



UPVD
Université de Perpignan Via Domitia

**ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFERENTES METHODOLOGIES
DE RESTAURATION DES RECIFS CORALLIENS DEGRADES.**



RAPPORT DE STAGE

Sous la direction de Mr

Line VAN BEVER

MASTER 1^{ère} année

Environnement Méditerranéen & Développement Durable

Mention professionnelle

"Environnement et Développement Durable"

Option Géosciences marines appliquées

SOMMAIRE

Avant-propos	1
1 INTRODUCTION.....	1
2 Contexte général.....	2
2.1.1 Généralités sur les récifs coralliens.....	2
2.1.2 Principales causes de dégradation.....	3
2.1.3 Les mesures de protection et de réhabilitation/restauration.....	5
2.2 Objectifs de l'étude.....	6
3 METHODOLOGIE.....	24
3.1 Principales techniques de restauration.....	24
3.1.1 Transplantation de colonies coralliennes.....	24
3.1.2 Immersion de récifs artificiels.....	25
3.1.3 Construction récifale électrochimique (Biorock).....	25
3.2 Analyse comparative des techniques.....	26
4 RESULTATS.....	28
5 DISCUSSION.....	29
5.1 Bilan des comparaisons entre les techniques de restauration.....	29
5.2 Limites et perspectives d'amélioration des projets de restauration récifale.....	30
6 CONCLUSION.....	33
7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	35
ANNEXES.....	40
Résumé.....	45

ILLUSTRATIONS

Figure 1: Schéma d'un fragment d'Acropora fixé par un clou et des serre-câbles.....	9
Figure 2: Schéma de « guirlandes coralliennes » agencées en quadrillage.....	10
Figure 3: Bloc de béton utilisé pour la restauration à Bora Bora.....	12
Figure 4: Mise en place de ReefBall®.....	13
Figure 5 A. Moulage du ciment pour la transplantation sur les prises. 5B fixation.....	14
Figure 6 A: Mise en place d'une structure d'Armorflex® 6B d' Ecoreef.....	14
Figure 7: Schéma du dispositif ERCON.....	16
Figure 8 : Illustration d'un récif artificiel électrochimique Biorock.....	20
Figure 9 : A. structure Biorock™ en Avril 1997 sur laquelle des coraux viennent d'être transplantés. 9B. même structure qu'en A mais en Novembre 2001.....	21

Avant-propos

Une mission de quatre mois réalisée à Ko Samui (Thaïlande) au sein de l'association Biorock m'a permis de découvrir et participer au projet de restauration des récifs coralliens. Ce projet consistait en la mise en place de récif artificiel électrochimique sur quatre zones d'études autour de l'île de Ko Samui. L'objet de mon stage a été de contribuer activement à la mise en place de ce nouveau projet de restauration qui répond au concept de développement durable, notamment par l'installation d'un équipement solaire apportant l'énergie nécessaire à l'alimentation du récif artificiel électrochimique.

Ce rapport présente trois techniques de restauration ainsi que leur comparaison permettant de juger de leur efficacité respective, et ainsi déterminer la technique la mieux appropriée en fonction du contexte.

1 INTRODUCTION

Depuis quelques décennies on constate une sérieuse dégradation des récifs coralliens. A l'origine de ces problèmes, on peut trouver des causes naturelles comme les cyclones, les brusques augmentations de température ou bien des causes anthropiques comme l'augmentation de la fréquentation des littoraux et donc de l'urbanisation croissante des zones côtières.

Les récifs coralliens étant le siège d'une biodiversité exceptionnelle, leur disparition progressive entraîne inéluctablement une diminution des richesses de ces milieux.

Pour répondre à cette problématique, de nombreuses recherches se sont multipliées en vue de restaurer les récifs dégradés.

Les premiers travaux réalisés par des chercheurs dans ce domaine concernaient la transplantation de coraux (Maragos 1974), (Alcala & Gomez, 1979 ; Alcala et

al. 1989). Leur objectif était de transplanter des coraux vivants sur des zones où ils étaient cassés ou morts à la suite d'une perturbation.

Des travaux ont ensuite été étendus à des restaurations proprement dites au niveau d'importantes zones dégradées.

2 Contexte général

2.1.1 Généralités sur les récifs coralliens

Les milieux récifaux sont des écosystèmes marins complexes et variés. Ils fournissent la nourriture et servent d'habitat à d'autres espèces, ils soutiennent l'industrie touristique, alimentent les plages en sable, et agissent comme barrières naturelles à l'érosion côtière en réduisant l'énergie des vagues.

Ils constituent un environnement opportun et favorable aux activités reproductrices et à la colonisation du milieu par les poissons, en offrant abri et protection contre les prédateurs.

Une structure récifale complexe et en bonne santé optimisera la variété et le nombre de sites propices à une reproduction réussie (Eckert, 1987 ; (Medley 1983) (Lewis 1987) et contribuera à développer la qualité de l'écosystème concerné.

Cependant, depuis quelques années, scientifiques et gestionnaires constatent et se préoccupent du nombre croissant de facteurs de stress dus aux activités humaines qui contribuent au déclin des récifs mondiaux (Brown 1987) Salvat, 1987; Wilkinson, 1996; Bryant et al., 1998; (Hodgson 1999).

Si on estime à 10% la surface des récifs irrémédiablement détruits, on peut prédire que 20 à 30% supplémentaires subiront le même sort dans les 20 à 30

années à venir, essentiellement dans le Sud-Est asiatique et dans les Caraïbes, si rien ne change (Salvat *et al.* 2002).

Une étude a été menée en 1998 sur les menaces anthropiques potentielles (développement côtier, surexploitation et pratiques de pêche destructrices, pollution terrestre, érosion et pollution marine) auxquels sont exposés les récifs coralliens. Il en découle que les colonies qui ont déjà été exposées à des perturbations humaines durables font souvent preuve d'une faible aptitude à la récupération (Brown 1997),(Kay A., Grigg R.W. and S.J.Dollar 1994).

Nous allons donc étudier les différentes stratégies de restauration des récifs en les comparant sur la base de certains paramètres indispensables à leur mise en place. Un tableau regroupera et présentera ces différentes méthodes.

2.1.2 Principales causes de dégradation

Depuis la formation des premiers récifs, des perturbations diverses n'ont cessé de les affecter. Avant l'influence de l'espèce humaine, les impacts naturels tels que les fortes pluies, les variations de température ou les expositions aux rayons ultraviolets ont eu des répercussions négatives sur les coraux.

Cependant, ces répercussions n'ont jamais autant affecté les récifs que les perturbations anthropiques qui viennent s'y ajouter.

En plus des perturbations naturelles, tempêtes, augmentation de la température de l'eau, maladies, invasion d'acanthaster, tempêtes, effet d'el Nino, les récifs coralliens ont vu au cours des dernières décennies une augmentation des pressions anthropiques liée aux travaux d'aménagement du littoral (dragage, construction de jetées...) avec les rejets polluants (rejets urbains, usines, tourisme), les techniques de pêche destructives et la surexploitation des

ressources marines, l'échouage des bateaux sur les récifs, les dommages causés par l'ancrage des bateaux, minage des coraux, l'enrichissement des eaux côtières en nutriments favorisant les algues au détriment des coraux, la sédimentation terrigène par suite d'une mauvaise gestion des terres des bassins versants, l'urbanisation croissante et le développement côtier avec la création et l'entretien des voies de circulation, les pollutions en tous genres, la dégradation de la qualité de l'eau, les remblaiements d'atteintes directes.(Kay A. 1994), (Salvat *et al.* 2002).

C'est dans les années 70 que les scientifiques ont commencé à se préoccuper du déclin à grande échelle des récifs autour du monde.

Les opérations de restauration sont essentiellement menées dans l'ensemble de la zone intertropicale où les récifs coralliens peuvent se développer de façon optimale. (Océan Pacifique, Mer des Caraïbes, Mer Rouge, Océan Indien, Australie, Amérique centrale et du nord).(voir figure en Annexe).

Lorsque le récif est soumis à une perturbation, celui-ci passe par une phase de recouvrement pour revenir à son état initial. Cette phase dépend de l'intensité et de l'impact de la perturbation, parfois après une sévère perturbation de la structure même du récif, des siècles peuvent être nécessaires pour recouvrir un récif en bonne santé, ce qui à l'échelle humaine, est considérable. De plus les perturbations humaines s'enchaînent à une fréquence bien supérieure au temps de recouvrement nécessaire pour les récifs. Dans le fonctionnement physiologique de ces espèces on constate que l'accrétion corallienne est désormais dépassée par le taux de destruction induit par l'homme.

Dans l'optique d'inverser la tendance, les chercheurs tentent de remédier à ces perturbations grâce à la mise en place d'études et de projets de restauration.

Ceci dans le but de redonner un habitat aux poissons et de rétablir l'équilibre d'un récif en bonne santé.

Tout au long de cette étude le terme de restauration sera utilisé pour englober les termes généraux suivants : restauration, réhabilitation et création de récifs coralliens. La restauration consiste à retourner du mieux possible à l'état initial d'un écosystème dégradé, (Edwards, 1998). Nous présenterons donc les techniques de restauration actuellement disponibles utilisées par les scientifiques et comparerons leur efficacité et divers coûts respectifs.

2.1.3 Les mesures de protection et de réhabilitation/restauration

Au-delà de la suppression des causes de dégradations, la restauration de sites coralliens consiste en une intervention humaine directe qui vise à établir les conditions nécessaires à la vie récifale et à favoriser cette reprise (Salvat *et al.* 2002).

Précisons que la restauration d'un écosystème consiste à l'aider à retrouver, les conditions initiales représentant la meilleure configuration possible (Edwards et Clark 1998).

Avant d'appliquer un programme de restauration, il conviendra d'évaluer l'état de santé du récif et son degré de dégradation par des échantillonnages biologiques répétés, c'est ainsi qu'on identifie la source de stress/dégradation.

En effet, la source du stress peut encore être effective et entretenir le processus de détérioration du récif ou bien ce dernier peut être stoppé.

Avant toute sélection de méthode de restauration, il est donc primordial de considérer l'état du récif, les causes de dégradation, les objectifs à atteindre, et les conditions environnementales présentes. Tous ces facteurs influent significativement sur les conséquences que peuvent entraîner une méthode de restauration. Il est aussi indispensable de pouvoir prédire les futures conditions

environnementales et limiter ainsi l'arrivée d'événements inattendus et donc plus difficilement maîtrisables.

Une variété de techniques a été explorée jusqu'à présent incluant des actions directes et indirectes, la restauration des récifs ou la transplantation et l'installation de récifs artificiels.

Ces techniques permettent le retour des coraux ainsi que la faune associée. Le recours à la transplantation et la mise en place de récifs artificiels peut éventuellement favoriser le recrutement naturel.

Les techniques de restauration peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison.

Le choix du matériel du substrat est à prendre en considération.

2.2 Objectifs de l'étude

Comparaison de 3 principales techniques de restauration :

Un des aspects majeurs de la restauration tient compte de la complexité de la topographie et de la nature du substrat, car ces facteurs affectent le recrutement des coraux.

(i) transplantation de colonies coralliennes.

Après avoir étudié le fonctionnement de l'écosystème récifal et du réseau d'interactions entre les différentes espèces qui le constituent, on peut appliquer la technique de transplantation : c'est une méthode biologique qui consiste en l'implantation ou la refixation de fragments ou colonies coralliennes cassés.

Les espèces transplantées peuvent être issues du milieu naturel (site non dégradé) ou de cultures (aquarium, fermes).

En milieu naturel, il est possible de choisir entre transplanter des fragments de colonies adultes de grande ou de petite taille ou des colonies adultes entières ou encore des recrues et des juvéniles.

Précisons que le recours à l'ensemencement d'un substrat au moyen de fragments de coraux ou larves préalablement cultivés *in vitro* puis libérées, est parfois envisageable. (Heyward et Smith, 2002)

La transplantation de coraux en milieu naturel est utilisée dans le cadre de la restauration des récifs coralliens dégradés suite à des perturbations d'origine naturelle telles que cyclones (Hudson et Goodwin. 1997), maladies, élévation anormale de la température, augmentation de la pression de prédation, blanchissement ; mais aussi d'origine anthropique comme la pêche à l'explosif (Auberson 1982), pollutions, échouage de bateaux (Hudson et Goodwin. 1997),(Hudson et Diaz, 1988 ;Bruckner et Bruckner, 2001) extraction de roches et de sables coralliens (Clark et Edwards 1995) ; Salvat et al., 2002) et constructions côtières (Plucer-Rosario et Randall 1987 ; Munoz-Chagin et Cruz-Aguero 1993).

Selon les types de transplants et types de supports utilisés, récif artificiel ou substrat naturel, les techniques de transplantation varient (E. Bautz, 2005).

Communément pour prélever des colonies adultes entières de corail et les utiliser comme transplants, on les déloge du substrat auquel elles sont fixées, à l'aide d'un marteau et d'un burin (Hudson et Diaz, 1988 ; Clark et Edwards, 1995 ; Clark, 1997 ; Muñoz-Chagin, 1997 ; Yap et al., 1998 ; (Ammar *et al.* 2000) ; Thorton et al. 2000 ;(Petersen *et al.* 2004)(Figure 1).

Toutefois, des hachettes (Bak *et al.* 1981) et pinces (Auberson 1982) sont aussi utilisées pour détacher les colonies coralliennes du substrat.

Les outils utilisés sont à adapter selon la forme de la colonie : branchue, massive, foliacée, tabulaire, encroûtante ou digitée. Cela permet de minimiser les dégâts sur le récif en se concentrant sur les espèces sélectionnées pour la collecte et en créant ainsi le moins de dommages possibles aux colonies environnantes non sélectionnées pour la transplantation (E. Bautz, 2005).

Il arrive souvent que des colonies entières ou des fragments de coraux soient arrachées à leur substrat lorsqu'adviennent des perturbations climatiques importantes : cyclone, ouragan... Le ramassage de ces restes posés sur le fond marin constitue un moyen naturel de préserver les coraux non touchés et d'utiliser judicieusement les reliquats pour la transplantation (Figures 1, 2 ; Annexes).

La fixation des larves de coraux requiert un substrat spécifique et certaines conditions environnementales (Petersen et Tollrian. 2001)

Les surfaces qui ont une complexité et une rugosité spatiale importante sont plus appropriées pour le recrutement et la survie des recrues dont le recouvrement corallien en dépend.

En effet, en privilégiant des topographies complexes, on observe une corrélation positive entre la diversité et l'abondance des poissons des récifs, (Spieler *et al.* 2001), les coraux, alcyonaires et éponges offrent abri et ressources alimentaires pour les poissons récifaux. De plus, on sait que la présence de poissons herbivores diminue la couverture algale au bénéfice du recouvrement corallien.

Transplantation de colonie corallienne

Cette technique consiste à refixer des fragments ou colonies sur des squelettes coralliens (Yap *et al.* 1998). Ils sont issus de cultures (mariculture) ou débris délogés ou cassés.

Les différents types de fixation : adhésifs, clous

On utilise l'adhésif lorsque le substrat est dur tel que les roches (Auberson, 1982 ; (Kaly 1995) ; Hudson et Goodwin, 1997).

D'autres chercheurs déposent une boulette d'adhésif sur la partie du transplant en contact avec le substrat ce qui permet de le fixer sans percer le substrat au préalable (Tamelander *et al.* 2002) ; Naim *et al.*, 2001).

Le transplant peut être attaché à un clou planté dans le substrat (Bruckner et Bruckner, 2001) ou bien par un ou 2 serre-câbles (Kaly 1995); Okubo *et al.*, 2005) (Figure 1).

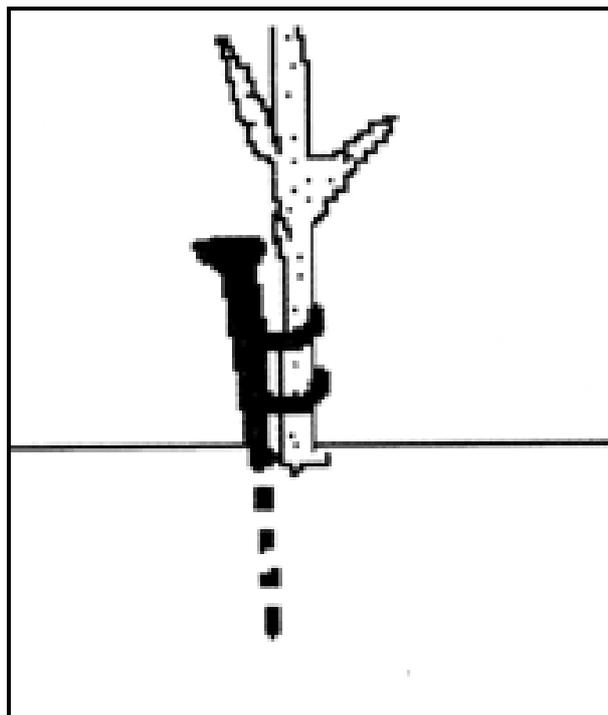


Figure 1: Schéma d'un fragment d'Acropora fixé par un clou et des serre-câbles. (d'après Okubo 2004)

Transplantation à faible coût

Il existe des méthodes moins courantes n'utilisant pas d'adhésif et pouvant être réalisées sans l'intervention de plongeurs.

Des assemblages de branches coralliennes sont effectués à l'aide d'une ficelle de nylon à laquelle on attache les coraux par des serre-câbles plus ou moins longs.

Ces guirlandes sont déposées sur le fond légèrement maintenues par des pierres (Lindahl 1998) ou fixées à un rail métallique enfoncé dans le substrat (Bowden-Kerby 2001), elles sont ensuite disposées de manière parallèle ou en quadrillage superposé l'une sur l'autre (**Figure 2**).

A la différence de Lindhal (1998), (Guzman *et al.* 1991) a lui aussi attaché les fragments coralliens à des rails métalliques mais par du fil de fer.

On notera que les coraux branchus (genre : *Acropora*) sont préférentiellement utilisés pour ces techniques.



Figure 2: Schéma de « guirlandes coralliennes » agencées en quadrillage.
(d'après Lindahl, 2003)

(ii) Immersion de récifs artificiels,

Lorsqu'on observe une modification structurelle du récif, le substrat doit être stabilisé en appliquant une méthode physique car dans certaines situations la restauration des récifs par des méthodes biologiques telle que la transplantation n'est pas réalisable.

Il convient en effet de stabiliser le substrat avant de réaliser toute transplantation, puis enfin s'assurer de la présence initiale de recrues, avant la réparation de récifs naturels ou l'installation de récifs artificiels.

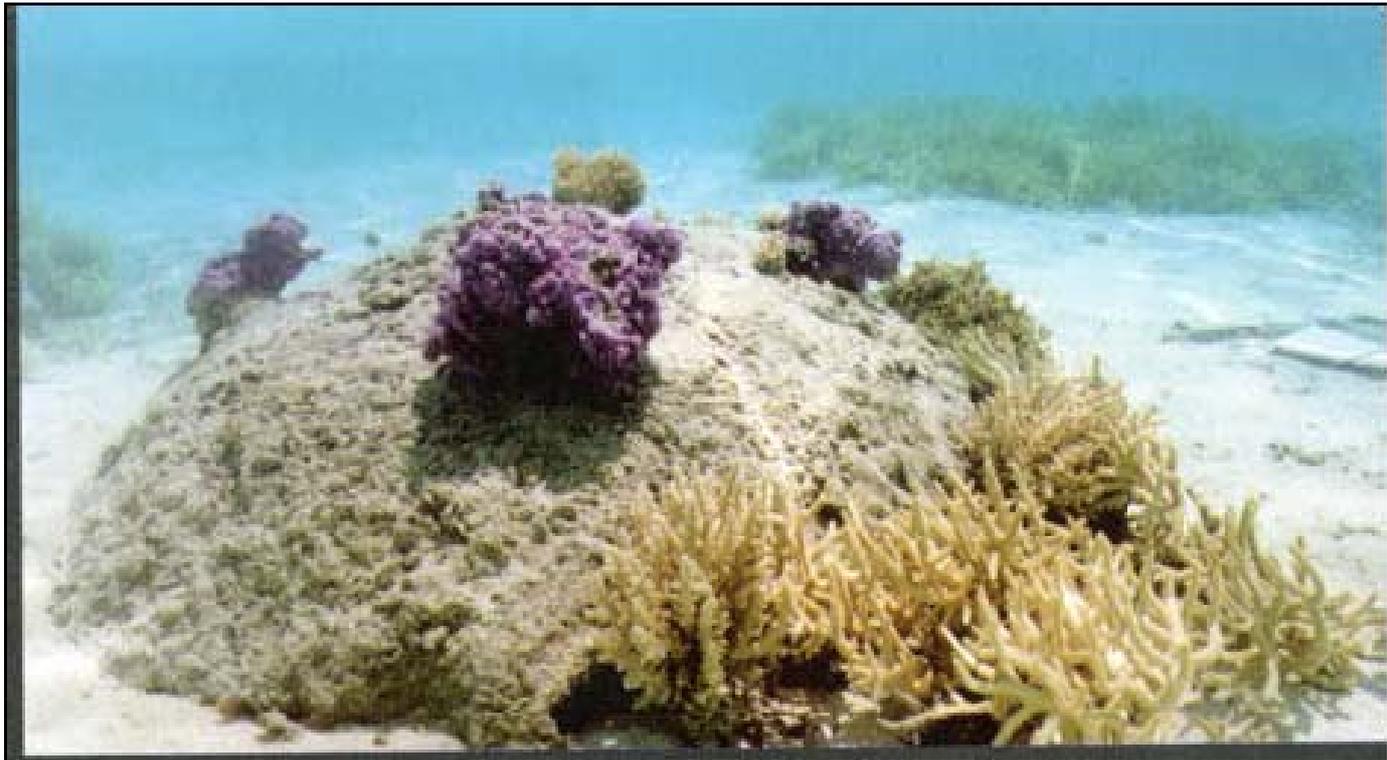
Pour favoriser le recrutement naturel il est encore possible de réparer ou créer un substrat ou encore augmenter sa surface, pour cela la mise en place de structures naturelles : blocs, assemblages de coraux morts ou structures artificielles : métalliques, en béton, pneus, épaves, font partie des agencements ou constructions utilisées. (Barber 2002)

L'installation de structures artificielles doit permettre de :

- Restaurer les habitats en fournissant un substrat et un refuge pour les poissons, les coraux, et autres organismes récifaux.
- Jouer le rôle de brise-lame en réduisant l'hydrodynamisme.

Nombreux sont les éléments qui peuvent servir à la fabrication de récifs artificiels : pneus, plastique, métal, bois, fibre de verre, PVC, rochers, cependant le matériel le plus utilisé pour les projets de restauration avec des récifs artificiels reste le béton et la roche calcaire qui fournissent un substrat stable sous différentes formes. Le choix du matériel du substrat est à prendre en considération, la fonction d'un substrat artificiel dépend de la composition, la surface, le design et la stabilité de la structure, puis des caractéristiques de l'environnement, c'est-à-dire la température, la lumière, le sédiment, la faune environnante, l'hydrodynamisme, la profondeur et l'effet du temps

A Bora Bora, en Polynésie Française, Salvat et al. (2002) ont transplanté des colonies adultes de coraux sur des blocs de béton par collage avec du ciment. Les blocs ont l'aspect (forme, couleur) et la structure (cavités, aspérités) de massifs coralliens (Figure 3).



**Figure 3: Bloc de béton utilisé pour la restauration à Bora Bora
(Salvat et al., 2002)**

-Plaques et dalles de béton

Le béton a aussi été utilisé sous forme de dalles et de plaques dans de nombreuses études pour transplanter des colonies.

Dans ce cas, le transplant est collé à cette plaque par du ciment ou un adhésif résistant à l'eau (Thornton et al., 2000 ; Hosoya, 2004).

ReefBall®

Les structures Reefball® en béton fournissent un habitat pour certaines espèces de poissons et d'invertébrés benthiques tout en servant de support pour les transplants coralliens. En faisant office de brise-lame tel un récif, ils peuvent aussi stabiliser la ligne côtière. (Harris et Woodring 2001).

Les ReefBall® (Figure 4) ont l'apparence de bols retournés, ils sont creux et percés de nombreuses cavités ainsi que de prises permettant de recevoir les fragments coralliens. Ces fragments sont moulés dans le ciment à la taille des prises (Figure 5 A) et sont ensuite fixés dans les prises avec un mastic époxy (Figure 5 B) (www.reefball.com).



Figure 4: Mise en place de ReefBall®.
(source : www.reefball.com)

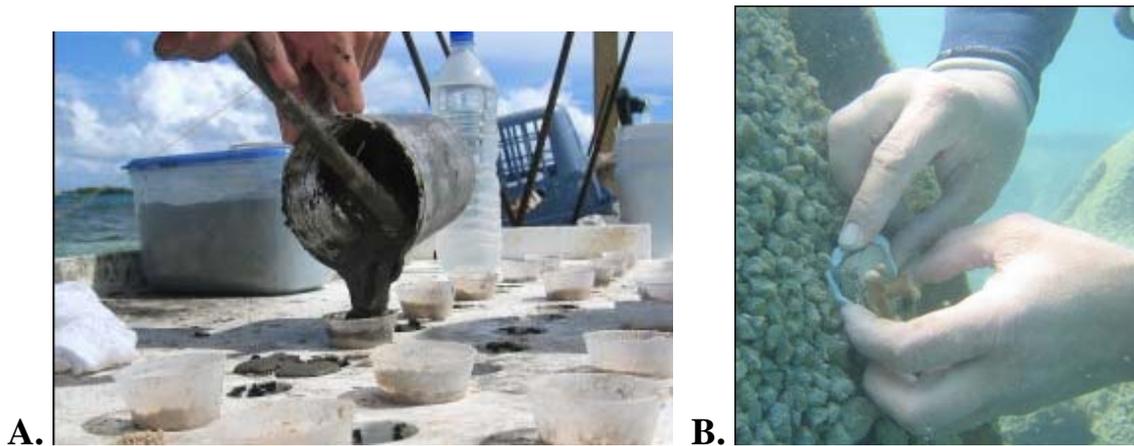


Figure 5 A. Moulage du ciment pour la transplantation sur les prises.
 B. Fixation d'un fragment sur une ReefBall®

(Source : www.reefball.com)

Il existe également d'autres méthodes de mise en place de récif artificiel telles que les plaques et croix de béton (Rinkevich 2000, Epsein et al.2001), Armorflex® (fig 6a): une matrice de blocs de béton (Clark et Edwards 1996), ou encore des module en céramique Ecoreefs® (fig 6b) .



Figure 6 a: Mise en place d'une structure d'Armorflex®
 (<http://www.armortec.co.uk>).



Figure 6 b : Modules Ecoreef assemblés en récif
(<http://www.ecoreefs.com>)

Récifs de déchets

Ces récifs sont formés essentiellement de rebus tels que des pneus et des carcasses de voitures. Ces récifs ne sont pas sans danger pour l'environnement car ils introduisent dans le milieu marin une quantité importante de substances étrangères très nocives (métaux lourds, composés chimiques ...).

Sans fixation

Plusieurs études ont transplanté des coraux sans les fixer au substrat (Heyward et Collins 1985), (Petersen *et al.* 2004) et (Randall 1987); (Bowden-Kerby 1997); (Bruno 1998); (Smith et Hughes 1999); Lindahl, 2003).

Les coraux sont alors répartis au hasard sur le substrat.

(iii) construction récifale électrochimique : ERCON et BIOROCK

Construction récifale électrochimique (Electrochemical Reef CONstruction: ERCON)

Les constructions électrochimiques sous-marines semi-artificielles s'appuient sur le principe d'électrolyse de l'eau de mer.

Parmi les minéraux dissous dans l'eau de mer on trouve le calcium et le magnésium qui peuvent précipiter sur un support métallique de préférence en grillage ou en acier, grâce au passage d'un courant électrique.

Les minéraux s'agrègent alors sur le gabarit (cathode) en couches solides de brucite (hydroxyde magnésium ; $Mg(OH)_2$) et d'aragonite ($CaCO_3$) qui possèdent des caractéristiques similaires au calcaire récifal, tandis que du dioxygène (O_2) et du dichlore (Cl_2) sont libérés au niveau d'une grille en titane, carbone ou plomb (anode) (Figure 7).

La transplantation consiste à insérer entre les mailles du grillage de la cathode les fragments coralliens puis d'alimenter en électricité la structure pour que les transplants y soient cimentés par les dépôts minéraux.

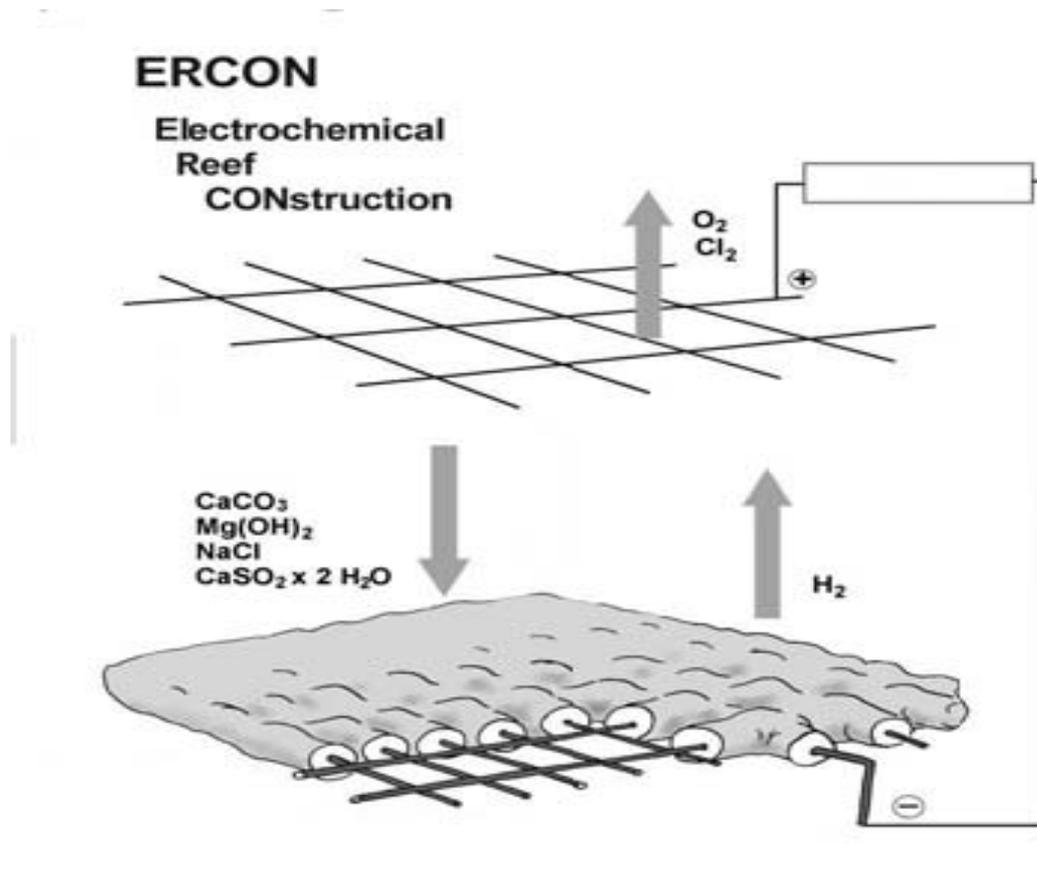


Figure 7: Schéma du dispositif ERCON
(www.uni-essen.de)

Procédé Biorock™

En participant au projet Biorock durant ces 4 mois, différents travaux ont pu être réalisés.

Le projet se résume de la manière suivante :

- objectifs principaux,
- aires d'études et activités,
- méthodologie,
- résultats les plus révélateurs.

Présentation du projet Biorock à Ko Samui :

- Investigateur principal : Thomas Goreau
- Organisme de financement : le gouvernement thaïlandais, quelques sponsors, une structure hôtelière, l'association elle-même.

Le projet de restauration des récifs coralliens sur l'île de Ko Samui a débuté en décembre 2005, après avoir commencé avec efficacité sur une île voisine Ko Tao en juillet 2005.

En effet, comme partout ailleurs où l'on trouve des écosystèmes récifaux ces derniers sont fragilisés par les constructions littorales qui entraînent des rejets d'eaux usées et une pollution chimique est à l'origine de l'eutrophisation des eaux et l'importante extraction de matériaux rocheux sur le continent qui induisent une hyper-sédimentation de l'eau car les sédiments sont entraînés par les eaux de pluie vers la mer.

La société Biorock™ utilise des tiges en acier assemblées sous différentes formes pour construire la structure nécessaire à l'accrétion minérale (procédé protégé Biorock™). (voir figure en Annexe).

Dans ce cas les mailles formées par les tiges sont trop espacées pour pouvoir y insérer les transplants.

Ces derniers sont donc maintenus par des fils de fer.

(www.globalcoral.org, www.biorock-thailand.com).

Objectifs principaux :

L'implantation de récifs artificiels électrochimiques permettra dans une moindre mesure de contrer la disparition rapide des espèces de coraux. Ces derniers étant plus vulnérables aux pollutions chimiques, notamment le rejet des eaux usées et l'augmentation de la turbidité de l'eau à certains endroits de l'île ou des structures hôtelières se sont développées massivement ces dernières années.

Pour cela le procédé électrochimique qui repose sur la réaction d'électrolyse de l'eau de mer va favoriser la croissance des scléactiniaires en leur permettant d'épargner une partie de leur énergie à la fabrication de leur squelette calcaire.

Cette énergie économisée, les coraux transplantés pourront alors s'investir et se consacrer pleinement à leur croissance et au développement sur le récif artificiel, mais pourront aussi se défendre contre les différents facteurs de pollution.

Aires d'études et activités :

L'île de Ko Samui se trouve à l'Ouest du golfe de Thaïlande.

Les structures électrochimiques ont été implantées sur 4 sites différents autour de l'île.

-**Bam Makam** au nord où ont été implantés à une profondeur d'environ 20m, 6 spirales et 2 dômes reliés au générateur sur la côte par un câble de 450 m.

-**Silver beach** au sud-est : 3 spirales et 2 dômes à une profondeur de 15m environ, reliés au générateur sur la côte par un câble de 90 m.

-**Chaweng** à l'est : 3 tunnels reliés au générateur d'un hôtel par un câble de 320m.

-**Ko Taen**, au sud : un petit dôme a été implanté à une profondeur d'environ 15m relié à des panneaux solaires d'une capacité d'énergie : 2 x 120W.

Chacun de ces 4 sites est exposé à une présence excessive de sédiments et matière organique en suspension, à cela s'ajoute parfois un faible hydrodynamisme qui augmente la turbidité de l'eau et par conséquent abaisse la quantité de lumière parvenant aux récifs. Les coraux hermatypiques se développent très difficilement dans les milieux turbides. (Nixon, S.W., 1995).

L'origine de la présence excessive des sédiments n'est pas précisée, puisqu'il existe des facteurs naturels comme l'influence des marées, la présence de rivières qui se jettent dans le golfe, non loin de là, un faible hydrodynamisme (J. Claudet, 2006).

Méthodologie :

La construction d'un récif artificiel électrochimique (Fig. 8) se fait selon les étapes suivantes :

- Assemblage de l'armature métallique grillagée, torsadé, pyramidale plongée à quelques mètres de profondeur.
- Attache du fil de cuivre faisant office de cathode.
- Branchement à un générateur électrique de faible puissance ou panneaux solaires situés au bord de la plage.

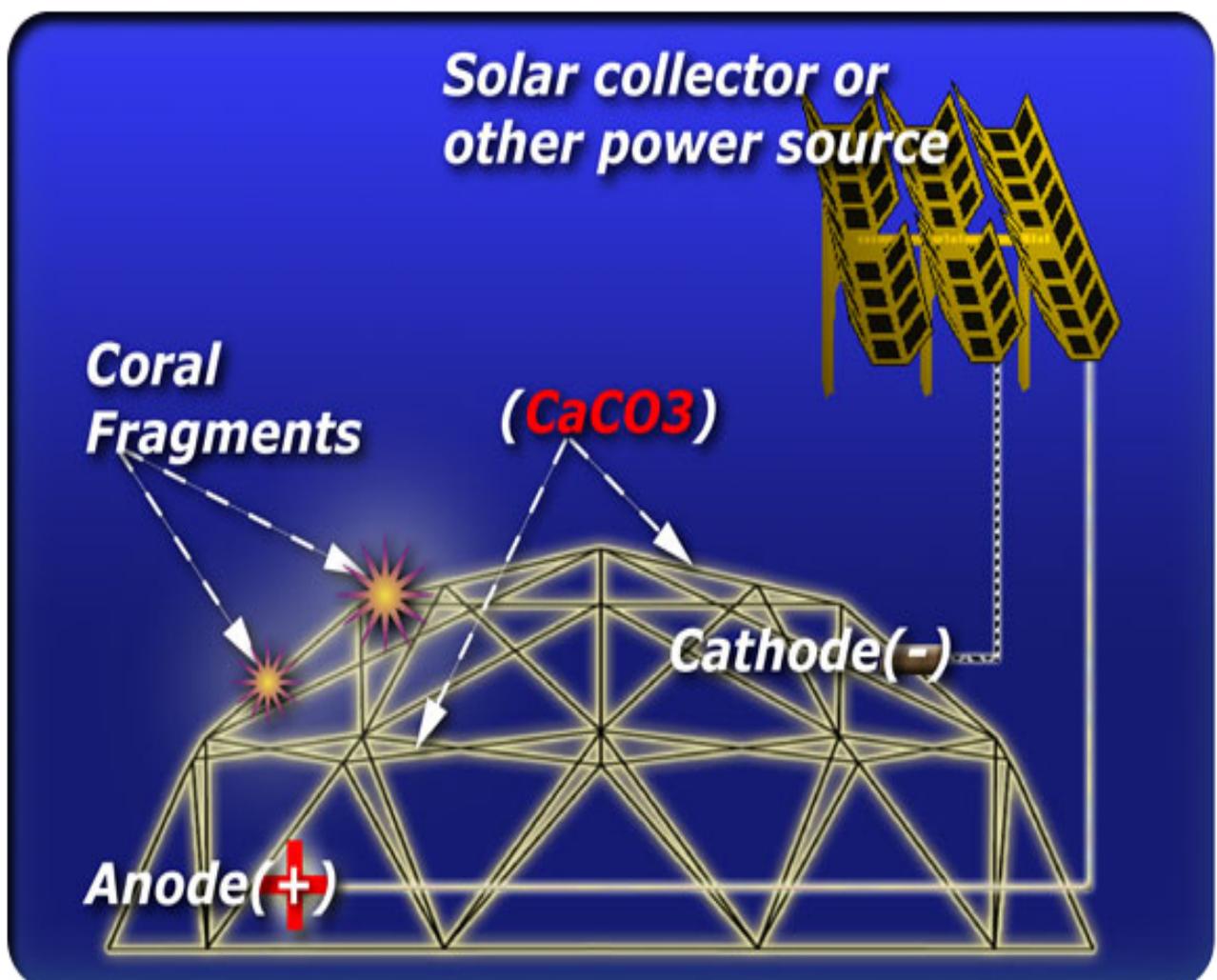


Figure 8 : Illustration d'un récif artificiel électrochimique Biorock

La couverture corallienne a mis quatre ans après la transplantation, (Fig. 9A) entre Avril 1997 et Novembre 2001 à recouvrir la structure Biorock en forme de bernacle à Ihuru aux Maldives, la structure métallique d'origine est ici complètement recouverte (Fig. 9B).

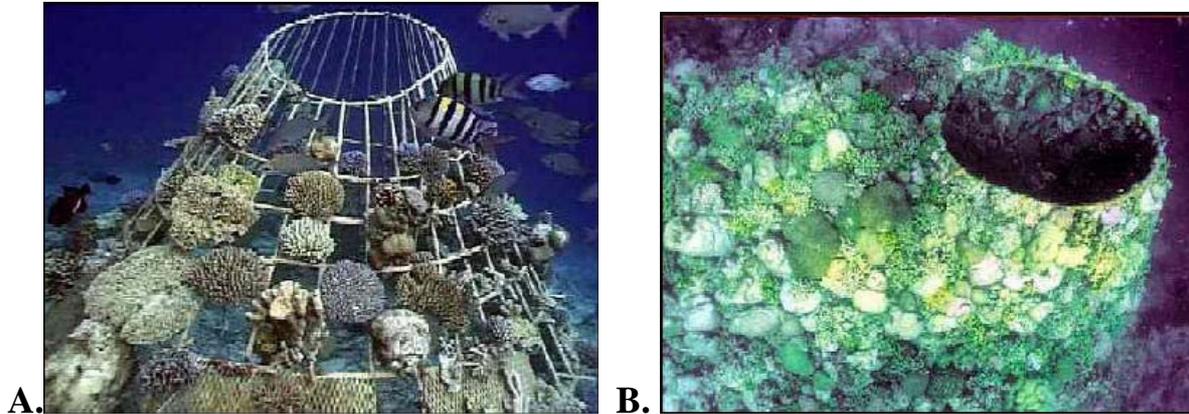


Figure 9 : A. structure Biorock™ en Avril 1997 sur laquelle des coraux viennent d'être transplantés. B. même structure qu'en A mais en Novembre 2001. Aucune transplantation n'a été effectuée depuis la transplantation initiale en Avril 1997.(www.globalcoral.org)

Pour obtenir des boutures qui seront ensuite fixées sur le récif électrochimique, le moyen le plus simple est de récolter les fragments déjà existant sur le récif suite à une dégradation naturelle ou anthropique (Heyward et Collins 1985) ; (Bowden-Kerby 1997) ; (Hudson et Goodwin. 1997); Schuhmacher et al., 2000).

Certaines méthodes nécessitent l'utilisation de hache, râteau (Bak *et al.* 1981),(Bak et Criens, 1981), scie à métaux, pinces fines pour *Cladocora spp.* (www.artificialreefs.org), sécateur ou encore perceuse pneumatique pour obtenir des fragments de coraux. Sur le récif électrochimique, seuls les fragments déjà présents sur le fond marin sont utilisés.

Les résultats les plus révélateurs :

a) principal caractéristique du récif corallien justifiant l'utilisation

biorock : pour quel type de stress est utilisé la méthode biorock ?

(Hyper sédimentation → turbidité associée → perte de luminosité, qui conduit à l'étouffement des colonies)

Identification du problème :

L'hyper sédimentation est un stress parmi tant d'autres qui coûte de l'énergie aux coraux.

Les coraux scléactiniaires sont des organismes à croissance lente car une partie de leur énergie est dédiée à la calcification qui leur coûte cher en énergie.

On peut donc justifier l'utilisation de la technique biorock puisque dans ce cas là, la calcification est déjà réalisée grâce à l'électrolyse marine qui permet ainsi d'économiser l'énergie dédiée à la calcification. Cette énergie économisée ils peuvent donc se consacrer plus aisément à la reproduction, nutrition, croissance et défenses contre les pollutions diverses.

Afin de quantifier l'intensité du stress sédimentaire sur les coraux, plusieurs échantillonnages du taux de sédimentation ont été réalisés à Bam Makham au nord de l'île et Silver Beach au sud-est de l'île. Ces échantillonnages consistaient à comparer le flux sédimentaire à différentes profondeurs : 15m, 10m, 5m, sur 2 sites opposés de l'île. Des trappes à sédiments déployées sur une période de 10 jours ont mis en évidence une différence quantitative et qualitative du matériel sédimentaire retrouvé. Ces résultats à prendre avec précaution ne permettent de mettre en évidence et suggérer que de simples hypothèses sur l'origine de cette hyper sédimentation, entraînant en partie, la diminution de la photosynthèse par les coraux et donc la réduction de leur étendue autour de l'île.

Résultats : (voir figure en Annexe)

L'évaluation quantitative de la sédimentation demeure bien souvent délicate et complexe car les concentrations en sédiment et les taux d'arrangement sont extrêmement variables, selon les événements naturels suivant : pluie, vent, et vagues.

L'approche la plus commune et simple pour réaliser cette évaluation est l'utilisation de tubes cylindriques orientés verticalement afin d'emprisonner le matériel sédimentaire. Celui-ci est ensuite périodiquement recueillis pour être pesé et si possible analysé (diffraction aux RX).

Il est indispensable de tenir compte des facteurs environnants, car le matériel recueillis dans ces tubes sera fonction de l'énergie de l'eau qui influe sur le transport et la remise en suspension du sédiment.

Ce moyen d'évaluation et de mesure du matériel sédimentaire reste donc assez archaïque et ne permet de donner qu'une mesure approximative.

L'analyse des 2 échantillons de sédiments prélevés sur 2 sites différents soumis à l'analyse par diffraction aux rayonsX, au laboratoire de Géologie de Perpignan, a permis de confirmer qu'entre les 2 échantillons, le flux sédimentaire était plus important pour le site de Bam Makam, où l'influence de la marée est la plus importante mais aussi la présence d'une rivière se jetant non loin du site que sur le site de Silver Beach situé à une dizaine de mètres de la côte rocheuse.

3 METHODOLOGIE

3.1 Principales techniques de restauration

3.1.1 Transplantation de colonies coralliennes

En règle générale transplanter des colonies ou des fragments sur des récifs artificiels offre de bons résultats et il n'y a pas de décrochage des transplants de la structure.

La transplantation sur des récifs en béton tels que des ReefBall à Porto-Mari montre 72 % de survie totale des fragments des espèces *Porites porites*, *Madracis mirabilis*, *Agaricia agaricites*, *Eusmilia fastigiata*, *Montastrea annularis*, *Acropora cervicornis* et *Acropora palmata* et ce malgré un bloom phytoplanctonique 2 mois après la transplantation (www.artificialreefs.org). Munoz-Chagin (1997) qui a transplanté des colonies adultes observe lui aussi un fort taux de survie des colonies.

De même, à Bora-Bora, Salvat et al. (2002) observent des taux de survie importants : 90 % après 28 mois.

La transplantation de fragments et de colonies sur des plaques peut aussi s'effectuer soit directement par collage (Thornton, 2000 ; Hosoya, 2004), soit indirectement par un serre-câble précollé sur la plaque (Rinkevich, 2000 ; Epstein et al., 2001).

Ces transplantations montrent de forte survie et pas de pertes de fragments.

3.1.2 Immersion de récifs artificiels

L'utilisation de récifs artificiels tels que des blocs de béton et ReefBall® doit rester ponctuelle.

En effet, ce sont des méthodes coûteuses non applicables à grande échelle car elles requièrent un fort développement logistique.

De plus, ces structures de par leur composition vont avant tout relarguer dans le milieu des composés non favorables à la croissance des coraux.

Un temps de latence est donc nécessaire entre le moment où les blocs sont immergés et le moment où la transplantation peut avoir lieu.

On peut considérer que la transplantation peut être effectuée lorsque la structure commence à être colonisée par des algues notamment par de la coralline.

3.1.3 Construction récifale électrochimique (Biorock)

La transplantation sur des récifs de type ERCON donne de très bons résultats avec une forte survie des fragments toutes espèces confondues sauf pour l'espèce *Pocillopora damicornis* qui semble être une espèce peu adaptée pour ce type de transplantation avec des taux de mortalité très élevés (Van-Treeck et Schuhmacher 1999).

Les structures de type ERCON ne relarguent normalement pas de composés toxiques et sont relativement simples à mettre en place.

L'alimentation en électricité est l'un des coûts, qui à long terme pourrait devenir important et donc conséquent sur la faisabilité et efficacité de la méthode.

En ce qui concerne la méthode Biorock, l'expérience et l'application de la méthode d'implantation de récifs artificiels électrochimiques à Bali montre qu'après 4 ans de mise en place la structure métallique Biorock se recouvre complètement de coraux. On y observe également la présence de divers poissons. (www.biorock-thailand.com)

3.2 Analyse comparative des techniques

Chacune de ces méthodes requièrent différents moyens appliqués à différents contextes. Afin de comparer et analyser ces 3 méthodes, on retiendra les descripteurs suivants :

- *Coût financier*
- *Coût humain (nombre de personnes et leur qualification),*
- *Facilité de mise en œuvre*
- *Échelle spatiale concernée,*
- *Longévité*
- *Efficacité*
- *Réussite du point de vue "écologique"*

La technique de transplantation :

Elle se révèle être difficilement viable sur de grandes étendues de récifs dégradés où des populations donneuses ne supporteraient pas le projet.

L'application d'une méthode judicieuse avec la sélection appropriée de l'espèce de scléactiniaires est indispensable à la réussite de la transplantation.

Des études évaluant les méthodes de transplantation de corail libre montrent différents degrés de réussite, cette méthode à faible coût est appropriée sur des récifs initialement en bonne santé, c'est-à-dire des récifs possédant une quantité suffisante de larves. Un substrat inapproprié soit des sédiments non consolidés (impact dû à la pêche à l'explosif, le dragage, le minage des récifs) empêche le recrutement et la survie des larves.

. Période de transplantation

Parmi les critères influençant sur l'efficacité de la transplantation, il semble nécessaire de tenir compte de la période à laquelle sera réalisée la transplantation.

Okubo et al. (2005) ont montré que la meilleure période se situe au début du printemps dans l'hémisphère nord, c'est-à-dire lorsque la température de l'eau commence à s'élever progressivement.

Les conditions sont défavorables à la réussite de la transplantation si le corail doit dépenser son énergie sur une longue période pour résister à une augmentation de la température des eaux comme il arrive plus tard dans l'année. En effet, répondre à 2 stress en même temps représente pour le corail un effort considérable puisqu'il doit lors de cette transplantation fabriquer de nouveaux tissus mais aussi résister à des variations de températures qui peuvent lui être fatales alors que la quantité d'énergie stockée dans le fragment est déjà limitée.

La mise en place de récifs artificiels électrochimiques :

Ils sont efficace à condition de tenir compte de l'évaluation des conditions environnementales. En effet ces derniers ont pu mettre en évidence que la morphologie de la structure artificielle influençait sur la diversité et l'abondance des espèces telles que les algues, poissons et invertébrés que l'on trouvait à certains endroits.

Il semble donc que les coraux suivant leur stade de développement doivent être transplantés à différentes profondeurs en fonction des facteurs bénéfiques à leur survie et leur croissance ainsi que les perturbations présentes : compétition algale.

4 RESULTATS

Ce tableau permet de mettre en évidence les particularités de chacune des méthodes de restauration des récifs dégradés et de les comparer judicieusement afin de les appliquer dans le contexte le plus approprié.

	TRANSPLANTATION		RECIF ARTIFICIEL		RECIF ARTIFICIEL ELECTROCHIMIQUE
	Fragments ramassés	Culture de coraux	Blocs de pierre	Reefball et autres	Biorock
Conditions d'utilisations ?	Recrutement limitant		Recrutement non limitant		Stress important
Coût financier	-	+++	-	+	+++
Coût humain	-	+++	Une seule intervention		+
			-	-	
Echelle d'action	+		+++	+	-
Longévité :	+++	+++	+++	+	+
Temps nécessaire pour être efficace	-		-		-
Réussite écologique	<u>A moyen terme</u> : à défaut d'observation sur long terme				
	+++		+++		++++
Référence	-Minoz-Chagrin, 1997 -Clark et Edwards 1995		-Helen fox 2004	www.Reefball.com	-Hilbertz et,al -1977 et 2004 -

Légende : - : minimum ; + : intermédiaire ; +++ : maximum

5 DISCUSSION

5.1 Bilan des comparaisons entre les techniques de restauration

Les techniques de réparation des récifs ont permis l'augmentation du recouvrement corallien à de nombreux endroits.

Cependant des inconvénients dans ces techniques demeurent : au niveau du travail intense requis, le coût du matériel et l'équipement.

Les inconvénients de la technique de transplantation :

-Le travail intense et coût requis, le vaste temps passé sous l'eau à enlever et transporter les colonies, le vaste matériel et équipement.

-L'impact sur les colonies donatrices et les populations.

-Le taux de mortalité accru dans la transplantation.

-Le taux de diminution de croissance chez les transplants.

-Le déplacement des transplants à partir du point d'attachement dû à l'effet des vagues.

-la réduction de la fécondité des transplants résultant du stress lié aux déplacements, transport, et transplantation.

Mise en place de récifs artificiels :

Les récifs artificiels favorisent l'augmentation de la fréquentation des poissons et des communautés d'invertébrés.

L'inconvénient des récifs artificiels incluent la perte éventuelle de coraux, poissons, autres communautés récifale par transfert ou délocalisation de récifs naturels à la structure artificielle, mais aussi la possibilité de surpêche là où les récifs artificiels concentrent des poissons.

Avant la mise en place de telles installations, il est évidemment indispensable de vérifier la présence initiale de recrues sur le site à restaurer, sans cela ces

moyens d'actions restent vains et ne permettent pas de recouvrer le récif dégradé.

Mise en place de récif artificiel électrochimique :

Les récifs artificiels électrochimiques peuvent être répartis de manière très locale et surtout non loin de la côte afin d'être alimentés en énergie grâce à des câbles qui les relient à des générateurs situés sur le littoral.

Cette technique demeure tributaire d'une alimentation énergétique, nécessaire à la fabrication du carbonate de calcium sur la structure, elle demande donc un investissement financier permanent à moins que l'énergie fournie ne proviennent d'énergie renouvelables : solaire, marée-motrice, hydroélectrique, géothermique...

Cette méthode trouve donc tout son intérêt et son efficacité à une échelle locale et dans d'éventuelles situations d'urgence, exemple un épisode de blanchissement dû à des stress importants sur une certaine durée et à certains endroits.

5.2 Limites et perspectives d'amélioration des projets de restauration récifale

-Transplantation sans attachement :

L'avantage de cette technique est qu'elle ne requière pas l'utilisation de plongeurs et d'abondant matériel.

En effet c'est parce que la majorité des pays nécessitant de la plus grande aide en matière de restauration des récifs n'ont pas les ressources disponibles pour fournir un tel effort, que l'on a recours à des méthodes relevant de la plus grande simplicité : la transplantation sans attachement mime la fragmentation (reproduction) asexuée.

L'inconvénient est que ces fragments non attachés peuvent être déplacés et sont donc sujets à une certaine mortalité dû aux tempêtes et l'action des vagues.

Le succès de cette technique est donc appréciable dans les milieux récifaux soumis à des forces externes modérées.

Jardin et sélection de coraux :

Le concept de jardins de coraux est similaire à celui de sylviculture, là où les recrues de coraux sont élevées dans les nurseries in situ ou ex situ ont transplanté dans les sites de restauration.

L'avantage de cette technique est qu'elle évite les impacts défavorables aux populations de donneurs qui arrivent pendant la transplantation directe de corail. De plus les coraux présentés peuvent fournir la diversité génétique au secteur de récif endommagé.

Les inconvénients de cette méthode incluent les longs délais exigés pour établir un secteur de recrues viables capable de fournir des greffes, ainsi que les perturbations environnementales (tempêtes, températures extrêmes et maladies) qui peuvent influencer la croissance de ces coraux.

La sélection de coraux a aussi été proposée comme méthode d'amélioration de recrutement des coraux pour la restauration.

Cette technique implique la collecte de larve provenant des lieux de culture et une mise en place sur les substrats coralliens ; cependant alors qu'elle éviterait les dégâts et le déplacement de donneurs sains, une méthode efficace n'a encore pas été développée avec succès jusqu'à présent.

Questions concernant la transplantation et les besoins de la recherche :

Parce que la transplantation est une des méthodes la plus largement employée et étudiée parmi les techniques de restauration, il demeure indispensable de s'attarder sur quelques points.

Certaines recherches sont nécessaires pour définir avec pertinence l'existence d'espèces particulières pour la transplantation par rapport aux différentes

conditions environnementales : l'effet de la profondeur, action des vagues, la qualité de l'eau, les saisons, l'efficacité du substrat sur la transplantation des différentes espèces de coraux.

Des recherches restent à faire concernant les effets des transplants de coraux, réalisés dans des habitats qui diffèrent du site donneur, c'est-à-dire approfondir les connaissances sur la tolérance des espèces de coraux pour le transport et la transplantation.

Un des moyens qui permettrait de déterminer l'efficacité d'un récif artificiel serait d'évaluer l'augmentation et l'abondance de la biomasse, ou bien la taille de toutes les espèces ou certaines espèces cibles.

Notons aussi la nécessité de tenir compte des facteurs suivants pour contrôler et mener au mieux le projet de restauration :

- les dimensions des structures avant immersion,
- les dimensions des RA immergés,
- l'étendue verticale de la structure,
- la surface recouverte,
- la position géographique du récif,
- son orientation,
- la composition des structures,
- la texture de surface des structures (en termes de composition chimique, porosité, dureté et rugosité),
- la complexité architecturale du récif,
- le nombre et l'espace des cavités disponibles,
- la distance aux récifs naturels ou à toute autre structure pouvant avoir une influence et la date d'immersion.

Plus les structures artificielles sont similaires aux zones naturelles plus il est plus aisé d'évaluer leur influence sur les communautés présentes. C'est un des objectifs majeurs des évaluations (Carr et Hixon 1997).

6 CONCLUSION

La restauration de récifs coralliens dégradés a permis jusqu'à présent de limiter à plus ou moins grande échelle et long terme, les conséquences parfois irréversibles, de certains facteurs de perturbations d'origine naturelle ou anthropique.

Dans l'étude de comparaison des différentes méthodologies de restauration, nous avons mis en évidence qu'il est indispensable de remédier aux problèmes d'origines anthropiques qui répercutent toujours plus fortement et injustement sur l'état de santé des écosystèmes récifaux. De plus, par principe de bienveillance : qui consiste à faire le plus de bien possible sinon le moins de mal possible, ces perturbations d'origine anthropique devraient demeurer moindre et limitées sur l'état de l'environnement, étant donné la responsabilité qui nous incombe à tous de préserver notre patrimoine environnemental.

Il existe bien entendu de nombreuses méthodes de restauration des récifs dégradés, en explorant 3 de ces principales méthodes : la transplantation, la mise en place de récif artificiel et artificiel électrochimique, nous avons souligné combien il est indispensable de tenir compte de certains paramètres pour leur application sur le terrain.

En ce qui concerne la méthode de transplantation il est important de tenir compte de la complexité et de la nature du substrat, car ces facteurs influent considérablement sur le recrutement des coraux. L'évaluation de l'état du récif se détermine par les causes de sa dégradation, on établit ensuite les objectifs à atteindre suivant les conditions environnementales présentes. La technique de transplantation consiste essentiellement en l'implantation ou refixation de fragment et/ou colonies corallienne cassés, mais ils peuvent aussi provenir de site naturel ou de culture en aquarium par exemple. Il convient d'appliquer cette méthode sur les sites dépourvus de recrues de coraux suite à une perturbation bien souvent.

Au contraire de la transplantation, la mise en place de récif artificiel nécessitera inévitablement la présence initiale ou potentielle de recrues sur le site à restaurer. Ceci s'expliquant par l'action passive du principe même de l'implantation de récif artificiel sur le fond marin. En effet cette méthode prend tout son sens lorsque suite à une perturbation, (ouragan, pêche à la dynamite) le substrat devenu instable et fragilisé devient inapproprié à la fixation des larves qui en temps normal se fixe sur un milieu stable leur permettant de se développer en subissant le minimum de contraintes, ex : l'effet de l'hydrodynamisme.

La dernière méthode consiste à fournir une faible quantité d'énergie au récif artificiel électrochimique afin qu'il produise activement le carbonate de calcium nécessaire à la fabrication du squelette calcaire des coraux. Ce matériel calcaire déposé sur la structure Biorock n'a donc plus qu'à être incorporé au squelette calcaire des coraux hermatypiques fixés sur la structure électrochimique par du fil de fer. Cette incorporation du carbonate à leur squelette leur coûte peu en matière d'énergie dépensée, puisque déjà fabriqué : ceci au profit de leur croissance et défense contre les stress environnants. On peut donc déduire tout l'intérêt de cette méthode lors de situation urgente et très locale de restauration suite aux conséquences imprévisibles d'un événement perturbateur sur le milieu. Nous venons donc de mettre en évidence la nécessité d'appliquer judicieusement chaque méthode de restauration à un contexte particulier et préalablement étudié.

Ces méthodes permettent de limiter les conséquences néfastes, parfois irréversibles de certaines perturbations et avec de la chance parfois recouvrer un récif corallien avec sa biodiversité associée.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ammar M.S.A., Amin E.M., Gundacker D. et Mueller W.E.G. (2000) One Rational Strategy for Restoration of Coral Reefs: Application of Molecular Biological Tools to Select Sites for Rehabilitation by Asexual Recruits.
- Auberson B, (1982). Coral transplantation: an approach to the reestablishment of damaged reefs. *Kalikasan, Philippines Journal of Biology* 11: 158-172
- Bak R.P.M., Sybesma J. et Van-Duyf F.C. (1981) The ecology of the tropical compound ascidian *Trididemnum solidum* . 2. Abundance, growth and survival
- Barber,TR., (2002) Reef Balls: An advanced technique to mimic natural reef systems using designed artificial reefs Reef Ball Foundation on line document Presented at the International Conference On The Role Of Divers In Protection Of Marine Environment, Kuwait, 22-25 May 2000
- Bautz E., (2005). Propagation et transplantation de coraux scléactiniaires en milieu naturel et en milieu contrôlé : Synthèse sur les techniques et les expérimentations et perspectives de recherche. *Synthèse Bibliographique*, Université de Perpignan, 51p.
- Bouchon C., Jaubert J., et Bouchon-Navarro Y. (1981) Evolution of a Semi-Artificial Reef Built by Transplanting Coral Heads.
- Brown B.E. (1997) Adaptations of Reef Corals to Physical Environmental Stress
- Bowden-Kerby A, (1997). Coral transplantation in sheltered habitats using unattached fragments and cultured colonies. *Proceedings 8th International Coral Reef Symposium* 2: 2063-2068
- Bowden-Kerby A, (2001). Low-tech coral reef restoration methods modeled after natural fragmentation processes. *Bulletin of Marine Science* 69: 915-931
- Bruckner AW, Bruckner RJ, (2001). Condition of restored *Acropora palmata* fragments off Mona Island, Puerto Rico, 2 years after the Fortuna Reefer ship grounding. *Coral Reefs* 20: 235-243
- Bruno JF, (1998). Fragmentation in *Madracis mirabilis* (Duchassaing and Michelotti): how common is sizespecific fragment survivorship in corals? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 230: 169-181
- Carr M.H. et Hixon M.A. (1997) Artificial reefs: The importance of comparisons with natural reefs
- Claudet, (2006). Aires Marines protégées et Récifs Artificiels : Méthodes d'évaluation, protocoles expérimentaux et indicateurs. Thèse de Doctorat Université de Perpignan Et de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, 266p.**
- Clark S. et Edwards A.J. (1995) Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: Evaluation of a case study in the Maldive Islands. *Coral Reefs*, 14, 201-213
- Clark S, Edwards AJ, (1994). Use of artificial reef structures to rehabilitate reef flats degraded by coral mining in the Maldives. *Bulletin of Marine Science* 55: 724-744
- Clark S, Edwards AJ, (1995). Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldive islands. *Coral Reefs* 14: 201-213
- Custodio HM, Yap HT, (1997). Skeletal extension rates of *Porites cylindrica* and *Porites* (*Synaraea*) *rus* after transplantation to two depths. *Coral Reefs* 16: 267-268
- Décamps H., (2002) Nouvelles pratiques d'aménagement du territoire: vers une récréation de la nature. *R. Acad. Agric. Fr.*, 88,n°6, pp.45-47
- Edwards A.J. et Clark S. (1998) Coral Transplantation: *A Useful Management Tool or Misguided Meddling*

- Epstein N, Bak RPM, Rinkevich B, (2001). Strategies for gardening denuded coral reef areas: the applicability of using different types of coral material for reef restoration. *Restoration Ecology* 9: 432-442.
- Fox, (2004). Coral recruitment in blasted and unblasted sites in Indonesia: assessing rehabilitation potential. *Marine Ecology Progress series*, **269**: 131-139.
- Guzman H.M., Ross-Robertson D. et Diaz M.L. (1991). Distribution and abundance of corals at the Refugio de Isla Iguana reef, Panama Pacific.
- Guzmán HM, (1991). Restoration of coral reefs in pacific Costa-Rica. *Conservation Biology* 5: 189-195.
- Harris LE, Woodring MP, (2001). Artificial reefs for submerged and subaerial habitat protection, mitigation and restoration. Proceedings of the 54th institute of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute pp 386-395.
- Heyward A.J, L.D Smith, M. Rees, S.N Field, (2002). Marine Ecology progress, Vol. 230: 113–118, Enhancement of coral recruitment by in situ mass culture of coral larvae.
- Heyward AJ, Smith LD, Rees M, Field SN, (2002). Enhancement of coral recruitment by in situ mass culture of coral larvae. *Marine Ecology Progress Series* 230: 113-118.
- Heyward A.J. et Collins J.D. (1985). Growth and sexual reproduction in the scleractinian coral *Montipora digitata* (Dana).
- Heyward AJ, Collins JD, (1985). Fragmentation in *Montipora ramosa*: the genet and ramet concept applied to a coral reef. *Coral Reefs* 4: 35-40.
- Hodgson G. (1999) A Global Assessment of Human Effects on Coral Reefs
- Hosoya S, (2004) Development of underwater techniques for coral reef restoration: transplantation of a whole coral colony *Porites lutea*. In: Omori M and Fujiwara S (eds), Manual for restoration and remediation of coral reefs. Nature Conservation Bureau, *Ministry of Environment*, Japan, pp 68-73.
- Hudson J.H. et Goodwin. W.B. (1997) Restoration and growth rate of hurricane damaged pillar coral (*Dendrogyra cylindrus*) in the Key Largo National Marine Sanctuary, Florida. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Symp*, 1, 567-570.
- Hudson JH, Goodwin WB, (1997). Restoration and growth rate of hurricane damaged pillar coral (*Dendrogyra cylindricus*) in the Key Largo national marine sanctuary, Florida. *Proceedings 8th International Coral Reef Symposium 1*: 567-570.
- Job S, Schrimm M, Morancy R, (2003). Restauration mixte d'un récif dégradé par des opérations d'extraction corallienne à Bora-Bora. In: *La restauration récifale, guide pratique à l'usage des décideurs et aménageurs*. Ministère de l'écologie et du développement durable, Proscience Te Turu'Ihi, IFRECOR Polynésie Française, Carex Environnement, pp21-22.
- Kaly U. (1995) Experimental test of the effect of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. *CRC Reef Research Centre Tech. Rep*, 1, 28
- Kaly UL, (1995). Experimental test of the effects of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. In: CRC Reef Research Centre, *Technical Report No. 1*. CRC Reef Research Centre, Townsville, pp 24.
- Kay A. (1994) A Natural history of the Hawaiian Islands: selected readings II; Natural and anthropogenic disturbance on coral reefs, 493.
- Lewis J.B. (1987) Measurements of groundwater seepage flux onto a coral reef: Spatial and temporal variations.
- Lindahl U, (2003). Coral reef rehabilitation through transplantation of staghorn corals: effects of artificial stabilization and mechanical damages. *Coral Reefs* 22: 217-223.
- Lindahl U, (1998). Low-tech rehabilitation of degraded coral reefs through transplantation of staghorn corals. *Ambio* 27: 645-650.

- Maragos J.E. (1974) Coral transplantation: a method to create, preserve, and manage coral reefs
- Medley (1983) *Gestion des récifs blanchis et gravement endommagés*
- Munoz-Chagin R.F. et Cruz-Aguero G.d.-I. (1993) [Corals of the Akumal Reef, Quintana Roo, Mexico.]
- Munoz-Chagin RF, (1997). Coral transplantation program in the Paraiso coral reef, Cozumel Island, Mexico. *Proceedings 8th International Coral Reef Symposium 2*: 2075
- Naim O, Prigent W, Boucher N, (2001). Utilisation de la croissance de transplants du Scléactiniaire Hermatypique *Acropora muricata* (Linnaeus, 1758) comme bioindicateur (île de la Réunion, Océan Indien). *Revue Ecologique (Terre Vie)* 56: 201-220.
- Nixon, S.W., (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns, *Ophelia*, 41, 199-219
- Okubo N, (2004). Restoration technology by using asexual reproduction: Transplantation of coral fragments. In: Omori M and Fujiwara S (eds), *Manual for restoration and remediation of coral reefs*. Nature Conservation Bureau, Ministry of Environment, Japan, pp 34-40.
- Okubo N, Taniguchi H, Motokawa T, (2005). Successful methods for transplanting fragments of *Acropora Formosa* and *Acropora hyacinthus*. *Coral Reefs* 24: 333-342.
- Petersen D., Laterveer M., van Bergen et D. and Kuenden M. (2004) Transportation techniques for massive scleractinian corals. *Zoo Technology*, 23
- Petersen D. et Tollrian. R. (2001) Methods to enhance sexual recruitment for restoration of damaged reefs. *Bulletin of Marine Science*, 69, 989-1000.
- Plucer-Rosario G. et Randall R.H. (1987) Preservation of reef coral speices by transplantation: and examination of their recruitment and growth. *Bull, Mar. Sci*, 41, 585-593.
- Rinkevich, (2000). Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments. *Marine Biology* 136: 807-812.
- Randall J.E. (1987). Collecting reef fishes for aquaria.
- 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. *Revue d'Ecologie (Terre Vie)*, supplément 9 : 81-96
- Schrimm M, Salvat B, Chancerelle Y, Adjeroud M, Porcher M, Morancy R, Aubanel A, (2004). Biological and physical restoration of a French Polynesian damaged reef site: success and frustration. *Proceedings 10th International Coral Reef Symposium*.
- Schuhmacher H, Van Treeck P, Eisinger M, Paster M, (2000). Transplantation of coral fragments from ship groundings on electrochemically formed reef structures. *Proceedings 9th International Coral Reef Symposium 2*: 983-990.
- Smith LD, Hughes TP, (1999). An experimental assessment of survival, re-attachment and fecundity of coral fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 235: 147-164.
- Spieler R.E., D.S. Gilliam, Sherman. R.L. et . (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.
- Thorton SL, Dodge RE, Gilliam DS, DeVictor R, Cooke P, (2000). Success and growth of corals transplanted to cement armor mat tiles in southeast Florida: implications for reef restoration. *Proceedings 9th International Coral Reef Symposium 2*: 955-962.
- Tameland J., Obura D., O., Souter D., Wilhelmsson D. et Obura D. (2002) Coral reef rehabilitation: Feasibility, benefits and need' in Lindén, *Coral Reef Degradation in the Indian Ocean. Status Report*, 263-271.

- Van-Treeck P. et Schuhmacher H. (1999) Artificial Reefs Created by Electrolysis and Coral Transplantation: *An Approach Ensuring the Compatibility of Environmental Protection and Diving Tourism*.
- Van Treeck P, Schuhmacher H, (1997). Initial survival of coral nubbins transplanted by a new coral transplantation technology options for reef rehabilitation. *Marine Ecology Progress Series* 150: 287-292
- Wilkinson C. R., (1996). Global change and coral reefs: impact on reefs, economies and human cultures. *Global Change Biology*, 2, 547-558.
- Woodley J.D. et Clark. R. (1989) Rehabilitation of degraded coral reefs. *Coastal Zone* 89, 3059-3075.
- Yap HT, (2004). Differential survival of coral transplants on various substrates under elevated water temperatures. *Marine Pollution Bulletin* 49: 306-312
- Yap HT, Alvarez RM, Custodio HM, Dizon RM, (1998). Physiological and ecological aspects of coral transplantation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 229: 69-84.
- Yap HT, Gomez ED, (1985). Growth of *Acropora pulchra*. III. Preliminary observations on the effects of transplantation and sediment on the growth and survival of transplants. *Marine Biology* 87: 203-209.
- Yap H.T., (1998). Alvarez R.M., Custodio H.M., III et Dizon R.M. Physiological and ecological aspects of coral transplantation.

REFERENCES INTERNET:

- http://globalcoral.org/coral_collecting_1_copy.jpg
- <http://www.advancedaquarist.com/issues/dec2003/tips.htm>
- <http://www.armortec.co.uk/armorflex.htm>
- <http://www.artificialreefs.org/Corals/tubecoral.htm>
- <http://www.biorock-thailand.com>
- <http://www.centrescientifique.mc/csmfr/microcolonies.php>
- <http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/atollpol/irdpoly/divatoll.htm>
- <http://www.ecoreefs.com/home.php>
- <http://www.pacificaquafarms.com/collection.htm>
- <http://www.reefball.com/reefballcoalition/coralprop.htm>
- <http://www.reefball.com/whatsball.htm>
- http://www.reefkeeping.com/issues/2005-03/ac_sp/feature/index.php
- <http://www.reefs.org/library/farmertodd/frags/lps/1.htm>
- <http://www.reefs.org/library/farmertodd/frags/lps/2.htm>
- <http://www.reefs.org/library/farmertodd/frags/lps/3.htm>
- http://www.uni-essen.de/hydrobiologie/e_frameseite.htm

ANNEXES

Répartition des récifs coralliens :

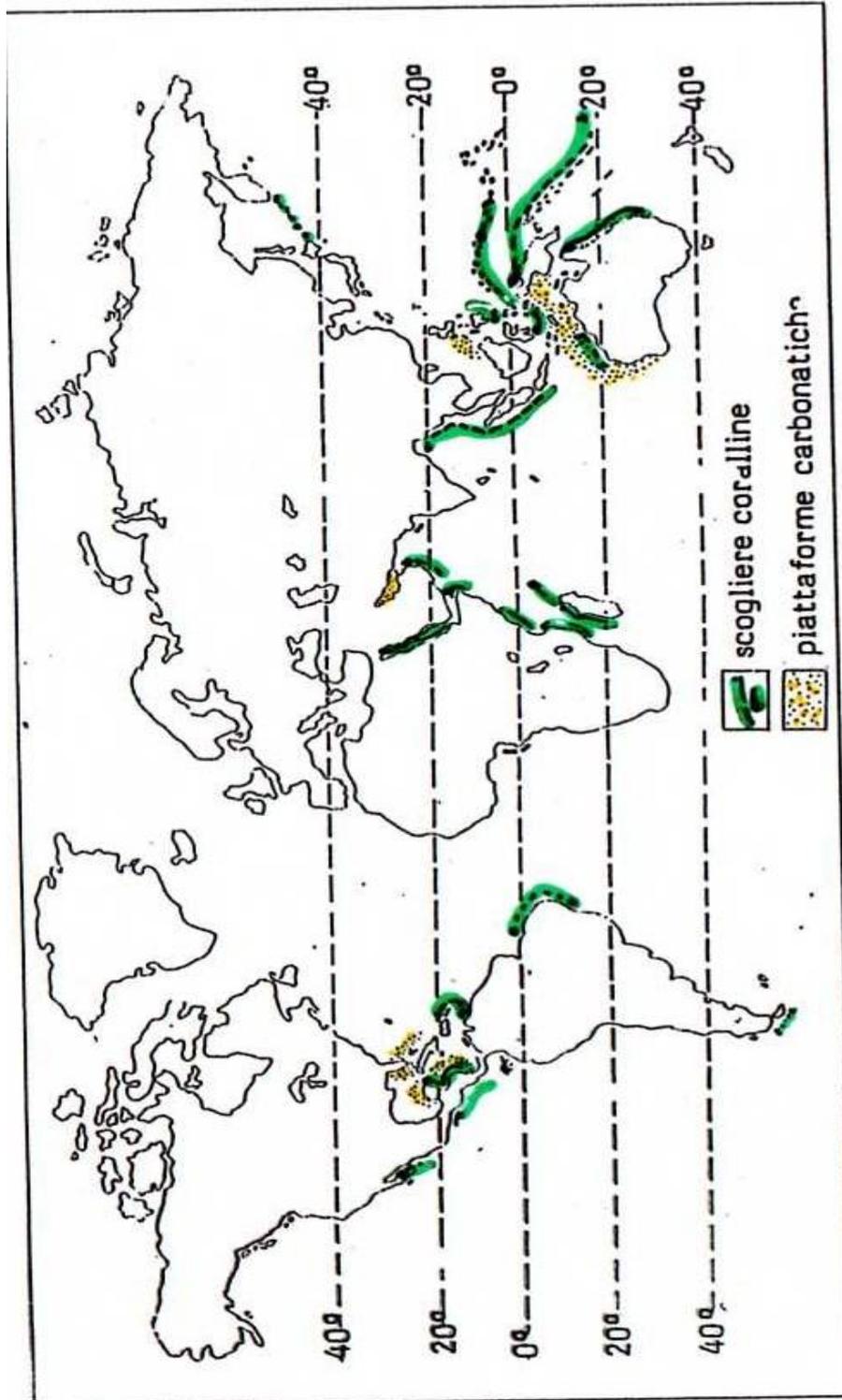


Figura 23.1 Distribuzione delle scogliere coralline e delle piattaforme carbonatiche. Questi ambienti, nei quali avviene la sedimentazione carbonatica in mare poco profondo, sono concentrati nelle regioni attorno all'equatore, tra circa 30° N e 30° S. Le piattaforme carbonatiche si trovano tuttavia anche a latitudini maggiori (Irlanda e Scozia occidentali) e a sud dell'Australia (da J.L. Wilson, "Carbonate facies in geologic history", Springer V., Berlin 1975).

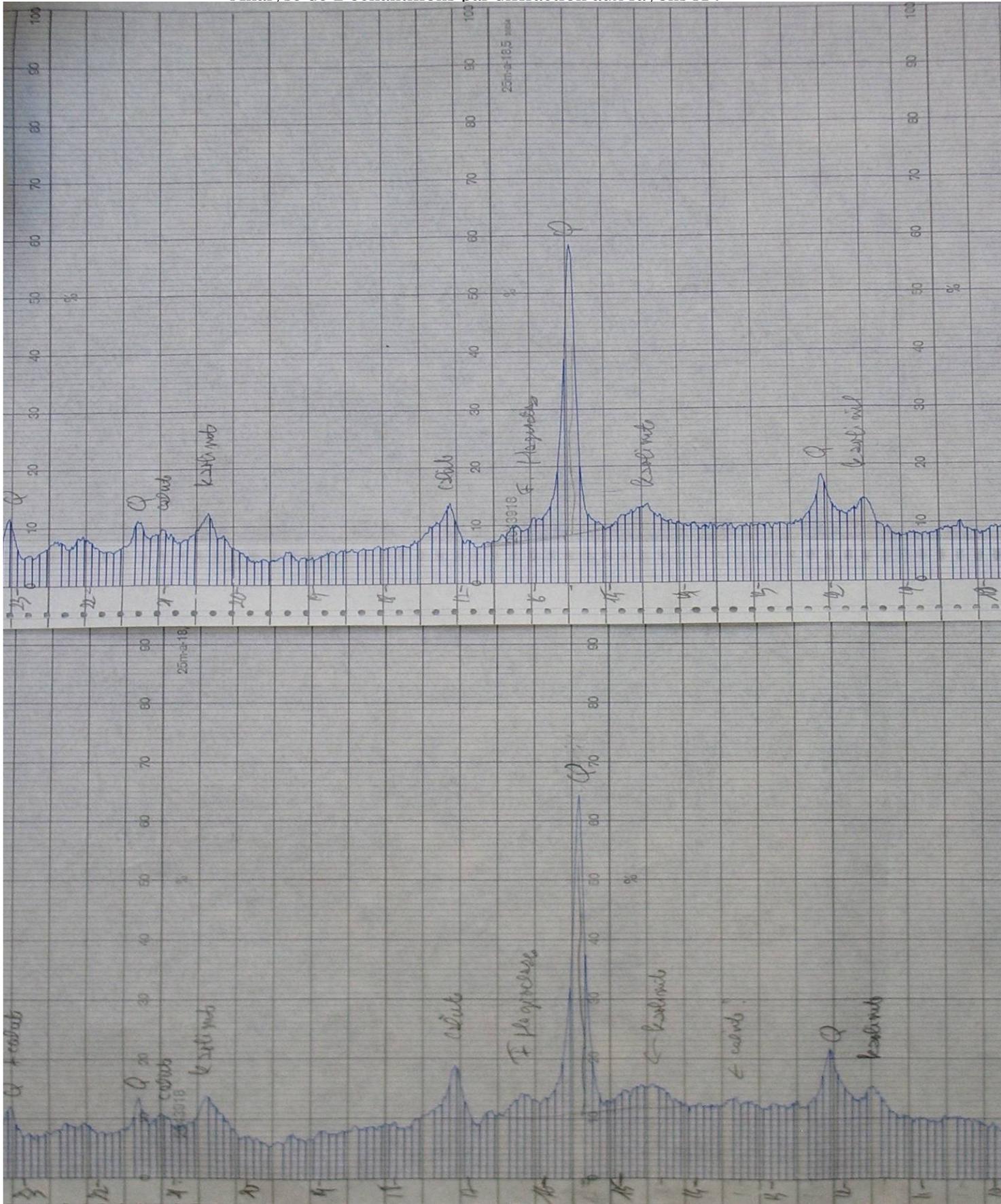


Une structure Biorock en forme de dôme :

La technique Biorock consiste à appliquer un faible voltage électrique dans l'eau de mer, provoquant ainsi la dissolution des minéraux qui cristallisent alors sur la structure, la structure se recouvre ensuite de carbonate de calcium similaire à celui que fabriquent naturellement les coraux.

Ce processus appelé « accrétion minérale » par électrolyse fut initialement développé par l'architecte Wolf Hilbertz dans le but de fabriquer un matériel de construction de type alternatif. Wolf Hilbertz et Thomas Goreau développent alors cette idée pour la restauration des récifs coralliens et la protection des rivages.

Analyse de 2 échantillons par diffraction aux rayons X :





Différents types de récif corallien.



Figure 1 : Prélèvement de colonies coralliennes à l'aide d'un marteau et d'un burin
(source : www.pacificaquafarms.com)



Figure 2 : Collecte manuelle de colonies naturellement arrachées du substrat
(source : <http://globalcoral.org>)

2.3 L'emplacement et la stabilité des récifs artificiels

L'emplacement des RA doit être choisi en fonction des conditions physiques et hydrodynamiques environnementales. Un module immergé est assujéti à de nombreuses forces (Sheng, 2000). Il est soumis à un forçage dû aux courants de fond et de surface (vagues et vent), proportionnel à la surface immergée, créant des forces de traction et d'inertie (Figure III-4).

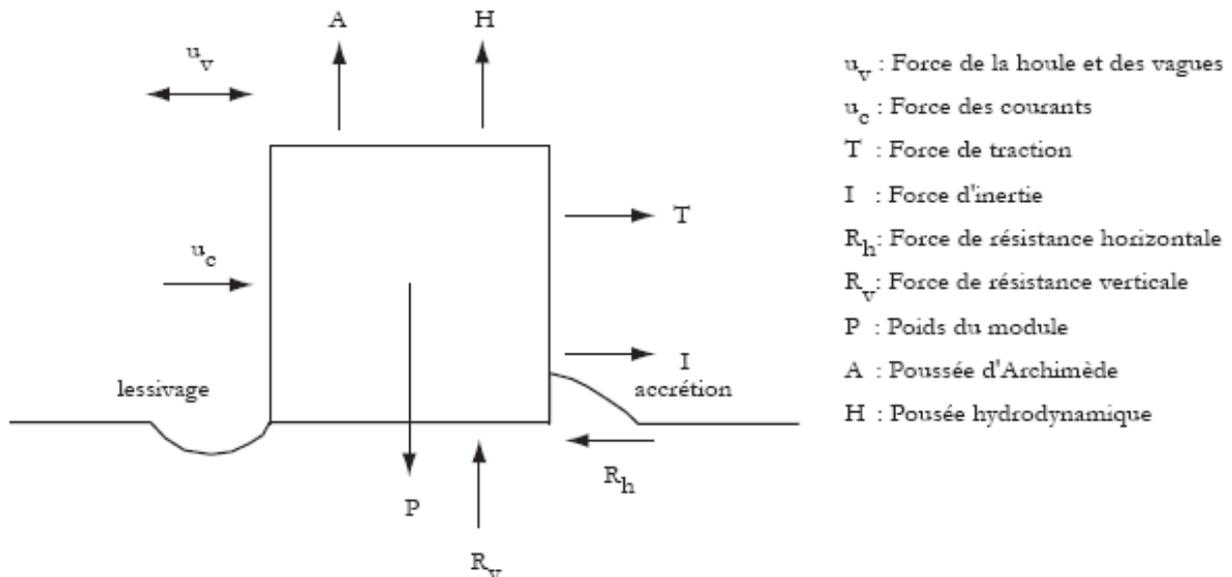
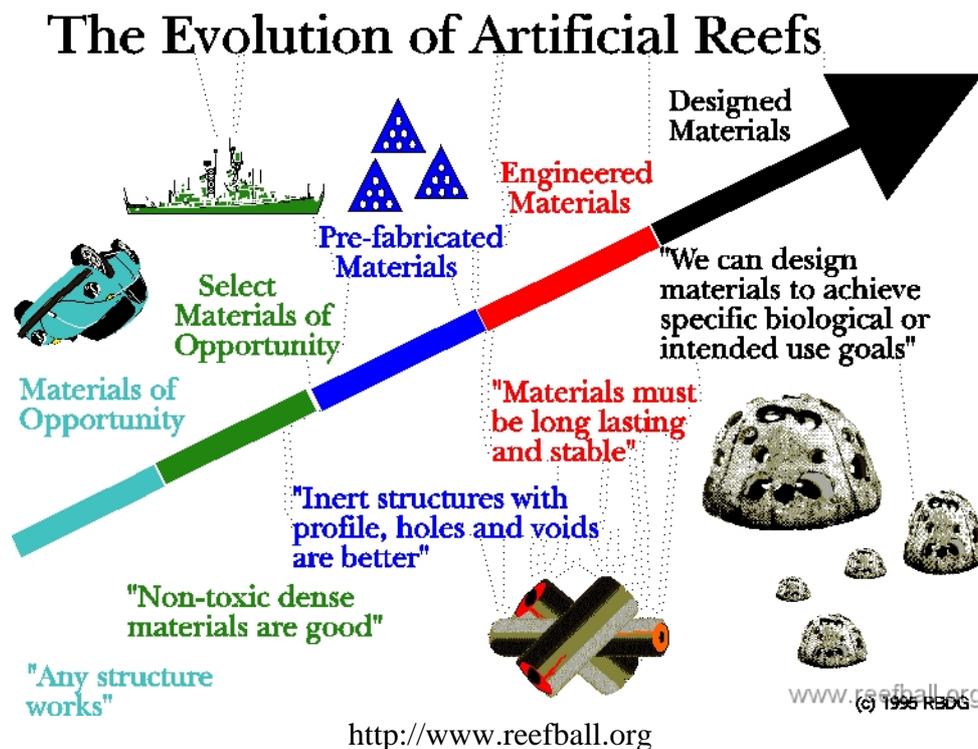


Figure III-4 : Forces agissantes sur une unité récifale (Sheng, 2000).



Résumé

Ce rapport rend compte du travail réalisé sur le terrain lors du stage avec l'organisme Biorock sur l'île de Koh Samui dans le Golfe de Thaïlande.

En comparant le projet de restauration des récifs coralliens dégradés : Biorock, réalisé intégralement sur différents sites, à d'autres méthodes de restauration grâce à une étude bibliographique, il a été possible de relever les avantages et inconvénients pour chaque projet de restauration, dont l'efficacité repose sur une sélection judicieuse et sur les moyens mis en œuvre pour retourner le mieux possible à l'état initial du récif.

Cette étude c'est réalisée ainsi :

Découverte, connaissance, et mise en application de la méthode électrochimique appliquée à la restauration des récifs coralliens dégradés soumis à de forts stress d'origine essentiellement anthropiques.

Comparaison de la méthode Biorock à d'autres méthodes de restauration grâce à une étude bibliographique.

Discussion et mise en évidence des avantages et inconvénients de chacun des projets.

Mots clés

Perturbations naturelles et anthropiques, électrolyse, Biorock, restauration, récif coralliens.