

3.1 - RESTAURATION PHYSIQUE D'UN RECIF DYNAMITE EN INDONESIE

ORIGINE DE L'OPERATION :

Pêche à la dynamite

LIEU :

Parc National de Komodo, Indonésie

DEGATS :

Destruction des récifs : amas de gravats et blocailles

TECHNIQUE UTILISEE : RESTAURATION PHYSIQUE

3 méthodes de restauration physique ont été testées pour consolider le substrat meuble:

1. Filets attachés au substrat
2. Plaques de ciment
3. Enrochements de carrière



BILAN :

L'utilisation des enrochements de carrière a été la technique la plus efficace pour favoriser le recrutement corallien. Les algues rouges encroûtantes ont colonisé rapidement les roches et le recrutement corallien s'est produit dans l'année qui a suivi l'intervention. Les roches ont également présenté une résistance mécanique aux mouvements du sable et des gravats.

Particularités de la restauration :

- 1) ressources financières limitées,
- 2) zone où le recrutement corallien est important : transplantations non nécessaires.

COUT :

5-10 €/m²

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

Fox (2001)

3.2 - RESTAURATION PHYSIQUE APRES ECHOUAGES DE NAVIRES EN FLORIDE

ORIGINE DE L'OPERATION :

Echouage de 2 navires, ALEC OWEN
MAITLAND et ELPIS (1989)

LIEU :

Sanctuaire Marin National des Florida Keys,
Etats-Unis

DEGATS :

Destruction de la charpente du récif autour
des sites d'échouage (cratères)

TECHNIQUE UTILISEE : RESTAURATION PHYSIQUE

• ALEC OWEN MAITLAND :

Profondeur : 2,5 mètres

Remplissage du cratère laissé par l'échouage
du navire avec des plaques de béton
(incrustées de rochers calcaires) fixées avec
du ciment sous-marin.

• ELPIS :

Profondeur : 10 mètres

Remplissage du cratère avec du sable
corallien et de gros rochers calcaires.



Photo NOAA
*Restauration physique à l'aide de plaques
de béton (site Alec Owen Maitland)*



Photo NOAA
*Remplissage du cratère avec sable
corallien*

BILAN :

- Dans les 2 cas, la stabilisation du substrat
après l'échouage a été un succès. Les
structures restaurées sont restées stables et
ont résisté à l'ouragan Georges (1998).

- Le recrutement corallien a été supérieur
sur le site le plus profond (ELPIS), en termes
d'abondance et de diversité. Il semble que la
structure du substrat à ELPIS (davantage de
faces verticales et substrat plus complexe,
plus irrégulier) ait constitué un facteur
favorisant le recrutement corallien. Les
structures horizontales, à l'inverse,
paraissent favoriser l'accumulation de
sédiments et l'installation d'algues
filamenteuses, limitant ainsi le recrutement
corallien.

COUT :

- ALEC OWEN MAITLAND : 400 €/m²
- ELPIS: 100 €/m²

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

Miller et Barimo (2001)

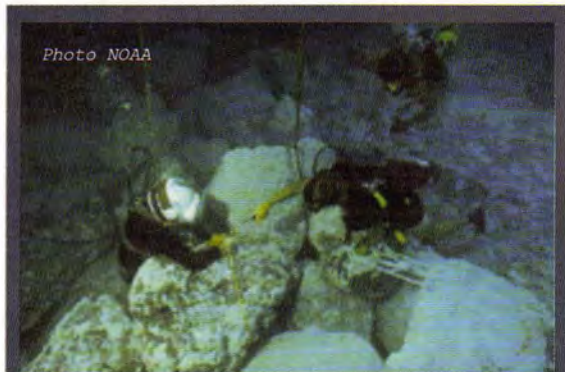


Photo NOAA
*Restauration physique à l'aide de
rochers calcaires (site Elpis)*

3.3 - RESTAURATION BIOLOGIQUE D'UN SITE APRES ECHOUAGE D'UN NAVIRE A PORTO RICO

ORIGINE DE L'OPERATION :

Echouage du navire FORTUNA REEFER (1997)

LIEU :

Récifs frangeants de Mona Island, Porto Rico

DEGATS :

*Destruction des communautés coralliennes (*Acropora palmata*) sur le site d'échouage, menace de déversement de pétrole*

TECHNIQUE UTILISEE : RESTAURATION BIOLOGIQUE

Récupération des fragments coralliens balayés dans les zones sableuses. Immobilisation et re-fixation des fragments instables et cassés (*Acropora palmata*) aux éperons récifaux et structures coralliennes (*Acropora*) encore en place, en les sécurisant avec du fil et des clous en acier inoxydable. Du fait de la dureté et de la densité des fonds récifaux, les fragments coralliens ont été stabilisés en perçant des trous dans le substrat, pour y planter des clous en inox et y attacher les fragments.

BILAN :

1857 fragments coralliens ont été stabilisés en l'espace de 2 mois et demi et des stations de suivi de cette restauration ont été installées.

COUT :

1,25 million € pour la totalité de la restauration

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

<http://www.darp.noaa.gov/serection/fr.htm>



Fixation de fragments coralliens à l'aide de fils et de clous



*Fragment de *Acropora palmata* refixé sur le substrat naturel*

3.4 - RESTAURATION MIXTE D'UN RECIF DETRUIT PAR LES CONSEQUENCES D'UN CYCLONE A LA REUNION

ORIGINE DE L'OPERATION :

Cyclone Firinga (1989)

LIEU :

Saint Leu, La Réunion

DEGATS :

*Destruction des habitats
(99% de mortalité corallienne)*

TECHNIQUE UTILISEE : RESTAURATION MIXTE

- Première phase (1996-1998)

RESTAURATION BIOLOGIQUE

- Capture et mise en bassin d'élevage de larves de *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae), poissons demoiselle associés à *Acropora formosa*.
- Transplantation de coraux branchus (*Acropora formosa*) sur le substrat naturel. Remise en liberté des larves de *Dascyllus aruanus* destinées à coloniser les transplants coralliens (repeuplement du milieu).

- Deuxième phase (1999-2000)

RESTAURATION PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE

- Mise en place de structures artificielles (en béton fibré), de forme adaptée aux platiers récifaux réunionnais.
- Transplantation de fragments d'*A. formosa* sur les récifs artificiels (collage au ciment prompt).

Suivi de la colonisation des récifs artificiels par la faune et flore fixées (coraux, algues), sédentaires (oursins, mollusques, crustacés) et vagiles (poissons) sur 5 mois. L'évolution et la croissance des transplants ont également été étudiées.



BILAN :

- Première phase :

- Réussite de l'élevage en aquarium de larves de *Dascyllus aruanus* mais échec de la tentative de colonisation des récifs artificiels. Les poissons réintroduits sur le site ne se sédentarisent pas,

- Réussite de la transplantation : Pas de mortalité observée et bonne croissance des transplants.

- Deuxième phase :

- Réussite de la transplantation de *A. formosa* sur les récifs artificiels : taux de mortalité nul dans le premier mois puis mortalité due à l'impact de l'homme (piétinement, braconnage), des bioéroditeurs

(oursins, poissons perroquets) ou à l'envahissement du site par des algues filamenteuses.

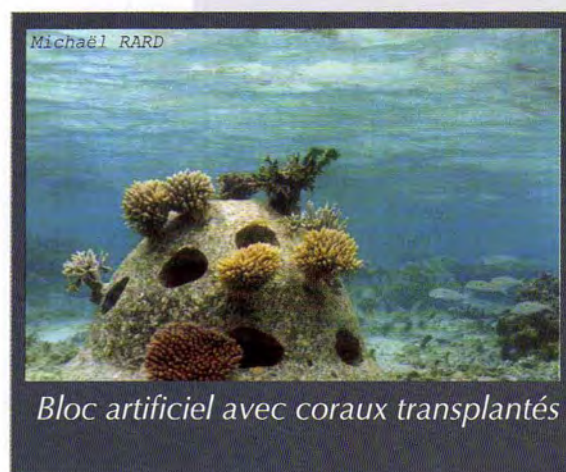
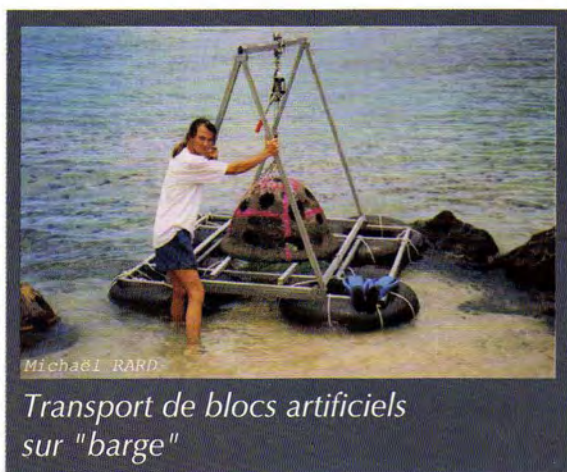
- Suivi de l'évolution des communautés récifales entre 1996 et 2000 : excellent taux de récupération de la couverture corallienne.

COUT :

8 100 € pour la totalité de l'opération

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

Chabanet et Naim (2000)



3.5 - RESTAURATION MIXTE D'UN RECIF DEGRADE PAR DES OPERATIONS D'EXTRACTION CORALLIENNE A BORA-BORA

ORIGINE DE L'OPERATION :

Extraction corallienne sur le platier récifal

LIEU :

Bora-Bora, pointe Matira, Polynésie Française

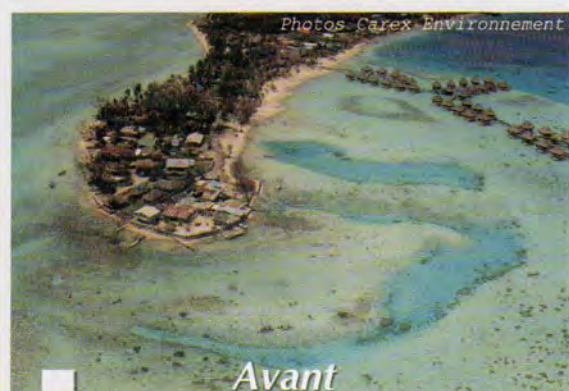
DEGATS :

Récifs détruits ou fortement nécrosés, érosion côtière accrue

TECHNIQUE UTILISEE : RESTAURATION MIXTE

RESTAURATION PHYSIQUE

1. Reprofilage des fonds : Comblement du chenal et des fosses d'extraction (pièges à sédiments), avec du sable provenant de la pente interne du lagon (dragage hydraulique) pour permettre le transit des sédiments vers le littoral.



2. Mise en place de blocs artificiels en béton :

Fonction de brise-lame des houles lagonaires (limite l'érosion du littoral). Les blocs artificiels ont été conçus pour simuler (forme, couleur, aspérités, cavités) de gros massifs coralliens naturels et pour conserver l'esthétique du site. Les blocs ont été disposés seuls ou en groupe de 2 ou 3 pour reconstituer des massifs dont l'agencement est le plus proche possible de celui observé dans le lagon non perturbé.

RESTAURATION BIOLOGIQUE

Création d'un **jardin corallien** : Fixation (collage) de transplants coralliens sur des blocs artificiels (fragments coralliens) et autour des blocs (colonies entières).

Les 22 espèces de coraux sélectionnées pour la transplantation :

- Ont été choisies en fonction des espèces recherchées pour le jardin corallien : différentes morphologies pour recréer un paysage naturel et diversifié ;
- Sont toutes potentiellement aptes à survivre à la transplantation et à vivre sur le jardin corallien ;
- Ont été collectées sur des sites similaires au jardin corallien (en termes de profondeur, exposition à la houle, turbidité, recouvrement corallien) faciles d'accès et proches, pour limiter le temps de transport ;
- Ont été transportés sous l'eau, dans des paniers.



Des opérations complémentaires ont été menées, consistant à mettre en place:

- Un **balisage** autour du jardin corallien pour prévenir d'éventuelles dégradations par des embarcations et visiteurs,
- Un **suivi scientifique biologique** pour un an, comprenant un relevé initial (identification et localisation de chaque transplant), des relevés trimestriels (taux de croissance, de mortalité, évolution du faciès récifal, colonisation des blocs artificiels par la faune et flore marines : échinodermes, algues, poissons), et un relevé terminal. Parallèlement, un ingénieur écologue a réalisé 3 missions techniques complémentaires afin de suivre l'évolution sédimentologique et géomorphologique des fonds et du littoral en rapport avec les problèmes d'érosion.

BILAN

- Stabilisation du trait de côte sur la zone restaurée.
- Faible taux de mortalité (3% sur l'ensemble des transplants).
- Taux de croissance des transplants élevé.
- Recrutement corallien naturel sur les blocs artificiels.
- Colonisation du jardin corallien par les poissons.



COUT :

- 627 000 € pour la restauration physique des fonds (comblement des fosses, réalisation d'épis, réensablement des plages, conception et pose de massifs en béton).
- 135 700 € pour la réalisation du jardin corallien (fabrication et pose de 6 massifs, recherche des sites donneurs et transplants, conception et réalisation du jardin et suivi scientifique sur un an), soit 18,75 € /m².

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Porcher *et al.* (2000)
Salvat *et al.* (2002)



L'écosystème corallien est très complexe. Chaque site, et les conditions écologiques qui y règnent, sont différentes. Chaque cas est particulier, il n'existe donc pas de méthode "universelle", tout comme

il est difficile voire impossible de reproduire exactement une opération de restauration viable sur des sites différents, même très proches.

4.1 - RECOMMANDATIONS GENERALES

- Une **étude préliminaire** spécifique (analyse de l'état initial) est requise pour chaque opération de restauration. Cette étude devra déterminer les caractéristiques du site à restaurer, au point de vue hydrodynamique, sédimentologique, biologique et écologique, afin d'optimiser la restauration. Elle doit impérativement être menée par des scientifiques, experts, ingénieurs en environnement récifal et travaux sous-marins. Pour plus de détails sur l'analyse de l'état initial, on se reportera au guide "Milieu littoral et récifal intertropical et aménagements". *Guide pratique. Méthodologie d'étude. Recommandations techniques. M. Porcher. Ministère de l'environnement français et de Polynésie française 1993.*

- Une **étude pilote** est également fortement recommandée pour tester la faisabilité de l'opération de restauration. L'étude pilote consiste à suivre le même protocole que celui choisi pour la restauration mais sur une surface ou un nombre d'échantillons réduit (exemple à Bora-Bora, Pointe Matira: Transplantation de colonies coralliennes et suivi de leur croissance sur 15 blocs artificiels, parmi les 50 devant être mis en place).

- Il est préférable de ne pas concentrer l'effort de restauration sur des sites où la **présence d'algues** est naturellement favorisée (apports de nutriments, forte turbidité, zones calmes...).

En effet, les algues sont les principales compétitrices des coraux; leur installation sur le site est plus rapide et leur développement limite alors le recrutement et la croissance des colonies coralliennes.

- Pour repeupler un récif en poissons herbivores, on peut agir sur les populations d'oursins : une **réduction de l'abondance en oursins** conduit initialement à une augmentation de la biomasse algale, d'où un retour des poissons herbivores sur le site (poissons perroquets, labres, poissons chirurgiens). Une fois les algues consommées, les coraux peuvent à nouveau s'installer sur le substrat récifal.



Prise de données sur un site à restaurer



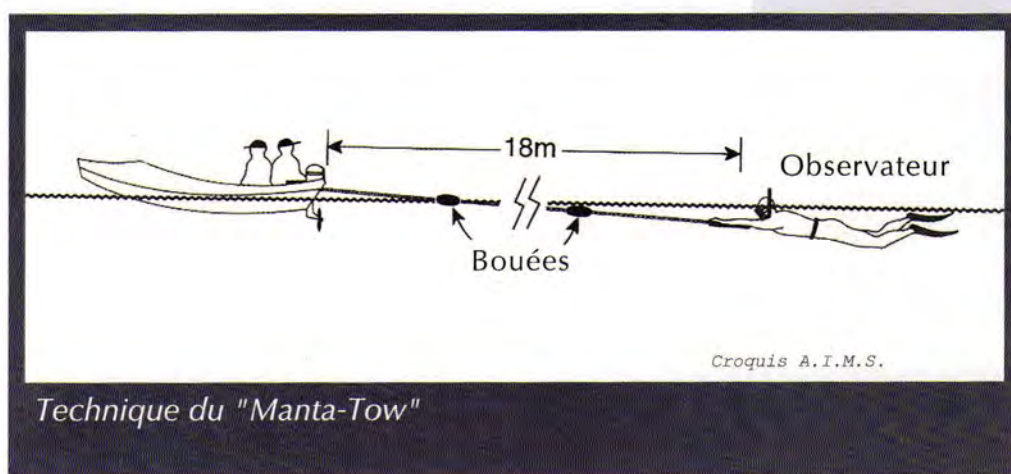
Site à fort recouvrement algal et densité d'oursins importante

• Un **suivi environnemental rigoureux** est nécessaire pour évaluer le succès d'une opération de restauration et éventuellement pouvoir la répéter ou l'améliorer. De nombreuses techniques peuvent être utilisées, comme le montre le tableau ci-dessous. Quelle que soit la méthode choisie, il est nécessaire :

(1) d'effectuer le suivi de façon annuelle, approximativement à la même époque, le plus **longtemps** possible (minimum 5-10 ans), (2) d'effectuer des **relevés complémentaires** en cas de perturbations naturelles majeures (cyclone, élévation anormale des températures...), (3) de **ne pas changer de méthode** au cours du temps afin d'obtenir des données qui soient comparables

Méthode	Observations	Avantages	Inconvénients
« Manta-tow » (sur des kilomètres)	% coraux vivants, morts, mous + comptages divers	- Permet l'étude de larges portions de récif en un temps réduit, sans fatigue - Ne requiert pas de matériel et de qualifications de plongée sous-marine	- Etude sur des portions de récif non appropriées (sable...) - Les animaux « cachés » ne sont pas recensés (espèces cryptiques) - Non appropriée dans des zones à visibilité réduite ($\leq 6m$)
« Line intercept » (sur 25 mètres)	% couverture corallienne, sable, rochers, algues... abondances relatives	- Peut être mené par des plongeurs peu expérimentés en identification - Requier peu d'équipement	- Objectifs limités aux questions concernant les abondances relatives des différents groupes - Non approprié pour évaluer les taux de croissance, recrutement ou mortalité
Quadrat permanent (sur quelques m ²)	Mesures de croissance, stress mortalité et recrutement	- Informations détaillées par photographies, cartographies : bonne estimation des variations temporelles - Bonne estimation des taux de croissance, stress mortalité et recrutement - Informations permanentes sur un site	- Méthode lente et fastidieuse - Méthode logistiquement lourde - Examen d'une petite portion du récif - Photographie : surface +/- plate
Recensement visuel des poissons récifaux (au dessus d'un couloir de 100 m ²)	Comptage de poissons récifaux dans un volume d'eau au dessus d'un couloir le long d'un transect	- Méthode rapide, non destructrice et non onéreuse - Peu de personnel nécessaire	- Observateurs expérimentés en identification de poissons - Comportement des poissons change avec la présence de plongeurs - Ne détecte pas des variations d'abondance chez les espèces rares

Description des méthodes d'étude des récifs coralliens (D'après " Survey Manual for Tropical Marine Resources " (1997) . S. English, C. Wilkinson et V. Backer).



4.2 - RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'UTILISATION DE RECIFS ARTIFICIELS

- Fonctions du récif artificiel :
 - Offre un substrat dur pour la colonisation d'invertébrés.
 - Sert de refuge pour les poissons et les invertébrés.
 - Modifie les courants et l'action des vagues.
 - Consolide les zones meubles (bloccaille, etc.).
 - Empêche certaines activités de pêche (par exemple l'utilisation des chaluts).
 - Attire les poissons.
 - Présente un intérêt touristique.
- A part quelques exemples de récifs artificiels à base de pneus, de plastique ou d'épaves, la plupart des récifs artificiels sont en **béton** ou sont des **blocs naturels** (rochers calcaires) ou encore **une combinaison des deux** (incorporation de débris de coraux morts dans le mélange béton). Les larves coralliennes semblent se fixer davantage sur des débris coralliens ou du béton que sur des surfaces en caoutchouc/plastique. Les avantages des premiers sont multiples : ils fournissent un substrat de composition similaire à celui qu'ils remplacent ; ils sont résistants et stables ; leur fabrication est économique et ils sont aisément maniables pour obtenir la forme désirée. Certains récifs artificiels sont créés par dépôt de $\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$ (électrolyse). Les coraux sont placés sur des plaques en acier, ou autres matériaux conducteurs et un courant direct (1-24 V) est appliqué. Le substrat est ainsi créé à partir de matériaux naturels et permet une fixation rapide des transplants. Les effets à long terme de ce type de formation n'ont pas encore été étudiés.



Blocs artificiels utilisés lors de la restauration biologique du site de Saint-Leu (La Réunion)

- La fondation « **Reef Ball™** » a mis au point un type de récif artificiel spécifiquement adapté à l'écosystème corallien. La structure correspond à une demie-sphère d'un mètre de diamètre, creuse, dont la superficie est percée de trous circulaires plus ou moins larges. Environ 500 000 «Reef- Ball™» ont été mis en place, dans près de 3 200 projets de restauration récifale. Ils constituent des supports adaptés à la transplantation corallienne.

- En général, les coraux durs préfèrent s'installer sur des surfaces **rugueuses, verticales** et souvent **protégées** d'un hydrodynamisme fort. Il existe bien entendu des exceptions selon les espèces.

- Il a été observé que les poissons colonisent en priorité les récifs de **couleurs sombres** (rouge foncé, noir).

- Le récif artificiel doit avoir un pH proche de la **neutralité** (pH=7). Un constructeur de récifs artificiels (Reef Ball™) recommande d'ajouter de la microsilice au béton pour neutraliser le pH.

- La **prédation** étant considérée comme un des facteurs structurant les communautés récifales, il apparaît nécessaire que les récifs artificiels comportent des zones où vertébrés et invertébrés puissent trouver refuge : trous, fissures, espaces vides, interstices...

- La **stabilité** des récifs artificiels est une considération essentielle, en particulier dans les régions soumises aux dépressions tropicales. La stabilité d'une structure artificielle peut être déterminée par des calculs hydrauliques précis effectués par un spécialiste.

- Il est préférable de **fixer les structures artificielles au substrat** pour éviter tout déplacement ou leur dégradation lors d'épisodes cycloniques. Plusieurs techniques existent (crayonnage, collage avec béton).

- Certaines structures sous-marines sont particulièrement efficaces pour favoriser ou accélérer le repeuplement en poissons récifaux :

- **Dispositifs de Concentration des Poissons (DCP)** : flotteurs qui offrent aux petits poissons abri et nourriture, dans le but d'attirer les gros poissons carnivores (thons, maquereaux ...).

- **Récifs artificiels à base de pneus** : Comme les DCP, ces récifs servent d'abri et de substrat pour attirer les petits poissons, leur permettre de croître et se multiplier.

- **L'esthétique** est un facteur à prendre en compte lorsque le site à restaurer présente un attrait touristique (paysage exceptionnel, activités de plongée sous-marine, apnée...). Le récif artificiel doit simuler un aspect naturel. Ce qui nécessite de composer entre différentes sciences: l'ingénierie, la biologie, l'écologie et l'art.

- Dans le cadre de la création d'un jardin corallien, l'aménagement des récifs artificiels doit reposer sur une bonne connaissance des paysages coralliens naturels adjacents afin de bien **l'intégrer** au contexte local.

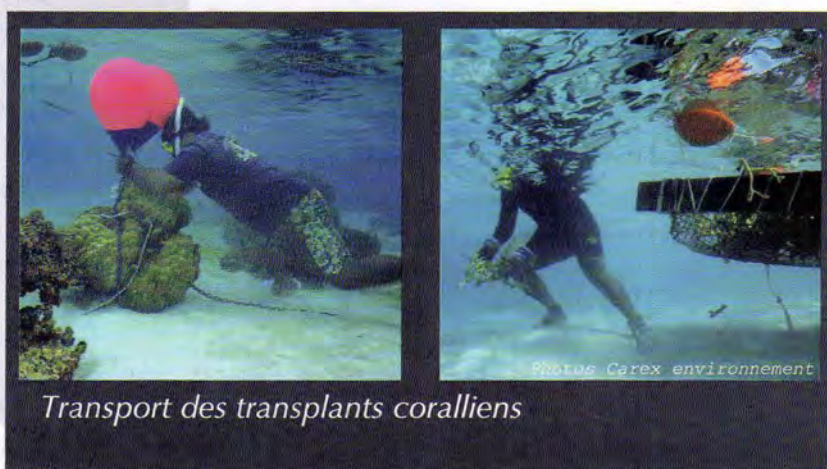


Photo Carex environnement

Exemple de jardin corallien à Bora Bora où l'esthétique a été un facteur déterminant dans le choix des techniques utilisées

4.3 - RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA TRANSPLANTATION CORALLIENNE

- Les coraux doivent être collectés dans un **habitat similaire** à celui où ils seront transplantés (hydrodynamisme, profondeur, turbidité).
- Le succès de la transplantation repose en grande partie sur le **choix de l'espèce** à transplanter. Seront préférentiellement sélectionnées celles qui étaient présentes **en abondance** dans l'écosystème avant sa détérioration. L'analyse de la structure de la communauté récifale avant la dégradation ou dans le proche environnement du site considéré est de ce fait cruciale. Certaines espèces sont plus adaptées que d'autres pour la transplantation. Les espèces ainsi choisies sont adéquates et ont en général un taux de survie et une capacité de colonisation du milieu élevés (taux de croissance rapide). Les formes **branchues tri-dimensionnelles** sont préférables aux colonies massives ou encroûtantes, plus à même d'être enfouies par les sédiments ou déplacées. Dans la zone Pacifique, les coraux **branchus** et **tabulaires** du genre *Acropora* sont recommandés pour leur croissance rapide à partir de fragments et leur capacité de survie. Les **alcyonnaires** (coraux mous) sont difficiles à déplacer sans être endommagés.
- La transplantation de colonies ou fragments de **taille modérée** (30-40 cm) est préférable à celles de colonies trop grandes ou de fragments de petite taille.
- Il est impératif de transporter les coraux du site donneur au site de transplantation **en immersion** continue pour minimiser le stress lié à la transplantation. De plus, les coraux ne doivent pas être en contact les uns avec les autres, ni avec le container.
- Transport par bateau : bacs d'eau de mer, à l'ombre, avec apport continu en eau.
- Transport sous-marin : à la main sur de faibles distances ; dans des containers tractés par bateau ; à l'aide de bouées gonflables ou de parachutes pour les grosses colonies ou pâtes coralliennes.
- Le site de transplantation devrait préférentiellement être choisi dans une zone où **l'hydrodynamisme est faible** pour éviter la perte des transplants par l'action des courants, vagues, ressac... Les coraux étant très sensibles à l'étouffement par les sédiments ou le sable, il faut éviter de les placer dans des zones **sableuses** (sauf si l'hydrodynamisme est assez faible pour que les sédiments/sable ne soient pas remis en suspension) ou fortement chargées en matières en suspension (estuaires...). D'une façon générale, la transplantation de coraux scléractiniaires est viable dans des sites caractérisés par une **faible turbidité et sédimentation**. Il est également recommandé de choisir un site de transplantation **adjacent** à des récifs naturels en bon état afin de profiter de la dispersion naturelle des recrues coralliennes, des larves d'autres invertébrés et de poissons.



Transport des transplants coralliens

- Les coraux peuvent être transplantés:

- Sur de petits supports : supports en PVC, portoirs amovibles, carreaux de terre cuite, carreaux en béton, bâtonnets de bambou croisés, clous plantés dans le substrat...

- Dans des trous effectués à la perceuse pneumatique.

- Sur des surfaces plus importantes : réseau de cordages, géotextiles, cadres...



Photo Carex environnement

Transplant corallien fixé sur un massif artificiel en béton (colle époxy)

- Les méthodes de fixation des transplants au substrat sont multiples. Ils sont soit collés avec des résines époxy, du ciment sous-marin type Portland, du plastique moultant ou du ciment marin époxy ; soit attachés avec du fil métallique en acier inoxydable, fil électrique gainé de plastique, câble ou nylon. Le **ciment** et les résines **époxy** semblent plus efficaces pour attacher les transplants au substrat que les clous et câbles.

Elles favorisent la fixation basale des fragments sur le substrat, évitent que les fragments ne soient en contact les uns avec les autres (avec les mouvements de l'eau) ainsi que l'abrasion de la base des fragments.

Si **clous** et **câbles** sont utilisés, il est recommandé de se servir de matériaux en **acier inoxydable** afin de minimiser la corrosion et d'augmenter la longévité des ouvrages mis en place. Quelle que soit la méthode choisie, le système d'attache doit être rapide, esthétique, et permanent.



Photo Reef Ball™

Fixation d'un transplant par vissage



Photo Reef Ball™

Récif artificiel "Reef Ball™" avec transplantation de coraux

- Le collage des transplants doit préférentiellement se faire par **temps calme** (clapotis inférieur à 0,15 m), la surface de collage être **préparée** (nettoyage et martelage de la zone de contact). Le choix et la disposition des transplants doivent être décidés par un scientifique ou expert en milieu récifal.

- Il est recommandé de **ne pas manipuler** les coraux durant les **mois les plus chauds** de l'année (taux de croissance réduit et risque de blanchissement mineur).

- Pour minimiser les effets de la collecte de coraux sur le site donneur, il est préférable d'effectuer les prélèvements sur une **zone large**.



Des opérations de restauration du milieu naturel sont réalisées en milieu terrestre depuis plusieurs dizaines d'années. L'expérience dans ce domaine est importante et les méthodologies pour la plupart très fiables.

En milieu récifal, bien que les premières opérations de restauration aient été réalisées il y a plusieurs décennies, le développement de cette activité est resté longtemps marginal et ce n'est que depuis quelques années, suite aux efforts de sensibilisation menés par les scientifiques auprès des décideurs que les opérations de restauration récifale ont commencé à se développer, principalement aux Etats-Unis (en Floride).

L'expérience est encore limitée, toutefois la majeure partie des opérations menées a mis en évidence la faisabilité de ce type d'intervention sur le milieu récifal. Au niveau biologique, les scientifiques savent aujourd'hui, en fonction des caractéristiques du site, optimiser les conditions de transplantation de coraux, et choisir les espèces offrant le minimum de risque de rejet. Globalement, les échecs en matière de restauration biologique sont réduits, et ce constat laisse présager un bel avenir pour ce moyen de restauration des zones dégradées.

Au niveau technique, la préparation des supports ou leur fabrication sont variées ainsi que les techniques de fixation des transplants. Le choix des moyens techniques à retenir sera fonction principalement des conditions de site et des objectifs de la restauration.

Dans les zones peu profondes nécessitant une optimisation de l'aspect paysager des fonds à restaurer, les moyens techniques sont au point, ils restent cependant relativement onéreux pour envisager d'être appliqués à de grandes étendues de récifs (plusieurs hectares par exemple).

Actuellement, on peut donc considérer que les moyens scientifiques et techniques sont disponibles et suffisamment fiables pour être mis en œuvre.

La restauration des écosystèmes récifaux nécessite toutefois une haute compétence scientifique et technique et demande la constitution d'une équipe de projet possédant

une bonne connaissance du milieu récifal et des travaux d'aménagement en milieu marin.

La réalisation d'une opération de restauration doit faire impérativement l'objet d'une étude de site détaillée (conditions biologiques, sédimentologiques, géomorphologiques et hydrodynamiques) et incluant les sites donneurs (ou les coraux seront prélevés pour être ensuite transplantés).

Les travaux doivent être réalisés par une équipe de spécialistes, et comprendre un suivi de l'évolution du site sur plusieurs années.

Moyennant le respect de la démarche décrite ci-dessus, la restauration récifale peut aujourd'hui être considérée comme applicable et les méthodes transférables. Elle n'appartient plus au domaine expérimental.

Enfin l'avenir de ce type de restauration nécessite de mener un travail de recherche appliquée afin d'optimiser la préparation et la fabrication des supports susceptibles de recevoir des transplants. De même, il apparaît utile d'améliorer les techniques de fixation des transplants (rapidité de pose), l'objectif étant de pouvoir diminuer le temps de réalisation d'une opération de restauration et en conséquence d'en réduire le coût. Enfin la technique de réensemencement d'un site récifal par des larves de coraux constitue une approche novatrice qu'il apparaît nécessaire de développer et dont les perspectives semblent prometteuses.

Cette optimisation de la mise en œuvre conduira alors à envisager à l'avenir des restaurations sur de grandes étendues (plusieurs hectares), avec une approche extensive, qui n'existe pas aujourd'hui.

Cette poursuite des travaux est absolument nécessaire à engager, en particulier pour favoriser les opérations de restauration récifale dans les pays en voie de développement où les moyens financiers sont limités et où malheureusement les zones à restaurer sont importantes sachant que l'objectif majeur dans ces régions concerne l'amélioration de la ressource vivrière.

Bouchon, C., Aubert, J. & Bouchon-Navaro, Y. (1981). Evolution of a semi-artificial reef built by transplanting coral heads. *Thetys*, 10(2):173-176

Bowden-Kerby, A (2001). Low-tech coral reef restoration methods modelled after natural fragmentation processes. *Bull. Mar. Sc.*, 69(2):915-931

Chabanet, P. & Naim, O. (2000). Restauration d'un platier récifal corallien par le biais de transplantations de coraux scléractiniaires branchus, isolés et/ou associés à leur faune ichtyologique, et de la pose de structures artificielles. *Programme National de Recherche « Recréer la nature » - RMATE, MNH, Paris*, pp. 16-30

Clark, S. & Edwards, A.J. (1994). Use of artificial reef structures to rehabilitate reef flats degraded by coral mining in the Maldives. *Bull. Mar. Sc.*, 55(2-3):724-744

Clark, S. & Edwards, A.J. (1995). Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldives Islands. *Coral Reefs*, 14:201-213

Clark, S. (1999). Rehabilitation of degraded reefs using artificial reef blocks (R4533). University of Newcastle on Tyne.

Fox, H.E. (2001). Pilot study suggests viable options for reef restoration in Komodo National Park. *Coral Reef*, 20:219-220

Harriott, V.J. & Fisk, D.A. (1988). Coral transplantation as a reef management option. *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp.*, 2:375-378

Harris, L.E. & Woodring (2001). Artificial reefs for submerged and subaerial habitat protection, mitigation and restoration. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute Conference* – November 2001

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 Int. Coral Reef Symp.*, 2:231-236

Hudson, J.H., Robbin, D.M., Tilmant, J.T. & Wheaton, J.L. (1989). Building a coral reef in southeast Florida: Combining technology and aesthetics. *Bull. Mar. Sc.*, 44:1067-1068

Kaly, U.L. (1995). Experimental test of the effects of method attachment and handling on the rapid transplantation of corals. *CRC Reef Research – Technical Report*. James Cook University, Townsville, Australia.

Laydoo, R.S. (1996). Coral transplantation in reef management at Buccoo Reef, south-west Tobago. *Carib. Mar. Stud.*, 5:67-77

Maragos, J.E. (1974). Coral transplantation : a method to create, preserve and manage coral reefs. SeaGrant Advisory Report UNIHI-SEAGRANT-AR-74-03 CORMAR-14

Miller, M. W. & Barimo, J. (2001). Assessment of juvenile coral populations at two reef restoration sites in the Florida keys national marine sanctuary : indicators of success ?. *Bull. Mar. Sc.* 69(2) : 395-405

Mueller, E.L. (1988). Managing interreefal environments and resources by artificial constructions. *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp.*, 2:387-391

Munoz-Chagin, R.F. (1997). Coral transplantation program in the Paraiso coral reef, Cozumel Island, Mexico. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, 2:2075-2078

Porcher, M., Salvat, B., Morancy, R., Chancerelle, Y. & Schrimm, M. (2000). Creation of a coral garden to restore a damaged reef site (Bora-Bora, French Polynesia). *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.*, in press.

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 à Bora Bora, Polynésie française. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, supplément 9 : 81-96

Spieler, R.E., Gilliam, D.S. & Sherman, R.L. (2001). Artificial substrate and coral reef restoration: what do we need to know to know what we need. *Bull. Mar. Sci.*, 69(2):1013-1030.

D'après "International Conference on Scientific Aspects of Coral Reef Assessment, Monitoring, and Restoration, Fort Lauderdale, Florida – April 14-16, 1999.

Amos, M. & Purcell, S.W. Caging strategies for reef based grow-out of *Trochus nicoticus* (Gastropoda) in Vanuatu.

Banks, B., Dodge, R.E., Fisher, L.E., Stout, D. & Jaap, W.C. Grounding of the nuclear submarine, *USS Memphis*, on a southeast Florida coral reef: impact assessment and proposed restoration.

Barneah, O. & Benayahu, Y. Soft coral transplantation as a means for reef rehabilitation.

Blair, S.M. & Flynn, B.S. Habitat restoration on intermittently impacted hardground reef.

Bruckner, R.J. & Bruckner, A.W. Survivorship of restored *Acropora palmata* fragments secured using wire after a ship grounding in Puerto Rico.

Dodge, R.E., Anderegg, D., Fergen, R. & Cooke, P. Coral transplantation following repair of outfall.

Eakin, C.M. A test of post-bleaching recovery using coral fragments as seedlings.

Fox, H.E., Pet, J., Dahuri, R. & Caldwell, R.L. Coral reef restoration after blast fishing in Indonesia.

Garrison, G. Transplanting « at-risk » coral fragments in Virgin Islands National Park.

Gilliam, D.S., Dodge, R.E., Thornton, S.L., Jaap, W. & Wheaton, J.L. Scleractinian coral reattachment success and recruitment on a shallow water ship grounding site in southeast Florida.

Gil-Navia, M.F., Sanchez, J.A. & Alvarado, E. Transplantation of reef-building corals on the Rosario Archipelago, Colombian Caribbean.

Goldberg, W.M. & Caballero, A. Reef damage by large vessel impact and its mitigation by site cleanup.

Heeger, T., Sotto, F., Gatus, J. & Langevoord, M. Community-based coral farming: Economically viable reef rehabilitation and livelihood option for fisherfolk.

Hudson, J.H. & Halley, R.B. Oldest living star coral ? Growth history and restoration of a giant *Montastrea faveolata* in the Florida Keys National Marine Sanctuary.

Hudson, J.H. & Spadoni, R.H. Injury assessment and restoration of the R/V *Columbus Iselin* grounding site : Looe Key reef, Florida.

Jaap, W.C., Morelock, J., Austin, T. & Bush, P. Reef restoration and monitoring: Soto's reef, George Town, Cayman Island, B.W.I.

McClanahan, T.R. Sea urchin reduction as a restoration technique in a new marine park.

Raymundo, L.J. & Maypa, A.P. Using cultured coral to rehabilitate a degraded reef in the Central Philippines.

Schmahl, G.P. Analysis of the coral reef restoration for the grounding of the contship *Houston*, Florida Keys.

Visram, S., Tamelander, J., Kilonzo, J. & Obura, D. Prospects for coral recovery through transplantation and natural recruitment, Kenya.

ANNEXES - EXEMPLES DE RESTAURATIONS RECIFALES

Auteur et année	Lieu d'étude	Origine du projet	Méthode utilisée
Chabanet, P. & Naim, O. (2000)	La Réunion	Destruction des habitats récifaux par le cyclone Firinga (1989)	Restauration mixte : Restauration physique : Mise en place de structures artificielles Restauration biologique : Transplantation de coraux branchus, <i>Acropora formosa</i> , et introduction de larves de <i>Dascyllus aruanus</i> (poissons demoiselles) cultivées en bassin, sur les transplants coralliens
Porcher, M. & al. (2000) Salvat, B. et al (2002)	Bora-Bora	- Erosion du littoral - Tourisme	Restauration mixte : Restauration physique : • Ré-ensablement des fosses • Re-profilage du littoral • Mise en place de massifs artificiels Restauration biologique : Transplants coralliens sur les récifs artificiels (création d'un jardin corallien)
Barneah O. & Benayahu, Y. (1999)	Mer Rouge	Réhabilitation d'un récif à faible recouvrement naturel	Restauration biologique : Transplantation de coraux mous (attachement naturel)
Bouchon C. & al. (1981)	Mer Rouge (Jordanie)	Construction d'un récif semi-artificiel dans une région sableuse	Restauration biologique : Transplantation de massifs coralliens entiers
Hudson, J.H. & al. (1989)	Floride	Réhabilitation de récifs à faible recouvrement naturel ou endommagés par l'échouage de navires	Restauration mixte : Restauration physique : Mise en place de blocs artificiels Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens sur les blocs artificiels
Bruckner, R.J. & Bruckner, A.W. (1999)	Porto Rico	Echouage du navire Fortuna Reefer	Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens sur le substrat récifal ou aux squelettes coralliens en place (câble inox)
Schmahl, G.P. (1999)	Florida Keys	Echouage du navire Contship Houston	Restauration mixte : Restauration physique : Stabilisation du substrat et mise en place de blocs artificiels Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens au substrat récifal et blocs artificiels
Gilliam, D.S. & al. (1999)	Floride	Echouage du navire Hind	Restauration biologique : Ré-attachement des fragments coralliens cassés au substrat récifal
Jaap, W.C. & al. (1999)	Iles Grand Caïman (UK West Indies)	Echouage du navire Maasdam	Restauration mixte : Restauration physique : • Récupération des coraux encore viables • Nettoyage du site (bocailles...) • Re-profilage des fonds Restauration biologique : Transplantation des coraux viables sur le substrat restauré (ciment époxy)
Banks, B. & al. (1999)	Floride	Echouage du sous marin nucléaire Memphis	Restauration mixte : Restauration physique : • Nettoyage du site (bocailles, débris...) • Stabilisation des flancs récifaux • Mise en place de 6 différents types de modules de récif artificiel Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens sur substrat naturel nu et récifs artificiels
Goldberg, W.M. & Caballero, A. (1999)	Saint Martin Antilles Néerlandaises	Echouage du navire Horizon	Restauration physique : Nettoyage du site
Hudson, J.H. et Diaz, R. (1988)	Floride	Echouage du navire Wellwood	Restauration mixte : Restauration physique : Stabilisation du substrat et reconstitution de la topographie récifale Restauration biologique : Transplantation de fragments de coraux mous et durs sur le substrat restauré
Hudson, J.H. & Spadoni, R.H. (1999)	Florida Keys	Echouage du navire Columbus Iselin	Restauration mixte : Restauration physique : Reconstitution des éperons et mise en place de blocs artificiels Restauration biologique : Transplantation de coraux durs et mous sur les blocs artificiels

Auteur et année	Lieu d'étude	Origine du projet	Méthode utilisée
Hudson, J.H. & Halley, R.B. (1999)	Florida Keys	Collision d'un navire avec une colonie massive <i>Montastrea faveolata</i>	Restauration mixte : Restauration physique : renforcement de la partie injurée de la colonie (tiges Inox et ciment) Restauration biologique : implantation de morceaux de tissu vivant sur la partie injurée de la colonie
Visram, S. & al. (1999)	Kenya	Blanchissement	Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens sur substrat naturel et portoirs amovibles (ciment époxy)
Gil-Navia, M.F. & al. (1999)	Caraïbes colombienne	Zone dégradée par des opérations de dragage, pêche à la dynamite et tourisme	Restauration biologique : Transplantation de colonies entières du site dégradé vers un site protégé
Clark, S. (1999)	Maldives	Exploitation de matériaux coralliens	Restauration physique : Mise en place de structures artificielles pour le recrutement naturel des coraux
Heeger, T. et al. (1999)	Philippines	Surexploitation des ressources récifales et pêche à l'explosif	Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens cultivés en ferme corallienne
Fox, H.E. et al. (1999) Fox, H.E. (2001)	Indonésie	Dégâts liés à la pêche à l'explosif	Restauration physique : Mise en place de structures artificielles pour le recrutement naturel des coraux
McClanahan, T.R. (1999)	Kenya	Surexploitation des ressources récifales	Restauration biologique : Réduction de la population d'oursins
Mueller, E.L. (1988)	Papouasie Nouvelle Guinée	Surexploitation des ressources récifales et collecte intensive	Restauration physique : Mise en place de : • Dispositifs de concentration des poissons • Cages flottantes • Récifs artificiels à base de pneus • Pièges à poissons
Bowden-Kerby, A (1999)	Iles du Pacifique	Collecte de coraux pour bijoux, ornements, production de chaux	Restauration biologique : Collecte de fragments coralliens dans des zones «à risque» (exposées) et transplantation dans des zones dégradées ou non favorables au recrutement par reproduction sexuée
The Mauritius Marine Conservation Society (1998)	Ile Maurice	Perturbations naturelles et anthropiques variées	Restauration physique : Immersion de vieux navires désaffectés et de pneus comme récifs artificiels pour le recrutement naturel des coraux
Yap, H.T. et al. (1999)	Philippines	Perturbations naturelles et anthropiques variées	Restauration biologique : Transplantation de fragments coralliens et de bénitiers
Raymundo, L.J. & Maypa, A.P. (1999)	Philippines centrales	Perturbations naturelles et anthropiques variées	Restauration biologique : Transplantation de larves coralliennes cultivées en aquarium
Dodge, R.E. et al. (1999)	Floride	Sauvegarde des coraux fixés à un émissaire endommagé par un cyclone	Restauration biologique : Collection des colonies fixées sur l'émissaire et transplantation des colonies sur des carreaux en béton
Blair, S.M. & Flynn, B.S. (1999)	Floride	Destruction des habitats par dragage (projet de restauration de plage)	Restauration physique : Mise en place de 4 différents types de modules de récif artificiel pour le recrutement naturel de la faune et flore récifale
Munoz-Chagin, R.F. (1997)	Mexique	Construction d'une jetée	Restauration mixte : Restauration physique : Mise en place de structures artificielles en ciment Restauration biologique : Déplacement du benthos (coraux, éponges...) de la zone de construction vers des habitats similaires et transplantation sur des structures artificielles (ciment époxy)
Harris, L.E. & Woodring, M.P. (2001)	Turks et Caicos Islands	Erosion côtière	Restauration mixte: Restauration physique : Mise en place de structures artificielles (« Reef Ball ») Restauration biologique : Transplantation de coraux sur structures (ciment époxy)

Experts en restauration récifale

M. PORCHER Michel : m.porcher@carexenvironnement.com
M. MORANCY Richard : r.morancy@carexenvironnement.com
Melle JOB Sandrine : s.job@carexenvironnement.com
M. SALVAT Bernard : bsalvat@univ-perp.fr
Melle SCHRIMM Muriel : schrimm@univ-perp.fr
Mme NAIM Odile : naim@univ-reunion.fr
M. HARRIS Lee : lharris@fit.edu
Mme FOX : hfox@socrates.berkeley.edu
M. BOWDEN-KERBY : bowdenkerby@is.com.fj

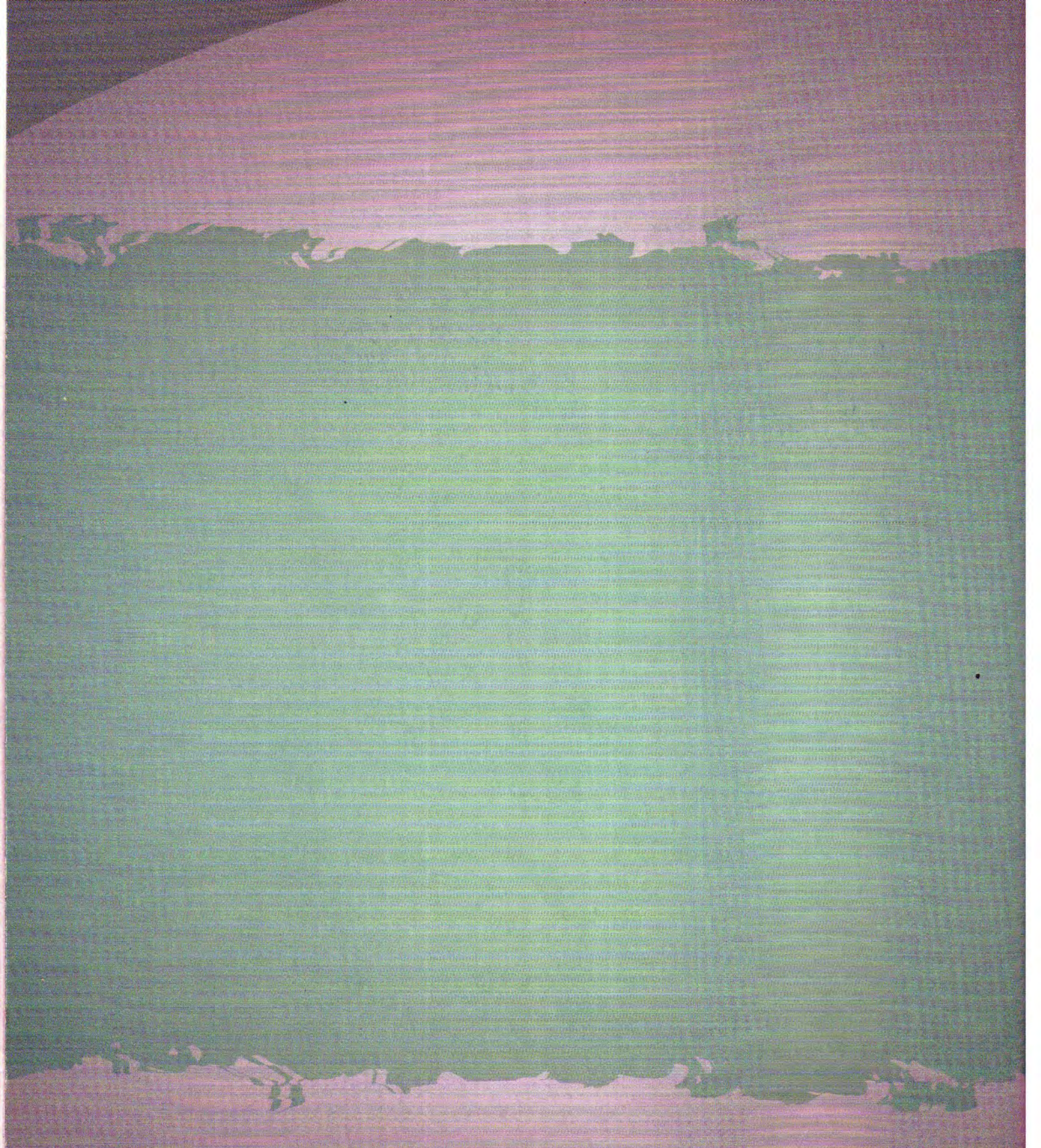
Sites à consulter :

Exemples de restaurations récifales :

National Coral Reef Institute : www.nova.edu/ocean/ncri
National Oceanic & Atmospheric Administration: www.noaa.gov

Création et fabrication de récifs artificiels :

Reef Ball Foundation : www.reefball.org
EcoReef: www.ecoreefs.com/index.shtml



**Responsable technique
et scientifique :** Michel PORCHER - Directeur de Carex Environnement

Auteurs : Sandrine JOB, Muriel SCHRIMM, Richard MORANCY - Carex Environnement

Infographistes : Sébastien GUIRONNET, Patricia GUEYRARD - Carex Environnement

Remerciements : Bernard SALVAT - E.P.H.E.

LA RESTAURATION RECIFALE

Guide pratique à l'usage des décideurs et aménageurs



ETUDES D'AMÉNAGEMENTS, INGÉNIERIE DE L'ENVIRONNEMENT
Rés. Les Collines de Cuques
Bât B3 Avenue de l'Armée d'Afrique
13100 AIX EN PROVENCE
tel : 04 42 93 95 98
fax : 04 42 93 95 97

www.carexenvironnement.fr
Carex environnement est
une société du groupe Ginger

