



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



FACULTÉ DES SCIENCES
DE MONTPELLIER

Faculté des sciences de l'université de Montpellier

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

Année 2023

L'utilisation des récifs artificiels pour restaurer les récifs
coralliens



Source : Pixabay

Messaline Alarcon

Tuteur : Philippe Lenfant

Remerciements

Je remercie les organisateurs et les intervenant du DU pour nous fourni cette formation très intéressante. Je remercie particulièrement mon tuteur Philippe Lenfant pour son aide et sa disponibilité. Je remercie Valentin pour son aide lors de l'écriture et de la relecture de ce mémoire. Enfin, je remercie l'ensemble de mes camarades pour l'agréable semaine que nous avons passé à Montpellier.

Résumé

Les récifs coralliens font partie des écosystèmes les plus productifs et diversifiés de la planète. Cependant, depuis plusieurs décennies, ils sont soumis à une série de pressions causant leur destruction à grande échelle. Alors que la conservation marine s'est historiquement concentrée sur la protection passive de l'habitat, la demande et l'intérêt pour la restauration active ont augmenté au cours des dernières décennies. Parmi les méthodes de restauration, le déploiement de récifs artificiels fait partie des méthodes les plus utilisées. A travers cette étude nous avons analysé différents types de récifs artificiels : les matériaux simples de récupération, les Reef Ball et les structures conçues spécialement pour le repiquage de coraux. Alors que des structures simples et les Reef Ball sont efficaces pour augmenter la biomasse de poissons, les structures permettant le repiquage de coraux sont efficaces pour augmenter la couverture corallienne. Cependant, il a été montré que les résultats des projets de restaurations ne sont pas toujours accessibles. De plus, il est important que les gestionnaires de projets travaillent en amont avec les acteurs locaux afin que les résultats des déploiements perdurent. Enfin, même si le déploiement de récifs artificiels est une méthode efficace, il est important de ne pas la considérer la restauration comme substitut à une action sur le changement climatique.

Table des matières

Introduction.....	1
Etudes de cas.....	3
Récifs artificiels composés de matériaux de récupération.....	3
Récifs artificiels conçus pour imiter le relief d'un récif corallien.....	4
Récifs artificiels conçus pour fournir un substrat pour la transplantation de coraux.....	6
Discussion.....	8
Récifs artificiels pour augmenter l'abondance de poissons.....	9
Récifs artificiels pour permettre le repiquage de coraux.....	10
L'utilisation des récifs artificiels dans le contexte global de restauration.....	11
Conclusion.....	13
Bibliographie.....	14

Table des figures

Figure 1	3
Figure 2	5
Figure 3	6
Figure 4	7
Figure 5	8

Table des tableaux

Tableau 1	9
-----------------	---

Introduction

Les récifs coralliens sont des structures tridimensionnelles dominées par des coraux scléactiniaires (Bellwood *et al.*, 2004). Ils sont répartis en deux grandes régions biogéographiques : l'Indo-Pacifique (qui englobe les océans Indien et Pacifique) et les Caraïbes (Roff, 2021). Les récifs coralliens font partie des écosystèmes les plus productifs et diversifiés de la planète (Odum et Odum, 1955 ; Spalding *et al.*, 2001). En effet, alors qu'ils ne couvrent que 0,1% de la surface totale des océans, on estime qu'ils abritent 25 % de l'ensemble de la vie marine grâce à leurs fonctions de nurserie, d'habitat et de lieu d'alimentation (Moberg et Folke 1999, Morrison *et al.*, 2019). De plus, on estime que plus de 800 millions de personnes dans le monde dépendent des récifs coralliens pour leur alimentation, la protection de leurs côtes et le tourisme (Teh *et al.*, 2013 ; Rogers *et al.*, 2014).

Malgré leurs nombreux services écosystémiques, les récifs coralliens sont parmi les écosystèmes marins les plus menacés (Bindoff *et al.*, 2019). En effet, les récifs sont soumis à une série de pressions anthropiques, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle mondiale. Les facteurs de stress locaux, tels que la destruction de l'habitat (comme l'utilisation de la dynamite pour la pêche), la surpêche et les espèces envahissantes sont des problèmes majeurs pour les récifs coralliens (Bellwood *et al.*, 2004, Goldberg et Wilkinson 2004 ; Morrison *et al.*, 2019). Toutefois, à l'échelle mondiale, le changement climatique est devenu la principale menace pour les récifs coralliens en raison de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, en particulier de CO₂ dans l'atmosphère (Bindoff *et al.*, 2019). Le réchauffement des températures qui en résulte a entraîné un blanchiment massif des coraux, une augmentation des maladies et une forte mortalité corallienne à l'échelle mondiale. (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007 ; Hughes *et al.* 2017 ; Bindoff *et al.*, 2019).

Bien que la menace principale soit le réchauffement climatique, des mesures de conservation à l'échelle locale (*e.g.* aires marines protégées) ont été utilisées pour protéger les coraux depuis de nombreuses années (Mora *et al.*, 2006 ; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). De plus, un intérêt pour l'utilisation de mesures actives de restauration comme outil complémentaire a émergé (Boström-Einarsson *et al.*, 2020 ;

Higgins *et al.*, 2022). En effet, la Société pour la Restauration Écologique définit la restauration comme "le processus d'aide à la reconstitution d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit" (Society for Ecological Restoration, 2004). Par ailleurs, l'Assemblée générale des Nations Unies a reconnu le besoin urgent de restaurer les écosystèmes endommagés en proclamant la période 2021-2030 "Décennie des Nations Unies" pour la restauration des écosystèmes (Nations Unies, 2019).

Les approches expérimentales de la restauration active des récifs coralliens comprennent la transplantation directe de coraux, l'élevage de coraux, la dissémination de larves ainsi que le déploiement de récifs artificiels (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Dans le cadre de notre étude, nous allons nous intéresser à l'utilisation de récifs artificiels pour restaurer les récifs coralliens qui est l'une des premières méthodes à avoir été utilisée à partir des années 1980 (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Le Congrès International sur les Récifs Artificiels et les Habitats Aquatiques associés définit un récif artificiel comme une structure submergée placée délibérément sur le substrat pour imiter certaines caractéristiques d'un récif naturel (Bortone, 2015).

Il est important de noter que la définition admise de la restauration implique un retour de l'écosystème endommagé ou détruit vers l'état initial avant perturbations tandis que le terme de "réhabilitation" se concentre sur la restauration des processus, des fonctions et des services de l'écosystème. Bien que le terme de réhabilitation soit plus adapté à notre étude, nous utiliserons le terme de restauration, plus utilisé dans les revues scientifiques, pour plus de cohérence.

Ce mémoire vise à présenter différents exemples de récifs artificiels déployés dans des zones endommagées afin d'étudier comment ces récifs artificiels peuvent restaurer certaines fonctions du récif. Nous étudierons le cas des récifs composés de matériaux simples ou complexes pour augmenter l'abondance en poissons. Nous étudierons ensuite des récifs artificiels spécialement conçus pour permettre le repiquage de fragments de coraux. Enfin, nous discuterons des limites et des améliorations possibles de ces applications et de la place des récifs artificiels dans la restauration des récifs coralliens.

Etudes de cas

Récifs artificiels composés de matériaux de récupération

Le premier type de récif artificiel auquel nous allons nous intéresser a été déployé dans le but de fournir un habitat aux poissons (Golani et Diamant, 1999). Il a été déployé en Israël dans le Golfe d'Eilat, dans la mer Rouge, à une distance de 20 à 50m d'un récif corallien sévèrement endommagé. Le récif artificiel était composé de sept structures métalliques (Fig.1): un cylindre à soufflet rayon de 2,4 m et de 1 m de hauteur ; un échangeur de chaleur en forme de cylindre de 0,9 m de diamètre et de 5,4 m et contenant de nombreux tuyaux, deux poutres métalliques de 11 m de long et de 2,3 m de large et de hauteur, et quatre véhicules amphibies de 9,5 m de long, 2,3 m de large et 1,5 m de haut. L'assemblage de ces structures se trouvait sur un fond plat et sablonneux à une profondeur de 22-24 m.

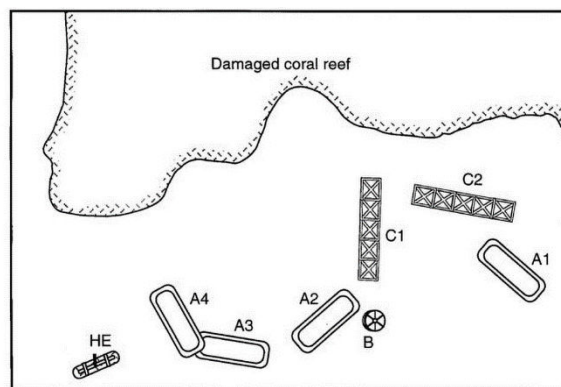


Figure 1 : Schéma représentant l'emplacement des structures déployées. A1-A4 = véhicules amphibies,

B = cylindre à soufflet, C1-C2 = poutres de construction métalliques, HE = échangeur thermique.

Source : Golani et Diamant (1999)

Le récif artificiel a été mis en place le 22 mai 1991. Le premier comptage a été effectué deux jours plus tard. Par la suite, des comptages ont été effectués à des intervalles d'un mois pendant la première année puis environ tous les deux mois pendant la deuxième année. Lors des relevés, les poissons ainsi que leur espèce ont été comptés et enregistrés pour chaque structure du récif.

Les auteurs indiquent qu'au cours des sept premiers mois, une augmentation progressive du nombre d'espèces a été observée puis s'est stabilisée. Au total, 80 espèces ont été recensées. Ils indiquent également que de nombreuses espèces de

poissons qui ont formé la communauté de récifs artificiels ont été recrutées dans les zones adjacentes. En effet certains individus adultes ont été identifiés alors que leur larve n'aurait pas pu s'installer avec succès dans le récif artificiel en raison de la faible complexité récif artificiel déployé.

Cette étude montre que le déploiement de simples structures peut servir à augmenter la biomasse de poissons et ainsi restaurer la fonction habitat des récifs coralliens. De plus, cette étude montre que la complexité de la structure a un impact sur le type d'espèces colonisant le milieu. En effet, selon les auteurs, la faible complexité des principaux composants du récif artificiel, ainsi que leur emplacement sur un sol vaseux ont entraîné une couverture constante de particules à grains fins qui a probablement découragé l'installation des invertébrés et des petits animaux.

Récifs artificiels conçus pour imiter le relief d'un récif corallien

En parallèle du déploiement de matériaux d'opportunité, des structures artificielles spécialement conçues avec une plus grande complexité ont été développées dans le but d'imiter plus fidèlement les habitats fournis par les récifs coralliens. Créée en 1993, la Fondation Reef Ball a conçu des récifs artificiels qui sont aujourd'hui déployés dans plus de 62 pays (www.reefball.org). Les structures appelées Reef Ball, ont été conçues pour protéger le littoral et améliorer les rendements de la pêche en augmentant l'abondance des poissons tout en créant un substrat pour le recrutement naturel et la fixation d'organismes benthiques (www.reefball.org). Les Reef Balls sont parmi les systèmes de récifs artificiels les plus utilisés au monde avec plus de 11 000 projets de restauration (www.reefball.org).

Les Reef Ball sont des structures en ciment conçues avec plusieurs trous afin de servir de refuge pour les poissons (Fig.2). Le mélange de ciment a été mis au point afin de permettre aux modules Reef Ball d'être déployés dans les 24 à 48 heures suivant leur fabrication (www.reefball.org). Il existe différentes tailles de Reef Ball en fonction des applications. Dans le cadre de la restauration de la fonction habitat des récifs coralliens, les Reef Ball peuvent peser entre 170 et 1350 kg en fonction de leur hauteur qui varie entre 61 cm et 1,2 m. Le poids des Reef Ball peut mener à des

difficultés lors du déploiement comme l'ont indiqué des utilisateurs auprès d'une enquête par questionnaire (Young *et al.*, 2012). Le site de la Fondation Reef Ball indique cependant que leur poids crée une action vortex qui pousse les Reef Ball vers le bas, permettant ainsi une grande stabilité. Dans certains cas, des fragments de coraux peuvent être transplantés sur les Reef Ball (Fig. 2).



Figure 2 : A – Photo d'une structure Reef Ball déployée en Indonésie. B – Photo de coraux mous et durs transplantés sur un Reef Ball à Curaçao. Source : www.reefball.org

Parmi les milliers de projets annoncés sur le site de la Fondation Reef Ball, très peu sont accompagnés d'un suivi scientifique. De plus, les articles scientifiques disponibles étudiant l'efficacité des Reef Ball sont principalement des études sur les populations de poissons (e.g. Neves dos Santos *et al.*, 2010 ; Hylkema *et al.*, 2020). Parmi celles-ci, nous allons nous intéresser à l'étude faite par Kojansow *et al.*, (2013) dans la baie de Buyat en Indonésie où avait été signalé un déclin des populations de poissons à cause de la destruction des récifs par la pêche à la dynamite. Pour répondre aux inquiétudes des pêcheurs locaux, 674 Reef Balls ont été déployés en août 1999 avec l'objectif d'augmenter l'abondance de poissons dans la zone. Un programme de suivi a été mené chaque année de 1999 à 2009 sur 3 sites à différentes profondeurs, dans la zone de déploiement des Reef Ball mais également dans le récif naturel adjacent. Ainsi, en 2009, le comptage a permis d'identifier 81 espèces et 2 025 individus peuplant les récifs à 3 m de profondeur et 106 espèces et 3 883 individus à 10 m de profondeur. De plus, après 9 ans de suivi, il a été constaté que les récifs de Reef Ball avaient un meilleur peuplement de poissons que le récif naturel adjacent.

Cette étude montre que les Reef Ball sont efficaces pour augmenter l'abondance de poissons ainsi que la diversité dans des zones sévèrement endommagées.

Récifs artificiels conçus pour fournir un substrat pour la transplantation de coraux

Notre troisième étude de cas s'intéresse à la création d'un récif artificiel conçu pour stabiliser le substrat et ainsi permettre le repiquage de coraux. Mars Incorporated a mis au point une approche adaptée au déploiement sur des substrats instables. La technique utilise de petites structures composées de trois barres d'acier recouvertes de plusieurs couches de revêtement anti-oxydation et d'un mélange de sable et de carbonate de calcium. Les structures appelées "Spider" ressemblent à une araignée à six pattes, chacune couvrant environ 1 m² et 30 cm de haut (Fig.3).

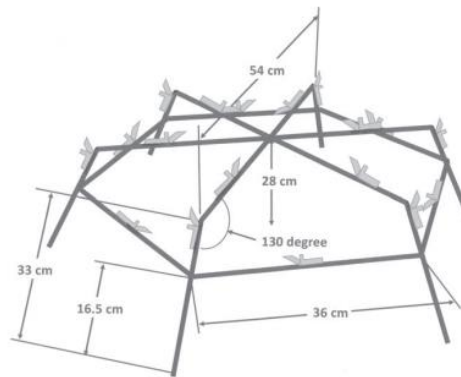


Figure 3 : Schéma représentant une structure « Spider ». Source : Williams et al., 2019

Williams *et al.*, (2019) ont étudié le déploiement de ces structures à grande échelle en Indonésie. La restauration a eu lieu sur 2 hectares d'un récif qui était devenu un champ de décombres parsemé de structures coralliennes mortes. En effet, selon les habitants de l'île, cette partie du récif avait été endommagée par la construction d'un chenal de navigation il y a 30 à 40 ans, par la pêche à la dynamite il y a environ 30 ans, et par l'extraction massive de coraux pour construire des maisons il y a 20 ans. Dans le cadre d'un projet de conservation et de gestion des récifs coralliens, les habitants de l'île avaient établi une petite zone d'interdiction de pêche sur une partie du récif en 2007.

L'objectif de cette étude était de restaurer à grande échelle les fonctions d'habitat des coraux en créant un habitat naturel par le repiquage de coraux. Pour atteindre cet objectif, les structures utilisées pour stabiliser le substrat devaient permettre la croissance des coraux transplantés et être modulables en termes de facilité de déploiement et de coût. De plus, les auteurs souhaitaient comparer les résultats obtenus dans la zone de déploiement avec les « Spider » déployées dans la zone de non-pêche établie plusieurs années avant le projet.

Lors de chaque déploiement, des fragments de coraux libres ont été collectés à l'arrière du récif. Il est important de noter qu'il n'y avait aucune intention de sélectionner les espèces de coraux récoltées. Sur chaque structure, 18 fragments espacés d'environ 15 cm ont été attachés. Les "Spider" ont été fixées sur un substrat principalement constitué de gravats à l'aide de tiges d'acier inoxydable. Au total, entre 2013 et 2015, environ 11 000 structures couvrant 7 000 m² ont été déployées sur 2 ha du récif. Lors des relevés de terrain, le pourcentage de couverture corallienne vivante a été relevé sur 20 structures choisies au hasard. Ces relevés ont eu lieu deux fois par an (de février à mars et de juillet à septembre) de 2014 jusqu'à octobre 2017



Figure 4 : Vue aérienne de montrant le site de restauration avec les quatre sections de restauration et la zone de non-pêche (bordure jaune). Section 1 : déployée de mars à juin 2013 ; Section 2 : déployée en juin 2014 ; Section 3 : déployée de juillet à novembre 2014 ; Section 4 : déployée de juillet à septembre 2015.

La zone de nurserie a été établie en 2015 pour produire des fragments destinés au repiquage. Source : Williams et al., 2019

Au moins 42 espèces de coraux sur les structures ont été observées. Les résultats montrent que la couverture corallienne a augmenté de 10% au début de l'expérience jusqu'à atteindre 60% en fonction de la profondeur et de la date de déploiement (Fig.5). On observe que le taux de couverture corallienne était plus important dans la zone de non-pêche. De plus, lors de l'épisode de réchauffement

intense des eaux El Niño (2014-2016), le blanchiment dans la zone de restauration était inférieur à 5 % de la couverture malgré des eaux chaudes avec une température supérieure à 30°C.



Figure 5 : Photos comparant une zone de la section 4 (déployée de juillet à septembre 2015) entre septembre 2015 et janvier 2017. Source : Williams et al., 2019

Cette étude montre que la restauration de coraux est possible à grande échelle dans des endroits où les récifs ont été sévèrement endommagés et sont encore soumis à des perturbations anthropiques telles que le réchauffement des eaux. De plus, même si la couverture corallienne n'a pas atteint les mêmes niveaux que dans la zone de non-pêche, le projet de restauration a permis de passer d'un récif détruit à un récif avec une bonne couverture corallienne. Les auteurs ajoutent qu'en plus de stabiliser le substrat, la structure "Spider" a été propice à la croissance des coraux car la structure minimale permet un flux d'eau relativement libre essentiel pour le métabolisme des coraux. De plus, les structures peuvent intercepter des fragments de coraux détachés à la suite d'une tempête.

Discussion

Les différents types de récifs artificiels des méthodes efficaces ont été mises au point pour restaurer les coraux mais possèdent des limites (Tab.1).

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des trois types de récifs artificiels étudiés et leurs objectifs

Référence	Type de récifs artificiels	Objectifs
Golani et Diamant, 1999	Matériaux simples de récupération	Augmenter l'abondance de poissons
Kojansow <i>et al.</i> , 2013	Structures imitant le récif : Reef Ball	Augmenter l'abondance et la diversité de poissons Favoriser la colonisation benthique
Williams <i>et al.</i> , 2019	Structures pour repiquage de coraux	Augmenter la couverture corallienne

Récifs artificiels pour augmenter l'abondance de poissons

Lors de déploiement de récifs artificiels, augmenter l'abondance est l'un des objectifs les plus souvent mentionnés dans la littérature scientifique. Les récifs peuvent être composés de matériaux simples tels que des barres en acier ou des voitures amphibies. Dans l'étude de Golani et Diamant (1999), les résultats montrent que de simples matériaux peuvent augmenter l'abondance de poissons. Cette méthode a pour avantage d'être peu coûteuse car elle utilise des matériaux de récupération et rapide: dans l'étude, le déploiement des 7 structures s'est déroulé en une seule journée. Cependant, il a été montré que certaines structures peuvent introduire des matériaux étrangers sur les récifs pouvant nuire à la communauté en laissant échapper des composés toxiques (Collins *et al.*, 2002). Il est donc important de se questionner quant à la composition des matériaux avant d'immerger une structure. De plus, la simplicité des structures peut limiter la colonisation des récifs artificiels par les organismes benthiques.

Lorsque les récifs sont conçus spécialement pour augmenter l'abondance des poissons comme les Reef Ball les résultats sont également positifs. À la suite d'une étude comparant les Reef Ball avec un autre type de récif artificiel imitant l'habitat, Komyakova *et al.*, 2019 suggèrent que le choix de l'emplacement a une plus grande

influence sur l'abondance de poissons que le design tandis que le design est un facteur déterminant la diversité des espèces ainsi que la structure de la communauté, quel que soit l'emplacement. Ainsi, la conception des récifs artificiels et la sélection des sites de déploiement doivent être envisagées en prenant en compte les objectifs de restauration.

Lorsque des récifs artificiels sont déployés pour augmenter l'abondance de poissons, certains auteurs émettent l'hypothèse que ces récifs artificiels pourraient devenir un "puits de diversité" (Grossman *et al.*, 1997 ; Brickhill *et al.*, 2005). En effet, les récifs artificiels pourraient attirer de nombreux poissons mais ne fourniraient pas nécessairement leur besoin en refuge. Ceux-ci seraient donc plus vulnérables face aux prédateurs que dans un récif naturel. Les arguments allant dans ce sens sont plus faibles par rapport aux résultats d'abondance et de diversité obtenus dans de nombreuses études (Boström-Einarsson *et al.*, 2020 ; Higgins *et al.*, 2022). Cependant la gestion du récif artificiel joue un rôle déterminant pour maintenir la présence des poissons. En effet, une forte abondance et diversité peut attirer de nombreux pêcheurs qui sans un plan de gestion et des mesures de surveillance pourraient endommager le récif artificiel. L'étude de Kojansow *et al.*, 2013 sur les Reef Ball n'indique pas si les techniques de pêche ayant mené à la destruction du récif initial avaient été supprimées. Ainsi, il est important de définir en amont du déploiement, un plan de gestion à long terme qui inclut les acteurs locaux afin d'éviter un nouvel effondrement des stocks de poissons sur les récifs artificiels.

Récifs artificiels pour permettre le repiquage de coraux

Nous avons vu avec l'exemple des Reef Ball et des "Spider" que des récifs artificiels peuvent être conçus pour permettre le repiquage de coraux. Dans le cas des Reef Ball, l'objectif principal reste d'augmenter la biomasse de poissons. En effet, aucune étude n'a été trouvée quant à la survie de ces coraux repiqués sur les Reef Ball. Cependant, Bachtiar et Prayogo (2010) ont examiné le recrutement des larves coralliennes sur des Reef Ball. Au total, 640 colonies ont été dénombrées trois ans après le déploiement. Les auteurs affirment que cette étude montre que les Reef Ball peuvent être utilisés efficacement comme méthode de restauration des récifs

coralliens endommagés. Il est toutefois difficile d'évaluer l'efficacité d'un récif artificiel par la quantité de recrues naturelles. En effet, Blakeway *et al.*, (2013) ont montré que de simples matériaux peuvent fournir un substrat approprié pour le recrutement des coraux et que la colonisation reste suffisante pour initier une communauté corallienne sur un substrat artificiel.

Les structures telles que les "Spider" spécialement conçues pour le repiquage de coraux possèdent de nombreux avantages. En effet, leur léger poids leur permet d'être maniables et facilement déplaçables. De plus, leur conception permet une forte couverture corallienne et un relief se rapprochant fortement de celui d'un récif naturel. Les structures utilisées sont vraisemblablement intégrées dans la structure du récif au fil du temps, mais l'impact et la stabilité à long terme de ce système doivent encore être évalués.

Les récifs artificiels conçus pour le repiquage de coraux peuvent être un outil de restauration particulièrement adapté pour certaines espèces. En effet, à l'inverse de l'étude de Williams *et al.*, 2019, où il a été spécifié qu'aucun contrôle des espèces n'avait été fait, il pourrait être possible de sélectionner des espèces en particulier pour le repiquage. On pourrait alors imaginer utiliser ce type de structures pour repiquer des espèces de coraux rares et menacées telles que *Acropora palmata* et *Acropora cervicornis* dans les Caraïbes (Aronson *et al.*, 2008 ; Crabbe *et al.*, 2022). Cependant, une question se pose quant au lieu de récolte des coraux. En effet, Williams *et al.*, 2019 font mention de coraux d'opportunité et d'une nurserie mais ne définissent pas de manière précise les conditions de récolte. De même, certains projets Reef Ball mentionnent des coraux détachés du substrat pour le repiquage mais certains ne spécifient pas l'origine. Il est important d'avoir un protocole précis de récolte des fragments afin de ne pas causer de dommages sur le récif donneur.

L'utilisation des récifs artificiels dans le contexte global de restauration

Les différents exemples que nous avons étudiés ne sont qu'une liste non exhaustive des types de récifs artificiels conçus et déployés pour restaurer les récifs coralliens. La restauration des récifs coralliens a pendant longtemps été sujette à des

réserve de la part de la communauté scientifique (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Cette réserve par rapport aux méthodes de restauration pourrait expliquer le manque de données scientifiques publiées et facilement accessibles sur la méthode Reef Ball. En effet, parmi les milliers de projets annoncés sur le site de la Fondation Reef Ball, peu semblent avoir été effectués dans le cadre d'une collaboration entre des gestionnaires de projet de restauration et des scientifiques. De plus, de nombreux déploiements de récifs artificiels sont effectués par des organisations non gouvernementales locales où les travaux de restauration sont entrepris avec peu ou pas d'apport scientifique et de suivi détaillé (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Par conséquent, il est difficile d'avoir accès aux données ainsi qu'aux résultats de ces déploiements.

De nombreux projets de restaurations effectuent une surveillance pendant une période inférieure à deux ans (Higgins *et al.*, 2022). Nous l'avons vu avec l'exemple de Golani et Diamant (1999) où les comptages ont été effectués pendant seulement deux ans. Une étude qui a suivi le développement des communautés de récifs coralliens sur deux types de récifs artificiels a constaté qu'il avait fallu quatre ans pour que les communautés benthiques et de poissons se stabilisent, soulignant ainsi la nécessité de mener des études à long terme pour évaluer le succès de récifs artificiels (Thanner *et al.*, 2006). De plus, des études à long terme doivent être menées afin de pouvoir étudier la dégradation ou non de ces structures dans l'eau ainsi que leur résistance face à des événements météorologiques extrêmes.

Comme nous l'avons vu avec l'exemple de Reef Ball, le ciment est l'un des matériaux les plus utilisés dans la conception de récifs artificiels (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). La production de ciment est cependant responsable de 5 à 7 % des émissions globales de carbone (Worrel *et al.*, 2001). De plus, dans le cas de repiquage de fragments de coraux, les systèmes d'attache sont souvent composés de matières plastiques. On peut supposer que contribution de la restauration à l'empreinte carbone globale du ciment et de plastique est négligeable mais il est important que les gestionnaires utilisent des matériaux locaux de manière réfléchie afin de ne pas contribuer aux problématiques auxquelles doivent faire face les récifs coralliens.

Enfin, le déploiement de récifs artificiels est une méthode qui s'inscrit dans un contexte plus large de restauration des récifs coralliens. En effet, de nombreuses autres méthodes peuvent être utilisées afin de restaurer les récifs. Parmi celles-ci, on retrouve l'élevage de coraux, la propagation de larves de coraux ou encore le renforcement du substrat par électricité (Boström-Einarsson *et al.*, 2020). Chaque méthode répond à un besoin et à une volonté de restaurer une fonction spécifique du récif. Il est important que quelle que soit la méthode choisie, les projets de restauration impliquent les communautés locales pendant la planification et la mise en œuvre du projet afin de garantir l'appropriation locale et de s'assurer que le récif corallien restauré peut prospérer après l'arrêt des interventions actives.

Conclusion

Ce travail de synthèse nous a permis de mettre en lumière les différentes utilisations des récifs artificiels dans la restauration des récifs coralliens. La création d'habitat pour les poissons afin d'augmenter leur abondance et leur diversité est l'un des objectifs principaux de restauration. Les récifs utilisés peuvent être composés de structures simples ou conçues spécialement pour imiter le récif naturel. D'autres types de récifs artificiels peuvent être spécialement conçus pour permettre le repiquage de fragments de coraux et ainsi recréer un habitat en augmentant la couverture corallienne. Nous avons mis en évidence le manque de collaboration entre les organisations non gouvernementales et les scientifiques menant à une absence de données et de résultats dans la littérature scientifique. De nous avons évoqué la nécessité d'impliquer les acteurs locaux dans les projets de restauration afin que les résultats puissent être positifs à long terme. Enfin, même si des méthodes efficaces ont été mises au point pour restaurer les coraux de manière locale, il est essentiel de ne pas considérer la restauration comme substitut à une action significative sur le changement climatique, menace principale des récifs coralliens.

Bibliographie

- Aronson, R., Bruckner, A., Moore, J., Precht, B., & Weil, E. (2008). *Acropora palmata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*.
- Bachtiar, I., & Prayoga, W. (2011). Coral recruitment on Reef Ball modules at the Benete Bay, Sumbawa island, Indonesia. *JOURNAL OF COASTAL DEVELOPMENT*, 13(2), Article 2.
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., & Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994), Article 6994. <https://doi.org/10.1038/nature02691>
- Bindoff, N., Cheung, W., Kairo, J. G., Aristegui, J., Gunder, V., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M., Levin, L., O'Donoghue, S. H., Purca, S., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., Williamson, P., Acar, S., Alava, J. J., Allison, E., & Whalen, C. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (p. 447-588).
- Blakeway, D., Byers, M., Stoddart, J., & Rossendell, J. (2013). Coral Colonisation of an Artificial Reef in a Turbid Nearshore Environment, Dampier Harbour, Western Australia. *PLOS ONE*, 8(9), e75281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075281>
- Bortone, S. A. (2015). CARAH (International Conference on Artificial Reefs and Related Aquatic Habitats) : An historical perspective of accomplishments. *Journal of Applied Ichthyology*, 31(S3), 3-14. <https://doi.org/10.1111/jai.12946>
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P. J., Vardi, T., & McLeod, I. M. (2020). Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLOS ONE*, 15(1), e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Brickhill, M. J., Lee, S. Y., & Connolly, R. M. (2005). Fishes associated with artificial reefs : Attributing changes to attraction or production using novel approaches. *Journal of Fish Biology*, 67(sB), 53-71. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00915.x>
- Collins, K. J., Jensen, A., Mallinson, J. J., Roenelle, V., & Smith, I. (2002). Environmental impact assessment of a scrap tyre artificial reef. *Ices Journal of Marine Science - ICES J MAR SCI*, 59. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1297>
- Crabbe, J., Rodríguez-Martínez, R., Villamizar, E., Goergen, L., Croquer, A., & Banaszak, A. (2022). *Acropora cervicornis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2022. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*.
- Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes (2021-2030)*. (2019). <http://www.decadeonrestoration.org/fr/propos-de-la-decennie-des-nations-unies>
- Golani, D., & Diamant, A. (1999). Fish Colonization of an Artificial Reef in the Gulf of Elat, Northern Red Sea. *Environmental Biology of Fishes*, 54, 275-282. <https://doi.org/10.1023/A:1007528210270>
- Goldberg, J., & Wilkinson, C. (2004). Global threats to coral reefs : Coral bleaching, global climate change, disease, predator plagues and invasive species. *Status of Coral Reefs of the World, 2004*, 67-92.
- Grossman, G., Jones, G., & Seaman, W. (1997). Do Artificial Reefs Increase Regional Fish Production? A Review of Existing Data. *Fisheries*, 22, 17-23. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1997\)022<0017:DARIRF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1997)022<0017:DARIRF>2.0.CO;2)

- Hein, M., Vardi, T., Shaver, E., Pioch, S., Boström Einarsson, L., Mohamed, A., Grimsditch, G., & McLeod, I. (2021). Perspectives on the Use of Coral Reef Restoration as a Strategy to Support and Improve Reef Ecosystem Services. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.618303>
- Higgins, E., Metaxas, A., & Scheibling, R. E. (2022). A systematic review of artificial reefs as platforms for coral reef research and conservation. *PLoS One*, 17(1), e0261964. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261964>
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatziolos, M. E. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., Baird, A. H., Baum, J. K., Berumen, M. L., Bridge, T. C., Claar, D. C., Eakin, C. M., Gilmour, J. P., Graham, N. A. J., Harrison, H., Hobbs, J.-P. A., Hoey, A. S., Hoogenboom, M., Lowe, R. J., ... Wilson, S. K. (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371), 80-83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Hylkema, A., Debrot, A. O., Osinga, R., Bron, P. S., Heesink, D. B., Izioka, A. K., Reid, C. B., Rippen, J. C., Treibitz, T., Yuval, M., & Murk, A. J. (2020). Fish assemblages of three common artificial reef designs during early colonization. *Ecological Engineering*, 157, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105994>
- Kojansow, J., Sompie, D., Emor, D., & Rondonuwu, A. (2013). Fish settlement on reefballs artificial reef and natural coral reef at Buyat Bay and surrounding areas, North Sulawesi, Indonesia. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 15, 229-237. <https://doi.org/10.3755/galaxea.15.229>
- Komyakova, V., Chamberlain, D., Jones, G. P., & Swearer, S. E. (2019). Assessing the performance of artificial reefs as substitute habitat for temperate reef fishes: Implications for reef design and placement. *Science of The Total Environment*, 668, 139-152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.357>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological Goods and Services of Coral Reef Ecosystems. *Ecological Economics*, 29. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Mora, C., Andr fou t, S., Costello, M. J., Kranenburg, C., Rollo, A., Veron, J., Gaston, K. J., & Myers, R. A. (2006). Coral Reefs and the Global Network of Marine Protected Areas. *Science*, 312(5781), 1750-1751. <https://doi.org/10.1126/science.1125295>
- Morrison, T., Hughes, T., Adger, W., Brown, K., Barnett, J., & Lemos, M. (2019). Save reefs to rescue all ecosystems. *Nature*, 573, 333-336. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02737-8>
- Neves dos Santos, L., Brotto, D. S., & Zalmon, I. R. (2010). Fish responses to increasing distance from artificial reefs on the Southeastern Brazilian Coast. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 386(1), 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.01.018>
- Odum, H. T., & Odum, E. P. (1955). Trophic Structure and Productivity of a Windward Coral Reef Community on Eniwetok Atoll. *Ecological Monographs*, 25(3), 291-320. <https://doi.org/10.2307/1943285>
- Reef Ball Foundation. (s.d.). Reef Ball Foundation. Consult  19 mai 2023,   l'adresse <https://reefballfoundation.org/>
- Roff, G. (2021). Evolutionary History Drives Biogeographic Patterns of Coral Reef Resilience. *BioScience*, 71(1), 26-39. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa145>

- Rogers, A., Harborne, A., Brown, C., Bozec, Y.-M., Castro Sanguino, C., Chollett, I., Hock, K., Knowland, C., Marshall, A., Ortiz, J.-C., Razak, T., Roff, G., Samper-Villarreal, J., Saunders, M., Wolff, N., & Mumby, P. (2014). Anticipative management for coral reef ecosystem services in the 21st century. *Global Change Biology*, 21. <https://doi.org/10.1111/gcb.12725>
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. (2004). *Restoration Resource Center The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration. <https://www.ser-rrc.org/resource/the-ser-international-primer-on/>
- Spalding, M., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press.
- Teh, L. S. L., Teh, L. C. L., & Sumaila, U. R. (2013). A Global Estimate of the Number of Coral Reef Fishers. *PLOS ONE*, 8(6), e65397. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065397>
- Thanner, S., McIntosh, T., & Blair, S. (2006). Development of benthic and fish assemblages on artificial reef materials compared to adjacent natural reef assemblages in Miami-Dade County, Florida. *Bulletin of Marine Science*, 78, 57-70.
- Williams, S. L., Sur, C., Janetski, N., Hollarsmith, J. A., Rapi, S., Barron, L., Heatwole, S. J., Yusuf, A. M., Yusuf, S., Jompa, J., & Mars, F. (2019). Large-scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia. *Restoration Ecology*, 27(2), 447-456. <https://doi.org/10.1111/rec.12866>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303-329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Young, C., Schopmeyer, S., & Lirman, D. (2012). A Review of Reef Restoration and Coral Propagation Using the Threatened Genus *Acropora* in the Caribbean and Western Atlantic. *Bulletin of Marine Science*, 88(4), 1075-1098. <https://doi.org/10.5343/bms.2011.1143>