
Efficacité de la restauration écologique en milieu marin tropical : revue critique dans l’Océan indien

Effectiveness of Ecological Restoration in Tropical Coral Environments: A Critical Review in the Indian Ocean

Aurore Léocadie, Sylvain Pioch, Mathieu Pinault et Gilbert David

Remerciements

Le présent article a été réalisé dans le cadre du projet de thèse du principal auteur. Une thèse financée par la Région Réunion, La Fondation de la Mer et l’IFRECOR dans le cadre du thème d’intérêt transversal « Développer l’approche MERCI-Cor » pour Eviter, Réduire ou Compenser les impacts en milieu marin côtier tropical. Nous tenions à remercier toutes les personnes ayant participé à la relecture de cet article : William Perrin, Thibault Catry, Léa de Carvalho Massabo.

Introduction

- 1 Face à l’érosion catastrophique de la biodiversité, sous l’effet des pressions anthropiques (IPBES, 2019), les politiques de réduction ou de gestion des pressions se développent lentement, au côté des nécessaires activités de réparation du vivant. Ces actions positives pour la biodiversité font appel à l’ingénierie écologique, une activité qui regroupe « l’ensemble des techniques et des processus pour résoudre un problème socio-économique et/ou environnemental via l’utilisation d’organismes vivants ou d’autres matériaux d’origine biologique ou non » d’après W. J. Mitsch et Jørgensen (1989) et SER (Society for Ecological Restoration) (2004).
- 2 Depuis les années 60, l’ingénierie écologique est pratiquée avec un large éventail d’approches appliquées à de nombreux écosystèmes, notamment les forêts, les rivières, les marais salants, les récifs coralliens et les mangroves (Mitsch, 2012). L’intérêt pour ce domaine d’expertise ne cesse d’ailleurs d’augmenter (Buisson *et al.*, 2018). La revue internationale « Ecological Engineering » a notamment vu son « impact factor »

augmenter considérablement, plus rapidement que la plupart des autres revues d'écologie, entre 2006 et 2022 passant de 1,33 à 4,379. Au début, les thèmes abordés par cette jeune discipline étaient plutôt dédiés aux milieux aquatiques continentaux ou terrestres (Mitsch, 2012). Les travaux d'ingénierie écologique s'orientent désormais vers les milieux marins (Bayraktarov *et al.*, 2016; Jacob *et al.*, 2018), en particulier les écosystèmes coralliens, sans doute en raison des besoins de conservation qui s'y font de plus en plus ressentir (Bayraktarov *et al.*, 2016). En effet, d'après l'IPBES 2019 (Díaz *et al.*, 2019), les effets cumulés du changement climatique (acidification, blanchissement corallien et évènements climatiques extrêmes), de l'impact des aménagements côtiers, de la surexploitation des fonds marins, de l'introduction d'espèces invasives et des pollutions sont responsables de la perte d'environ 50% des milieux récifaux de la planète depuis 1870. Du côté des solutions, comme le soulignent Hughes *et al.* (2010), une meilleure gouvernance paraît être l'un des facteurs clefs pour résoudre cette crise environnementale, ce qui implique une forte implication des parties prenantes dans la gestion du milieu (Chademas *et al.*, 2020). L'objectif est de maintenir la biodiversité ou de restaurer les systèmes sociaux et écologiques au niveau de références historiques récentes, ce qui devient complexe pour les écosystèmes coralliens, lourdement exposés aux effets du changement climatique (Hilmi *et al.*, 2014; Pendleton *et al.*, 2016; David *et al.*, 2019; Morrison *et al.*, 2020). La dernière COP 15 de la Convention sur la diversité biologique, qui s'est tenue à Montréal en décembre 2022¹ et a mis l'accent sur la restauration des écosystèmes et l'ingénierie écologique. Les objectifs de la COP15 sont clairs et des actions ciblées doivent être atteintes d'ici à 2030. L'un des objectifs phare est la préservation de 30% des terres et des mers au niveau mondial par l'emploi, entre autres, de la restauration écologique afin de dynamiser la résilience des écosystèmes, récifs coralliens compris (Voir Cible 2, 3, 8, et 11 de la COP15 Biodiversité). Toutefois, en ce qui concerne les écosystèmes coralliens, il convient d'être réaliste. Si l'intérêt pour les techniques de réparation écologique ne cesse de croître, que ce soit au niveau national ou international (Anthony *et al.*, 2017; Liversage et Chapman, 2018), il s'avère qu'à l'heure actuelle, les techniques de restauration écologique des récifs coralliens sont souvent appliquées avec des résultats en deçà des objectifs à atteindre (Bayraktarov *et al.*, 2016). L'une des faiblesses actuelles de leur réparation écologique est la difficulté de définir et de mesurer l'efficacité réelle des projets de réparation, que ce soit en raison de la durée du suivi trop courte ou de l'impossibilité de comparer avec un état de référence, comme le soulignaient Hein *et al.*, (2017) à l'issue d'une revue de 83 articles de revues internationales : « *coral restoration programs typically lack rigor and critical evaluation of their effectiveness* ». De même, en s'appuyant sur l'analyse de 362 projets de réparation écologique à l'échelle mondiale, le constat de Boström-Einarsson *et al.*, (2020) est analogue et aucun indicateur normalisé de la mesure de l'efficacité de cette réparation n'a été identifié. La revue de littérature qui est proposée dans cet article porte sur l'évaluation de l'efficacité de la restauration écologique corallienne dans le contexte spatial de l'océan Indien. Il s'agit d'approfondir les travaux génériques de Boström-Einarsson *et al.*, (2020) et d'Hein *et al.* (2017) menés à l'échelle mondiale, sur des indicateurs décontextualisés, en mobilisant un pool plus large de données issues de la littérature grise ou obtenue sur le terrain. Les résultats de l'analyse sont donc susceptibles d'intéresser les gestionnaires des milieux marins de la Caraïbe, souvent confrontés à une évolution de l'écosystème corallien vers un écosystème dominé par les macro-algues (Bellwood *et al.*, 2004; Bruno *et al.*, 2009), dégradation qui demande de vigoureuses actions de réparation écologique.

1. Matériels et méthodes

- 3 La zone d'étude de la réparation écologique des écosystèmes corallien tropicaux se situe dans l'océan Indien, pris dans son acception la plus large, du canal du Mozambique à l'ouest, de la mer rouge au nord-ouest à l'Australie à l'est (Figure 1).

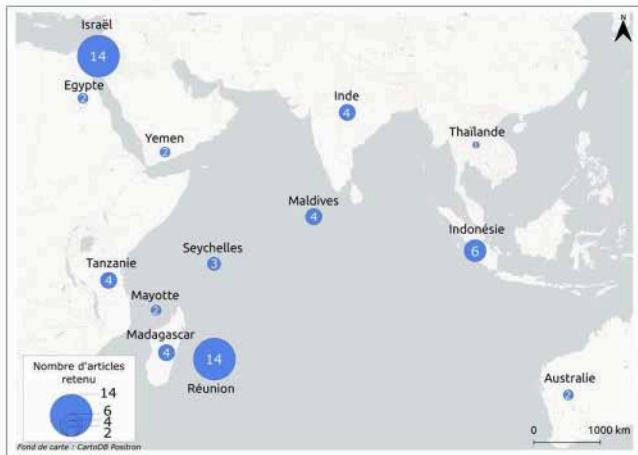


Fig 1. Distribution géographique de l'étude

- 4 Trois étapes ont été suivies pour la collecte et l'analyse des données : (i) la construction d'une base de données concernant les projets de réparation écologique en milieu corallien et les méthodes de restauration appliquées, (ii) l'identification des variables permettant de caractériser l'efficacité de la réparation et (iii) le traitement statistique du jeu de données (recoupement, croisement et classement relatif).

1.1. Construction de la base de données

- 5 Cette base intègre deux jeux de données : le premier porte sur la littérature scientifique, le second sur la littérature grise. La construction de la base de données s'est faite à partir de trois phases décrites ci-après.

1.1.1. La mobilisation de la littérature scientifique

- 6 Une première recherche bibliographique a été réalisée sur la période de 2019 à 2021, selon la méthode standardisée PRISMA Protocol (Moher *et al.*, 2010). Les moteurs de recherche Google Scholar et Web of Science ® (WoS®) ont été utilisés sur la base des mots clefs suivants : (i)"coral restoration" (ii)"ecological restoration" + " coral reef" (iii)"ecological engineering" + " coral reef" (iv)" coral' + [nom de la technique] + "restoration" + "indian ocean". Les résultats ont été croisés avec ceux de Bayraktarov *et al.* (2016) dont le principal auteur nous a autorisé l'accès, cette base recensant l'ensemble des publications scientifiques traitant des projets de restauration écologique de récifs coralliens, d'herbiers, de mangroves, de marais salants et des récifs d'huîtres dans le monde jusqu'en 2015.

1.1.2. La mobilisation de la littérature grise

- 7 Cette mobilisation s'est faite par recouplement et enquêtes directes de terrain, auprès des réseaux d'acteurs de la réparation écologique : gestionnaires, collectivités, bureaux d'études et universitaires. Cette littérature grise est constituée d'études (études d'impacts, expertises), y compris les rapports de stage universitaires, ainsi que les suivis écologiques. Les prises de contact se sont faites par courrier électronique ou par téléphone. Une méthodologie dite « Boule de neige » a été employée, en demandant aux personnes interrogées d'identifier les acteurs concernés par le projet de restauration, jusqu'à ce que le rythme de nouvelles occurrences se réduise fortement (Combessie, 2007).
- 8 A l'échelle du territoire d'étude, 62 projets ont pu être étudiés, 41 issus de la littérature scientifique et 21 de la littérature grise. Ils ont permis d'identifier, après analyse et vérification, 93 occurrences de techniques utilisées sur le terrain. (Figure 2 et Tableau 1). Ce nombre est important, si nous le rapportons aux 407 projets étudiés par Boström-Einarsson *et al.*, (2020), et aux 315 données descriptives des techniques de réparation écologique des récifs coralliens, à l'échelle mondiale (Figure 2).

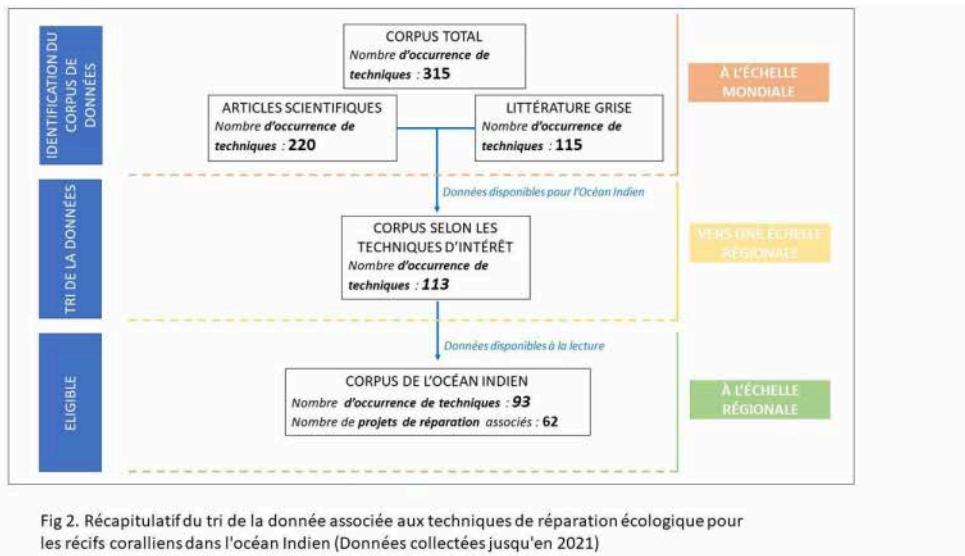


Fig 2. Récapitulatif du tri de la donnée associée aux techniques de réparation écologique pour les récifs coralliens dans l'océan Indien (Données collectées jusqu'en 2021)

| N° | Auteurs et année de publication | Année d'expérimentation | Technique employée | Localisation | Type de publication |
|----|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------|----------------------|
| 1 | Kumar, J. S., <i>et al.</i> , (2017) | 2014 | Mixte | Inde | Article scientifique |
| 2 | Kumar, J. Y., <i>et al.</i> , (2017) | 2013 | Mixte | Inde | Article scientifique |
| 3 | Raj, K. D., <i>et al.</i> , (2015) | 2008 | Transplantation | Inde | Article scientifique |
| 4 | Ferse S (2010) | 2005 | Transplantation | Indonésie | Article scientifique |

| | | | | | |
|----|------------------------------------|--------------------|---|-------------------|----------------------|
| 5 | Port Echo (journal) (2021) | 2018 | Transplantation | Madagascar | Littérature grise |
| 6 | Todinanahary, G. G. (2021) | 2014 | Recrutement larvaire | Madagascar | Article scientifique |
| 7 | Reef Doctor (site internet) (2017) | 2012 | Mixte | Madagascar | Littérature grise |
| 8 | Reef Doctor (site internet) (2019) | 2016 | RA | Madagascar | Littérature grise |
| 9 | Edwards A (2010) | 2008 | Transplantation | Maldives | Littérature grise |
| 10 | Clarke, S., Edwards, A. J. (1995) | 1995 | Transplantation | Maldives | Article scientifique |
| 11 | Biais, G., Taquet, M., (1990) | 1985 / 1988 | RA | Maurice / Réunion | Littérature grise |
| 12 | Edwards A, Gomez E (2007) | 2004 | Transplantation | Mayotte | Littérature grise |
| 13 | Pioch, S., et al., (2011) | 2008 | RA | Mayotte | Article scientifique |
| 14 | Chabanet et Naim, 2000 | 1998 / 2000 | Transplantation / Mixte | Réunion | Littérature grise |
| 15 | Naim, O., et al., (2001) | 1995 | Transplantation | Réunion | Article scientifique |
| 16 | Pothin et al (2001) | 2001 | RA | Réunion | Littérature grise |
| 17 | Arvam (2004) | 2004 | Mixte | Réunion | Littérature grise |
| 18 | Masse L., Martin, J. (2020) | 1999 / 2004 / 2006 | Transplantation / Transplantation / Mixte | Réunion | Littérature grise |
| 19 | CRPMEM (2007) | 2006 | RA | Réunion | Littérature grise |
| 20 | Prefet de la Réunion (2013) | 2012 | RA | Réunion | Littérature grise |
| 21 | Prefet de la Réunion (2014) | 2014 | RA | Réunion | Littérature grise |

| | | | | | |
|----|---|------|----------------------|------------|----------------------|
| 22 | Montoya-Maya, P. H., et al., (2016) | 2012 | Mixte | Seychelles | Article scientifique |
| 23 | Mbije, N. E., et al., (2010) | 2007 | Pépinière | Tanzanie | Article scientifique |
| 24 | Mbije N, et al., (2013) | 2008 | Transplantation | Tanzanie | Article scientifique |
| 25 | Lindahl, U. (2003). | 2003 | Transplantation | Tanzanie | Article scientifique |
| 26 | Wagner, G. M., et al., (2001) | 2001 | Transplantation | Tanzanie | Article scientifique |
| 27 | Seguin, F., et al., (2008) | 2007 | Transplantation | Yémen | Article scientifique |
| 28 | Heyward, A. J., et al., (2002) | 2002 | Recrutement larvaire | Australie | Article scientifique |
| 29 | Blakeway D, et al., (2013) | 2013 | RA | Australie | Article scientifique |
| 30 | Kumar JSY, Set al., (2017) | 2017 | Transplantation | Inde | Article scientifique |
| 31 | Ferse, S. C. A., and A. Kunzmann (2009) | 2009 | Pépinière | Indonésie | Article scientifique |
| 32 | Fox, H. E., et al., (2005) | 2005 | RA | Indonésie | Article scientifique |
| 33 | Fadli N, et al., (2012) | 2012 | RA | Indonésie | Article scientifique |
| 34 | Edwards, A., Clark, S. (1993) | 1993 | RA | Maldives | Littérature grise |
| 35 | Clark S, Edwards AJ (1994) | 1990 | RA / Transplantation | Maldives | Article scientifique |
| 36 | Clark S, Edwards AJ (1999) | 1999 | RA | Maldives | Article scientifique |
| 37 | Frias-Torres, S., et al., (2015) | 2015 | Recrutement larvaire | Seychelles | Article scientifique |
| 38 | Montoya-Maya, P. H., et al., (2016) | 2016 | Transplantation | Seychelles | Article scientifique |

| | | | | | |
|----|---|------|-----------------------------|------------|----------------------|
| 39 | Frias-Torres S, van de Geer C. (2015) | 2015 | Pépinière | Seychelles | Article scientifique |
| 40 | Montoya-Maya, P. H., et al.,(2015) | 2015 | Transplantation | Seychelles | Littérature grise |
| 41 | Seguin, F.,et al., (2008) | 2008 | Transplantation | Yémen | Article scientifique |
| 42 | Jompa, J., et al., (2006) | 2006 | Electrodéposition | Indonésie | Article scientifique |
| 43 | Williams, S.L.,et al., (2018 - in press) | 2018 | RA | Indonésie | Article scientifique |
| 44 | Detolle, J.P., et al., (1996) | 1996 | RA | Réunion | Littérature grise |
| 45 | Lacour, F.-N., (2000) | 2000 | RA | Réunion | Littérature grise |
| 46 | Epstein, N., et al., (2001) | 2001 | Pépinière / Transplantation | Israël | Article scientifique |
| 47 | Shafir, S., et al., (2006) | 2006 | RA | Israël | Article scientifique |
| 48 | Van Treeck, P., Schuhmacher, H. (1997) | 1997 | Mixte | Israël | Article scientifique |
| 49 | Oren, U., Benayahu, Y. (1997) | 1997 | Mixte | Israël | Article scientifique |
| 50 | Bongiorni, L., et al., (2003). | 2003 | Pépinière | Israël | Article scientifique |
| 51 | Horoszowski-Fridman, Y. B. et al., (2011) | 2011 | Transplantation | Israël | Article scientifique |
| 52 | Horoszowski-Fridman, et al., (2015) | 2015 | Transplantation | Israël | Article scientifique |
| 53 | Linden, B. Rinkevich, B. (2011) | 2011 | Pépinière | Israël | Article scientifique |
| 54 | Perkol-Finkel, S., Benayahu, Y. (2009) | 2009 | RA | Israël | Article scientifique |

| | | | | | |
|----|---|------|----------------------|-----------|----------------------|
| 55 | Rinkevich, B. (2000) | 2000 | Transplantation | Israël | Article scientifique |
| 56 | Elad Nehoray, R., Rinkevich, B. (2017) | 2017 | Pépinière | Israël | Article scientifique |
| 57 | Linden, B., Rinkevich B. (2017) | 2017 | Recrutement larvaire | Israël | Article scientifique |
| 58 | Golani D, Diamant, A (1999) | 1999 | RA | Israël | Article scientifique |
| 59 | Rilov G, Benayahu, Y (2000) | 2000 | RA | Israël | Article scientifique |
| 60 | Edwards A (2010) | 1994 | RA | Thaïlande | Littérature grise |
| 61 | Ammar, M. S. A., et al., (2000) | NA | Transplantation | Egypte | Article scientifique |
| 62 | Schuhmacher, H., et al., (2002) | NA | Mixte | Egypte | Article scientifique |

1.2. Variables et modalités d'analyses choisies

- 9 Un jeu de 16 variables a été identifié pour caractériser les projets de réparation (Tableau 2). Seuls les projets pour lesquels ces variables ont pu être incrémentées (modalités) ont été retenus et codés pour créer le jeu de données avec le tableur Microsoft Excel©. Six déclinaisons de la variable « Type de technique employée », ont ainsi été identifiées: (1) la transplantation corallienne sur site ; (2) les pépinières coraliennes, où les larves ou des fragments coralliens sont élevés avant d'être transplantés sur un site receveur ; (3) les récifs artificiels regroupant toute structure volontairement immergée dans le but de reproduire artificiellement les fonctions écologiques d'un habitat naturel donné ; (4) l'électrodéposition, à l'interface entre le récif artificiel et la transplantation corallienne, permettant de fixer des fragments coralliens sur des structures métalliques connectées à un courant électrique. Par un procédé d'électrolyse de l'eau, les minéraux présents vont précipiter sur un support métallique, entraînant une accrétion minérale ; (5) le recrutement larvaire, processus par lequel les *planulae* (larves de corail) se fixent et s'établissent sur une structure artificielle ; (6) les techniques mixtes regroupant au minimum deux techniques citées au-dessus.
- 10 Concernant la variable « objectif de réparation écologique » (Tableau 2), quatre modalités ont été définies : (1) Expérimental, qui regroupe les projets réalisés à but de recherche et d'expérimentation ; (2) Amélioration/réhabilitation d'écosystème, qui est une assistance au rétablissement de certaines fonctions d'un écosystème endommagé,

dont les services rendus ; (3) Compensation écologique marine, qui a pour but de contrebalancer les dommages engendrés par les projets d'aménagements en visant la notion de non-perte nette de biodiversité « No net loss » (4) Restauration écologique, qui regroupe les projets ayant pour but de faciliter le rétablissement ou la réparation d'un écosystème endommagé vers une trajectoire écologique naturelle.

| Zone géographique | Type de publication | Année de parution | Etat écologique du site avant dégradation | Temps de suivi des projets | Cause de dégradation | Type de technique employée | Superficie en m ² | Coût | Taux de survie | Objectif | Spécies | Paramètres étudiés lors des suivis de projet | Raisons de réussite des projets | Raisons d'échec des projets | Types d'acteurs impliqués |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------|---|----------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|--------|------------------------------|-----------------------------------|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Inde / Maldives | Littérature scientifique | [1985;1990] | Degrade | [0;2] | Origine anthropique | Transplantation [0;1500] | [0;200000] | [0;10] | Expérimental | <i>Acropora sp.</i> | Courant | Sensibilisation | Contexte social | Scientifiques | |
| Indonésie / Australie | Littérature grise [1986;2007] | Non-degrade | [2;5] | Origine naturelle | Recouvrement larvaire | [1500;15000] | [20000;50000] | [0;32] | Amélioration | <i>Pocillopora sp.</i> | Enfoncement | Implication d'acteurs | Fréquentation | Usagers | |
| Mozambique | [2007;2018] | [5;] | Origine mixte corallienne | [15000;40000] | [50000;] | Compensation écologique | [32;55] | | Robert | <i>Sylophora sp.</i> | Etat de santé générale | Recrutement corallien | Gestionnaires | | |
| Mascareignes | | | Non-degrade | Récif artificiel | | | [55;77] | | Restauration | <i>Siderastrea sp.</i> | Nombre de fragments (coraux ou colonies) | Reproduction | Stress du à la fragmentation | Ingenieurs en environnement | |
| Mer rouge | | | | Technique mixte | | | [77;100] | | <i>Dendrogyra cylindrica</i> | pH | Fragmentation assouvie naturelle | Predation | Gouvernance | | |
| | | | | | | | | | <i>Goniopora sp.</i> | Salinité | Survie corallienne | Impact anthropique | Entreprise privée | | |
| | | | | | | | | | <i>Gobiodon sp.</i> | Turbidité | Facteurs environnementaux | Facteurs environnementaux | | | |
| | | | | | | | | | <i>Acanthaster sp.</i> | Sédimentation | Resilience de l'écosystème | Survie | | | |
| | | | | | | | | | <i>Turbinaria sp.</i> | Température | Recrutement corallien | Mortalité post-installation | | | |
| | | | | | | | | | <i>Millepora sp.</i> | Reproduction | Recrutement lithologique | Perde des structures | | | |
| | | | | | | | | | <i>Plectgyra sp.</i> | Poids | Survie | Conditions négatives des sites | | | |
| | | | | | | | | | <i>Cyphastrea sp.</i> | Blanchissement | Choix des espèces | Transplantation d'espèce | | | |
| | | | | | | | | | <i>Parites sp.</i> | Biomasse | Complexité des récifs artificiels | Localisation du site | | | |
| | | | | | | | | | <i>Porites sp.</i> | Diamètre | Comparaison des récifs artificiels | Structure inadaptée | | | |
| | | | | | | | | | <i>Favia sp.</i> | Déracinement ou cassé | Echelle du projet | Vulnérabilité due à la hode | | | |
| | | | | | | | | | <i>Montipora sp.</i> | Recouvrement corallien | Conditions négatives des sites | Cout | | | |
| | | | | | | | | | <i>Porites sp.</i> | Recouvrement corallien ou larvare | Transplantation d'espèce | Survie des sites à court ou au long terme | | | |
| | | | | | | | | | | Croissance | Localisation du site | Composition du substrat | | | |
| | | | | | | | | | | Taux de survie | Structure adaptée | Méthode employée est inadaptée | | | |
| | | | | | | | | | | | Survie des sites à court ou au long terme | | | | |
| | | | | | | | | | | | Composition du substrat | | | | |
| | | | | | | | | | | | Cout | | | | |
| | | | | | | | | | | | Méthode employée est adaptée | | | | |

1.3. Analyse statistique du jeu de données océan Indien

- 11 Méthode factorielle permettant de dresser des rapports de corrélation entre variables qualitatives et entre les modalités de ces variables (Lebart *et al.*, 1995), l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a été retenue pour explorer le jeu de données. Elle fournit des représentations graphiques sur lesquelles les proximités entre catégories de variables qualitatives et observations peuvent être facilement identifiables. Pour chaque modalité définie, une ellipse est dessinée permettant de représenter au mieux la dispersion des observations possédant la modalité considérée. Cette technique d'analyse statistique a été entreprise sur le jeu de données à l'aide du logiciel RStudio (4.1.3) et du package « ade4 » (Chessel *et al.*, 2004).
- 12 Au total, six variables ont été jugées significative pour expliquer la distribution de l'information à laquelle elles contribuent à hauteur de 15% à 25%. Il s'agit (1) de la zone géographique, (2) de l'état de l'écosystème avant le projet de réparation, (3) des causes de dégradation, (4) de l'objectif de réparation écologique, (5) du type technique et (6) du temps de suivi des projets. En revanche, le taux de survie moyen, le coût des projets et la superficie consacrée à la réparation, ne sont pas des variables significatives pour nos objectifs.

2. Résultats

2.1. La réparation écologique des récifs coralliens dans l'Océan indien : objectifs, techniques et résultats

- 13 Dans cette partie, seront successivement examinés les principaux résultats de l'ACM puis les principales techniques utilisées, la durée de suivi des projets, les objectifs qui

ont été assignés à la réparation écologique, les paramètres collectés par les projets concernant les pratiques d'ingénierie écologique et l'environnement dans lequel elles sont faites.

- 14 Le principal résultat de l'ACM (figure 3) est une corrélation entre les modalités des variables « cause de dégradation », « état du site avant le projet de réparation » et « objectif de réparation écologique ». Lorsque le site est « dégradé », l'objectif de réparation écologique concerne la « restauration », la « compensation écologique de projet d'aménagement » ou « l'amélioration- réhabilitation d'habitat ». Lorsque le site est « non dégradé », les projets de réparation écologique sont davantage mis en œuvre dans un cadre « expérimental ». Cette corrélation est confirmée par la significativité du jeu de données pour ces variables (Figure 3). Les techniques de « recrutement larvaire », d'« électrodéposition » ou encore les techniques « mixtes » semblent également être davantage mises en œuvre de manière « expérimentale ».

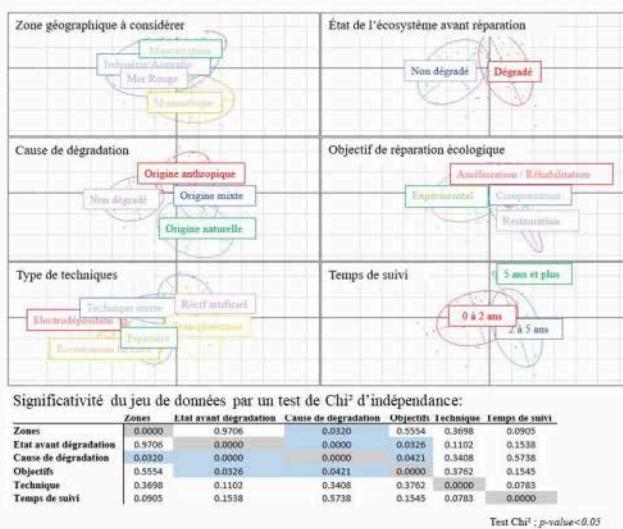


Fig 3. Résumé des ACM obtenues pour le jeu de données. Représentation dans le plan factoriel des 6 variables actives pour l'écosystème récif corallien. De gauche à droite et de haut en bas : La zone géographique considérée ; L'état du site avant la mise en place des projets de réparation ; Les objectifs des projets de réparation ; Les types de technique de réparation ; Le temps de suivi associé aux techniques.

La « transplantation » et la mise en place de « récif artificiel » sont les techniques plus souvent utilisées dans un objectif de réparation écologique des « sites dégradés » (Figure 3). Elles concernent en effet 66% des projets, contre 18% pour les « techniques mixtes », impliquant souvent la « transplantation », 8% pour les « pépinières » et 6% pour le « recrutement larvaire » (Figure 4).

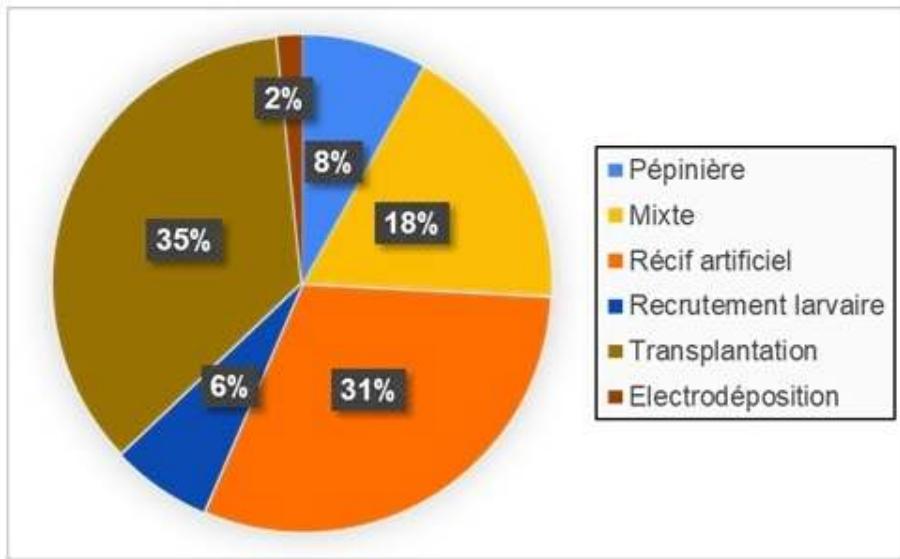


Fig 4. Les techniques employées dans le bassin Océan Indien (%) (n= 62)

Sur les 62 projets étudiés, 59 ont pu être renseignés sur la durée de suivi des mesurées mises en œuvre. D'une manière générale, cette durée peut être qualifiée de très faible. Ainsi, 66% des projets présentent un suivi écologique inférieur ou égal à 2 ans (respectivement 36% < 1 an et 30% compris entre 1 et 2 ans de suivi) (Figure 5). Une forte disparité dans la durée du suivi peut être observée selon les techniques de réparation utilisées. Seuls la transplantation et les récifs artificiels font l'objet de suivi au-delà de 2 ans (Figure 6).

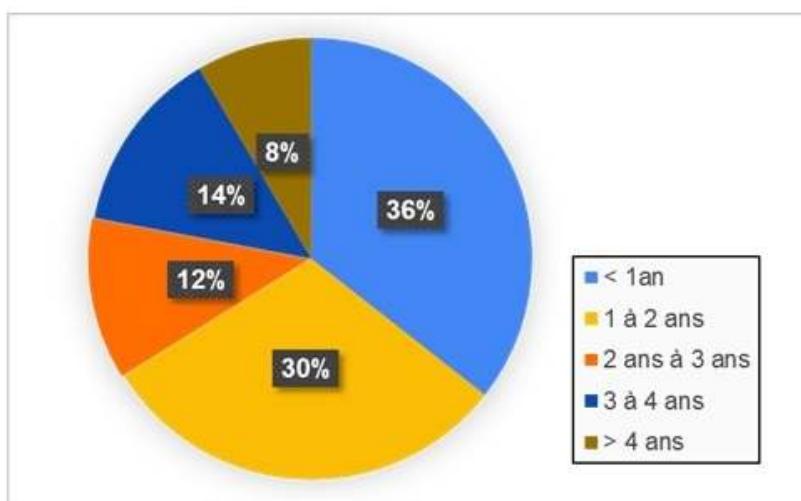


Fig 5. Le suivi de réalisation de projets en fonction des techniques de restauration (n= 59)

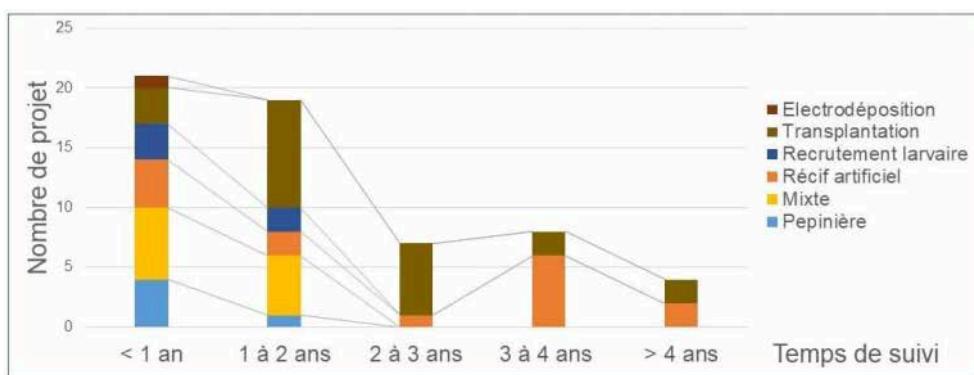


Fig 6. Le temps de suivi des projets en fonction des types de techniques (n= 59)

- 16 Ces techniques visent principalement à restaurer les habitats (13% des projets), à compenser les impacts des aménagements du littoral (15%) et à améliorer ou réhabiliter des milieux dégradés (19%). Elles ont pour public cible les populations riveraines des récifs. En revanche, les autres techniques de réparation écologique concernent principalement des projets de recherche et relèvent de l'expérimentation (Figure 7). C'est ce que confirme la figure 8 qui montre que 59% des acteurs impliqués dans les projets sont des scientifiques. Les usagers représentent quant à eux 15% des personnes impliquées, les gestionnaires 11% et les entreprises privées, les acteurs de la gouvernance et les ingénieurs en environnement 5% chacun.

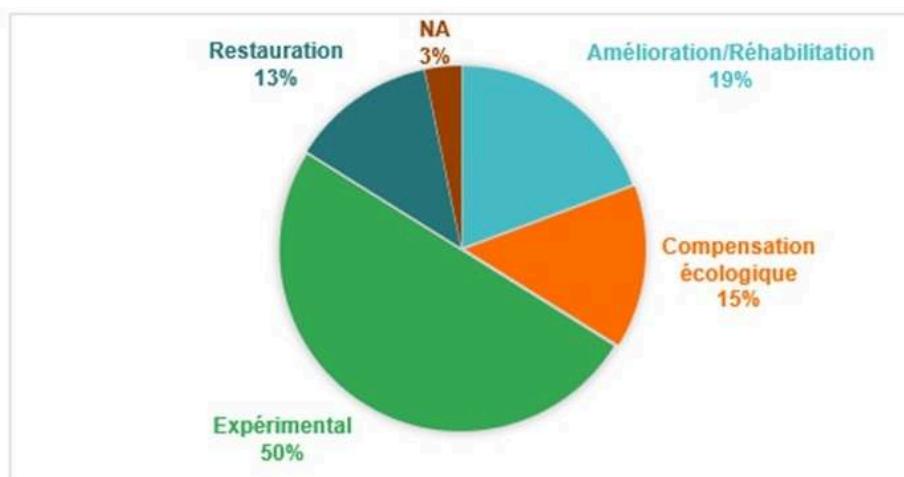


Fig 7. Les objectifs de réparation écologique pour les 62 projets étudiés (%)

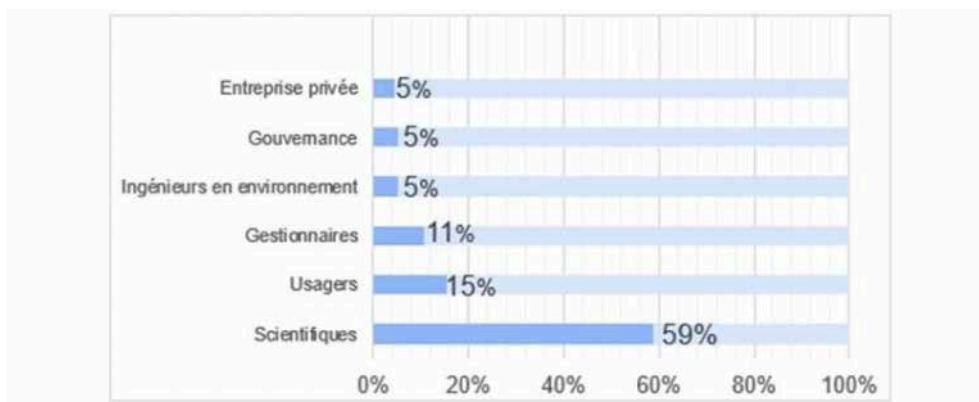


Fig 8. Les acteurs impliqués dans les projets de restauration écologique corallienne

- 17 Ces 62 projets ont donné lieu à des mesures permettant de caractériser les pratiques d'ingénierie écologique mises en œuvre, ainsi que l'environnement dans lequel elles ont été réalisées. Un total de 19 paramètres a ainsi été recensé : 12 d'entre eux sont d'ordre biologique ou technique, 7 sont d'ordre physico-chimique, comme par exemple la salinité de l'eau, son pH, sa température et la courantologie des sites. L'un des problèmes majeurs rencontrés pour la comparaison des différents projets est qu'aucun d'entre eux n'a été suivi par l'ensemble des paramètres relevés. Le taux de survie des espèces coraliennes est le paramètre le plus couramment suivi. Viennent ensuite la croissance des fragments coralliens (11%), le recouvrement corallien (9%), le recrutement larvaire, le détachement ou la casse des techniques employées, pour 8% chacun. Ces paramètres caractérisent à eux seuls 60% des relevés de suivi écologique des projets de réparation (Figure 9). En revanche, plus de 80% d'entre eux n'ont fait l'objet d'aucun suivi de paramètres physico-chimiques.

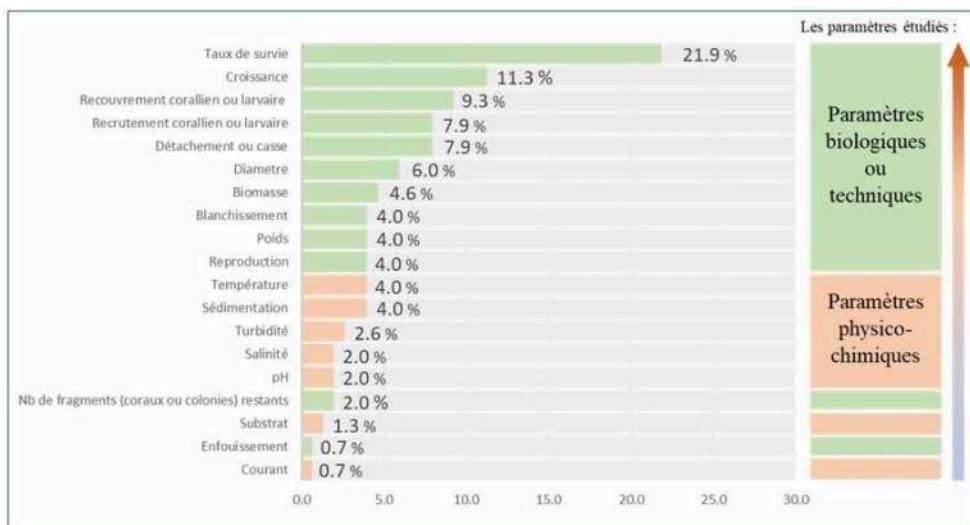


Fig 9. Les paramètres étudiés lors de suivi de projets de réparation écologique dans l'océan Indien (en proportion)

- 18 En ce qui concerne les espèces coraliennes employées pour la transplantation ou l'électrodéposition, on observe que le genre *Acropora* représente 20% des cas, le genre *Pocillopora* est employé dans 13% des cas, *Stylophora* et *Porites* dans 10% des cas (Figure 10). Cette faible diversité, par rapport aux 301 espèces de coraux bio-constructeurs de l'océan Indien, pose la question du risque prophylactique lié à la « monoculture », bien décrit pour les écosystèmes terrestres.

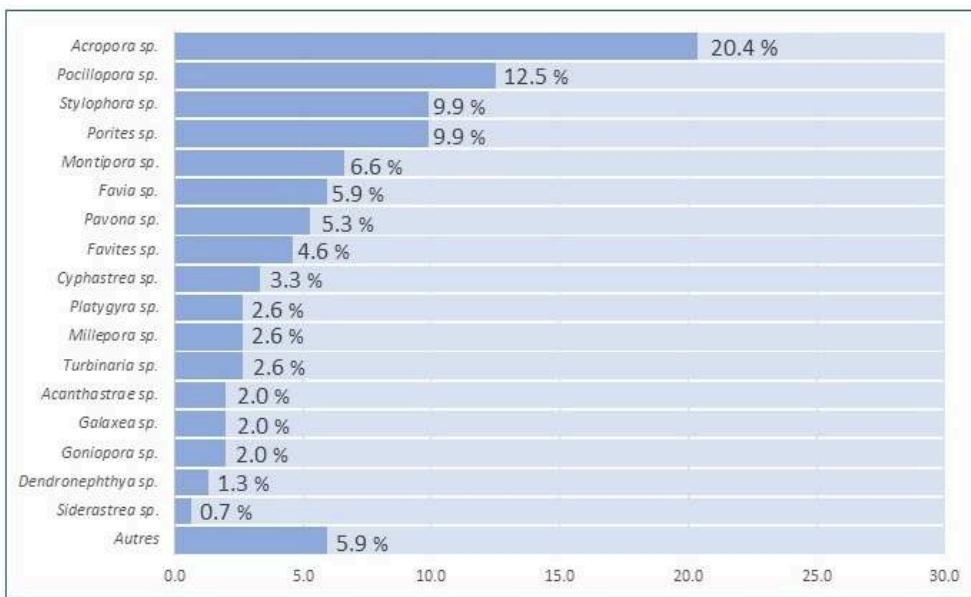


Fig 10 : Les coraux les plus employés lors de projets de réparation écologique dans l'Océan Indien (en %)

2.2. Quelle efficacité de la réparation écologique corallienne ?

- 19 Un total de 21 paramètres a pu être exploité pour évaluer l'efficacité des 62 projets de réparation écologique étudiés. Ces paramètres se ventilent selon trois catégories : a) l'efficacité de la mise en œuvre de la technique d'ingénierie choisie (figure 11 - barres oranges), b) l'efficacité de ses résultats, estimée via la résilience de l'écosystème corallien (barres bleues) et c) son efficacité sociale (barres vertes), auxquelles peut être rajoutée une classe hybride incluant des paramètres relevant à la fois de l'efficacité de la technique d'ingénierie et de la résilience de l'écosystème corallien (barres roses).
- 20 Au total, les facteurs d'évaluation de l'efficacité des projets dépendent principalement (et logiquement) de la technique de réparation employée et de son adaptation au milieu considéré (16%). Les autres facteurs sont liés à la présence d'espèces ichtyologiques sur le site de réparation (14%), ou encore au coût de la/les technique(s) engagé(es) (11%). Inversement, l'influence des facteurs environnementaux (18%) et l'inadaptation des techniques employées (11%) semblent être les principaux facteurs relevés pour expliquer les échecs (Figure 11).

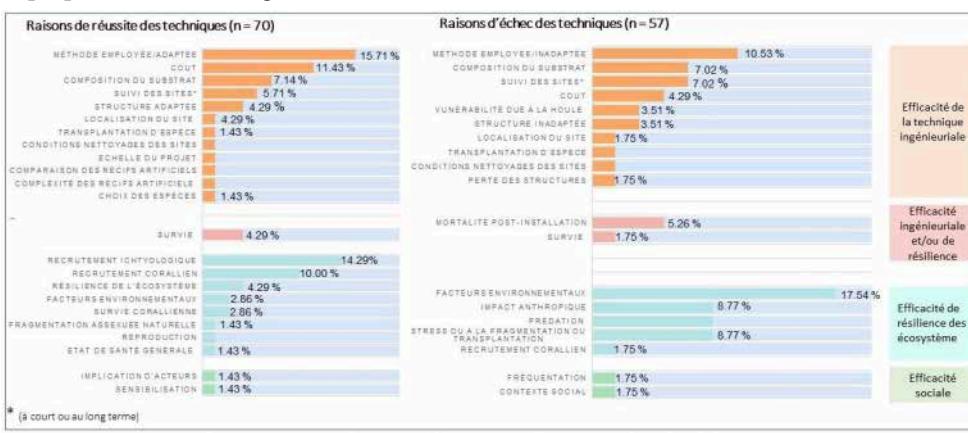


Fig 11. Les indicateurs attestant de la réussite ou de l'échec des techniques pour l'ensemble du jeu de données océan Indien

- 21 Les 41 projets relevés dans la littérature scientifique sont essentiellement destinés et réalisés dans un objectif « expérimental » (recherche académique) qui concerne 66% d'entre eux. Les autres possèdent des objectifs d'amélioration de l'écosystème (17%), de restauration écologique (12%) ou de compensation d'impacts des aménagements du littoral (Figure 12 a).
- 22 En comparaison, les projets traités dans la littérature grise ont pour objectifs principaux la compensation écologique de projets d'aménagement (33%), l'amélioration ou la réhabilitation de l'écosystème corallien (24%) et l'expérimentation (19%) (Figure 12 b). Seules trois techniques sont présentes : la transplantation, les récifs artificiels et les techniques mixtes (Figure-12 d et f). Les projets sont suivis sur des temps plus longs, en moyenne de 2,76 ans, avec 11% des projets étudiés au-delà de 4 ans, quand la durée moyenne de suivi des projets rapportés dans la littérature scientifique est de 1,38 an, dont seuls 5% d'entre eux sont étudiés au-delà de 4 ans (Figure 12 e).

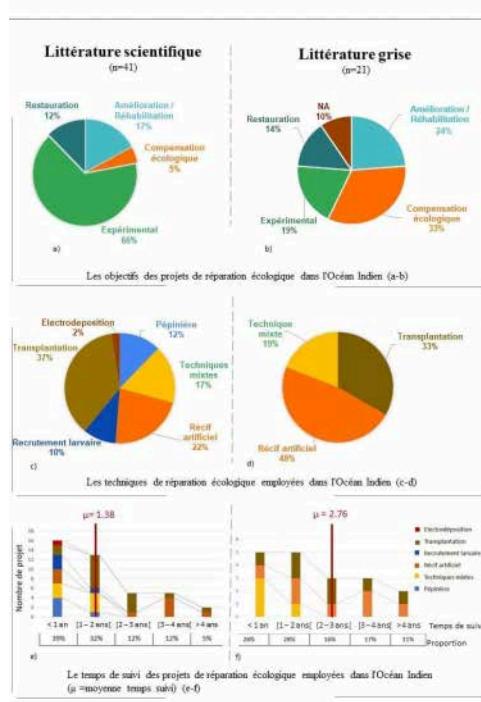


Fig. 12 Planche comparative entre des données issues de la littérature scientifique et grise

3. Discussion

3.1 La variable temporelle dans l'évaluation de l'efficacité des projets de réparation écologique

- 23 Pour évaluer l'efficacité de tout projet, il convient de le suivre sur un temps suffisant. Or, il varie de 3 mois à 5 ans dans le jeu de données utilisé par Jacob et al. (2018), avec une majorité de projets suivis durant moins d'un an. Ce constat est appuyé par l'étude de Bayraktarov et al. (2016) où 47% des projets sont étudiés sur moins de 12 mois. Ces auteurs soulignent également que 11% des projets répertoriés ne fournissent aucune information sur la durée du projet, absence également notée par Jacob et al. (2017). Dans la présente étude, le suivi des projets de réparation écologique ne dépassent que

très rarement les 2 ans, toutes techniques étudiées confondues, en raison du caractère expérimental d'une part importante des projets analysés par la littérature scientifique, ce qui est conforme avec l'analyse de Bayraktarov et al. (2019) à l'échelle mondiale. Les expérimentations portent notamment sur l'électrodéposition, la mise en pépinière, le recrutement larvaire ou l'emploi de techniques mixtes. Ces techniques n'ont pas été éprouvées sur un temps suffisamment long pour être utilisées « en sécurité » pour la réparation des milieux dégradés, constat fait également par Hein et al. (2017).

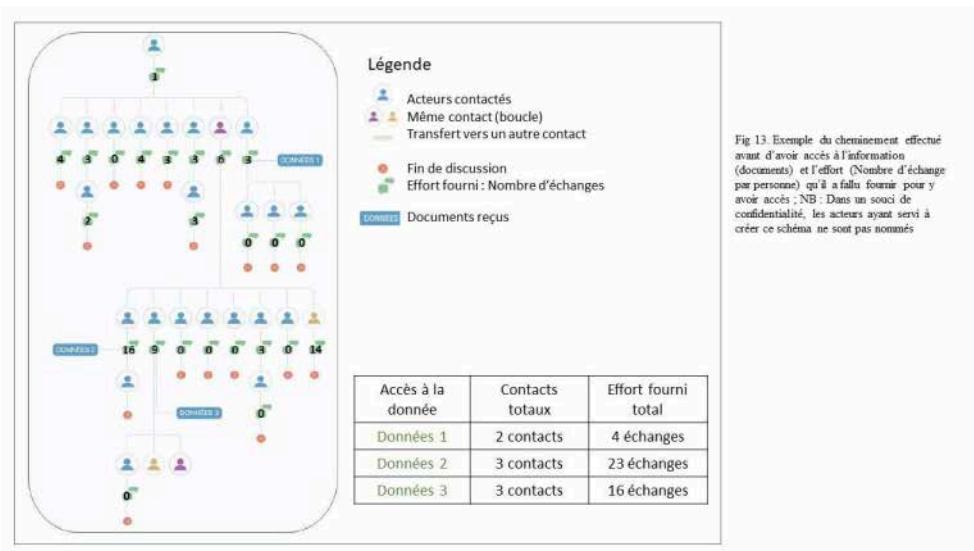
3.2. L'efficacité sociale, la grande absente des critères d'évaluation de l'efficacité

- ²⁴ À l'issue de cette analyse critique de la bibliographie, trois critères ont été identifiés pour mesurer l'efficacité des projets. D'abord le critère de mise en œuvre de la réparation écologique, qui peut être renseigné par de nombreux indicateurs portant notamment sur les moyens matériels utilisés, les techniques mises en œuvre (e.g. nombre de transplants, nombre de patates ou de massifs ou de branches de coraux transplantés, etc.) et les espèces mobilisées dans les transplantations. Le second critère porte sur la résilience des écosystèmes, qu'Hein et al. (2017) assimilent aux taux de survie et à la croissance des espèces transplantées. Il est plus pertinent que le précédent car il mesure les résultats de l'ingénierie mise en œuvre, mais il n'est pas renseigné dans tous les projets. Le troisième critère concerne l'efficacité sociale du projet. Même s'il est abordé dans les discussions des articles consultés, pour expliquer les facteurs de réussites ou d'échec, il n'a jamais fait l'objet de mesure dans les jeux de données (pas d'indicateur). D'une manière générale, les données traitant des caractéristiques socio-économiques des projets de réparation sont très peu présentes dans la littérature de référence. Thématique très récente (comparativement au milieu terrestre), la réparation des récifs coralliens s'appuie surtout sur des connaissances écologiques théoriques, dont nombre d'entre elles sont toujours en cours de développement (Young, 2000; Abelson, 2006; Boström-Einarsson et al., 2020). La plupart des projets publiés sont donc motivés par le besoin de recueillir des données expérimentales dans le but d'approfondir les connaissances ou d'améliorer l'approche méthodologique. Peu d'entre eux intègrent un volet de sensibilisation de la population riveraine à la fragilité de l'habitat récifal nouvellement restauré, à la nécessité d'induire des changements de pratiques (techniques de pêche agressives, accès au site, gestion de nouveaux communs, etc.), voire d'entretenir les milieux. De fait, la dimension humaine, voire sociétale, de la réparation écologique est très peu relevée dans les projets étudiés, tant dans les phases de conception que de mise en œuvre de l'ingénierie écologique. Comme le soulignent Hughes et al. (2010), de nombreuses interventions de gestion sont fondées sur des connaissances scientifiques solides, mais échouent néanmoins en raison d'une mauvaise compréhension des contextes et des contraintes sociales et économiques ainsi que d'une gouvernance inadéquate. Inclure des mesures de l'acceptabilité sociale des projets de réparation puis des mesures de leur efficacité sociale, en intégrant les acteurs, leurs besoins et les représentations sociales, s'avérerait pourtant nécessaire (Depraz et Laslaz, 2014; Rey et al., 2014). D'autant que mesurer uniquement l'efficacité biologique ou relever les techniques d'un projet de réparation nous éloigne du but premier : améliorer la conservation de milieux exposés aux pressions anthropiques locales et globales. Le besoin de proposer des indicateurs socio-écologiques semble tout de même faire consensus auprès de la communauté

scientifique, mais pour cela plusieurs défis à relever ont été identifiés par de nombreux auteurs, parmi lesquels : l'accès aux habitants-usagers sur le terrain, l'utilisation d'outils nécessitant des compétences techniques et de savoir-être (enquêtes qualitatives, étude des pratiques et cultures locales, attachement aux lieux, etc.) et les stratégies et réseaux d'acteurs (Rey *et al.*, 2014; Okubo et Onuma, 2015; Suding *et al.*, 2015; Hein *et al.*, 2017; Martin, 2017; Hein *et al.*, 2019; Bayraktarov *et al.*, 2019; Salaün *et al.*, 2022). Le principal enjeu est d'identifier des paramètres sociaux robustes et peu coûteux évaluant, d'une part, les pressions anthropiques (responsables en partie de la dégradation de l'habitat) et, d'autre part, les bénéficiaires potentiels de cette réparation (amélioration de leurs activités et bien-être).

3.3. Le problème majeur de la disponibilité de l'information

- 25 L'expérience de l'effort à fournir, pour avoir accès aux différents documents issus de la littérature grise, permet de souligner plusieurs points relatifs à la disponibilité de l'information.
- 26 Tout d'abord, il existe un réel manque de diffusion et donc de valorisation de ce type de littérature, probablement lié au manque de centralisation de la donnée en ce qui concerne les milieux marins tropicaux. C'est un constat qui peut être généralisé à l'échelle mondiale, comme l'a démontré Lake (2001). Heureusement, plusieurs groupes de recherche internationaux ont vu le jour pour centraliser et communiquer sur les informations disponibles. Ainsi Boström-Einarsson *et al.*, (2020) ont réalisé un ambitieux (et fastidieux) projet de compilation de données relatives aux projets de réparation écologique pour les récifs coralliens à l'échelle mondiale, disponible sur le site de l'International Coral Reef Initiative (ICRI).²
- 27 En outre, le « cheminement » pour avoir accès aux données est long. Comme l'illustre la figure 13, pour parvenir aux « données 3 », ce sont trois personnes différentes qui ont été contactées et 23 échanges téléphoniques ou par courriel qui ont eu lieu. Aussi, pour chaque projet, il convient d'avoir l'autorisation de toutes les personnes concernées. Cela a parfois réveillé des conflits entre acteurs, qui peuvent au mieux ralentir la collecte de données ou, au pire, l'annuler.
- 28 Un autre facteur de blocage se trouve dans la réticence, de l'ensemble des acteurs contactés, à parler des projets qui ont très peu ou n'ont pas fonctionné. L'échec ne semble pas une option lorsqu'il s'agit de communiquer sur des projets de réparation, ce qui serait pourtant absolument nécessaire pour faire évoluer les techniques et les pratiques.



3.4. Limites et points d'amélioration des travaux de recherches présentés

- 29 Comme le montre la figure 9, il n'existe aucune standardisation du protocole de suivi des projets d'ingénierie écologique appliqués aux récifs coralliens. Les mesures de l'efficacité des projets proposées à la figure 11 dépendent donc, non seulement de l'accès à l'information, mais également du déploiement de critères de suivi identiques pour chaque projet, afin de pouvoir les comparer.
- 30 La facilité d'accès aux données issues des revues scientifiques, comparativement à l'effort fourni pour l'acquisition de données issues de la littérature grise, explique la sur-représentation des articles produits en majorité par le corps académique (chercheurs, universitaires), vis-à-vis des documents produits par les autres types d'acteurs (bureaux d'études, organismes de gestion, ONG, etc.) qui pourtant peuvent apporter de précieuses informations.
- 31 Ces différents points abordés montrent combien il est aujourd'hui complexe de proposer une revue de l'efficacité des projets de réparation des écosystèmes coralliens tropicaux représentative d'une réalité écologique, sociale et économique. En effet, les réticences de diffusion de certains résultats liés à l'aménagement et, à l'opposé, les velléités de publication des institutions de recherche publique, tendent à déséquilibrer la balance entre programmes expérimentaux, abondamment documentés, et projets de compensation écologique, souvent soumis à d'importantes contraintes de confidentialité.
- 32 Il serait ainsi spéculatif d'attribuer un poids relatif aux différents usages de l'ingénierie écologique dans l'océan Indien, mais il est très probable que de nombreux projets de restauration voient le jour chaque année dans le cadre de compensations écologiques, sans que leurs résultats ne puissent alimenter la réflexion sur l'efficacité des différentes techniques déployées. La faible diversité des techniques recensées dans le cadre de la compensation indique toutefois un recours à un panel limité de solutions, face à une nécessité de développement, souvent accompagnée de pertes écologiques significatives.

Conclusion

- 33 Les initiatives de réparation écologique des récifs coralliens se sont multipliées au cours des dernières décennies (Calvet *et al.*, 2015; Jacob *et al.*, 2018; McLeod *et al.*, 2022). La plupart d'entre elles sont étudiées via des projets de recherche, relevant de l'expérimentation. Les durées des suivis, destinées à évaluer l'efficacité des projets, des techniques, des paramètres et facteurs clefs du succès ou de l'échec, sont encore insuffisants, avec une forte majorité de suivis n'excédant pas 2 ans.
- 34 Dès lors, face à un contexte encore instable au sujet des critères et des durées des suivis, l'identification des trois critères à déployer pour tout projet de réparation écologique constitue le principal apport de notre article. Le premier est centré sur la mise en œuvre des moyens et techniques d'ingénierie, le second évalue la résilience de l'écosystème réparé et le troisième porte sur les critères sociaux qu'il conviendrait de collecter pour améliorer la performance des projets, importance déjà soulignée par Guest *et al.*(2011) et Bayraktarov *et al.*(2016).
- 35 Améliorer la diffusion de l'information est également primordial (Lake, 2001; Jacob *et al.*, 2018; Bayraktarov *et al.*, 2019). Le manque d'accès aux données est en effet le signe d'un manque d'échange bilatéraux entre la recherche et les acteurs de terrain, qui freine le déploiement d'une véritable gouvernance de la réparation socio-écologique, que nous appelons de nos vœux.
- 36 Enfin, suivant le constat d'un panel limité de solutions face à un besoin de compensation écologique, aux résultats souvent mal évalués et sur des durées trop courtes, et dans un contexte de large diffusion internationale du principe de pas de perte nette de biodiversité dans le cadre d'aménagements, des efforts considérables devront être faits pour améliorer la connaissance des techniques d'évitement et de réduction des pressions et des impacts, ainsi que de l'évaluation de leur efficacité, afin de limiter autant que faire se peut le recours à la compensation.

BIBLIOGRAPHIE

- Abelson, A. (2006). Artificial reefs vs coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration : Benefits, concerns, and proposed guidelines. *Bulletin of Marine Science*, 78, 151-159.
- Anthony, K., Bay, L., Costanza, R., Firn, J., Gunn, J., Harrison, P., Heyward, A., Lundgren, P., Mead, D., Moore, T., Mumby, P., van Oppen, M., Robertson, J., Runge, M., Suggett, D., Schaffelke, B., Wachenfeld, D., & Walshe, T. (2017). New interventions are needed to save coral reefs. 1, 1420-1422.
- Bayraktarov, E., Saunders, M. I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H. P., Mumby, P. J., & Lovelock, C. E. (2016). The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, 26(4), 1055-1074.

- Bayraktarov, E., Stewart-Sinclair, P. J., Brisbane, S., Boström-Einarsson, L., Saunders, M. I., Lovelock, C. E., Possingham, H. P., Mumby, P. J., & Wilson, K. A. (2019). Motivations, success and cost of coral reef restoration. *Restoration Ecology*.
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., & Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994), 827-833.
- 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>
- Bruno, J. F., Sweatman, H., Precht, W. F., Selig, E. R., & Schutte, V. G. (2009). Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology*, 90(6), 1478-1484.
- Buisson, E., Jaunatre, R., Regnery, B., Lucas, M., Alignan, J.-F., Heckenroth, A., Muller, I., Bernez, I., Combroux, I., & Moussard, S. (2018). Promoting ecological restoration in France : Issues and solutions. *Restoration Ecology*, 26(1), 36-44.
- Calvet, C., Ollivier, G., & Claude, N. (2015). Tracking the origins and development of biodiversity offsetting in academic research and its implications for conservation : A review. *Biological Conservation*, 192, 492-503.
- Chadenas, C., Andreu-Boussut, V., Barthon, C., Michel, X., & De Lajartre, A. (2020). La gouvernance des espaces protégés : Vers un partage de la nature? *Vertigo*, 20(1).
- Chessel, D., Dufour, A. B., & Thioulouse, J. (2004). The ade4 package-I-One-table methods. *R news*, 4(1), 5-10.
- Combessie, J.-C. (2007). IV. Sondages, échantillons: Vol. 5e éd. (p. 45-54). La Découverte. <https://www.cairn.info/la-methode-en-sociologie--9782707152411-p-45.htm>
- David, G., Chabanet, P., Lagabrielle, E., & Quod, J. P. (2019). Low-Tech Conservation Planning Strategies for Human-Coral Reefs Coviability in a Changing World. *Coviability of Social and Ecological Systems: Reconnecting Mankind to the Biosphere in an Era of Global Change*: Vol. 2: Coviability Questioned by a Diversity of Situations, 203-219.
- Depraz, S., & Laslaz, L. (2014). Une méthode en dix points pour comprendre l'acceptation sociale des espaces protégés. Belin.
- Díaz, S. M., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H., Guèze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K., & Butchart, S. (2019). The global assessment report on biodiversity and ecosystem services : Summary for policy makers.
- Guest, J. R., Dizon, R. M., Edwards, A. J., Franco, C., & Gomez, E. D. (2011). How quickly do fragments of coral “self-attach” after transplantation? *Restoration Ecology*, 19(2), 234-242.
- Hein, M. Y., Birtles, A., Willis, B. L., Gardiner, N., Beeden, R., & Marshall, N. A. (2019). Coral restoration : Socio-ecological perspectives of benefits and limitations. *Biological conservation*, 229, 14-25.
- Hein, M. Y., Willis, B. L., Beeden, R., & Birtles, A. (2017). The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs. *Restoration Ecology*, 25(6), 873-883.
- Hilmi, N., Bambridge, T., Claudet, J., David, G., Failler, P., Feral, F., Léopold, M., Pascal, N., & Safa, A. (2014). Préserver la biodiversité des récifs coralliens : L'évaluation économique comme outil

- d'une gouvernance multi-échelle. In *Les sciences humaines et sociales dans le Pacifique Sud : Terrains, questions et méthodes* (p. 291-312). Pacific-Creed Publications.
- Hughes, T. P., Graham, N. A., Jackson, J. B., Mumby, P. J., & Steneck, R. S. (2010). Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience. *Trends in ecology & evolution*, 25(11), 633-642.
- IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5657041>
- Jacob, C., Buffard, A., Pioch, S., & Thorin, S. (2018). Marine ecosystem restoration and biodiversity offset. *Ecological Engineering*, 120, 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.007>
- Lake, P. S. (2001). On the maturing of restoration : Linking ecological research and restoration. *Ecological Management & Restoration*, 2(2), 110-115. <https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.2001.00074.x>
- Lebart, L., Morineau, A., & Piron, M. (1995). *Statistique exploratoire multidimensionnelle* (Vol. 3). Dunod Paris.
- Liversage, K., & Chapman, M. G. (2018). Coastal ecological engineering and habitat restoration : Incorporating biologically diverse boulder habitat. *Marine Ecology Progress Series*, 593, 173-185. <https://doi.org/10.3354/meps12541>
- Martin, D. M. (2017). Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. *Restoration Ecology*, 25(5), 668-673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
- McLeod, I. M., Hein, M. Y., Babcock, R., Bay, L., Bourne, D. G., Cook, N., Doropoulos, C., Gibbs, M., Harrison, P., Lockie, S., Oppen, M. J. H. van, Mattocks, N., Page, C. A., Randall, C. J., Smith, A., Smith, H. A., Suggett, D. J., Taylor, B., Vella, K. J., ... Boström-Einarsson, L. (2022). Coral restoration and adaptation in Australia : The first five years. *PLOS ONE*, 17(11), e0273325. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273325>
- Mitsch, W. J. (2012). What is ecological engineering? *Ecological Engineering*, 45, 5-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.013>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, P. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses : The PRISMA statement. *International journal of surgery*, 8(5), 336-341.
- Morrison, T. H., Adger, N., Barnett, J., Brown, K., Possingham, H., & Hughes, T. (2020). Advancing coral reef governance into the Anthropocene. *One Earth*, 2(1), 64-74.
- Okubo, N., & Onuma, A. (2015). An economic and ecological consideration of commercial coral transplantation to restore the marine ecosystem in Okinawa, Japan. *Ecosystem Services*, 11, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.009>
- Pendleton, L., Comte, A., Langdon, C., Ekstrom, J. A., Cooley, S. R., Suatoni, L., Beck, M. W., Brander, L. M., Burke, L., & Cinner, J. E. (2016). Coral reefs and people in a high-CO₂ world : Where can science make a difference to people? *PloS one*, 11(11), e0164699.
- Rey, F., Gosselin, F., & Doré, A. (2014). *Ingenierie écologique : Action par et/ou pour le vivant?* Editions Quae.
- Salaün, J., Pioch, S., & Dauvin, J.-C. (2022). Socio-Ecological Analysis to Assess the Success of Artificial Reef Projects. *Journal of Coastal Research*, 38(3), 624-638.

SER (Society for Ecological Restoration). (2004). Science and Policy Working Group. The SER International Primer on Ecological Restoration .Society for Ecological Restoration Science and Policy Working Group. 79.

Suding, K., Higgs, E., Palmer, M., Callicott, J. B., Anderson, C. B., Baker, M., Gutrich, J. J., Hondula, K. L., LaFevor, M. C., Larson, B. M. H., Randall, A., Ruhl, J. B., & Schwartz, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348(6235), 638-640. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4216>

W. J. Mitsch, & Jørgensen, S. E. (1989). W.J. Mitsch and S.E. Jorgensen, Introduction to Ecological Engineering, New York, John Wiley & Sons, 1989, p. 3-12. 3-12.

Young, T. P. (2000). Restoration ecology and conservation biology. *Biological conservation*, 92(1), 73-83.

NOTES

1. Cadre Mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal, « recommendation adopted by the working group on the post-2020 global biodiversity framework » <https://www.ecologie.gouv.fr/cop15-biodiversite-aboutit-accord>
 2. voir : <https://icriforum.org/restoration/coral-restoration-database/coral-restoration-database-visualization/>
-

RÉSUMÉS

Ces travaux portent sur une revue de littérature, complétée par un travail de terrain, pour récupérer une littérature grise au sujet des techniques de réparation écologique des milieux coralliens tropicaux dans l'Océan Indien (OI). Au total 62 articles disposant de données suffisantes ont pu être relevés et 16 paramètres permettant d'évaluer l'efficacité des projets ont été identifiés. Six d'entre eux ont été mobilisés au sein d'une Analyse des Correspondances Multiples, afin de dégager plusieurs profils de projets de réparation écologique dans l'océan Indien et de critiquer les méthodes d'évaluation mises en place : (1) la zone géographique, (2) l'état de l'écosystème avant le projet de réparation, (3) les causes de dégradation, (4) l'objectif de réparation écologique, (5) le type de technique et (6) la durée de suivi des projets. Sur la base de ces résultats, 3 catégories de critères de l'efficacité ont été proposées et discutées pour améliorer ces évaluations : (1) moyens et outils d'ingénierie mis en œuvre, (2) résilience des milieux réparés et (3) dimension sociale. Sur ce dernier point, face au manque de données relevées, nous discutons de l'intérêt d'une approche socio-écologique, dans le contexte scientifique disciplinaire encore jeune de la réparation écologique.

This research focuses on a literature review, supplemented by fieldwork to retrieve gray literature on ecological repair techniques for tropical coral environments in the Indian Ocean (OI). A total of 62 articles with sufficient data were identified and 16 metrics for assessing project effectiveness were identified. Six of these were mobilized for an MCA to provide an analysis of the profiles of ecological repair projects in the IO and to critique the evaluation methods used: (1)

geographic area, (2) ecosystem condition prior to the repair project, (3) causes of degradation, (4) ecological repair objective, (5) technical type, and (6) length of time projects were monitored. On the basis of these results, 3 categories of effectiveness criteria were proposed and discussed to improve these evaluations: (1) means and engineering tools implemented, (2) resilience of the repaired environments and (3) social dimension. On this last point, faced with the lack of data, we discuss the interest of a socio-ecological approach, in the still new scientific field that is ecological repair.

INDEX

Mots-clés : ingénierie écologique, récifs coralliens, Océan Indien, efficacité de la réparation écologique, approche socio-écologique

Keywords : ecological engineering, coral reef, Indian Ocean, ecological reparation effectiveness, socio-ecological approach

AUTEURS

AURORE LÉOCADIE

Université de la Réunion / GIE MAREX / IRD, UMR 228 ESPACE DEV (IRD-UA-UG-UM-UNC-UPVD-UR), Équipe LADIVA, doctorante en Géographie, Maison de la Télédétection, 500 Rue Jean François Breton, 34000 Montpellier, France, 0621 69 14 74 – courriel : aurore.leocadie@ird.fr

SYLVAIN PIOCH

EA LAGAM, Université Montpellier 3, Géographie et aménagement des territoires, Route de Mende. F-34000 Montpellier, France, courriel : sylvain.pioch@univ-montp3.fr

MATHIEU PINAULT

GIE MAREX / UMR 9220 ENTROPIE (UR-CNRS-IRD), Faculté des Sciences et Technologies, biologiste marin, Spécialité Environnement Marin Tropical, Chercheur Associé –15 Avenue René Cassin CS 92003 97744 ST DENIS CEDEX 9 Bâtiment S1, Île de la Réunion – 06 93 00 14 06 – courriel : math.pinault@gmail.com

GILBERT DAVID

IRD, UMR ESPACE DEV (IRD-UA-UG-UM-UNC-UPVD-UR), Équipe LADIVA, géographe de la mer et des îles, Maison de la Télédétection, 500 Rue Breton, 34000 Montpellier, France, courriel : Gilbert.David@ird.fr