



HAL
open science

Restauration d'une zone corallienne dégradée et implantation d'un jardin corallien à Bora Bora, Polynésie française

Bernard Salvat, Yannick Chancerelle, Muriel Schrimm, Richard Morancy,
Michel Porcher, Annie Aubanel

► To cite this version:

Bernard Salvat, Yannick Chancerelle, Muriel Schrimm, Richard Morancy, Michel Porcher, et al..
Restauration d'une zone corallienne dégradée et implantation d'un jardin corallien à Bora Bora,
Polynésie française. *Revue d'Écologie*, 2002, Sup9, pp.81-96. hal-03529942

HAL Id: hal-03529942

<https://hal.science/hal-03529942v1>

Submitted on 17 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RESTAURATION D'UNE ZONE CORALLIENNE DÉGRADÉE ET IMPLANTATION D'UN JARDIN CORALLIEN À BORA BORA, POLYNÉSIE FRANÇAISE

Bernard SALVAT¹, Yannick CHANCERELLE², Muriel SCHRIMM^{1,3}, Richard MORANCY³,
Michel PORCHER³ & Annie AUBANEL⁴

SUMMARY

The restoration of coral reef habitats by coral transplantation is a hot topic in the news today due to the accelerating degradation of the coral reef ecosystem all over the world. There is much discussion about research programs for the transplantation of corals and about actual field realizations and the motivation for coral reef restoration. But the implementation of such a project depends on a social request considering local or global cultural and economical situations. Projects are very costly and only applicable when important economical interests are involved such as the fight against erosion or tourism development.

In the lagoon of Bora Bora in French Polynesia, a fringing zone, degraded by coral sand extractions, led to an erosion of the coast damaging local private property in a sector well oriented toward tourism activities. The reconstruction of this degraded site (20,000 sq.m) required physically filling up holes, implementation of spurs, and putting into place artificial concrete structures to promote the natural colonization of corals and other reef organisms in order to reduce swell impacts. The creation of a coral reef garden was also part of the project with the transplantation of corals collected in the vicinity. Fifty groups of three different types of concrete blocks have been set out on the site and six others constitute the coral reef garden on which 311 coral colonies are transplanted.

Two and a half years after this restoration, the project proved to be successful. The coral reef garden flourished; it showed much diversification and little mortality among the corals colonies, and the natural colonization on the concrete substrate was teeming with corals, sea-urchins, mollusks, and fishes. But thirty months later, an exceptionally violent meteorological and oceanographical situation led to a catastrophic event which caused many transplanted coral as well as natural colonies in the vicinity to be killed off. Lagoon waters temperatures were recorded as high as 34°C and of the 311 transplanted coral colonies only 119 survived, most of them bleached or partly dead. All colonies of the genus *Acropora* died, while those of the genus *Psammocora* survived.

Methods for restoration and creation of coral reef gardens are highly controlled but they cannot always escape such catastrophic events such as the one in Bora Bora in December

¹ Centre de Biologie et d'Écologie Tropicale, EPHE, Université de Perpignan, F 66860 Perpignan.
E-mail : bsalvat@univ-perp.fr

² Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement, EPHE, BP 1013 Moorea, Polynésie française.

³ Carex Environnement, Avenue de l'Armée d'Afrique, F 13100 Aix-en-Provence.

⁴ Ifreco — Service de l'Urbanisme, BP 866, Papeete, Tahiti, Polynésie française.

2001. Physical restoration was successful but the biological transplantation of corals failed. Thus, when we consider how expansive a restoration project is, it is essential to conduct an historical inquiry on a potential coral transplantation site before implementing any project.

RÉSUMÉ

Les problèmes de restauration de zones coralliennes, avec transplantations de coraux, sont à l'ordre du jour compte tenu de la dégradation accélérée de cet écosystème à la surface de la planète. Les motivations des recherches dans ce domaine et celles des projets de restauration sur le terrain sont évoquées. Elles répondent à une demande sociale exprimée en fonction de considérations culturelles et économiques. Les projets sont coûteux et ne peuvent concerner que des cas très limités avec des intérêts économiques importants (lutte contre l'érosion, développement du tourisme).

À Bora Bora, en Polynésie française, une zone lagunaire frangeante, dégradée par des extractions de sédiment corallien, provoquait une érosion littorale. Son ré-aménagement comporte une restauration physique des lieux (comblement des fosses, réalisation d'épis...) et la mise en place de structures artificielles pour permettre la colonisation naturelle de coraux et autres organismes, afin de jouer le rôle de brise houle. Ce projet s'accompagne de la création d'un jardin corallien avec structures artificielles sur lesquelles sont fixés des transplants de coraux. Deux ans et demi après la fin des travaux, le jardin corallien affiche une communauté corallienne florissante et diversifiée avec très peu de mortalité des colonies transplantées, une croissance normale et la colonisation naturelle de coraux et d'autres organismes des récifs coralliens (oursins, mollusques, poissons). Cependant, un événement météorologique et océanographique exceptionnel, trente mois après la création du jardin corallien, a entraîné une forte mortalité des coraux transplantés comme ceux naturellement en place dans le secteur. Si les techniques nécessaires à la restauration de zones dégradées et à la création de jardins coralliens sont totalement maîtrisées, ces réalisations n'échappent pas aux variations temporelles des conditions de milieu qui peuvent être catastrophiques. Dans un tel cas, comme à Bora Bora en décembre 2001, la restauration physique reste à l'actif de l'opération, mais l'échec de la restauration biologique est à noter. Une étude historique, sur plusieurs décennies, des zones sujettes à des mortalités exceptionnelles s'impose donc avant tout choix de sites pour la réalisation de jardins coralliens dont les coûts sont très élevés.

INTRODUCTION

Les travaux en vue de la restauration d'écosystèmes dégradés se sont multipliés au cours des dernières décennies allant même jusqu'à la création d'écosystèmes (Lecomte *et al.*, 1995 ; Chapuis *et al.*, 2001). Le milieu marin littoral n'a pas échappé à ces investigations, tout particulièrement dans l'intertropical où deux écosystèmes sont importants aussi bien pour le fonctionnement de la zone côtière qu'au plan économique pour les populations riveraines : les mangroves et les récifs coralliens, en voie de disparition et de dégradation accélérées.

Pour les récifs coralliens, 10 % de leur superficie ont été irrémédiablement détruits à l'échelle mondiale (Wilkinson, 2000), soit par comblement (exemple : remblaiement pour construction d'aéroport), soit par des dégradations irréversibles (exemple : ports et zones urbaines, extractions de sable corallien). Pour les autres zones dégradées, la réhabilitation est possible. Elle passe par la suppression des perturbations, démarche écologique s'inscrivant dans la mise en place d'une gestion intégrée de l'ensemble de la zone côtière où les dégradations ont pour origine les activités humaines menées à terre (gestion des terres,...) comme sur les récifs eux-mêmes (méthodes destructives d'exploitation des ressources, tourisme...). Mais

cette option peut s'accompagner aussi d'une restauration du milieu dégradée par intervention directe en milieu corallien.

C'est une telle démarche que nous nous proposons d'exposer dans le présent article, en situant ces travaux de restauration de milieux coralliens dégradés dans leur contexte culturel, social et économique. En effet, menés par des chercheurs dans un cadre expérimental ou par des ingénieurs dans un objectif appliqué, ils résultent d'une forte demande sociale et exigent des crédits et des investissements conséquents de plusieurs partenaires pour leur réalisation.

Nous traiterons ce sujet en deux parties : une revue des motivations, expériences et résultats de travaux menés à ce sujet dans le monde, et une étude de cas en Polynésie française.

LA RESTAURATION DE SITES CORALLIENS DÉGRADÉS

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.

TRANSPLANTATION DE CORAUX, RESTAURATION DE SITES ET CRÉATION DE JARDINS CORALLIENS

Les premiers travaux réalisés par les chercheurs en ce domaine concernaient la transplantation des coraux d'un endroit à un autre (Maragos, 1974 ; Alcalá & Gomez, 1979 ; Birkeland *et al.*, 1979 ; Alcalá *et al.*, 1982). Leurs motivations et objectifs étaient de transplanter des coraux vivants sur des zones où ils étaient cassés ou morts à la suite d'une perturbation. Les travaux ont ensuite porté sur des restaurations proprement dites de zones dégradées, menées en vraie grandeur sur le terrain (Bouchon *et al.*, 1981 ; Woodley & Clark, 1989).

L'objectif d'implanter des « jardins coralliens » n'est apparu qu'ensuite. Cette réalisation peut intervenir dans un milieu corallien sain comme dans un milieu dégradé. Dans le premier cas, on parlera d'une « création » et dans le second, d'une « restauration ». Mais tous les intermédiaires existent et le cas de Bora Bora relève de cette mixité. Nous ne considérons pas ici les récifs artificiels, uniquement constitués de structures en béton, dont les objectifs sont — en milieu tropical mais aussi tempéré — de protéger les côtes, ni ces mêmes formations et structures destinées à augmenter les surfaces de substrat dur pour permettre le développement de peuplements benthiques et l'agrégation de poissons. C'est en effet en ce sens que sont compris généralement les termes « récifs artificiels ». Il faut noter, qu'à la différence des précédents, les projets de « restauration » de zones coralliennes, comme les projets de « création » de jardins coralliens, comprennent tous deux des transplantations de coraux. Mais ils comportent aussi, généralement, une base artificielle en béton ou autre matériau. Celle-ci a pour but de permettre la fixation des coraux transplantés. Elle peut être discrète lorsqu'il s'agit de constituer un jardin corallien de coraux branchus qui seront simplement fixés dans le substrat meuble, ou plus importante lorsque l'on veut créer une certaine diversité des formes de scléractiniaires, ce qui exige une base de fixation plus massive.

MOTIVATIONS DES RESTAURATIONS DE SITES DÉGRADÉS

Des restaurations ont été entreprises dans les zones coralliennes pour des raisons diverses de dégradation : échouages de bateaux, notamment en Floride et dans les Caraïbes (Hudson & Diaz, 1988 ; Mueller, 1999), rejets d'eau chaude à Guam (Birkeland *et al.*, 1979), pollution urbaine ou industrielle (Clark, 1997 ; Munoz-Chagin, 1997), méthode destructive de pêche à la dynamite (Alcala & Gomez, 1979, Fox *et al.*, 2000), blanchissement à Panama (Eakin, 2000). On notera que dans tous les cas il s'agissait de répondre à une demande sociale et à des besoins économiques que ce soit pour maintenir un écosystème corallien en bonne santé et fonctionnel afin de développer le tourisme ou pour pérenniser des ressources alimentaires nécessaires aux habitants riverains. On remarquera également que les préoccupations, pour la réalisation de ce type de restauration, sont apparues dans le contexte général de dégradation des écosystèmes à l'échelle planétaire, les acteurs prenant en compte des considérations éthiques. Les chercheurs se sont sentis concernés par ces problèmes et les décideurs ont également perçu l'intérêt de cette question, ce qui les a conduits à investir dans des restaurations aux coûts souvent très élevés. Dans tous les cas, les aspects culturels et traditionnels qui liaient les habitants aux récifs coralliens ont tenu une place importante dans les décisions politiques et leur réalisation au plan économique. A cet égard, l'exemple de Bora Bora est démonstratif compte tenu des ressources financières que le projet a nécessité et de leurs origines.

Compte tenu du développement récent des recherches et travaux sur la restauration de zones coralliennes, une conférence internationale s'est tenue à ce sujet en Floride en 1999 (National Coral Reef Institute, 1999). Par ailleurs, une session spéciale s'est déroulée sur ce thème lors du neuvième Symposium International sur les Récifs Coralliens (Bali, 2000), session au cours de laquelle plus de 30 communications orales et posters ont été présentés.

LES PROJETS DE RESTAURATION DE SITES CORALLIENS DU PROGRAMME RECRÉER LA NATURE

Dans le cadre du programme « Recréer la Nature » deux projets coralliens ont été retenus et subventionnés : le premier sur l'île de la Réunion et le second sur l'île de Bora Bora en Polynésie française.

À la Réunion, il s'agissait de la restauration d'un platier récifal dégradé par un cyclone (Chabanet *et al.*, 1998 ; Chabanet & Naim, 2001 ; Naim *et al.*, 2001). La première phase consistait à implanter des colonies coralliennes branchues avec leur faune associée de poissons. La seconde prévoyait la mise en place de dispositifs en béton pour aboutir à une concentration de la faune grâce aux implants de colonies coralliennes. Les supports financiers à ce projet proviennent des ministères de l'Environnement et de la Recherche, mais sans participation locale ce qui le différencie du projet de Bora Bora. Le coût total du projet à la Réunion a été de 8 080 Euros.

A Bora Bora, le projet comportait plusieurs objectifs. À la suite de travaux de dragages de sédiments coralliens en zone frangeante, le littoral de la pointe sud de l'île subissait une érosion préjudiciable aux riverains et au bon fonctionnement de l'écosystème récifo-lagonaire dans un secteur où les implantations hôtelières sont nombreuses. Ces extractions avaient de plus provoqué des destructions et des

nécroses dans les massifs coralliens voisins. La lutte contre l'érosion passait par un réaménagement du lagon et comportait deux volets. Le premier consistait à combler des fosses artificiellement draguées en récupérant les colonies coralliennes qui s'étaient développées au fond ou sur leurs bordures, et ensuite à construire des épis et à ré-ensabler les plages. Le second correspondait à la mise en place de blocs de béton simulant des blocs coralliens existant naturellement dans le secteur. Ces infrastructures devaient agir comme des brise-houle et se couvrir naturellement de coraux identiques à ceux du voisinage. Conjointement à cette lutte contre l'érosion littorale, la création d'un jardin corallien a été envisagée. Conçu selon des principes paysagers, il nécessitait la mise en place de blocs de béton et la fixation de coraux transplantés à partir d'un site donneur voisin. Outre son intérêt touristique, il participait également à la lutte contre l'érosion des plages.

La motivation des initiateurs de ce projet résultait d'une convergence d'intérêts des partenaires concernés. Les chercheurs et ingénieurs (auteurs du présent article) étaient sensibles à la transformation du milieu, et tout particulièrement aux dégradations inconsidérées dues aux extractions de sable corallien et à l'érosion du rivage. Par ailleurs, ils étaient à la recherche d'un site dégradé à restaurer et d'un site expérimental pour réaliser un jardin corallien à des fins touristiques. Les ministères polynésiens de l'Équipement, de l'Environnement et du Tourisme, ainsi que la Mairie de Bora Bora, étaient préoccupés, chacun en fonction de ses compétences, par la situation écologique à la pointe sud de l'île. C'est dans ce contexte qu'a été initiée l'action menée au titre de Recréer la Nature : un projet de réaménagement, de restauration du lagon et de création d'un jardin corallien, auquel les ministères concernés ont participé par le financement des études et la diffusion locale du message. Au total, le montant des travaux a été de 760 000 Euros, avec des contributions du ministère métropolitain de l'Environnement, de plusieurs ministères du Gouvernement de la Polynésie française, et de l'Agence Française de Développement également sollicitée. La restauration physique des fonds du lagon et du littoral a représenté les quatre cinquièmes du budget, le restant étant dévolu à la création du jardin corallien.

RESTAURATION ET JARDIN CORALLIEN À BORA BORA

En Polynésie française, les études de restauration des récifs dégradés ou de transplantations de coraux ont fait l'objet de quelques publications (Jardin, 1995), dont certaines sont des notes préliminaires au présent travail (Porcher & Salvat, 1999 ; Porcher *et al.*, 2000 ; Porcher & Salvat, 2001).

Les anciennes zones d'extractions de matériaux coralliens en zone récifale frangeante (Salvat *et al.*, 1979 ; Salvat, 1987b) sont parmi les premiers habitats à restaurer en Polynésie française car, comme dans toutes les zones lagonaires des pays en développement, elles se sont multipliées anarchiquement depuis des décennies en raison de besoins en matériaux (Salvat, 1987a). Ces matériaux coralliens sont, en effet, moins coûteux que ceux extraits de carrières terrestres. Par ailleurs, il est politiquement plus facile de prélever sur le domaine public maritime que de résoudre les problèmes fonciers inhérents au domaine terrestre. Les fosses ainsi artificiellement créées dans le lagon piègent les particules sédimentaires fines et contribuent à la dégradation des zones coralliennes saines du voisinage lors de fréquentes remises en suspension de ces fines. Sans compter l'aspect inesthétique de

ces secteurs pour le tourisme et la suppression de zones frangeantes récifales indispensables à la survie des populations du récif (zone de grossissement des larves de poissons, Planes *et al.*, 1993 ; Legendre *et al.*, 1997). Rétablir la topographie initiale et un substrat adéquat à une recolonisation corallienne exige souvent des travaux d'ingénierie avant que ne débutent les opérations de transplantation de coraux.

LE SITE ÉTUDIÉ, LE PROJET DE RESTAURATION ET DE JARDIN CORALLIEN

L'île de Bora Bora (Fig. 1), archipel de la Société en Polynésie française, constitue un haut lieu touristique (Salvat & Pailhe, 2002). Le cadre paysager de cette île volcanique de faible altitude au milieu de son écrin, lagon blanc et vert entouré de l'océan bleu profond, en fait la perle de la Polynésie. La surface du lagon (78 km²) l'emporte largement sur la surface des parties terrestres (38 km²). Le site d'étude, la Pointe Matira, est localisé au sud de l'île, secteur où les implantations hôtelières sont importantes. Il présente une profondeur d'eau qui n'excède pas 2-3 m, une superficie de 20 000 m² avec un linéaire côtier de 460 m (Fig. 1).

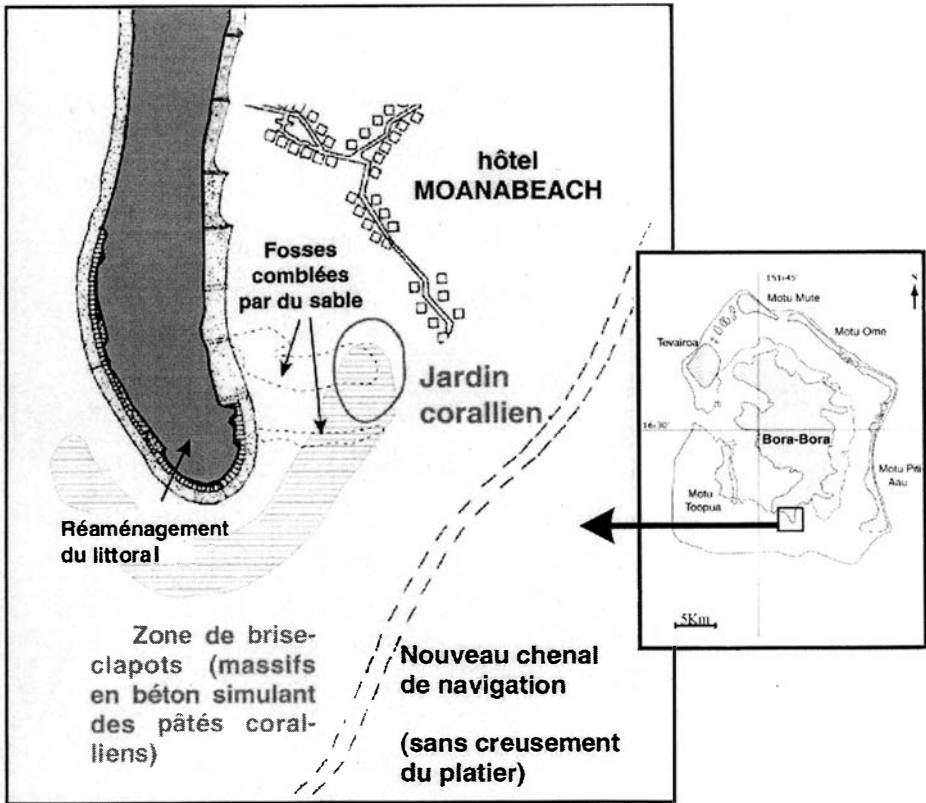


Figure 1. — Localisation de la zone de restauration et du projet de jardin corallien, sur la pointe sud de l'île Bora-Bora.

Le principe choisi pour la restauration et la constitution du jardin corallien reposait sur la mise en place de blocs de béton, avec transplantation de coraux par simple fixation à l'aide d'un ciment approprié. Ces techniques, encore récemment utilisées (Munoz-Chagin, 1997), ne sont cependant pas les seules. Des tapis en plastique ont été employés comme substrat artificiel (Clark & Edwards, 1995), de même que des graviers lorsqu'il s'agit de transplantation de coraux branchus du genre *Acropora* (Bowden-Kerby, 1996). Par ailleurs, l'utilisation de transplants coralliens issus de sites donneurs n'est pas le seul moyen de se fournir en colonies coralliennes. Il est en effet possible de « planter » des coraux élevés en laboratoire (Raymundo & Maypa, 1999) ou encore de déverser dans le milieu des milliers de larves afin qu'elles se fixent sur le substrat artificiellement créé (Sammarco *et al.*, 1999).

RESTAURATION PHYSIQUE DU SITE

Les fosses, responsables du blocage du transit sédimentaire arrivant au littoral, ont été remblayées. Les 10 500 m³ nécessaires ont été prélevés par dragage hydraulique à deux kilomètres au sud, sur la pente interne du lagon, là où l'accumulation du sédiment corallien se fait naturellement. Des blocs artificiels de béton, conçus de façon à avoir l'aspect (forme, couleur) et la structure (cavités, aspérités) de massifs coralliens ont été construits. De trois types (2 à 17 tonnes pour un volume de 0,6 à 7 m³), ils peuvent être imbriqués différemment pour constituer des massifs aux formes variées (Fig. 2). Disposés pour provoquer le déferlement des houles lagonaires et limiter leur action érosive au littoral, 50 massifs ont ainsi été répartis sur la zone, après étude et repérage sur photographie aérienne de façon à se confondre avec les massifs coralliens naturels (Fig. 3) et à respecter l'esthétique du site. Une fois immergés, ces blocs se recouvrent rapidement d'un gazon algal et ressemblent tout à fait à des massifs coralliens morts. Les opérations de restauration physique se sont déroulées en 1998 et au cours du premier semestre 1999.

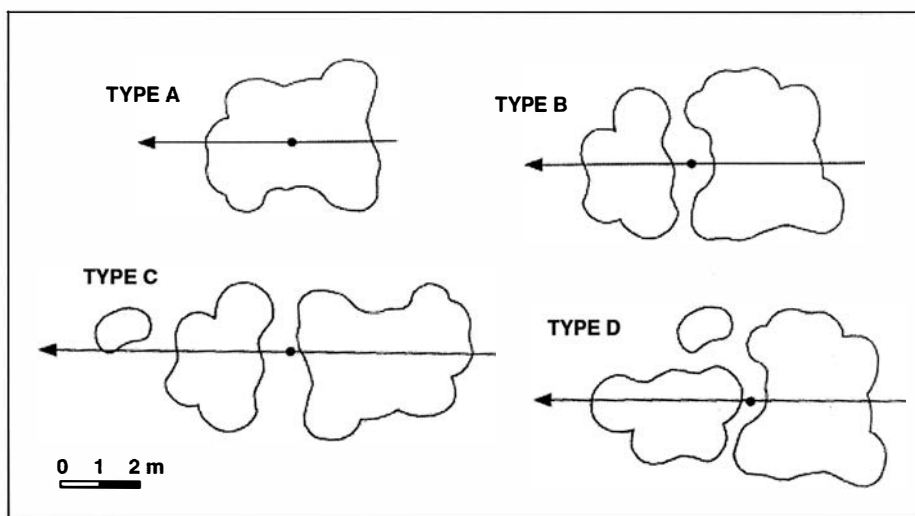


Figure 2. — Les trois types de blocs de béton assemblés selon quatre formations en massifs.

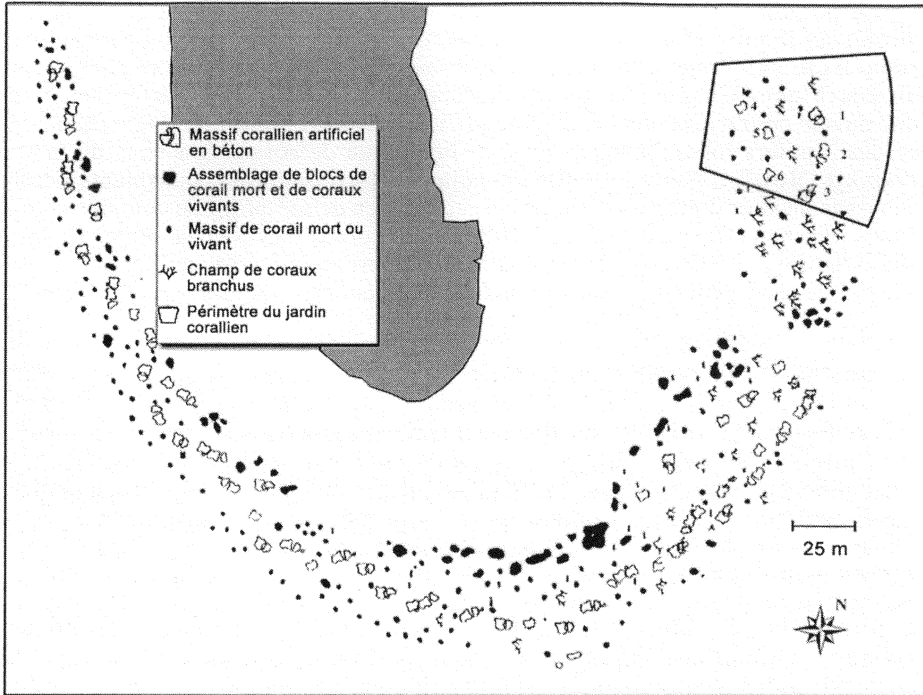


Figure 3. — Localisation des 50 massifs artificiels implantés dans la zone de restauration physique et délimitation du jardin corallien.

LE JARDIN CORALLIEN

Le projet de constitution d'un jardin corallien concerne la partie nord de la zone dégradée à restaurer et couvre approximativement le sixième de celle-ci, soit une surface d'environ 3 500 m². Il comporte 11 blocs répartis en 6 massifs artificiels sur lesquels ont été transplantées des colonies coralliennes. Elles ont été prélevées dans des sites aux conditions écologiques analogues à celles du site receveur : faible profondeur, exposition régulière aux houles du lagon, abondance des espèces retenues pour transplantation, facilité d'accès et de prélèvement, faible distance du site récepteur, courant régulier. Les sites donneurs présentant ces critères ont été localisés à moins de deux kilomètres au sud de la zone à restaurer. Par ailleurs, des coraux branchus (*Acropora*) ont été récupérés dans les fosses comblées lors de la restauration physique de la zone afin d'être transplantés dans le jardin corallien.

Le choix des espèces coralliennes à prélever tenait compte de leur présence naturelle à proximité du site récepteur et de leur capacité d'adaptation ainsi que d'une diversité de formes et de structures coralliennes (massives, foliacées, branchues, tabulaires, encroustantes, digitées, etc.) nécessaire à l'esthétique du jardin. Ces colonies appartenaient aux genres suivants : *Porites*, *Pavona*, *Acropora*, *Montipora*, *Pocillopora*, *Fungia*, *Herpolitha*, *Cyphastrea*, *Psammocora*.

Leur transport a été effectué sous l'eau. Le collage sur les blocs a nécessité la préparation préalable des surfaces concernées, l'utilisation d'un produit spécialement élaboré et ayant un temps de collage très court. L'opération a exigé plusieurs opérateurs et le suivi rigoureux d'un plan de transplantation des colonies sur les massifs, plan établi au préalable grâce aux études relatives aux paysages coralliens (Chancerelle & Salvat, 1999). La transplantation de 311 colonies coralliennes a eu lieu en juin 1999. La figure 4 donne un exemple de relevé de la situation des colonies transplantées sur les trois blocs constituant le massif n° 3.

Suivi du jardin corallien

Le suivi du jardin corallien a été réalisé en juillet, septembre et décembre 1999, mars et juillet 2000, octobre 2001 et février 2002, c'est-à-dire 1, 3, 6, 9, 13, 28 et 32 mois à compter de la mise en place des blocs et de la transplantation des coraux.

Chaque suivi comportait la photographie des massifs, la mesure des 32 colonies suivies individuellement quant à leur croissance (longueur maximale et largeur maximale perpendiculaire à la longueur), le diagnostic de l'état des 311 colonies initialement transplantées (saine, blanche, blanche avec parties nécrosées, nécrosée partiellement, morte). Les colonies blanches témoignent d'un stress entraînant la rupture de la symbiose entre le corail et ses algues symbiotiques zooxanthelles, phénomène qui intervient notamment lorsque la température des eaux est anormalement élevée ou les rayons ultra-violet trop importants, à l'occasion d'un calme plat des eaux (Salvat, 1992a ; Drollet *et al.*, 1995).

Survie, mortalité, état des colonies coralliennes transplantées

Le tableau I donne, par genre, le nombre de colonies toujours vivantes au moment des observations. On constate une excellente survie jusqu'au 28^e mois (90 %) mais une forte mortalité entre le 28^e et le 32^e mois (38,3 % de survie). Entre 1 et 28 mois après transplantation, elle concerne presque tous les genres. En revanche, entre le 28^e et le 32^e mois, des mortalités ou des états de santé différents selon les genres sont observés :

— mortalité totale des 83 colonies d'*Acropora* encore vivantes au 28^e mois, de presque tous les *Pocillopora damicornis*, de la moitié des *Montipora* et des *Pocillopora verrucosa*, et d'un quart des *Pavona* ;

— excellente survie des trois colonies de *Psammocora*, observées saines au 32^e mois, et des *Porites*, avec cependant des indications de stress importants (colonies blanches ou en partie nécrosées) ;

— disparition, sans doute prélevés par des habitants ou des touristes, des coraux *Fungia* et *Herpolitha* qui sont des genres non fixés.

Les 32 colonies mesurées ont montré une croissance linéaire dans les trois dimensions, conforme à celle de colonies témoins non transplantées. Les formes branchues affichent une croissance plus importante dans l'espace que les formes massives et donnent plus de relief aux massifs coralliens artificiellement constitués, mais les formes massives contribuent à la diversité de structure et des couleurs dans le jardin corallien.

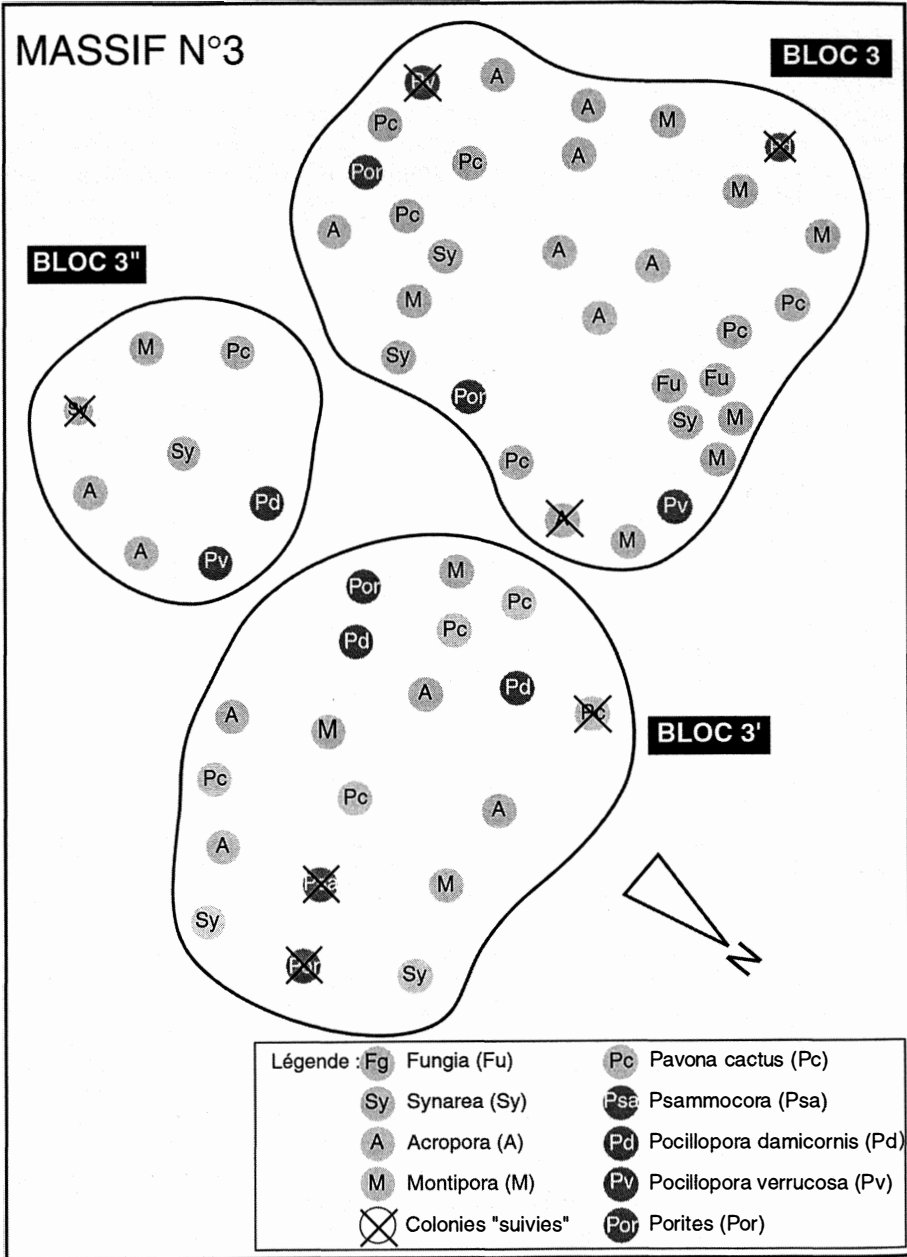


Figure 4. — Schéma des trois blocs (vu de dessus) constituant le massif n° 3, avec localisation des colonies coralliennes transplantées. Les croix repèrent les colonies dont la croissance a été suivie tout au long de l'étude.

TABLEAU I

Nombre de colonies observées vivantes (par genre ou espèce de coraux) lors de chaque prospection, de juin 1999 à février 2002, au cours des 32 mois de suivi après la transplantation.

| Date | | Juin 1999 | Juil. 1999 | Sept. 1999 | Déc. 1999 | Mars 2000 | Juil. 2000 | Oct. 2001 | Fév. 2002 |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Nombre de mois écoulés | | 0 | 1 | 3 | 6 | 9 | 13 | 28 | 32 |
| Nombre de colonies vivantes, par genre ou espèce | <i>Acropora</i> spp. | 86 | 86 | 86 | 86 | 85 | 85 | 83 | 0 |
| | <i>Montipora</i> spp. | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 71 | 36 |
| | <i>Pavona cactus</i> | 74 | 74 | 73 | 72 | 69 | 68 | 59 | 45 |
| | <i>Pocillopora damicornis</i> | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 11 | 1 |
| | <i>Porites (Synarea) rus</i> | 23 | 23 | 23 | 22 | 21 | 20 | 20 | 15 |
| | <i>Psammocora</i> spp. | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | <i>Fungia</i> spp. | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 8 | 0 |
| | <i>Porites</i> spp. | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 |
| | <i>Cyphastrea</i> spp. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | <i>Pocillopora verrucosa</i> | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | 9 | 5 |
| <i>Herpolitha limax</i> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| Nombre total de colonies | | 311 | 311 | 310 | 306 | 301 | 299 | 280 | 119 |
| Pourcentage total | | | 100 | 99,7 | 98,4 | 96,8 | 96,1 | 90,0 | 38,3 |

Colonisation naturelle par les coraux et par d'autres organismes

De jeunes colonies coralliennes se sont implantées naturellement sur les blocs artificiels. Elles ont été dénombrées 28 et 32 mois après la mise en place des massifs. Au total, 53 colonies avaient colonisé le substrat : 26 *Acropora*, 19 *Pocillopora damicornis*, 6 *Pavona cactus* et 2 *Montipora*. Toutes ces jeunes colonies étaient vivantes lors des relevés d'octobre 2001 (28^e mois) mais mortes en février 2002 (32^e mois), à l'exception de 11 des 19 colonies de *Pocillopora damicornis*. Leur diamètre était compris entre 2 et 10 cm, avec une majorité de 6 cm. Le recrutement naturel sur les blocs comprend les principaux genres de coraux transplantés, ce qui confirme le bien fondé du choix de ces espèces. La majorité des recrues naturelles sont des *Acropora* et il est paradoxal de constater que c'est l'espèce la plus sensible au stress thermique, décimée à 100 %. Les colonies recrutées naturellement sur les blocs n'ont pas échappé à la mortalité frappant les colonies transplantées qui présentent les mêmes réactions au stress environnemental. Ce phénomène n'est donc pas une conséquence de leur transplantation.

Des poissons ont naturellement fréquenté ou colonisé le jardin corallien. Des représentants de neuf familles, classés en deux groupes, ont été recensés. Le premier comprend des familles inféodées aux massifs artificiels et aux colonies de coraux transplantées [*Chaetodontidae* (*Chaetodon citrinellus*, *C. auriga*...), *Pomacentridae* (*Pomacentrus nigricans*, *Chromis cæruleus*, *Dascyllus aruanus*), *Labridae* et *Balistidae*], traduisant bien une restauration réussie. Le second groupe est constitué d'espèces de passage : *Acanthuridae* (*Acanthurus triostegus*), *Carangi-*

dae (*Caranx melampygus*), *Scaridae* (*Scarus* sp.), *Siganidae* (*Siganus argenteus*), *Mugilidae* (*Crenimugil crenilabis*) et *Mullidae* (*Upeneus vittatus*). La faune ichthyologique du jardin corallien est tout à fait analogue à celle d'un récif frangeant du voisinage.

Des échinides ont colonisé naturellement les massifs artificiels dès leur mise en place : *Tripneustes gratilla*, oursin aux piquants courts, s'accroche fortement au substrat même plat alors qu'*Echinometra mathaei*, oursin aux piquants plus allongés, niche dans les anfractuosités. Pendant les 28 premiers mois, de 30 à 50 *Tripneustes* et une dizaine d'*Echinometra* ont été dénombrés. Il s'agit d'oursins habituels des récifs frangeants et des chenaux entre platiers. Leurs abondances étaient analogues à celles observées sur les massifs coralliens naturels.

Des bécotiers (*Tridacna maxima*), bivalve commun des lagons polynésiens, se sont fixés sur les blocs artificiels, mais en petit nombre, une dizaine d'individus au total d'une taille de 5 centimètres environ sur l'ensemble du jardin corallien. Ils étaient toujours vivants en février 2002.

La mortalité de décembre 2001

Pendant les deux premières années de l'expérimentation, aucun phénomène particulier d'ordre météorologique ou océanographique n'a été relevé. La réussite de la transplantation des coraux s'est traduite par une croissance normale des colonies. La restauration était donc un franc succès jusqu'à l'intervention d'une perturbation majeure au cours de la dernière semaine de décembre 2001.

Sur plusieurs îles sous le vent de l'archipel de la Société (Raiatea, Tahaa, Huahine et Bora Bora), une période de calme météorologique a été observée en décembre 2001, conjointement à de fortes précipitations et à l'absence de houle du sud. Ces conditions météorologiques et océanographiques ont perduré, fait exceptionnel, pendant plusieurs mois. Elles ont entraîné un échauffement par insolation des eaux des parties méridionales des récifs et des lagons, avec des températures de plus de 33° à Bora Bora. À l'extérieur du récif, entre le 1^{er} décembre 2001 et le 5 février 2002, les eaux océaniques affichaient des températures moyennes journalières supérieures à 27,5°, avec un maximum de 29,6° début février. Ce maximum est proche de la limite de tolérance des coraux (30°) au-delà de laquelle ils blanchissent. Dans les parties lagonaires méridionales de ces quatre îles, des mortalités importantes des peuplements ichthyologique et benthique (incluant les coraux) ont été notées (D. Schneider, G. Besnard, C. Monier, A. Aubanel, com. pers.)

A Bora Bora, la zone de mortalité totale s'étendait depuis la crête récifale face à l'océan jusqu'à la plaine sableuse du lagon. Couvrant la crête et le récif barrière sur près d'une centaine de mètres de largeur, elle s'étirait sur plus de 10 km du récif barrière, de la pointe Turoa à la Pointe Tupitipiti, soit environ 1/5 de la barrière récifale de l'île (D. Schneider, com. pers.). Coraux, autres invertébrés et poissons étaient morts, dégageant une odeur pestilentielle, dans des eaux calmes, turbides et vertes.

De telles situations et leurs conséquences ne sont pas inhabituelles en Polynésie. Lorsqu'elles sont moins importantes, elles déclenchent des phénomènes de blanchissement des coraux, sans entraîner obligatoirement leur mort, ni celle de toute la faune récifale. Au-delà de la limite supérieure des températures pour les organismes, une crise dystrophique est observée, avec des eaux qui stagnent et qui s'appauvrissent en oxygène. En effet, l'apport de matières organiques détritiques et la persistance des conditions de milieu (calme et température élevée) permettent un développement considérable des bactéries et du phytoplancton qui conduit à

l'anoxie du milieu et à la mortalité des peuplements récifaux. Des échantillons d'eau prélevés le 4 janvier 2002 révélaient l'existence d'une efflorescence algale modérée (5-7 millions de cellules/litre). Les algues nanoplanctoniques (< 20 µm) étaient dominées par les dinoflagellés avec des diatomées dont la toxicité n'a pas été démontrée à ce jour (analyses de B. Delesalle, com.pers.). Ces phénomènes d'eaux « vertes », parfois « rouges » en d'autres circonstances, se sont déjà produits à Bora Bora en 1984 (E. Christian, com. pers. ; Salvat, 1992a, 1992b) et en 1986 (D. Schneider, com. pers.), accompagnés ou non de blanchissements.

Le site restauré et le jardin corallien, bien que sur la marge nord de cette zone de mortalité massive, en ont également subi les effets. Le 6 janvier, on relevait dans le jardin corallien une température des eaux de 34°, anomalie qui s'est prolongée jusqu'à la fin du mois (Schneider, com. pers.). L'analyse des résultats du suivi révèle des sensibilités différentes des coraux à ce stress thermique. Les *Acropora* sont les plus atteints (100 % de mortalité) alors que les *Psammocora* survivent tous, et que les *Porites rus* et les *Pavona cactus* se maintiennent (25 % de mortalité) mais affichent une mauvaise santé un mois et demi après l'évènement. Les autres coraux réagissent diversement : 50 % de mortalité pour les *Montipora* et les *Pocillopora verrucosa*. La sensibilité des genres subissant un stress thermique, éventuellement suivi de mortalité, est identique à celle relevée lors du blanchissement intervenu en Polynésie française sur les pentes externes de Moorea (Salvat, 1992a, b ; Hoegh-Guldberg & Salvat, 1995). Avec des eaux à 29-30°, il s'était étalé sur 5 mois et, à son terme, les colonies coralliennes avaient récupéré ou étaient mortes. A Bora Bora, le phénomène a été bien plus intense avec des températures de 33-34° qui ont provoqué une mortalité plus rapide. Les *Acropora* furent les plus sensibles. A Moorea près de 97 % de leurs colonies blanchirent mais seulement 51 % moururent, alors qu'à Bora Bora elles étaient déjà toutes mortes moins de deux mois après le début de l'évènement. A Moorea, 72 % des colonies de *Montipora* ont blanchi mais toutes ont récupéré, alors qu'à Bora Bora la moitié étaient déjà mortes, les autres étant encore blanches. Il est certain que la situation observée à Bora Bora en février 2002 n'est que provisoire et qu'un bon pourcentage des colonies repérées blanches ou nécrosées vont finalement mourir. En revanche, les *Psammocora* et les *Pavona* ont bien résisté.

Sur les 119 colonies encore vivantes au 32^e mois, 102 sont en mauvaise santé avec des parties blanches et/ou nécrosées. Les parties nécrosées sont couvertes de gazons algaux et ne seront pas « réinvesties » par le corail. Les parties blanches qui correspondent à un départ des zooxanthelles pourront reprendre leur couleur par ré-infestation de nouvelles algues symbiotiques ou par multiplication de celles restées dans le corail survivant, ou encore elles finiront par mourir. Les conditions de milieu, lors de l'évènement et postérieurement, décideront du devenir de la communauté corallienne.

Les *Acropora*, les *Pocillopora* et les *Porites* sont les principaux genres transplantés (Alcala & Gomez, 1979 ; Harriott & Fisk, 1988 ; Clark & Edwards, 1995 ; etc.). Les taux de survie de ces coraux mentionnés dans la littérature sont très variables en fonction des espèces et des conditions du milieu récepteur. Clark & Edwards (1995) relèvent de très fortes mortalités d'*Acropora* et une bonne résistance des *Porites*, comme dans notre expérimentation. Les *Acropora* sont souvent utilisés pour des transplantations en raison de leur forme branchue facile à récolter et à fragmenter, de leur bonne reprise à partir de fragments, de leur croissance rapide et leur apparence esthétique. A la Réunion, Chabanet & Naim (2001) font état d'une très forte mortalité des *Acropora* transplantés, mais ceux-ci ont été détruits par l'activité humaine (braconnage, piétinement) sur le site de restauration.

CONCLUSION

La restauration des caractéristiques physiques de la zone dégradée (comblement des fosses, mise en place de blocs artificiels en béton, formation d'épis et réengorgement des plages), première étape du programme, a permis de rendre au secteur son fonctionnement initial et de limiter les phénomènes d'érosion littorale. La seconde étape, la mise en place d'un jardin corallien, a souligné également la maîtrise des transplantations de diverses espèces de coraux, présentant une santé et une croissance satisfaisante jusqu'au 28^e mois. Cependant, à ce stade de l'expérimentation, un événement météorologique et océanographique exceptionnel a été à l'origine d'une très forte mortalité dans le jardin corallien comme dans l'ensemble du secteur où se trouvaient des communautés coralliennes naturellement en place.

Ce programme souligne ainsi que la maîtrise des techniques de restauration de récifs coralliens est indispensable, mais pas suffisante pour atteindre totalement les objectifs fixés et qu'une étude historique sur plusieurs décennies des zones susceptibles de subir ce type de phénomènes s'avère indispensable préalablement au lancement de telles opérations aux coûts financiers importants.

REMERCIEMENTS

Ce travail réalisé dans le cadre du Programme National « Recréer la Nature » du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement n'a été possible que grâce aux contributions financières de ce ministère et du Gouvernement de la Polynésie française avec intervention des Ministères de l'Équipement, de l'Environnement et du Tourisme ainsi que de la municipalité de Bora Bora. Les auteurs qui remercient ces ministères de l'intérêt qu'ils ont porté au projet sur Bora Bora, ont placé leur action dans le cadre de l'Initiative Française pour les Récifs Coralliens (IFRECOR), déclinaison nationale de l'Initiative Internationale en faveur des Récifs Coralliens (ICRI) à laquelle la France apporte son soutien depuis 1994. Les auteurs remercient les collègues qui leur ont transmis des informations rapportées dans cet article : Erwin Christian, Bruno Delesalle, Christian Monier, Denis Schneider. Leurs remerciements vont également aux organisateurs du colloque de restitution des résultats du Programme « Recréer la Nature » qui s'est tenu à Grenoble en septembre 2001, ainsi qu'à Geneviève Barnaud et Jean-Louis Chapuis pour leurs commentaires éclairés sur le manuscrit proposé.

RÉFÉRENCES

- ALCALA, A.C. & GOMEZ, E.D. (1979). — Recolonization and growth of hermatypic corals in dynamite blasted coral reefs in the Central Visayas, Philippines. Pp. 645-661, in : *Proc. Int. Symp. Mar. Biogeog. & Evol. in the Southern Hemisphere*. N.Z. DSIR, Information Series n° 137.
- ALCALA, A.C., GOMEZ, E.D. & ALCALA, L.C. (1982). — Survival and growth of coral transplants in central Philippines, Kalikasan. *Philip. Journ. Biol.*, 11 : 136-147.
- BIRKELAND, C., RANDALL, R.H. & GRIMM, G. (1979). — Three methods of coral transplantation for the purpose of reestablishing a coral community in the thermal effluent area at Tanguisson power plant. *University of Guam Marine Laboratory, Technical Report*, 60 : 24.
- BOUCHON, C., JAUBERT, J. & BOUCHON-NAVARRO, Y. (1981). — Evolution of a semi-artificial reef built by transplanting coral heads. *Tethys*, 10 : 173-176.
- BOWDEN-KERBY, A. (1996). — Coral transplantation in sheltered habitats using unattached and cultured colonies. Pp. 2063-2068, in : *Proc. 8th Int. Coral Reef. Symp.*, Panama, vol. 2.
- CHABANET, P. & NAIM, O. (2001). — Restauration d'un platier récifal corallien par le biais de transplantations de coraux scléactiniaires branchus isolés et/ou associés à leur faune ichtyologique, et de la pose de structures artificielles. Pp. 15-22, in : J.-L. Chapuis, V. Barre, V. & G. Barnaud (Eds)

- (2001), *Programme national de recherche « Recréer la Nature : réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes »*. Principaux résultats scientifiques et opérationnels. MATE, MNHN, Paris
- CHABANET, P., NAIM, O., GAPPER, C., KAY, T. & CHOUSSY, D. (1998). — Restoration of a damaged coral reef flat on Réunion island by the removal of buddings of corals and their associated fish fauna : preliminary results. *Amer. Zool.*, 37 : 40 A.
- CHANCERELLE, Y. & B. SALVAT, B. (1999). — Paysages sous-marins coralliens : classification et cartographie satellitaire. Pp. 1-10, in : *Coast GIS'99. GIS and new advances in integrated coastal management*, Brest, 9-11 sept. 1999.
- CHAPUIS, J.-L., BARRE, V. & BARNAUD, G. (Eds) (2001). — *Programme national de recherche « Recréer la Nature : réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes »*. Principaux résultats scientifiques et opérationnels. M.A.T.E., M.N.H.N., Paris.
- CLARK, T. (1997). — Tissue regeneration rate of coral transplants in a wave exposed environment, Cape d'Aguilar, Hong Kong. Pp. 2069-2074, in : *Proc. 8th Coral Reef Int. Symp.*, Panama, vol. 2.
- 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.
- DROLLET, J.H., FAUCON, M. & MARTIN, P.M.V. (1995). — Elevated sea-water temperature and solar UV-B flux associated with two successive coral mass bleaching events in Tahiti. *Mar. Freshwater Res.*, 46 : 1153-1157.
- EAKIN, C.M. (2000). — A test of post bleaching recovery using coral fragments as seedlings. Pp. 226, in : *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.* Bali, Indonesia, Abstract volume.
- FOX, H.E., PET, JOS, S., DAHURI, R. & CALDWELL, R.L. (2000). — Coral reef restoration after blast fishing in Indonesia. Pp. 226, in : *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.* Bali, Indonesia, Abstract volume.
- HARRIOTT, V.J. & FISK, D.A. (1988). — Coral transplantation as a reef management option. Pp. 375-379, in : *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp.*, Australia, Vol. 2
- HOEGH-GULDBERG, O. & SALVAT, B. (1995). — Periodic mass-bleaching and elevated sea temperatures : bleaching of outer reef slope communities in Moorea, French Polynesia. *Mar. Ecol. Prog. ser.*, 121 : 181-190.
- HUDSON, J.H. & DIAZ, R. (1988). — Damage survey and restoration of the M. Wellwood grounding site, Molasses Reef, Key Largo National Marine Sanctuary. Pp. 231-236, in : *Proc. 6th Coral Reef Int. Symp.*, Australia.
- JARDIN, C. (1995). — *Biologie de reproduction de quelques coraux scléractinaires en Polynésie française : application à la restauration d'un site lagunaire dégradé*. Thèse, Université française du Pacifique.
- LECOMTE, J., LEGAY, J.M., BARRE, V. & BERLAN-DARQUE, M. (Eds) (1995). — Recréer La Nature, Colloque d'Orx. *Natures Sciences Société*, 3 (hs).
- LEGENDRE, P., GALZIN, R. & HARMELIN-VIVIEN, M. (1997). — Relating behavior to habitat : solutions to the fourth- corner problem. *Ecology*, 78 : 547-562.
- MARAGOS, J.E. (1974). — Coral transplantation : a method to create, preserve, and manage coral reefs. *US Sea Grant Advisory Report*. UNIHI-SEAGRANT-AR-74-03, CORMAR-14.
- MUELLER, E. (1999). — Reef restoration : science or technology ? Pp. 142, in : *Int. conf. on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring and restoration*. Fort Lauderdale, Floride, USA, Abstract volume.
- MUNOZ-CHAGIN, R.F. (1997). — Coral transplantation program in the Paraiso coral Reef, Cozumel Island, Mexico. Pp. 2075-2078, in : *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panama, vol. 2.
- NAIM, O., PRINGENT, W. & BOUCHER, N. (2001). — Utilisation de la croissance de transplants du scléractinaire hermatypique *Acropora muricata* (Linnaeus, 1758) comme bio indicateur (Ile de la Réunion, Océan Indien). *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, 56 : 201-220.
- National Coral Reef Institute (Ed.) (1999). — *International conference on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring and restoration*. Fort Lauderdale, Florida, USA, Abstract volume.
- PLANES, S., LEFEVRE, A. & GALZIN, R. (1993). — Spatio-temporal variability in fish recruitment to a coral reef (Moorea, French Polynesia). *Coral Reef*, 12 : 105-113.
- PORCHER, M. & SALVAT, B. (1999). — A restoration of damaged coastal zone and reef flat in Bora Bora Island (Society, French Polynesia). Pp. 160, in : *Int. conf. on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring and restoration*. Fort Lauderdale, Floride, USA, Abstract volume.
- PORCHER, M. & SALVAT, B. (2001). — Réhabilitation de zones récifales coralliennes dégradées. Pp. 23-30, in : J.-L. Chapuis, V. Barre & G. Barnaud (Eds), *Programme national de recherche « Recréer la Nature : réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes »*. Principaux résultats scientifiques et opérationnels. MATE & MNHN, Paris.

- 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). Pp. 349, in : *9th Int. Coral Reef Symp.*, Bali, Indonesia, Abstract volume.
- RAYMUNDO, L.J. & MAYPA, A.P. (1999). — Using cultured coral to rehabilitate a degraded reef in the central Philippines. Pp. 160, in : *Int. conf. on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring, and restoration*, Fort Lauderdale, Florida, USA, Abstract volume.
- SALVAT, B. (1987a). — *Human impacts on coral reefs : facts and recommendations*. Antenne Muséum EPHE, French Polynesia.
- SALVAT, B. (1987b). — Dredging in coral reefs. Pp. 165-184, in : B. Salvat (Ed.), *Human impacts on coral reefs : facts and recommendations*, Antenne Muséum EPHE, Tahiti, French Polynesia.
- SALVAT, B. (1992a). — Blanchissement et mortalité des scléactiniaires sur les récifs de Moorea (Archipel de la Société) en 1991. *C.R. Acad. Sci.*, 314 : 105-111.
- SALVAT, B. (1992b). — The 1991 Bleaching event in the Society Islands, French Polynesia. Pp. 73, in : *7th Int. Coral Reef Symp.*, Guam, Abstract volume.
- SALVAT, B. & PAILHE, C. (2002). — Islands and coral reefs, population and culture, economy and tourism : world view and a case study of French Polynesia. Pp. 213-231, in : F. di Castri and V. Balaji (Eds), *Tourism, Biodiversity and Information*. Backhuys pub. Leiden.
- SALVAT, B., VERGONZANNE, G., GALZIN, R., RICHARD, G., CHEVALIER, J.P. & RICARD, M. (1979). — Conséquences écologiques des activités d'une zone d'extraction de sable corallien dans le lagon de Moorea (Ile de la Société, Polynésie française). *Cah. Indo Pacif.*, 1 : 83-126.
- SAMMARCO, P.W., BRAZEAU, D.A. & LEE, T.N. (1999). — Enhancement of reef regeneration processes : supplementing coral recruitment processes through larval seeding. Pp. 169, in : *Int. conf. on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring and restoration*. Fort Lauderdale, Florida, USA, Abstract volume.
- WILKINSON, C. (Ed.) (2000). — *Status of coral reefs of the world. Global Coral Reef Monitoring Network*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia.
- WOOLDEY, J.D. & CLARK, J.R. (1989). — Rehabilitation of degraded coral reefs. *Coastal zone*, 89 : 3059-3076.