terme.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| RÉSUMÉ | 2 |
| SOMMAIRE | 3 |
| TABLE DES FIGURES | 4 |
| TABLE DES TABLEAUX | 4 |
| INTRODUCTION | 5 |
| Contexte..... | 5 |
| Objectif..... | 8 |
| PRÉSENTATION DES SOLUTIONS EXISTANTES | 9 |
| Biohut® Quai et Ponton d'Ecocean..... | 9 |
| Biohut® Kelp d'Ecocean..... | 10 |
| Biohut® Digue d'Ecocean..... | 10 |
| Roselière® de SeaBoost..... | 11 |
| Oursin® de SeaBoost..... | 11 |
| ReFISH de Suez Consulting..... | 12 |
| Sargass de P2A Développement..... | 13 |
| Protec de P2A Développement..... | 13 |
| Totem© et Tipesk© d'Architeuthis..... | 14 |
| Tableau comparatif des solutions et de leur évaluation..... | 15 |
| DISCUSSION | 16 |
| De l'importance de l'évaluation des solutions..... | 16 |
| Des matériaux à privilégier..... | 18 |
| CONCLUSION | 21 |
| BIBLIOGRAPHIE | 22 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 - Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement..... | 5 |
| Figure 2 - Taux d'occupation des petits fonds de 0 à -10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à nos jours..... | 6 |
| Figure 3 - Les trois types de réponses/actions possibles suite à une dégradation d'un ou plusieurs écosystèmes..... | 7 |
| Figure 4 - Module Biohut Quai | 9 |
| Figure 5 - Module Biohut Ponton | 9 |
| Figure 6 - Module Biohut Kelp | 10 |
| Figure 7 - Module Biohut Digue..... | 10 |
| Figure 8 - Roselière de SeaBoost..... | 11 |
| Figure 9 - Oursin de SeaBoost | 11 |
| Figure 10 - Module ReFISH de Suez Consulting | 12 |
| Figure 11 - Sargass de P2A Développement..... | 13 |
| Figure 12 - Protec de P2A Développement..... | 13 |
| Figure 13 - Module Totem d'Architeuthis..... | 14 |
| Figure 14 - Module Tipesk d'Architeuthis..... | 14 |
| Figure 15 - Description des différents niveaux de maturité technologique (TRL) appliqués à la restauration écologique des petits fonds côtiers..... | 16 |
| Figure 16 - Graphique représentant l'hydrophobicité par type de plastique..... | 18 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 - Tableau comparatif des solutions et de leur évaluation..... | 15 |
| Tableau 2 - Représentation des niveaux de maturité ou TRL des solutions de restauration écologique des nurseries portuaires..... | 17 |

INTRODUCTION

Contexte

Cycle de vie des poissons côtiers et nurseries (Figure 1)

La reproduction des poissons a lieu en pleine eau ou près du fond. Après fécondation et éclosion des œufs, les larves se dispersent au gré des courants pendant une durée relativement fixe. Cette phase de dispersion en milieu pélagique permet une colonisation de nouveaux habitats et un brassage génétique. Les larves entrent dans une phase active, le stade de « post-larve », au cours duquel elles se déplacent activement vers la côte pour coloniser un habitat favorable à leur installation sur le fond. Ils vont alors grandir dans la nurserie qui leur fournira nourriture et abri jusqu'à atteindre en quelques mois une taille dite refuge à partir de laquelle le taux de mortalité dû à la prédation est fortement diminué. Selon les espèces, au bout de quelques mois ou de quelques années, les juvéniles intégreront l'habitat des adultes. C'est la phase de recrutement. Ils vont alors continuer à grandir jusqu'à atteindre leur maturité sexuelle (Lenfant et al., 2015).

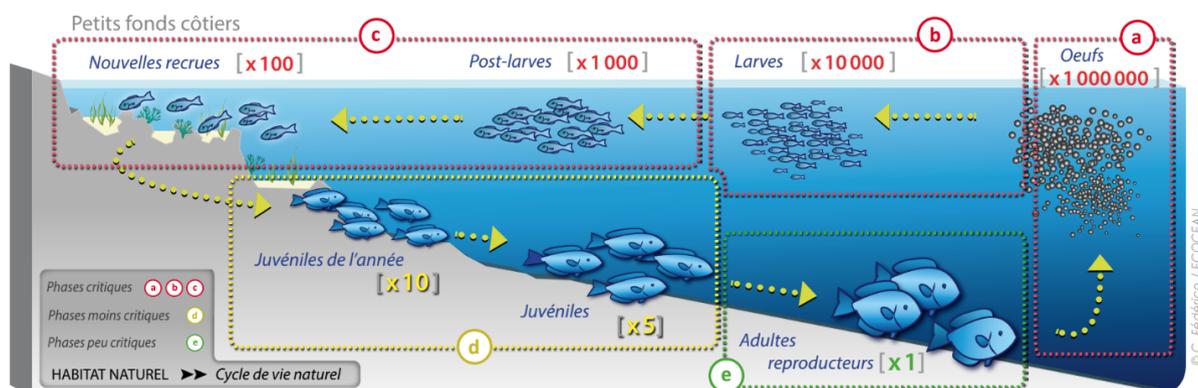


Figure 1 - Importance des taux de mortalité aux différents stades de développement. Les phases les plus critiques sont indiquées en rouge, moins critiques en jaune et peu critiques en vert (© C.Fédérico / ECOCEAN)

L'habitat nurserie est caractéristique de la morphologie et des besoins des espèces (Beck et al., 2001) :

1. une nutrition variée et adaptée,
2. un habitat favorable à l'installation des post-larves qui les protège des prédateurs et des pressions pendant leur période juvénile jusqu'à la taille refuge,
3. un environnement où les juvéniles grandissent plus vite et ont un meilleur taux de survie qu'ailleurs,
4. une localisation qui permet un déplacement vers les habitats adultes.

L'étude MedHab (2019 à 2021) a permis de localiser et quantifier sur l'ensemble de la façade méditerranéenne les nurseries de type petits fonds côtiers hétérogènes. Les premiers résultats ont montré que les nurseries de petits fonds côtiers hétérogènes représentent seulement 9% du littoral méditerranéen français et que chaque nurserie porte sur un linéaire côtier d'environ 50 mètres (Cheminée et al., 2021).

Activités humaines et infrastructures portuaires

Avec l'augmentation des activités humaines le long des littoraux, le développement des infrastructures côtières et l'artificialisation du littoral se sont accélérés. Ainsi le taux d'occupation des petits fonds côtiers entre 0 et -10 mètres en Méditerranée (figure 2) a été multiplié par 3 depuis 1975.

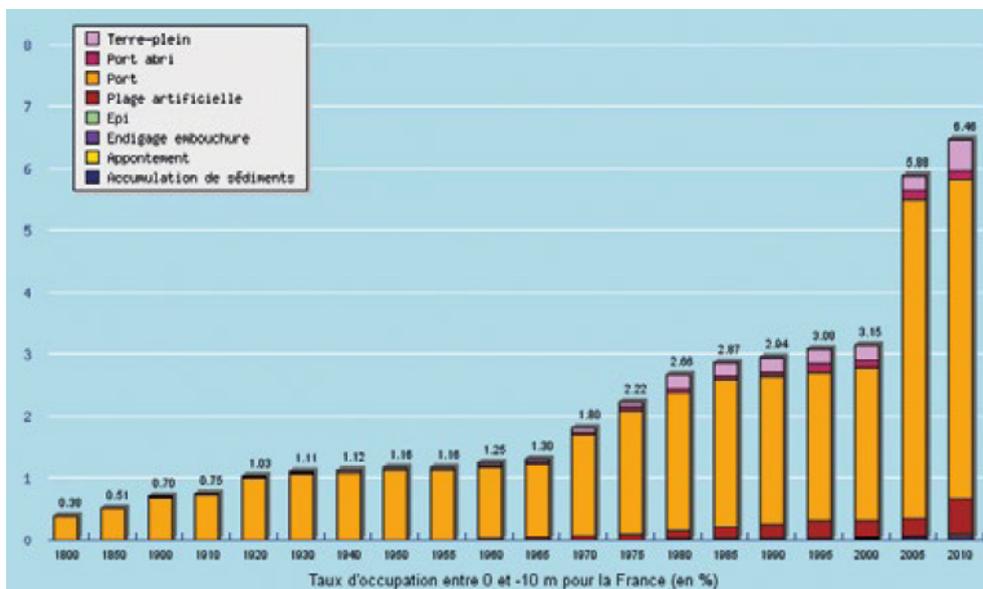


Figure 2 - Taux d'occupation des petits fonds de 0 à -10 mètres de la côte méditerranéenne française, de 1800 à nos jours (Données MEDAM)

L'artificialisation du littoral méditerranéen représente actuellement 10,8 % du linéaire côtier (soit 232 km) (Données MEDAM, 2023).

Les post-larves et jeunes recrues de poissons côtiers qui colonisent les côtes, se retrouvent souvent dans les ports du fait de l'artificialisation du littoral, zones qui étaient autrefois des nurseries. Ces ouvrages portuaires sont généralement moins complexes et hétérogènes que les habitats naturels qu'ils remplacent, ils sont de véritables pièges pour les jeunes stades de vie.

La restauration écologique en zone portuaire

La restauration écologique des petits fonds côtiers est une politique récente qui vient compléter la politique de lutte contre la pollution et la politique de non dégradation des habitats côtiers. Il convient de bien souligner que la restauration écologique ne trouve tout son intérêt et son efficacité que dans sa complémentarité avec les deux autres politiques. Ainsi et à titre d'exemple, restaurer une fonction nurserie dans un port n'a de sens que si ce port s'est déjà engagé dans une politique d'amélioration de la qualité de ses eaux.

Tout d'abord, il convient de préciser certains termes. Selon la société de restauration écologique (SER), la restauration écologique est définie comme le processus d'accompagnement vers la résilience d'un écosystème dégradé, détruit ou abîmé (SER, 2004). Avec la construction d'un port, les écosystèmes préexistants ont définitivement disparu et ne pourront jamais être restaurés. Cependant, il est possible de retrouver une ou des fonctions, un service particulier ou encore l'habitat de certaines espèces et le renforcement de leurs populations. L'objectif est souvent de retrouver une certaine

productivité de l'écosystème (figure 3). On parlera alors de réhabilitation écologique (Aronson et al., 1995). Par abus de langage, on appelle couramment les actions de réhabilitation, actions de restauration.

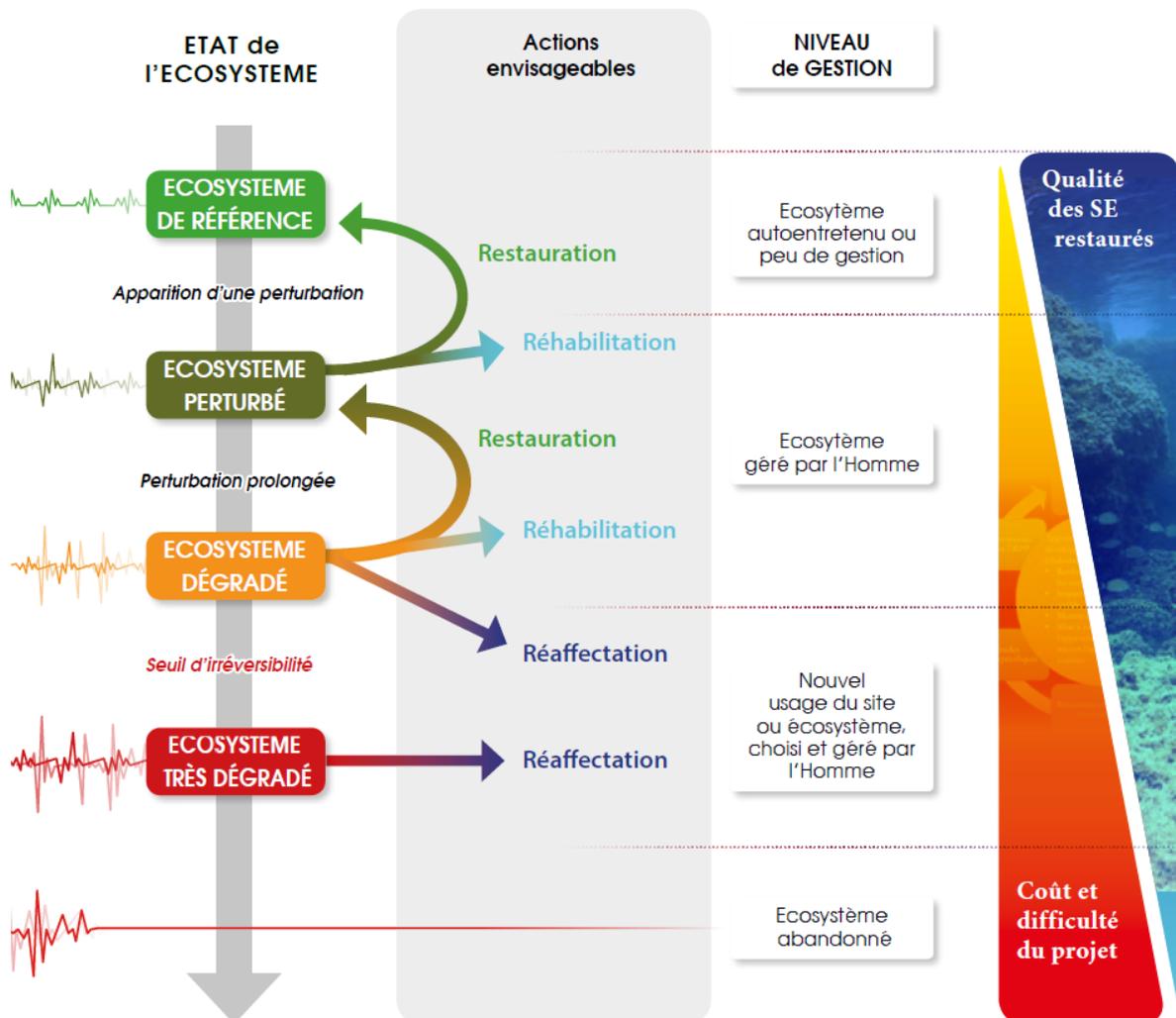


Figure 3 - Les trois types de réponses/actions possibles suite à une dégradation d'un ou plusieurs écosystèmes, les niveaux de gestion nécessaire et les objectifs correspondants. La notion de seuil d'irréversibilité est parfois théorique et de toute façon difficile à préciser sur le terrain. Modifié d'après Aronson et al., 2007

Depuis plus d'une décennie maintenant, des opérations pilotes ont été menées à travers le monde avec pour objectif d'utiliser l'ingénierie écologique et l'écoconception pour favoriser la biodiversité et réhabiliter des fonctions écologiques dans les ports. Le principe des solutions techniques proposées consiste à modifier la structure tridimensionnelle des ouvrages portuaires, soit en y fixant des micro-structures artificielles complexes, soit en intervenant directement sur leur topographie lorsqu'il s'agit d'éléments d'ouvrages nouveaux.

La plupart des suivis réalisés de par le monde lors de ces études pilotes ont montré des résultats très encourageants. Les structures éco-conçues fournissent généralement des conditions propices au développement de communautés fixées et sessiles diversifiées, avec une plus grande abondance d'individus que sur des structures « classiques ». Une étude à grande échelle, menée dans 14 zones

marines urbaines réparties sur la planète, a montré que le nombre total d'espèces pouvait être jusqu'à 2,7 fois supérieur sur des structures complexes éco-conçues que sur des témoins lisses (Strain et al., 2021). De plus, malgré l'effet délétère de la pollution sur les organismes, les densités de certaines espèces sur des structures éco-conçues dans les ports sont parfois équivalentes, voire supérieures, à celles observées dans des milieux naturels.

Aujourd'hui, tout concorde à dire que les projets d'ingénierie écologique visant à augmenter la complexité structurale des habitats portuaires sont des pistes intéressantes pour maintenir la biodiversité côtière.

Des solutions pour restaurer les nurseries côtières

En zones portuaires, l'objectif est de corriger la disparition des nurseries côtières par la mise en place d'habitats artificiels. Ce procédé tend à recouvrer la fonction écologique de nurserie, en protégeant les post-larves et les juvéniles de la prédation. Elles peuvent ainsi grandir à l'abri des prédateurs tout en s'alimentant grâce à la faune et flore fixée, présente en abondance.

Depuis 2013, en combinant recherche fondamentale et développement expérimental, des projets comme NAPPEX ou GIREL ont permis le développement d'outils innovants et opérationnels (Bouchouca *et al.*, 2016).

Objectif

L'objectif de ce rapport est de faire un état des lieux non-exhaustif des différentes solutions de restauration écologique de la fonction nurserie dans les infrastructures portuaires disponible aujourd'hui sur le marché. Leurs caractéristiques sont tout d'abord passées en revue, et une comparaison des matériaux employée est effectuée. Le niveau de maturité de ces solutions n'étant pas similaire, une discussion sur l'évaluation de leur efficacité est proposée.

PRÉSENTATION DES SOLUTIONS EXISTANTES

La thématique des nurseries en zone portuaire s'est démocratisée et devient une activité économique en plein essor avec le développement de sociétés spécialisées ayant acquis un savoir-faire.

Dans ce domaine, plusieurs sociétés disposent de solutions à différents niveaux de développement ou maturité. Dans ce mémoire, seules les solutions de restauration de la fonction nurserie à l'intérieur des ports seront passées en revue. Les solutions des sociétés Ecocean, Suez, Seaboost, P2A Développement et Architeuthis sont décrites en fonction des informations disponibles.

Biohut® Quai et Ponton d'Ecocean

Description :

Caisson grillagé vide (protection) accolé à un caisson grillagé contenant des coquilles (fixation nourriture).

Acier inoxydable et coquilles d'huîtres.

Fonctions écosystémiques :

Nurserie pour jeunes recrues de poissons, support faune flore fixées, habitat faune vagile.

Installation :

Biohut Quai : Fixation par perforation sur les quais (0-1 m) ;
Biohut Ponton : Suspension des Biohut sous les pontons, en subsurface (0-1m)

Durée de vie : 5 ans

Première installation : 2013

Projets existants : Plus de 30 ports en France.

Références / Publications :

Projets NAPPEX (Nurseries Artificielles Pour Ports Exemplaires) et GIREL (Gestion des Infrastructures pour la Réhabilitation Écologique du Littoral).

Publications scientifiques : Bouchoucha (2018), Bouchoucha (2016), Mercader (2018), Mercader (2017), Mercader (2016), Selfati (2018).

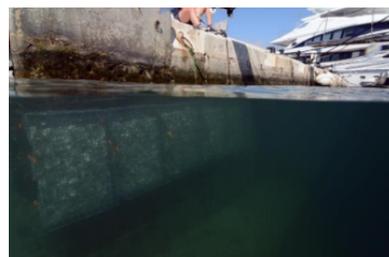
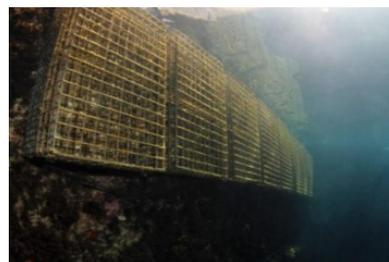


Figure 4 - Module Biohut Quai
(©Ecocean)

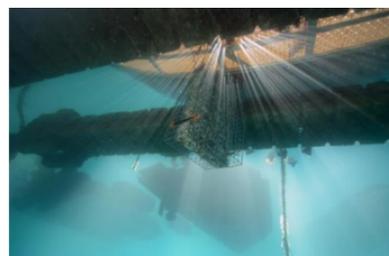
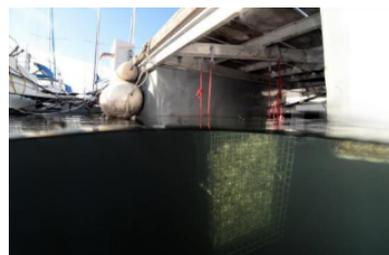


Figure 5 - Module Biohut Ponton
(©Ecocean)

Biohut® Kelp d'Ecocean

Description :

Platine acier + bois + fibre naturelle

Fonctions écosystémiques :

Nurserie pour jeunes recrues de poissons, support faune flore fixées, habitat faune vagile. Situé plus en profondeur que les Biohut Quai », permet d'offrir un abri pour les stades suivants le stade post larve (juvénile et subadulte).

Installation :

Profondeur d'installation : 1-5 m.

Durée de vie : 5 ans

Première installation : 2013

Projets existants : Port-Barcarès, Port-Vendres et Port des Embiez.

Références / Publications :

Thèse de recherche : Mercader (2018) "Restauration écologique des nurseries au sein des infrastructures portuaires : rôle sur l'écosystème marin", par Manon Mercader

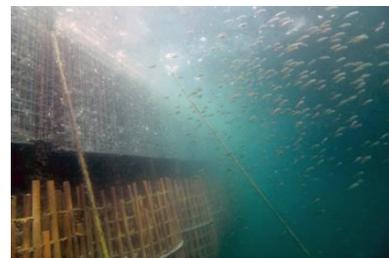


Figure 6 - Module Biohut Kelp
(©Ecocean)

Biohut® Digue d'Ecocean

Description :

Acier + tiges en bois & en acier + coquilles d'huîtres

Fonctions écosystémiques :

Nurserie pour poissons juvéniles de l'année côtiers, habitat corridor, support faune flore fixées.

Installation :

Positionné sur l'enrochement. Hauteur d'immersion : entre 0.5 et 5 m.

Durée de vie : 5 ans

Première installation : 2015

Projets existants : Port-La-Nouvelle, Port Leucate, St-Cyprien, Le Barcarès, Cerbère, Calais

Références / Publications :

Projet NUAMCE 2016-2017 : rapport scientifique CNRS/CEFREM.

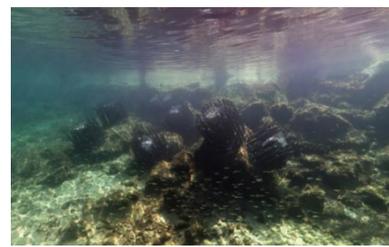
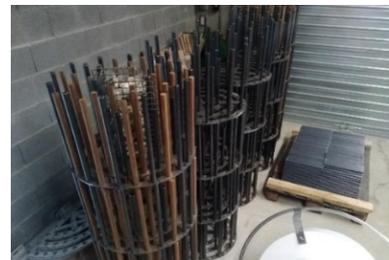


Figure 7 - Module Biohut Digue
(©Ecocean)

Roselière® de SeaBoost

Description :

Solution biomimétique des écosystèmes d'herbiers et d'algues. Constituée d'une sangle centrale de longueur modulable sur laquelle sont fixés des brins de longueur, nature et densité variable.

Matière biosourcée, biodégradable, végétale, Polypropylène (PP) conchylicole recyclable. A ce jour, seul le polypropylène (PP) est utilisé dans les projets de restauration (Seaboost, pers. comm.).

Fonctions écosystémiques :

Nurserie et habitat.

Installation :

Fixation des filins sur support existant par ligature sous les pontons, fixation sur support dédié (perçage, scellement, spit, ...) sur les quais.

Durée de vie : > 10 ans

Première installation : 2014

Projets existants : Seyne-sur-mer, Porquerolles, La Ciotat, Menton, Monaco, Marseille, Sanary-sur-Mer...

Références / Publications :

Projet GIREL (2015) : suivis scientifiques réalisés par le GIS Posidonie - Rapport non public.

Projet REXCOR (2015), projet XREEF (2017).

Pas de publications scientifiques.



Figure 8 - Roselière de SeaBoost
(©SeaBoost)

Oursin® de SeaBoost

Description :

Solution biomimétique qui s'inspire de relation symbiotique entre l'oursin diadème tropical et le rôle d'abri et de nurserie qu'il exerce vis-à-vis des espèces locales au stade juvénile.

Polypropylène (PP) conchylicole recyclable

Fonctions écosystémiques :

nurserie et habitat.

Installation :

En oursins suspendus sous un ponton ou en bout de ponton (lieu idéal pour un rôle de corridor) ou en demi-oursins fixés par scellement sur les blocs rocheux des digues

Durée de vie : > 10 ans



Figure 9 - Module Oursin de
SeaBoost (©SeaBoost)

Première installation : 2014

Projets existants : Seyne-sur-mer, Porquerolles, La Ciotat, Menton, Monaco, Marseille...

Références / Publications :

Projet GIREL (2015) : suivis scientifiques réalisés par le GIS Posidonie - Rapport non public.

Pas de publications scientifiques.

ReFISH de Suez Consulting

Description :

Solution biomimétique des écosystèmes d'herbiers et d'algues. Fibres en matière plastique biosourcée Rilsan® (3000 fibres/m²).

Fonctions écosystémiques :

nurserie pour jeunes recrues de poissons, support faune flore fixées, habitat faune vagile. Situé plus en profondeur que les Biohut Quai », permet d'offrir un abri pour les stades suivants le stade post larve (juvénile et subadulte).

Installation :

Suspendu sous les pontons. Scellé sur les quais ou pieux.

Durée de vie : inconnu

Première installation : 2015

Projets existants : Marseille, Toulon, Bormes-les-Mimosas, Seyne-sur-mer, Villefranche-sur-mer...

Références / Publications :

Suivis scientifiques réalisés par le GIS Posidonie - Rapport non public.

Suivis scientifiques réalisés par IFREMER : "Suivi écologique des populations de poissons sur les modules ReFISH dans les ports de La Seyne-sur-Mer, de Toulon Darse Nord, de Toulon Vieille Darse et de Saint Louis du Mourillon - année 2022".

Pas de publications scientifiques.

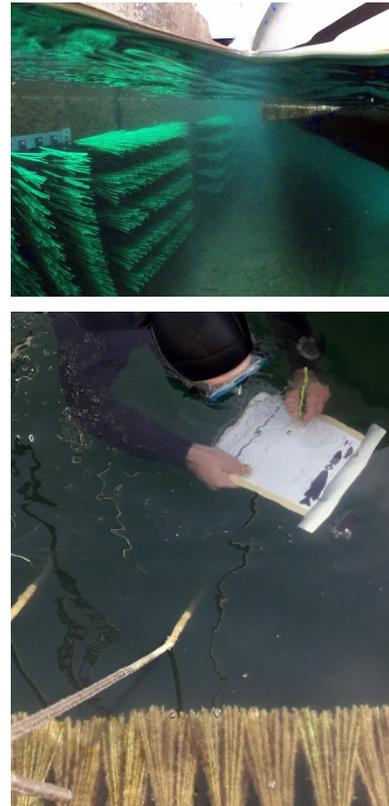


Figure 10 - Module ReFISH de Suez Consulting (© DR)

Sargass de P2A Développement

Description :

Solution biomimétique des écosystèmes d'herbiers.
Polymère ou fibres végétales. Flottant. Hauteur variable : 40 cm à 10 m. Diamètre : 30 cm.

Fonctions écosystémiques :

Nurserie

Installation :

Sous ponton, sous ligne de mouillage.

Durée de vie : inconnu

Première installation : inconnu

Projets existants : Mandelieu - La Napoule, Réserve marine du Golfe de Beauduc.

Références / Publications :

Suivis scientifiques réalisés par le GIS Posidonie (Golfe de Beauduc, 2015) - Rapport non public.
Pas de publications scientifiques.
Pas de retour de P2A Développement.



Figure 11 - Sargass de P2A Développement (© P2A)

Protec de P2A Développement

Description :

Module de parement en acier. Hauteur : 50 cm. Longueur : 1 m de long (adaptable). Largeur usuelle de 25 cm.

Fonctions écosystémiques :

Nurserie / Corridor.

Installation :

Sous ponton, sous ligne de mouillage.

Durée de vie : inconnu

Première installation : inconnu

Projets existants : Mandelieu - La Napoule.

Références / Publications :

Pas de références connues.
Pas de publications scientifiques.
Pas de retour de P2A Développement.



Figure 12 - Protec de P2A Développement (© P2A)

Totem© et Tipesk© d'Architeuthis

Description :

Structure grillagée qui entoure une géonatte tridimensionnelle Élodium© formant des circonvolutions aux dimensions variables.

Matériaux utilisés : grille plastique souple.

Fonctions écosystémiques :

nurserie pour jeunes recrues de poissons, support faune flore fixées.

Installation :

Le Tipesk peut être disposé sur les parois verticales du port. Le Totem est destiné à être ancré sur les enrochements submergés des digues portuaires. Sa base souple lui permet de s'adapter à la houle et aux tempêtes côtières.

Durée de vie : inconnu

Première installation : inconnu

Projets existants : Tipex : prototype testé à Brest ; Totem : prototype testé en Corse ; projet en cours à la Réunion.

Références / Publications :

Pas de références.

Pas de publications scientifiques.

Pas de retour d'Architeuthis.



Figure 13 - Totem© d'Architeuthis
(© Architeuthis)



Figure 14 - Tipesk© d'Architeuthis
(© Architeuthis)

Tableau comparatif des solutions et de leur évaluation

Tableau 1 : Tableau comparatif des solutions et de leur évaluation : récapitulatif des caractéristiques des différentes solutions de nurseries portuaires, l'importance des opérations de restauration réalisées, le suivi, l'évaluation de l'efficacité écologique et son partage à la communauté.

| Nom Fournisseur | Fonctions | Matériaux | Projets | Suivi | Efficacité écologique | Partage évaluation |
|----------------------------------|-----------------------------|--|---------|--|------------------------|--|
| Biohut Quai Ecocean | Nurserie, habitat | Acier Crapal® Coquilles huîtres | ++++ | Standardisé et base de données commune | Démontrée | Publications scientifiques + Thèses de recherche |
| Biohut Kelp Ecocean | Nurserie, habitat | Platine acier + bois + fibre naturelle | ++ | Non standardisé | Démontrée | Thèse de recherche |
| Biohut Digue ECOCEAN | Nurserie, habitat, corridor | Acier + tiges bois & acier + coquilles d'huîtres | + | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Rapport du projet PIA1 NUAMCES |
| Roselière Seaboost | Nurserie, habitat, corridor | Plastique Polypropylène (PP) | +++ | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Communications + Rapports non partagés |
| Oursin Seaboost | Nurserie | Plastique Polypropylène (PP) | +++ | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Communications + Rapports non partagés |
| ReFISH Suez Consulting | Nurserie, habitat | Plastique biosourcé | ++ | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Communications + Rapports non partagés |
| Sargass P2A Développement | Nurserie | Polymère ou fibres végétales (sans détails) | + | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Pas de partage connu |
| Protec P2A Développement | Nurserie, habitat, corridor | Acier | + | Non standardisé | Evaluation à renforcer | Pas de partage connu |
| Totem Architeuthis | Nurserie | Grille plastique souple | + | Non standardisé | Non démontrée | Pas de partage |
| Tipesk Architeuthis | Nurserie | Grille plastique souple | + | Non standardisé | Non démontrée | Pas de partage |

DISCUSSION

De l'importance de l'évaluation des solutions...

Lors de la mise en place d'une opération de restauration écologique, il est indispensable de suivre et d'évaluer le bénéfice écologique qui est induit. Cette évaluation sera différente en fonction du niveau de maturité technologique ou TRL (*Technology Readiness Level*), de la solution.

Deux types d'opération de restauration écologique sont à distinguer (figure 15) :

- les pilotes expérimentaux, qui sont des projets de recherche ou de recherche et développement (R&D), ayant un TRL inférieur à 8 ;
- les travaux, qui sont des projets opérationnels, ayant atteint un TRL 8 ou 9.

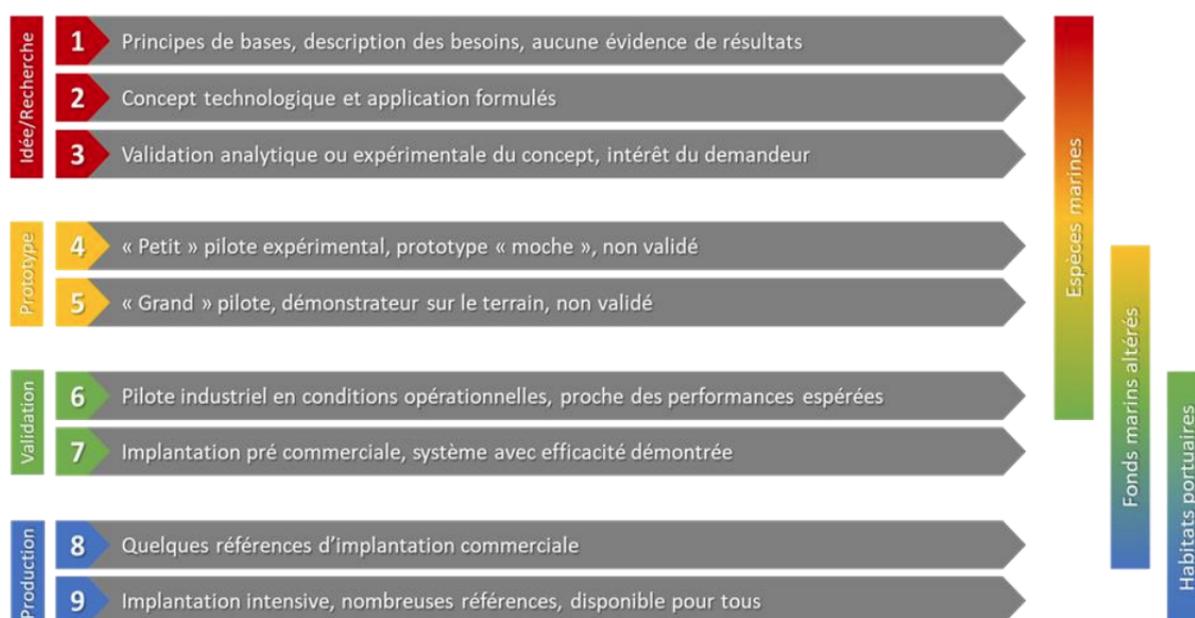


Figure 15 : Description des différents niveaux de maturité technologique (TRL) appliqués à la restauration écologique des petits fonds côtiers (Gudéfin et al., 2022)

Pour que des dispositifs artificiels puissent être qualifiés de nourriceries, il faut, en plus d'accueillir des juvéniles d'espèces de poissons, ils constituent un environnement adéquat à leur croissance et que le taux de mortalité y soit plus faible, grâce à un habitat favorable qui protège les post-larves des prédateurs et des pressions pendant leur période juvénile jusqu'à la taille refuge (Gudéfin et al., 2022).

Les différentes solutions détaillées dans ce mémoire n'ont pas toutes le même niveau de maturité, malgré le fait d'être disponibles au catalogue des différentes sociétés qui les commercialisent (Tableau 2).

Tableau 2 : Représentation des niveaux de maturité ou TRL des solutions restauration écologique des nurseries portuaires présentées dans ce mémoire. Il est défini sur la base des éléments disponibles au moment de l'étude : nombre de projets, niveau d'évaluation, nombre de publications scientifiques, disponibilité d'information.

| Solution | TRL | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Biohut® Quai et Ponton d'Ecocean | | | | | | | | | |
| Biohut® Kelp d'Ecocean | | | | | | | | | |
| Biohut® Digue d'Ecocean | | | | | | | | | |
| Roselière® de SeaBoost | | | | | | | | | |
| Oursin® de SeaBoost | | | | | | | | | |
| ReFISH de Suez Consulting | | | | | | | | | |
| Sargass de P2A Développement | | | | | | | | | |
| Protec de P2A Développement | | | | | | | | | |
| Totem© d'Architeuthis | | | | | | | | | |
| Tipesk© d'Architeuthis | | | | | | | | | |

Depuis 2013, la Biohut d'Ecocean a fait l'objet de 6 publications scientifiques, 5 thèses de recherche, et 4912 modules ont été installés dans 52 ports en Europe (NAPPEX, décembre 2022). Son niveau de maturité est maximal (TRL 9) et son efficacité n'est plus à démontrer. Cette solution est parfaitement opérationnelle.

Les modules développés par Seaboost ont été installés dans de nombreux ports français depuis 2014. Cependant, malgré quelques communications et rapports dont l'évaluation du projet pilote GIREL (2014), aucune publication scientifique ne vient valider scientifiquement l'efficacité de ces solutions. Les résultats de ces différentes opérations de restauration semblent encourageants. Une augmentation de l'abondance d'individus au stade juvéniles tant sur les digues que sur les quais est observée. Les Roselières et Oursins offrent un abri mais également une zone de croissance et d'alimentation. Mais une évaluation précise de l'efficacité des solutions Seaboost est manquante. C'est pourquoi, depuis 2020, une étude est menée par le centre IFREMER basé à la Seyne-sur-Mer. Un TRL de 7-8 est attribué aux solutions Roselière et Oursin.

Pour le module ReFISH de Suez, peu de résultats sont disponibles et seul deux rapports réalisés par IFREMER ont été communiqués (Suivi écologique des populations de poissons sur les modules ReFISH dans les ports de La Seyne-sur-Mer, de Toulon Darse Nord, de Toulon Vieille Darse et de Saint Louis du Mourillon – années 2021 et 2022). D'après ces suivis, les juvéniles de l'année fréquentent les dispositifs avec une densité proche de celle des zones naturelles. Également, une croissance des individus lors de la période de suivi au cours des deux années consécutives a pu être mise en évidence. L'évaluation des modules ReFISH est à renforcer avec en particulier son partage sous forme de publication scientifique. Un TRL de 7-8 est attribué à cette solution.

Très peu d'opérations de restauration concernent les solutions de P2A Développement. Leurs solutions n'ont pas dépassé le stade du pilote expérimental, même si cette société a commencé très tôt dans le domaine de la restauration portuaire. Aucune évaluation de l'efficacité de la solution n'est disponible et la société n'a pas fourni d'éléments à ce sujet. Nous pouvons définir un TRL de 4-5 pour cette solution.

Concernant les modules d'Architeuthis, société récente en génie écologique, seuls des prototypes ont été testés. Comme pour P2A Développement, aucune évaluation de l'efficacité de la solution n'est disponible et la société n'a pas non plus fourni d'éléments à ce sujet. Nous pouvons définir un TRL de 4 pour cette solution.

L'importance de l'évaluation de la solution ou de suivi d'une opération de restauration est indispensable. Malgré l'importance des études pilotes montrant des résultats très encourageants, il existe encore un certain scepticisme quant à l'efficacité de ces opérations, parfois qualifiées d'éco-blanchiment. En effet, des opérations sont souvent mises en œuvre de manière empirique ou à l'échelle expérimentale, avec des suivis réalisés sur de courtes périodes, et les solutions proposées restent bien souvent au stade de prototype. Le manque de retours d'expériences suffisamment solides et indépendants ne permet pas de quantifier le succès réel à grande échelle.

Également, élaborer et commercialiser une solution en se basant sur des recommandations ne peut être que préjudiciable pour l'image de la restauration écologique en général. Sur le site d'Architeuthis, pour la solution Tipesk, nous pouvons lire *“La multiplicité des formes et cavités ainsi créées à travers la géonatte correspond bien aux préconisations des spécialistes des peuplements de récifs artificiels”*. Un gestionnaire de port qui engage une opération de restauration écologique avec une solution non validée et sans réaliser son suivi, ne va rien faire d'autre qu'une opération de communication, qui peut facilement être assimilée à du *greenwashing*.

Des matériaux à privilégier...

Le milieu marin impose des conditions environnementales difficiles pour toutes les solutions de nurseries portuaires. Les matériaux utilisés doivent pouvoir résister à la corrosion pendant de nombreuses années, en plus d'éviter toute pollution du milieu. Acier, plastique ou matériaux d'origine naturelle sont utilisés par les différents fournisseurs. Mais ces différents matériaux sont-ils équivalents en termes de durabilité ou d'impact environnemental ?

Les modules Biohuts sont constitués d'une structure en acier Crapal® (acier brut recouvert d'une fine couche d'aluminium et manganèse) et de coquilles d'huîtres. L'impact environnemental de cet acier est minime mais sa durabilité est inférieure à 10 ans, c'est pourquoi Ecocean préconise un remplacement des modules au bout de 5 ans. L'avantage de cet acier est son fort taux de recyclabilité. En effet, ce dernier est recyclable à l'infini, sans altération de ses propriétés ni de perte de poids.

Pour les solutions de Seaboost, même si la fiche produit indique l'usage possible de différents matériaux pour les fibres (plastique biosourcé, biodégradable, fibres naturelles comme coco ou chanvre), c'est le polypropylène PP qui est utilisé sur tous les projets en cours (Seaboost, s.d.). Les fibres naturelles n'ont pour le moment pas données de résultats satisfaisants en termes de durabilité (3 ans maximum).

Contrairement à de nombreux polymères, biosourcés ou non, le polypropylène PP est extrêmement hydrophobe, sa probabilité d'érosion de surface en milieu marin est minimale. Il s'agit à ce jour d'un des matériaux plastiques les plus stables au monde en milieu marin (Min et al, 2020) (Figure 16).

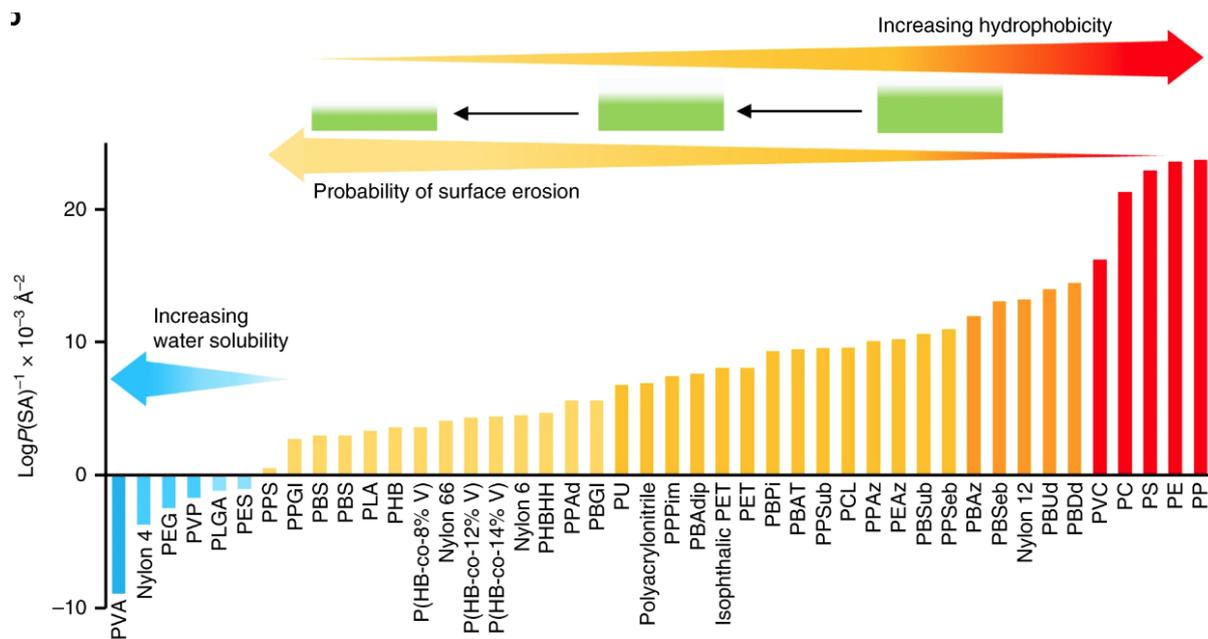


Figure 16 : Graphique représentant l'hydrophobicité ($\text{LogP(SA)}-1$) par type de plastique.

Cependant, il n'existe pas de données précises concernant la fragmentation du PP et la quantité de microplastiques relargués au cours du temps. Cette dégradation va se manifester à trois échelles différentes :

- échelle macroscopique : altération des propriétés (essentiellement mécaniques et optiques) sans perte de l'intégrité du matériau ;
- échelle microscopique : fragmentation en microplastiques liée à la propagation de fissures dans le matériau ;
- échelle moléculaire : relargage de nanoparticules et de molécules de tailles et natures diverses (macromolécules, oligomères, additifs, charges, etc.) en lien avec les phénomènes agissant à l'échelle moléculaire (rupture de liaisons, diffusion, désenchevêtrement, désorption).

Même si la fiche produit de Seaboost donne une durée de vie supérieure à 10 ans, cette potentielle pollution chimique n'est pas à négliger.

De plus, de nombreuses études démontrent l'adsorption de polluants chimiques par le plastique, ainsi que la fixation de pathogènes (animaux ou humains) à sa surface (Tuuri & Leterme, 2023). Dans un port, où les conditions sanitaires ne sont pas toujours idéales, il paraît peu judicieux d'utiliser le plastique pour des structures dont le but est de recréer un habitat propice à la biodiversité pendant de nombreuses années.

Enfin, bien que recyclable, au bout de plusieurs années dans l'eau de mer, le polypropylène PP doit être traité avant de pouvoir être recyclé (car chargé de contaminants). La recyclabilité des modules de Seaboost n'est pas vérifiée aujourd'hui.

Suez utilise un polymère biosourcé pour la fabrication de son module ReFISH, le Rilsan. C'est un bioplastique agrosourcé non-biodégradable, dérivé de l'huile de ricin. Bien que d'origine renouvelable, sa probabilité d'érosion de surface en milieu marin est plus importante que le polypropylène PP. Il présente également les mêmes inconvénients concernant l'adsorption de polluants chimiques et une recyclabilité qui n'est pas avérée.

Pour le moment, des matériaux naturels comme le bois, le bambou ou des fibres de coco ne sont pas privilégiés, ne donnant pas de résultats satisfaisants en termes de durabilité ou de comportement dans le temps.

Les fabricants de solutions doivent faire attention de ne pas tomber dans le piège d'une pseudo communication environnementale parce qu'il y a le mot recyclable, biodégradable, biosourcé, etc.

Une opération de restauration écologique ne peut induire dans le milieu récepteur une nouvelle altération, un dysfonctionnement ou une pollution. Il est souhaitable de vérifier l'innocuité des produits utilisés dans la durée avant de soutenir leur déploiement.

CONCLUSION

En zones portuaires, pour recouvrer la fonction écologique de nurserie, les différentes solutions passées en revue dans ce mémoire fonctionnent toutes sur le même principe : protéger les post-larves et les juvéniles de la prédation. Mais ces structures artificielles jouent également un rôle important dans l'alimentation des juvéniles grâce à la faune et flore fixée, présente en abondance. Le substrat utilisé dans certaines solutions pourraient avoir un rôle primordial et représente un point d'attention récent qui fera probablement la différence dans les futures solutions de nurseries portuaires (Varenne, 2023).

Finalement, les opérations de restauration des fonctions nurseries se déploient. Les compétences techniques se sont renforcées tout comme notre connaissance générale de l'état et du fonctionnement de la zone côtière qui complète les travaux initiés depuis plus de 20 ans par le monde académique.

Récemment, pour aller plus loin, une démarche de coopération (DRIVER) qui associe des chercheurs, des techniciens, des gestionnaires, des institutions et des partenaires financiers s'est mise en place. Elle a permis la création d'outils d'aide à la structuration de la filière

La dynamique de travail concernant les zones portuaires et l'efficacité pour le milieu naturel des actions de restauration permettent aujourd'hui d'envisager le lancement d'un plan de reconquête des nurseries à l'échelle des trois régions littorales de Méditerranée française. Son objectif ambitieux est d'accélérer le calendrier d'équipement des ports en définissant une programmation de travaux à l'échelle de la Méditerranée et ainsi atteindre une restauration de 100% des nurseries qui ont été détruites.

La restauration écologique des nurseries portuaires représente un bel exemple de succès en génie écologique.

BIBLIOGRAPHIE

- Aronson J, Dhillon S, Le Floch E, 1995. On the need to select an ecosystem of reference, however imperfect: A reply to Pickett & Parker. *Restoration Ecology*, 3, 1-3.
- Aronson J, Milton SJ, Blignaut J. Editeurs, 2007. *Restoring Natural Capital: Science, Business and Practice*. Island Press, Washington, DC.
- Beck MW, Heck KL, Able KW, Childers DL, Eggleston DB, Gillanders BM, Halpern B, Hays CG, Hoshino K, Minello TJ, Orth RJ, Sheridan PF, Weinstein MR, 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *Bioscience*. 51 (8), 633-641.
- Biotope, 2018. Étude d'opportunité sur les solutions de restauration écologique en milieu portuaire - Rapport de phase 1 : État de l'art des solutions de restauration écologique. Département des Bouches-du-Rhône, 40p.
- Bouchoucha M, Darnaude Gudefin AM, Neveu R, Verdoit-Jarraya M, Boissery P, Lenfant P, 2016. Potential use of marinas as nursery grounds by rocky fishes insights from four *Diplodus* species in the Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*, 547, 193-209.
- Cheminée A, Le Direach L, Rouanet E, Astruch P, Goujard A, Blanfuné A, Bonhomme D, Chassaing L, Jouvenel JY, Ruitton S, Thibaut T, Harmelin-Vivien M, 2021. All shallow coastal habitats matter as nurseries for Mediterranean juvenile fish. *Sci Rep.*, Jul 16, 11(1), 14631.
- Galgani F, Bruzard S, Duflos G, Fabre P, Casdaldi E, Ghiglione J, Grimaud R, George M, Huvet A, Lagarde F, Paul-Pont I, Ter Halle A, 2020. Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques. *Techniques de l'Ingénieur*, Pages BIO9300, 17p.
- Gudefin A, Lenfant P, Fonbonne S, Boissery P, 2022. Guide technique - Evaluation des pilotes expérimentaux et des travaux de restauration écologique, cas des nurseries portuaires. *ICO Solutions / DRIVER / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse*, 54p.
- Lenfant P, Gudefin A, Fonbonne S, Lecaillon G, Aronson J, Blin E, Lourie SM, Boissery P, Loeuillard JL, Palmaro A, Herrouin G, Person J, 2015. *Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes*.
- Mercader M, 2018. Rôle des infrastructures portuaires dans le maintien des populations de poissons côtiers : apports de la restauration écologique. *Océan, Atmosphère*. Université de Perpignan. Français. ffNNT : 2018PERP0027ff. fftel-01955161
- Min K, Cuiffi J, Mathers R, 2020. Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure. *Nat Commun*, 11(1), 727
- SER - Society of Ecological International Science & Policy Working Group, 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. SER & Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Strain EM, Steinberg PD, Vozzo M, Johnston EL, Abbiati M, Aguilera MA, Bishop MJ, 2021. A global analysis of complexity–biodiversity relationships on marine artificial structures. *Global Ecology and Biogeography*, 30(1), 140-153.
- Tuuri EM, Leterme SC, 2023. How plastic debris and associated chemicals impact the marine food web: A review. *Environmental Pollution*, Volume 321.