

ANALYSE COMPARÉE À L'ÉCHELLE MONDIALE DES TECHNIQUES D'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUES ADAPTÉES À LA RESTAURATION DES RÉCIFS CORALLIENS

Amélie CHIPEAUX^{1*}, Mathieu PINAULT^{2,3}, Nicolas PASCAL⁴ & Sylvain PIOCH¹

¹ UMR 5175 CEFE - Université Montpellier 3, Département Biologie et Conservation, Laboratoire de Biologie, Écologie et Environnement, Route de Mende. F-34000 Montpellier. E-mails : amelie.chipeaux@dbmail.com, sylvain.pioch@gmail.com

² MAREX Expertise & conseil en environnement marin, 697 Chemin Surprise. F-97436 Saint-Leu, La Réunion.

³ UMR 9220 ENTROPIE - Université de La Réunion, 15 Avenue René Cassin, BP 7151. F-97715 Saint-Denis, La Réunion. E-mail : math.pinault@gmail.com

⁴ USR 3278 CRIOBE, EPHE, CNRS, UPVD – Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement, BP 1013, Papetoai, Moorea, Polynésie Française. E-mail : nicolas.pascal@criobe.pf

* Corresponding author.

SUMMARY.— *A comparative study at the global scale of ecological engineering techniques suitable for coral reef restoration.*— To limit the impact of development projects on the decline of coral ecosystem while following a trend already started in Europe and in the world; the French regulation has, since 2009, made obligatory the establishment of initiatives to offset the impacts caused to the environment. Artificial reefs and coral transplantation (or both together) are the two tools providing the most positive experience feedbacks worldwide. The study and comparison of 22 restoration projects of coral reefs conducted worldwide has shown that since the new regulatory obligations of mitigation, European projects have been multiplied, trying to find more effective techniques at lower costs. However, despite undeniable advances in applied research on the effectiveness of ecological engineering techniques used in experimental conditions, there is still no standard methodology of evaluation for each case of their application, in the context of mitigation measures for environmental impacts. This methodological gap often results in a gap between the “scientific” and the “practical” restorations and by frequent disagreement on the best practices for evaluation.

RÉSUMÉ.— Afin de limiter l'effet des projets d'aménagement sur le déclin des écosystèmes coralliens tout en suivant une tendance déjà initiée en Europe et dans le monde, la législation française a, depuis 2009, rendu obligatoire la mise en place d'initiatives destinées à compenser les impacts subis par l'environnement. L'étude et la comparaison de 22 projets de restauration de récifs coralliens menés à travers le monde a permis de montrer que, depuis les nouvelles obligations réglementaires de compensation, les projets européens se sont multipliés, tentant de trouver des techniques de plus en plus efficaces à des coûts moindres. La mise en place de récifs artificiels et la transplantation corallienne sont à ce jour les deux outils d'ingénierie écologique apportant le plus de retours d'expériences positifs. Toutefois, malgré d'indéniables avancées en matière de recherche appliquée sur l'efficacité de ces techniques, mises en œuvre dans des conditions expérimentales, il ne semble pas exister à ce jour de méthodologie standard d'évaluation au cas par cas de leur application dans le cadre de mesures de compensation d'impacts environnementaux. Cette lacune méthodologique se traduit souvent par un décalage entre la restauration « scientifique » et la restauration « pratique » et par un désaccord fréquent sur les meilleures pratiques d'évaluation de la compensation.

Présents dans plus de 100 pays du monde, les récifs coralliens recouvrent plus de 600 000 km² des fonds marins (Jameson *et al.*, 1995). Pourtant, durant ces 50 dernières années, plus de 20 % de leur surface totale a disparu. Wilkinson estimait en 2008 que 15 % étaient gravement menacés de disparition dans les 10 à 20 prochaines années et que seulement 30 % étaient dans un état satisfaisant de conservation. Les récifs français d'outremer couvrent 10 % de la surface mondiale de récifs coralliens (4^{ème} rang avec 55 000 km²) et abritent 95 % de la biodiversité côtière nationale (Gabriél, 1998 ; Wilkinson, 2008). La France détient ainsi une responsabilité mondiale en matière de conservation et de gestion durable de ses récifs.

Différentes activités humaines, comme la pêche, les rejets d'engrais et de polluants, les apports terrigènes et, dans une large mesure, l'urbanisation littorale expliquent de façon directe le

déclin des récifs (Crossett *et al.*, 2004). Wilkinson (2002) a mis en évidence, à la suite d'une période de blanchissement aux Seychelles en 1998, la récupération plus rapide des coraux situés dans les aires marines protégées et dans des eaux côtières à faible niveau de pollution. Ainsi, non seulement les activités humaines modifient directement les écosystèmes coralliens, mais elles diminuent également leur capacité de régénération, ou résilience écologique (Hughes *et al.*, 2003).

La dégradation de ces écosystèmes complexes a des répercussions sur le bien-être des populations humaines. En plus de leur valeur patrimoniale élevée, les récifs coralliens jouent un rôle de protection des côtes, en atténuant l'effet des catastrophes naturelles (tempêtes, cyclones ou tsunamis) (Pinault *et al.*, 2014, 2015). Ils fournissent également des ressources alimentaires importantes à de nombreuses populations côtières et représentent une manne économique considérable, notamment pour le tourisme (Moberg & Folke, 1999). Afin de freiner le déclin des récifs coralliens et d'assurer leur pérennité, scientifiques et gestionnaires tentent de mettre en place différentes stratégies de conservation, de limitation des impacts liés à l'activité humaine et, lorsqu'un impact résiduel subsiste, de restauration active des récifs coralliens dégradés.

En France, depuis la loi n° 76-629 du 10 juillet 1976, sur la protection de la nature, « la protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques auxquels ils participent et la protection des ressources naturelles contre toutes les causes de dégradation qui les menacent » sont considérés comme d'intérêt général. Cette loi institue également la mise en place de l'étude d'impact et indique que les maîtres d'ouvrage doivent préciser « les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement ». Ce principe sera ensuite décliné dans différents codes dont celui de l'environnement. Mais l'obligation de compenser les impacts induits par des ouvrages (impacts dits *ex-ante*) restera généralement ignorée jusqu'aux lois Grenelle 1 (2009) et 2 (2010).

Les maîtres d'ouvrage sont depuis tenus de contrebalancer les dommages causés par leurs projets, qui n'ont pu être ni évités ni suffisamment réduits par d'autres moyens, par des « mesures compensatoires » visant une non perte nette (no net loss), voire un gain net, de la valeur écologique d'un site et de ses environs. Ces mesures ont pour objectif d'amener les maîtres d'ouvrage à qualifier et à quantifier les pertes compositionnelles, structurelles et fonctionnelles subies par les écosystèmes afin de proposer des solutions techniques adaptées et proportionnées à ces pertes (Jacob *et al.*, 2014).

Plusieurs techniques de restauration sont en cours de développement en zones récifales coralliennes à travers le monde mais leur suivi se fait généralement sur des échelles de temps très courtes et, les protocoles de suivi n'étant pas standardisés, il est souvent difficile d'évaluer leur efficacité écologique et socio-économique totale. La généralisation de ces protocoles est toutefois difficile car chaque projet possède des objectifs spécifiques (Hilderbrand *et al.*, 2005). Enfin, les bases de données existantes ne recensent que très peu d'informations détaillées sur les projets antérieurs réalisés. Un cadre serait pourtant nécessaire pour fournir des lignes directrices et des retours d'expériences aux gestionnaires et ainsi s'assurer que les techniques de restauration améliorent leur efficacité au fil des expériences (Hobbs & Harris, 2001 ; Abelson, 2006).

Afin de mieux identifier les techniques de restauration employées dans le cadre de mesures compensatoires ou de restaurations volontaires et de comprendre les liens réciproques entre le choix des techniques et la localisation géographique, l'objectif, le dimensionnement du projet, l'origine de la dégradation et l'époque à laquelle la restauration a été entreprise, une revue des travaux réalisés a été produite et analysée. L'objectif de cette étude était de fournir une base d'informations, à destination notamment des maîtres d'ouvrage, des services instructeurs et des bureaux d'études, sur les utilisations faites des techniques d'ingénierie écologique à travers le monde et sur leurs limites et opportunités, tant en termes d'évaluation que d'efficacité.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

COLLECTE DE DONNÉES

La première phase de recherche bibliographique a été réalisée grâce aux moteurs de recherche Google®, Google Scholar®, Scopus® et Web of Science®, avec différents mots-clés et différentes combinaisons de mots, en anglais et en français :

- « coral mitigation », « mesures compensatoires en milieu coralliens »,
- « coral reef restoration », « restauration des récifs coralliens »,
- « ecological engineering », « ingénierie écologique ».

En raison du peu d'informations détaillées sur les projets de restauration, des réseaux de connaissances spécialisés dans les récifs coralliens et la restauration écologique, tels que : Reefbase®, Global Restoration Network®, Reef Restoration®, Coral Guardian®, IFRECOR® (Initiative Française pour les Récifs Coralliens) et ICRI® (International Coral Reef Initiative), ont été utilisés dans un second temps. Les détails techniques et financiers de certains projets ont également pu être complétés suite à la prise de contact téléphonique ou par courrier électronique avec des bureaux d'études, des maîtres d'ouvrage et des professionnels de la restauration écologique.

VARIABLES UTILISÉES

Lors de la collecte de données, 10 critères ont été identifiés pour caractériser les projets de restauration (Tab. I). Seuls les projets pour lesquels ces variables ont pu être incrémentées (modalités) ont été retenus et introduits dans une base de données Microsoft Excel®.

TABLEAU I

Variables et modalités choisies pour la caractérisation des projets de restauration retenues dans cette étude

Zone Géographique	Cause de la dégradation du récif	Technique de restauration utilisée	But du projet	Type de financement	Période	Surface restaurée	Coût	Méthode de suivi de l'efficacité de la restauration	Retour d'expérience sur l'efficacité des techniques mises en place
France	Naturelle	Transplantation	Mesure compensatoire obligatoire	Public	Avant 2009	< 1 ha	< 200.000 \$	Biologique : taux de croissance, mortalité, etc.	0 : pas de retour ou retour négatif
Afrique	Anthropique	Récifs artificiels	Restauration volontaire (comprend la recherche)	Privé	Après 2009	Entre 1 et 5 ha	Entre 200.000 et 500.000 \$	Physique : sédimentation, détachement, enfouissement, etc.	1 : la technique semble avoir fonctionné en partie mais nous n'avons pas de chiffre exact
Amérique				Mixte		> 5 ha	> 500.000 \$	Écologique : colonisation, diversité, abondance des espèces	2 : la technique a bien fonctionné
Asie								Mixte	

Concernant la variable « technique de restauration utilisée », les données ont été regroupées en deux grandes catégories : (1) la transplantation de corail, qui regroupe la transplantation directe, la transplantation indirecte via la mise en place de pépinières ou la production de larves de corail et l'utilisation des dispositifs CSDs (Coral Settlement Devices), qui permettent l'installation des larves coralliennes, et (2) les récifs artificiels, qui regroupent toute structure immergée, délibérément sur le fond marin dans le but d'imiter certaines fonctions d'un récif naturel (Convention et Protocole de Londres - PNUE, 2009). Ce regroupement a permis de limiter le nombre de modalités et de tendre vers leur équivalence statistique. Lorsque transplantation et récifs artificiels étaient associés au sein d'un même projet de restauration, il a été considéré que la technique utilisée était la mise en place de récifs artificiels, ceux-ci étant indispensables à la survie des transplants, tandis que la réciproque n'est pas vérifiée.

ANALYSE STATISTIQUE

Les différents projets ont été décrits selon des variables qualitatives ou semi-quantitatives nominales (e.g. : France, Asie, Afrique, Amérique) ou ordinales (e.g. : < 200.000 \$, entre 200.000 et 500.000 \$, > 500.000 \$). Afin de les comparer, une ACM (Analyse des Correspondances Multiples) a été utilisée. L'ACM permet d'étudier les liens qui existent entre différentes variables par l'analyse des associations entre leurs modalités. Ainsi, deux modalités appartenant à deux variables distinctes sont considérées comme appariées lorsqu'elles sont projetées dans le même cadre du plan factoriel de l'ACM. Ces analyses ont été réalisées grâce au logiciel d'analyse R (R Development Core Team ; www.r-project.org) et le package ade4 (Chessel *et al.*, 2004).

RÉSULTATS

Sur l'ensemble des projets de restauration de récifs coralliens étudiés, 22 ont fourni l'ensemble des 10 critères de caractérisation identifiés (Fig. 1) dont une forte proportion se situait en Floride et seulement quatre se situaient en France (Tab. II). Toutefois, si parmi les projets français la transplantation corallienne et les récifs artificiels étaient utilisés à parts égales pour la compensation et pour la restauration volontaire, seuls trois projets sur 18 ont été mis en œuvre dans le cadre de compensations obligatoires des impacts d'aménagements dans le reste du monde. Parmi les projets réalisés dans le cadre de restaurations volontaires, la transplantation corallienne était la technique la plus employée (13 projets sur 15) et présentait les retours d'expériences les plus positifs (Fig. 2 D et J).

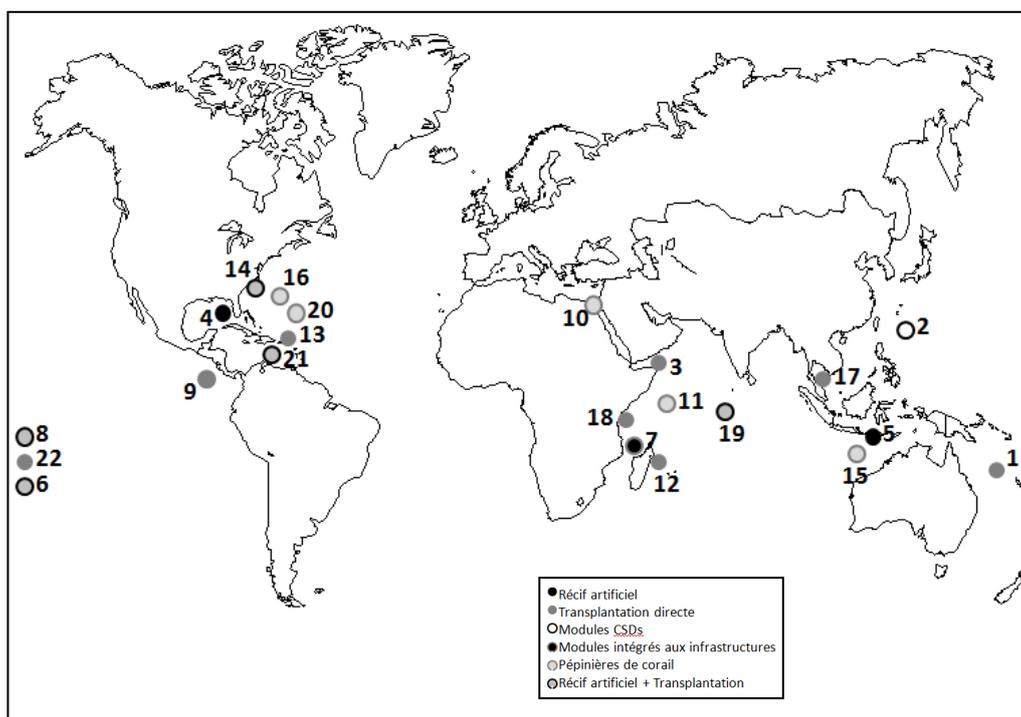


Figure 1.— Carte de répartition mondiale des projets de restauration des récifs coralliens recensés au cours de cette étude (Résumé de chaque projet : Tab. III).

TABLEAU II

Comparaison des types de projets français et mondiaux

		Projets français	Projets mondiaux
Mesure compensatoire	Transplantations	1	2
	Récifs artificiels	1	1
Restauration volontaire	Transplantations	1	13
	Récifs artificiels	1	2

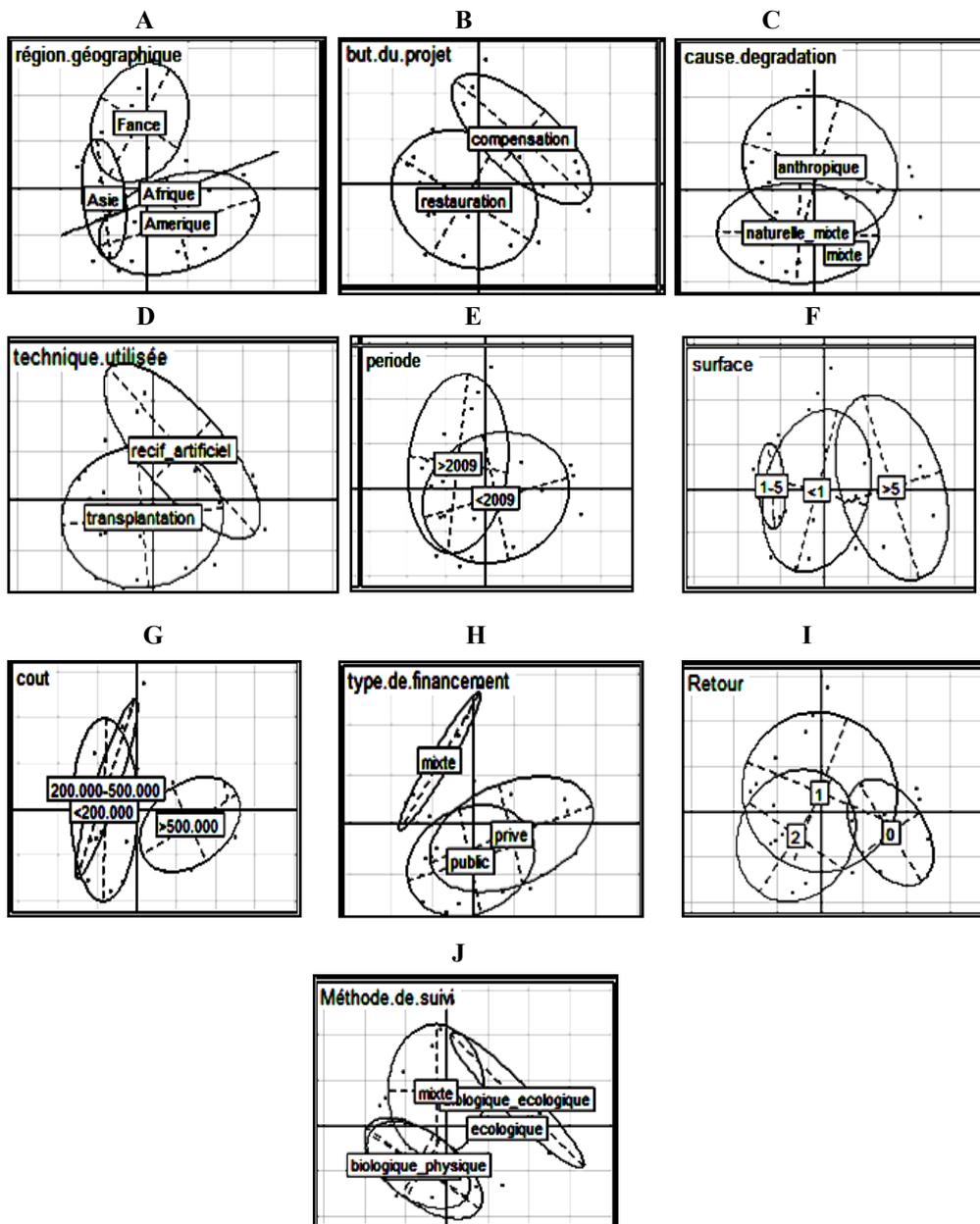


Figure 2.— Représentation graphique de l'analyse des correspondances multiples (ACM) réalisée sur les 22 projets de restauration recensés au cours de cette étude.

Il apparaît également qu'une proportion importante des projets de restauration récifale recensés avant 2009 a été mise en place sur le continent américain (Floride, États-Unis). Après 2009, les projets de restauration se multiplient et concernent d'autres parties du monde, notamment la France (Fig. 2A & E). Ils semblent s'appliquer à des surfaces plus réduites (Fig. 2E & F) et être évalués par des critères de réussite plus diversifiés (suivi mixte) (Fig. 2E & J). Les

projets de petite taille, aux faibles coûts, ayant eu lieu après 2009 ont par ailleurs fourni les retours d'expérience les plus positifs (Fig. 2E, F, G & I).

Enfin, les projets les plus coûteux recensés étaient associés à des sources de financement privées et impliquaient des surfaces supérieures à cinq hectares (Fig. 2F, G & H). Ils étaient également associés à une fréquente absence de retour, ou à des retours négatifs, sur l'efficacité des techniques mises en place (Fig. 2G & I). Les projets financés par des fonds publics (financements de recherches, subventions, etc.) concernaient principalement la restauration de milieux dégradés par des causes naturelles et utilisaient surtout des techniques de transplantation corallienne (Fig. 2C, D & H). Les mesures compensatoires mises en place suite à des dégradations causées par l'homme étaient financées par des organismes privés ou mixtes et impliquaient majoritairement la mise en place de récifs artificiels (Fig. 2C, D & H).

DISCUSSION

L'analyse de 22 projets ayant fourni les informations nécessaires à leur comparaison, à travers 10 critères de caractérisation, n'est pas exhaustive et la représentativité du pool statistique utilisé pourrait être en partie contestée, notamment à travers : (1) la possible omission d'un ou plusieurs critères de caractérisation, (2) le regroupement éventuellement peu pertinent de plusieurs projets au sein d'une même modalité, (3) la surestimation potentielle des projets aux retours d'expériences positifs, les projets avortés ou n'ayant pas rempli les objectifs fixés ne faisant pas ou peu l'objet de communications, ou (4) la surreprésentation envisageable de certaines régions, techniques, périodes, causes de dégradation, etc. en raison d'un programme de promotion, d'une équipe de recherche prolifique, d'une confidentialité liée à certaines pratiques ou d'une volonté politique.

Toutefois, bien que la pratique de la restauration existe depuis des décennies, en particulier en écologie végétale, le domaine de la restauration écologique est relativement nouveau (Young *et al.*, 2005). Les écosystèmes terrestres, y compris les forêts, les prairies et les systèmes fluviaux intérieurs ont été les premiers milieux à intéresser la restauration écologique. Celle des récifs coralliens est beaucoup plus récente (Ellison, 2000 ; Precht *et al.*, 2001 ; Edwards & Gomez, 2007 ; Bastyan & Cambridge, 2008) et peut s'expliquer par une tentative de contrer une dégradation qui n'a été que récemment démontrée (Wilkinson, 2008). Elle s'appuie sur des connaissances théoriques dont les travaux de recherche sont aujourd'hui encore en plein développement (Young, 2000 ; Abelson, 2006). Les États-Unis ont été parmi les premiers à mettre en place des projets de restauration de récifs coralliens endommagés, principalement à la suite d'impacts anthropiques accidentels, comme les échouages de navires (Hudson & Diaz, 1988) et de perturbations naturelles comme les cyclones ou les pullulations d'*Acanthaster planci* dans le Pacifique (Harriott & Fisk, 1988). Cette observation est cohérente avec la proportion élevée des projets recensés dans cette étude menés sur le territoire nord-américain, notamment avant 2009.

La notion de compensation écologique est directement liée aux procédures d'instruction d'EIE (Études d'Impact Environnemental), apparues dans les années 1970 suite au constat de dégradation des milieux naturels et de la nécessité de limiter les effets de l'activité humaine autorisée sur l'environnement (André *et al.*, 2010). Elle ne s'applique ni aux impacts accidentels, qui font l'objet de mesures réglementaires appropriées, ni aux perturbations naturelles, qui ne sont pas dépendantes de l'activité humaine, ni aux milieux ou espèces strictement protégés, sans une mesure de dérogation spécifique (Hubert *et al.*, 2013). Elle vise à restituer un environnement dans un état écologique initial, lorsque les mesures d'évitement et de réduction n'ont pas suffi à faire disparaître tout impact significatif de l'activité humaine évaluée sur l'environnement (Hubert *et al.*, 2013). Elle peut, pour se faire, avoir recours aux techniques de restauration écologique ; elle représente alors une sous-partie de cette plus vaste discipline.

À partir des années 1980, la compensation écologique se développe principalement en Amérique du Nord, à travers divers programmes (Wilcove & Lee, 2004). En France, si la séquence « éviter, réduire, compenser » les effets négatifs des projets sur l'environnement apparaît dès 1976, il faudra attendre une directive européenne environnementale de 2004, qui établit un cadre de responsabilité environnementale fondé sur le principe "pollueur-payeur", puis les lois dites Grenelle 1 (2009) et Grenelle 2 (2010) pour que la compensation devienne obligatoire (proportionnée et mesurable) (Pioch *et al.*, 2011). Les résultats fournis dans cette étude vont dans le sens de cette structuration progressive ; il semble ainsi que, suite aux lois Grenelle 1 et 2, les gestionnaires, autorités administratives, maîtres d'ouvrage et chercheurs français aient mis en commun leurs efforts afin de mieux appréhender la problématique de la dégradation des habitats naturels et les alternatives de restauration.

En matière de récifs coralliens, les principales formations récifales présentes sur le territoire des États-Unis sont protégées par la réglementation des Sanctuaires Maritimes Nationaux [Fagatele Bay (American Samoa), Florida Keys (Florida), Flower Garden Banks (Texas/Louisiana) et Gray's Reef (Georgia)] ou par le Statut de Monument National (Northwestern Hawaiian Islands) (White, 2008). Ce statut de protection prévoit que « toute destruction, perte ou dommage infligé aux ressources du sanctuaire résulte en une pénalité égale à la somme des coûts d'intervention et des dommages en résultant plus intérêts ». Cette réglementation, particulièrement contraignante, explique que peu de mesures compensatoires aient été recensées parmi les projets réalisés au États-Unis au cours des dernières décennies. En effet, les coûts occasionnés par chaque dégradation, autorisée dans le cadre de mesures dérogatoires, étant élevés, très peu de projets y sont réalisés en zone récifale.

Les projets de restauration recensés en Asie (Maldives, Indonésie, Thaïlande, Japon) ont, dans la plupart des cas, été réalisés par des institutions publiques, des organismes de recherche, des associations et des clubs de plongée sous-marine participatifs (Tab. III en Annexe). Ces initiatives, sont en partie soutenues par des équipes de volontaires et de scientifiques intervenant lors de programmes de solidarité suite à d'importantes perturbations naturelles (tsunami, cyclones, blanchissement, etc.) ou de pratiques chroniques destructives (pêche à la dynamite, tourisme de masse, urbanisation littorale, etc.), mais aucune étude réalisée dans le cadre d'une compensation écologique n'a été référencée au cours de ce travail. Cette lacune pourrait être le fait d'une plus grande transparence des organismes impliqués dans les programmes de solidarité internationale que des bureaux d'études spécialisés dans les EIE (Glicken, 2000 ; Fraser *et al.*, 2006). Les projets recensés en Afrique, au nombre de deux, sont trop peu représentatifs pour en déduire une quelconque tendance.

Du point de vue du choix des techniques de restauration en fonction de l'objectif des projets, une très forte correspondance apparaît entre, d'une part, la restauration volontaire et la transplantation corallienne et, d'autre part, la compensation obligatoire et les récifs artificiels.

La première peut être qualifiée de restauration « scientifique », en raison de l'importance des méthodes d'évaluation des critères de réussite des programmes par les organismes financeurs (mécénat, subvention, bourse, chaire, appel de dons, etc.), mais également de la faisabilité des protocoles mis en œuvre par les équipes de volontaires sur le terrain (suivis participatifs) (Facon *et al.*, 2015). La contrainte principale rencontrée par les opérateurs est alors de valoriser l'ensemble des volontaires tout en possédant les méthodes d'évaluation les plus pertinentes et les plus précises possibles dans le but de valider un retour d'expérience significativement positif. En ce sens, le succès des projets de transplantation corallienne peut être évalué à travers quelques critères de réussite (taux de survie, vitalité des transplants, vitesse de croissance, etc.) relativement simples à mesurer par un grand public ayant reçu une courte formation (Jameson *et al.*, 1998 ; Wapnick & McCarthy, 2006).

La seconde, pouvant être qualifiée de restauration « pratique » en raison de son contexte de réalisation lié aux projets d'aménagement et aux impacts anthropiques autorisés, intervient dans le

cadre de procédures d'instruction d'EIE. En ce sens la notion de restauration comprend, outre la notion de réparation écologique, la restitution des services (pêche, lutte contre l'érosion, etc.), usages (récréatif, balnéaire, etc.), fonctions (nursérie, reproduction, alimentation, etc.) et paysages (connectivité, corridors, etc.) présents lors de l'état initial de l'étude (Baine, 2001). La contrainte majeure des opérateurs est alors de fournir une technique susceptible de restituer rapidement ces fonctionnalités, même si les retours d'expériences sont souvent empiriques, que les éléments d'évaluation disponibles à ce jour restent parcellaires et que l'adaptation des outils aux spécificités régionales est souvent au bon vouloir du maître d'ouvrage et des prestataires de services (Pinault, 2013).

L'évaluation des effets des récifs artificiels est donc souvent incomplète, limitée à quelques espèces ou restreinte à l'environnement immédiat des structures immergées. L'essentiel de la littérature se limite alors à une simple description, à un instant donné, de la colonisation des structures par le benthos et à l'évaluation de la faune mobile à proximité immédiate des récifs (Gérard *et al.*, 2008). Pourtant, lorsqu'ils sont utilisés dans le but de reconnecter différents milieux indispensables au cycle de vie des espèces, le suivi simple des récifs artificiels ne peut pas suffire pour évaluer leur efficacité (Pinault, 2013). L'efficacité relative de la transplantation par rapport aux récifs artificiels se base donc sur des retours d'expérience principalement menés par des estimateurs biologiques car les méthodes d'évaluation des récifs artificiels sont souvent très peu performantes pour évaluer leur principal objectif : remplacer la fonctionnalité d'habitats dégradés ou soutenir leur connectivité.

CONCLUSION

Cette revue littéraire a permis de montrer que de nombreux programmes de recherche voient le jour afin d'élaborer de nouvelles techniques de restauration des récifs coralliens. Toutefois, les coraux ayant une croissance lente, il faut du temps avant d'obtenir des résultats significatifs, qui permettraient de valider l'efficacité de ces nouvelles techniques. Actuellement, l'installation de récifs artificiels demeure la technique la plus employée dans le cadre de mesures compensatoires, alors que la transplantation est la plus prisée par les chercheurs et les programmes participatifs. De plus, la restauration des récifs coralliens semble être encore un domaine très expérimental et il existe souvent un décalage entre la restauration « scientifique » et la restauration « pratique » qui se traduit par un désaccord fréquent sur les meilleures pratiques (Palmer *et al.*, 1997 ; Lunt, 2001 ; Pinault, 2013).

Il existe également une absence d'information qui résulte souvent de l'hésitation des équipes de recherche, des bureaux d'études et des maîtres d'ouvrage à partager les données et les résultats, ainsi que de leur réticence à révéler des erreurs ou l'échec de projets (Kondolf, 1995 ; Lake, 2001). Pourtant, afin de ne pas répéter les mêmes erreurs, il serait utile de mettre en place une base de données internationale, qui regrouperait les projets de restauration des récifs coralliens et, en particulier, ceux menés dans le cadre de mesures compensatoires. Dans cet objectif, des fiches synthétiques des projets recensés pourraient être réalisées et alimenter une plateforme numérique interopérable destinée aux maîtres d'ouvrage, services instructeurs et bureaux d'études. L'amélioration du suivi de l'efficacité des techniques via la mise en place de méthodes d'évaluation plus pertinentes en fonction des outils de compensation mis en œuvre et de leur but est également indispensable afin d'avoir des retours fiables sur les projets mis en œuvre.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des acteurs scientifiques, maîtres d'ouvrage, associatifs, membres d'organisations non gouvernementales et institutionnels pour leur avoir communiqué librement les résultats exploités dans cette étude. Les commentaires et suggestions des relecteurs anonymes ont également permis l'amélioration de ce manuscrit.

RÉFÉRENCES

- ABELSON, A. (2006).— Artificial reefs vs. coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: Benefits, concerns, and proposed guidelines. *Bull. Mar. Sci.*, 78: 151-159.
- ANDRÉ P., DELISLE, C.E. & REVÉRET, J.P. (2010).— *L'évaluation des impacts sur l'environnement, 3e édition: processus, acteurs et pratique*. Presses internationales Polytechnique, Québec.
- BAINE, M. (2001).— Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean Coast. Manage.*, 44: 241-259.
- BASTYAN, G.R. & CAMBRIDGE, M.L. (2008).— Transplantation as a method for restoring the seagrass *Posidonia australis*. *Estuar. Coast. Shelf S.*, 79: 289-299.
- CHESSSEL, D., DUFOUR, A.B. & THIOULOUSE, J. (2004).— The ade4 package-I- one-table methods. *R News*, 4: 5-10.
- CROSSETT, K.M., CULLITON, T.J., PILEY, P.C. & GOODSPEED, T.R. (2004).— *Population trends along the coastal United States: 1980 – 2008*. Coastal Trends Report Series, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Md.
- EDWARDS, A.J. & GOMEZ, E.D. (2007).— *Reef restoration concepts and guidelines: Making sensible management choices in the face of uncertainty*. Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Programme, St. Lucia.
- ELLISON, A.M. (2000).— Restoration of mangrove ecosystems. *Restor. Ecol.*, 8: 217-218.
- FACON, M., PINAULT, M., OBURA, D., PIOCH, S., POTHIN, K., BIGOT, L., GARNIER, R. & QUOD, J.P. (2016).— A comparative study of the accuracy and effectiveness of Line and Point Intercept Transect methods for coral reef monitoring in the southwestern Indian Ocean islands. *Ecol. Indic.*, 60: 1045-1055.
- FRASER, E.D., DOUGILL, A.J., MABEE, W.E., REED, M. & MCALPINE, P. (2006).— Bottom up and top down: Analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. *J. Environ. Manage.*, 78: 114-127.
- GABRIÉ (1998).— *L'état des récifs coralliens en France Outre-Mer: Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna, Polynésie Française, Clipperton, Guadeloupe, Martinique, Mayotte, La Réunion, îles éparses de l'Océan Indien. Paris (FRA)*. Rapport IFRECOR pour le compte du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; Secrétariat d'État à l'Outre-Mer. ISBN 2-11-091251-0.
- GÉRARD, A., THOUAR, E., VÉRON, G., DENIS, J. & THÉBAUD, O. (2008).— *Les récifs artificiels -État des connaissances et recommandations*. Rapport IFREMER, France.
- GLICKEN, J. (2000).— Getting stakeholder participation 'right': a discussion of participatory processes and possible pitfalls. *Environ. Sci. Policy*, 3: 305-310.
- HARRIOTT, V.J. & FISK, D.A. (1988).— Coral transplantation as a reef management option. *Proc 6th Intern. Coral Reef Symp.*, Vol. 2: 375-379.
- HILDERBRAND, R.H., WATTS, A.C. & RANDLE, A.M. (2005).— The myths of restoration ecology. *Ecol. Soc.*, 10: 19-29.
- HOBBS, R.J. & HARRIS, J.A. (2001).— Restoration ecology: Repairing the Earth's ecosystems in the New Millennium. *Restor. Ecol.*, 9: 239-246.
- HUBERT, S., MORANDEAU, D., LE BRIS, C., LANSIART, M. & LEMAÎTRE-CURRI, E. (2013).— *Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels*. CGDD ; Direction de l'eau et de la biodiversité. Octobre 2013.
- HUDSON, J.H. & DIAZ, R. (1988).— Damage survey and restoration of M/V Wellwood grounding site, Molasses reef, Key largo national marine sanctuary, Florida. *Proc. 6th Intern. Coral Reef Symp.*, Australia.
- HUGHES, T.P., BAIRD, A.H., BELLWOOD, D.R., CARD, M., CONNOLLY, S.R., FOLKE, C., GROSBERG, R., HOEGH-GULDBERG, O., JACKSON, J.B.C., KLEYPAS, J., LOUGH, J.M., MARSHALL, P., NYSTROM, M., PALUMBI, S.R., PANDOLFI, J.M., ROSEN, B. & ROUGHGARDEN, J. (2003).— Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929-933.
- JACOB, C., QUÉTIER, F., ARONSON, J., PIOCH, S. & LEVREL, H. (2015).— Vers une politique française de compensation des impacts sur la biodiversité plus efficace: défis et perspectives. *VertigO*, 14 (3).
- JAMESON, S.C., MCMANUS, J.W. & SPALDING, M.D. (1995).— *State of the reefs: regional and global perspectives*. ICRI Executive Secretariat Background Paper, May 1995. NOAA.
- KONDOLF, G.M. (1995).— Five elements for effective evaluation of stream restoration. *Restor. Ecol.*, 3: 133-136.
- LAKE, P.S. (2001).— On the maturing of restoration: Linking ecological research and restoration. *Ecol. Manage. Restor.*, 2: 110-115.
- LUNT, I. (2001).— Enhancing the links between restoration ecology and ecological restoration. *Ecol. Manage. Restor.*, 2: 3-4.
- MOBERG, F. & FOLKE, C. (1999).— Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecol. Econ.*, 29: 215-233.
- PALMER, M.A., AMBROSE, R.F. & POFF, N.L. (1997).— Ecological theory and community restoration ecology. *Restor. Ecol.*, 5: 291-300.

- PINAULT, M. (2013).— Évaluation de la fonctionnalité de récifs artificiels à vocation non extractive, dans un contexte d'habitats naturels fragmentés – Côte nord-ouest de l'île de La Réunion. *Cybium*, 37: 262.
- PINAULT, M., BISSERY, C., GASSIOLE, G., MAGALON, H., QUOD, J.P. & GALZIN, R. (2014).— Fish community structure in relation to environmental variation in coastal volcanic habitats. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 460: 62-71.
- PINAULT, M., QUOD, J.P. & GALZIN, R. (2015).— Mass-settlement of the Indian Ocean black-tip grouper *Epinephelus oceanicus* (Lacepède, 1802) in a shallow volcanic habitat following a tropical storm. *Environ. Biol. Fishes*, 98: 705-711.
- PIOCH, S., KILFOYLE, K., LEVREL, H. & SPIELER, R. (2011).— Green marine construction. *J. Coastal Res.*, 61: 257-268.
- PRECHT, W.F., ARONSON, R.B. & SWANSON, D.W. (2001).— Improving scientific decision-making in the restoration of ship-grounding sites on coral reefs. *Bull. Mar. Sci.*, 69: 1001-1012.
- WAPNICK, C. & MCCARTHY, A. (2006).— Monitoring the efficacy of reef restoration projects: Where are we and where do we need. *Coral Reef Restoration Handbook*: 339-350.
- WHITE, J.C. (2008).— Conserving the United States' coral reefs: National monument designation to afford greater protection for coral reefs in four national marine sanctuaries. *Wm. & Mary Envtl. L. & Pol'y Rev.*, 32: 901.
- WILCOVE, D.S. & LEE, J. (2004).— Using economic and regulatory incentives to restore endangered species: lessons learned from three new programs. *Conserv. Biol.*, 18: 639-645.
- WILKINSON, C. (2002).— *Status of coral reefs of the world: 2002*. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Reef and Rainforest Research Center, Townsville.
- WILKINSON, C. (2008).— *Status of coral reefs of the world: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Reef and Rainforest Research Center, Townsville.
- YOUNG, T.P. (2000).— Restoration ecology and conservation biology. *Biol. Cons.*, 92: 73-83.
- YOUNG, T.P., PETERSEN, D.A. & CLARY, J.J. (2005).— The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms. *Ecol. Lett.*, 8: 662-673.

ANNEXE : TABLEAU III

Résumé des 22 projets (Les différentes teintes correspondent à la technique utilisée, voir légende de la Figure 1)

Projet	Dégradation	But de la restauration	Financement	Maitre d'oeuvre	Surface en ha	Nb colonies/modules	Epoque	Critères d'efficacité	Référence
1 Prony Baie, France	Construction d'un port	Mesure compensatoire via la Transplantation	Goro Nickel : 62.000 \$	Soproner	0.02	1762 colonies	2005-2006	taux de survie, détachement transplants, taux de croissance, colonisation par poissons	Rapport final. Programme de reconstitution du biotope corallien en baie de PronyVale Inco, 2011.
2 Lagon de Sekisei, Japon Asie	Blanchiment du corail	Recherche pour la mise au point de dispositifs (CSDs) pour l'installation du corail	Ministère de l'Environnement : plus de 500.000 \$	na	0.08	81.000 CSDs	2004-2005	taux de croissance, mortalité, blanchiment, prédation, prolifération algues, sédimentation	Okamoto, M., Nojima, S., Fujiwara, S., & Furushima, Y. (2008). Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using in situ sexual reproduction of corals. <i>Fisheries Science</i> , 74: 1245-1253.
3 Golf d'Aden, Yemen Asie	Construction d'un pipeline	Mesure compensatoire via la Transplantation	Yemen LNG : plus de 500.000 \$	Créocéan	11	150 colonies	2007	taux de survie, colonisation	Seguin, F., Le Brun, O., Hirst, R., Al-Thary, I. & Dutrieux, E. (2009). Large coral transplantation in Bal Haf (Yemen): an opportunity to save corals during the construction of a Liquefied Natural Gas plant using innovative techniques. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium: 1267-1270.
4 Ile Sunny, Amérique	Renourissement de plage	Mesure compensatoire via les Récifs artificiels	Miami Dade County	Miami Dade County	0.05	80 modules	1991	diversité et densité invertébrés et poissons	Harris, L.E. (1995, October). Engineering design of artificial reefs. In <i>OCEANS'95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings</i> . Vol. 2: 1139-1148. IEEE.
5 Permutera, Indonésie Asie	Pêche destructrice, tourisme	Restauration volontaire via les Récifs artificiels	Fonds privés, dons : 600 à 3.000 \$ par module	Global Coral Reef Alliance	2.4	28 modules	2000	taux de survie, détachement transplants, taux de croissance, colonisation par poissons	Goreau, T.J. & Hilbertz, W. (2008). Bottom-up communitybased coral reef and fisheries restoration in Indonesia, Panama, and Palau. <i>Handbook of Regenerative Landscape Design</i> : 143-159.
6 Matira Point, France	Extraction de sable corallien	Restauration volontaire via les Récifs artificiels et la Transplantation	Gouvernement de Polynésie française : 1.951.000 \$	na	0.72	11 modules, 511 colonies	2000	taux de survie, détachement, abondance et diversité poissons, érosion côtière	Salvat, B., Chancerelle, Y., Schrimm, M., Morancy, R., Porcher, M., & Aubanel, A.2002. Restauration d'une zone corallienne dégradée et implantation d'un jardin corallien. <i>Rev. Ecol. (Terre Vie)</i> , Suppt. 9: 81-96.
7 Ecoavaliers à Mayotte, France	Mise en place d'un pipeline	Mesure compensatoire via des Ecoavaliers	Etat français : entre 200.000 et 500.000 \$	Vinci construction, Egis ingénierie	na	206 écoavaliers	2011	turbidité, colonisation par la faune et la flore, communautés ichtyologiques	Pioch, S., Saussola, P., Kilfoyle, K. & Spielner R. 2011. Ecological design of marine construction for socio-economic benefits: ecosystem integration of a pipeline in coral reef area. <i>Procedia Environmental Sciences</i> , 9: 148-152.
8 Ile Maiden, Amérique	Ouragan	Création d'un brise lame via des Récifs artificiels et la Transplantation	Dons privés : 1.770.000 \$	Fondation Reefball	na	3.500 modules, 5.000 colonies	2003-2004	colonisation par la faune et la flore, croissance et taux de survie du corail	Reef Ball Foundation. Antigua Maiden Island Total Reef Restoration Page & Press Release. 2005. Disponible en ligne : http://www.reefball.com/map/antiguascience/antiguapressrelease.htm
9 Ile Cano, Costa Rica Amérique	Réchauffement des eaux, sédimentation, pollution	Recherche sur l'efficacité de la transplantation au sein d'une aire marine protégée	Université du Costa Rica	Institut de recherche tropicale Smithsonian	0.01	310 fragments de <i>Pocillopora</i> spp.	1984-1989	taux de survie et de croissance des transplants	Guzmán, H.M. (1991). Restoration of coral reefs in Pacific Costa Rica. <i>Conservation Biology</i> , 189-195.
10 Golf d'Eilat, Israël Afrique	Urbanisation du littoral	Recherche sur l'efficacité des pépinières en pleines eaux	BARD USA Israel, INCO-DEV project, AID-CDR program : 300.000 \$	Institut National d'Océanographie d'Israël, Université de Jérusalem, Pisciculture Aadag	na	7119 fragments d'espèces branchues + 21 colonies de <i>Favia favaus</i> .	2004-2007	croissance, survie, détachement. Concentration en nutriments. Présence de micro-algues eet d'anémones	Shafir, S., Van Rijn, J. & Rinkevich, B. (2006). Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts. <i>Marine Biology</i> , 149: 679-687.
11 Ile Cousin, Amérique	Changement climatique	Recherche sur l'efficacité des pépinières en pleines eaux	USAID, GEF-UNEDP : entre 200.000 et 500.000 \$	Nature Seychelles	na	50.000 fragments de <i>Pocillopora</i> et <i>Acropora</i>	en cours de suivi	taux de survie, taux de croissance	Nature Seychelles. Coral Reef Restoration, The Reef Rescuers Project. Disponible en ligne : http://natureseychelles.org/what-we-do/coral-reef-restoration

12	Projet DECOR, France	Urbanisation du littoral	Recherche sur la Transplantation	< 200.000 \$	na	<1	na	2009	taux de survie, taux de croissance	Non disponible
13	Puerto Rico, Amérique	Pêche, aquaculture, urbanisation	Recherche pour restaurer l'habitat des juvéniles de poissons via la Transplantation	Fondation Toyota	Université de Puerto Rico	0.65	100 fragments de 14 espèces	2000-2001		Hernández-Delgado, E.A., Acuña, A.M., Otaño-Cruz, A. & Suleiman-Ramos, S.E.(2014). Bomb-cratered coral reefs in Puerto Rico, the untold story about a novel habitat: from reef destruction to community-based ecological rehabilitation. <i>International Journal of Tropical Biology and Conservation</i> , 62: 183-200.
14	M/V Wellwood, Amérique	Echouage de navire en 1984	Restauration de la structure récifale via les Récifs artificiels, la Transplantation, des Attracteurs chimiques et l'Ensemencement de larves	The Wellwood Shipping Company et the Hanseatic Shipping Company : 6.275 millions \$	NOAA	0.65	22 modules, 41 colonies de 20 espèces	2002	couverture corallienne, composition des communautés végétales et animales	Hudson, J.H. & Diaz, R. (1988). Damage survey and restoration of M/V Wellwood grounding site, Molasses Reef, Key Largo National Marine Sanctuary, Florida. <i>Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium</i> , Vol. 2: 231-236.
15	Tumbak, Indonésie Asie	Pêche à la dynamite et au cyanure	Gestion des ressources halieutiques par la mise en place de Pépinières et des Récifs artificiels	Fondation Veolia : < 200.000 \$	Acroporis Indonesia	<1	50 modules et 15 tables de culture de corail	Depuis 2010	évaluation biologique, écologique et économique	Sauver les récifs coralliens de Tumbak, Fondation Veolia. Disponible en ligne : http://fondation.veolia.com/fr/actions/projets-soutenus/12EB1590.acroporis.htm
16	Floride et Iles Vierges, Amérique	Blanchiment, urbanisation, pollution	Pépinières de corail	Gouvernement Américain : 3.3 millions \$	The Nature Conservancy	na	30.000 fragments détachés naturellement d' <i>Acropora palmata</i> et <i>cervicornis</i>	en cours de suivi	taux de croissance, détachement, mortalité	Contact avec The Nature Conservancy
17	Ile Kham Asie	Urbanisation du littoral	Restauration volontaire via la Transplantation	The Thai Royal Navy : entre 200.000 et 500.000 \$	Communautés locales, étudiants, clubs de plongé	Entre 1 et 5	260 colonies massives, 40 branchues et 3 colonies de coraux mous	1995-1997	taux de croissance et survie	Chunhabundit, S., Teva-aruk, T., Yeemin & Thapanand, T. 1998. Studies on coral restoration by transplantation at Kham island marine park, Sattahip Naval Base, the Thai Royal Navy, upper Gulf of Thailand, p. 125. In: P. Limpasichol, A. Edwards, P.E. Brown, T. Upanoi and N. Kulanjaree (eds.) <i>Proceedings of an International Workshop on the Rehabilitation of Degraded Coastal Systems</i> . Phuket Marine Biological Center, Thailand, 162 p. (Abstract)
18	Ile Mafia Afrique	Naturelle	Développer et tester une technique de Transplantation à faibles coûts	Université de Göteborg : moins de 200.000 \$	Institut des sciences marines de Tanzanie, pêcheurs locaux	<1	<i>Acropora muricata</i> et <i>A. vaughani</i>	1998	détachement des transplants, taux de croissance	Lindah, U. 1998. Low-tech rehabilitation of degraded coral reefs through transplantation of staghorn corals. <i>Ambio</i> , 27: 645-650.
19	Les Maldives, Asie	Exploitation du corail	Evaluer la survie de Transplants sur une Dalle de béton	Gouvernement du Royaume-Uni : entre 200.000 et 500.000 \$	Université de Newcastle, UK	0.01	530 transplants d' <i>Acropora</i> , <i>Pocillopora</i> , <i>Porites</i> , <i>Favia</i> et <i>Favites</i>	1995	taux de survie, de croissance, recrutement et détachement	Clark, S. & Edwards, A.J. (1995). Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldivian Islands. <i>Coral reefs</i> , 14: 201-213.
20	Les Bahamas, Amérique	Pêche destructrice, tourisme	Recherche sur un modèle type "arbre" de Pépinière	Gouvernement	The Atlantis Blue Project	2	3 pépinières, 50 fragments d' <i>Acropora</i>	en cours de suivi	taux de survie, taux de croissance, détachement de fragments	Contact avec the Nature Conservancy.
21	Projet Eco Electrica, Amérique	Construction d'un pipeline	Mesure compensatoire via les Récifs artificiels et la Transplantation	EcoElectrica : plus de 500.000 \$	Tetratech EC, INC	>5	na	1995	taux de survie et de croissance des coraux, communautés ichtyologiques	United States Fish and Wildlife Service. Final Report. Investigation of Mitigation for Coral Reef Impacts in the U.S. Atlantic :South Florida and the Caribbean. 2004 Contact avec EcoElectrica
22	Ile Samoa, Amérique	Construction d'une jetée	Mesure compensatoire via la Transplantation	Gouvernement : plus de 500.000 \$	NOAA	>5	1000 transplants de coraux sclératinaires	1999-2005	taux de croissance et survie	Craig, P., Daschbach, N., Wiegman, S., Curren, F., Aicher, J., Peau, L. & Filteau, M. C. (1999). Workshop report and development of 5-year plan for coral reef management in American Samoa (2000-2004). American Samoa coral reef advisory group.