

L'évolution de la recherche sur les systèmes coralliens (1960-2007)

Virginie Duvat

Volume 8, numéro 2, octobre 2008

La nature des sciences de l'environnement : quels enjeux théoriques, pour quelles pratiques ?

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/019963ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Duvat, V. (2008). L'évolution de la recherche sur les systèmes coralliens (1960-2007). *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(2).

Résumé de l'article

Cet article analyse l'évolution de la recherche sur les milieux coralliens dans le domaine des sciences de la nature. Les systèmes coralliens ont été un objet scientifique favorable au développement de la pluri et de l'interdisciplinarité. Dans les années 1970, une science récifale a émergé sur des bases terminologiques, méthodologiques et thématiques communes. Les années 1990 ouvrent une nouvelle période dans l'évolution de la recherche, caractérisée par l'essor de la transdisciplinarité.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2008



Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

érudit

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

<https://www.erudit.org/fr/>

L'ÉVOLUTION DE LA RECHERCHE SUR LES SYSTÈMES CORALLIENS (1960-2007)

Virginie DUVAT, Professeur de géographie, Université de La Rochelle, Laboratoire AGÎLE-LIENS, UMR CNRS 6250, France, courriel : virginie.duvat@orange.fr

Résumé : Cet article analyse l'évolution de la recherche sur les milieux coralliens dans le domaine des sciences de la nature. Les systèmes coralliens ont été un objet scientifique favorable au développement de la pluri et de l'interdisciplinarité. Dans les années 1970, une science récifale a émergé sur des bases terminologiques, méthodologiques et thématiques communes. Les années 1990 ouvrent une nouvelle période dans l'évolution de la recherche, caractérisée par l'essor de la transdisciplinarité.

Mots clés : récifs coralliens, îles coralliennes, plages coralliennes, interdisciplinarité, transdisciplinarité, océan Indien.

Abstract : This paper presents the evolution of scientific research on coral reef systems in the field of environment sciences. Coral reef systems were a favourable scientific subject for the development of pluri and interdisciplinarity research. In the 1970's, a coral reef science emerged on common conceptual, methodological and thematic basis. The 1990's opened a new period in the evolution of coral reef research, characterized by the development of transdisciplinarity.

Keywords : coral reefs, reef islands, coral beaches, interdisciplinarity, transdisciplinarity, Indian Ocean.

Introduction

Après une longue période d'émergence et d'affirmation séparée des différentes disciplines, les pratiques de la recherche scientifique se sont diversifiées (Max-Neef, 2005). On peut les classer en cinq catégories qui constituent à la fois des types distincts et des étapes dans le processus global d'évolution de la production de la connaissance (figure 1). La construction du savoir a d'abord été disciplinaire (isolement de chacune des spécialités) et multidisciplinaire (juxtaposition de différentes disciplines sans collaboration). À partir des années 1970, dans le contexte du renouvellement et de la globalisation des enjeux sociétaux, les objets, les pratiques et les fonctions de la recherche scientifique ont évolué. La demande des gestionnaires a favorisé l'émergence d'objets de recherche globaux, comme l'eau, le paysage, la montagne ou le milieu récifal, et ce faisant, soutenu le développement du processus d'intégration scientifique (Van Kerkhoff, 2005). Celui-ci atteint des niveaux variables. Le premier correspond à la pluridisciplinarité, qui caractérise une situation d'échanges entre les différents domaines disciplinaires sans coordination organisée. Lorsque cette dernière condition est en revanche remplie, on peut parler d'interdisciplinarité. Au-delà, le phénomène d'intégration, à la fois horizontal (entre disciplines) et vertical (entre domaines – scientifique, réglementaire, politique, éthique... – et entre niveaux décisionnels) qui s'affirme aujourd'hui, marque l'avènement de la transdisciplinarité (Max-Neef, 2005). Dans sa phase d'émergence actuelle, différentes logiques coexistent, à la fois sur les plans institutionnel (degré de structuration inachevé) et scientifique (coordination partielle) (Rip, 1997). On peut d'ailleurs considérer que les divers degrés d'intégration de la recherche scientifique – de la disciplinarité à la transdisciplinarité (fig. 1) – ne s'excluent pas. Bien au contraire, ils sont complémentaires, car la consolidation des savoirs disciplinaires

est une condition indispensable à la progression des travaux de recherche inter- et transdisciplinaires. Ainsi, par delà leur mission première qui est relative à la production de connaissances, les chercheurs sont aujourd'hui appelés à contribuer, d'une part, à la résolution de problèmes variés (écologiques, sociaux...), et d'autre part, à la mise en place de stratégies de gestion intégrée des ressources et des milieux (Bosch *et al*, 2003 ; Aram, 2004 ; Hirsch Hadorn *et al*, 2006).

Cet article se propose d'apporter une contribution originale à ces réflexions à travers l'étude d'un objet scientifique particulier, le « système corallien », considéré suivant un angle d'approche géomorphologique. Dans ce cadre, celui-ci peut être défini comme une entité physique qui associe deux composantes interdépendantes, une communauté d'êtres vivants, le récif corallien, et différents types de corps sédimentaires (plages, dunes, plaines littorales, îlots). L'analyse se limitera aux milieux insulaires, avec une attention particulière pour ceux de l'océan Indien. Il s'agira d'abord de justifier le concept de « système corallien » en montrant en quoi cet objet de recherche a été favorable au développement de la pluri- et de l'interdisciplinarité dans le domaine des sciences de la nature. Ce faisant, on s'attachera à mettre en évidence le processus de construction d'une science commune qui s'est affirmé à partir des années 1960-1970. Ensuite, on s'emploiera à présenter l'émergence de la transdisciplinarité dans un contexte renouvelé, caractérisé par l'évolution des fonctions et des pratiques de la recherche scientifique sous l'influence de facteurs exogènes (coopération internationale, apparition du paradigme du développement durable et de nouveaux questionnements). Le rôle des organisations internationales et régionales dans la structuration de la recherche scientifique et dans la constitution de réseaux d'action opérationnels sera développé à partir de l'exemple de l'île de la Réunion resitué dans son contexte régional.

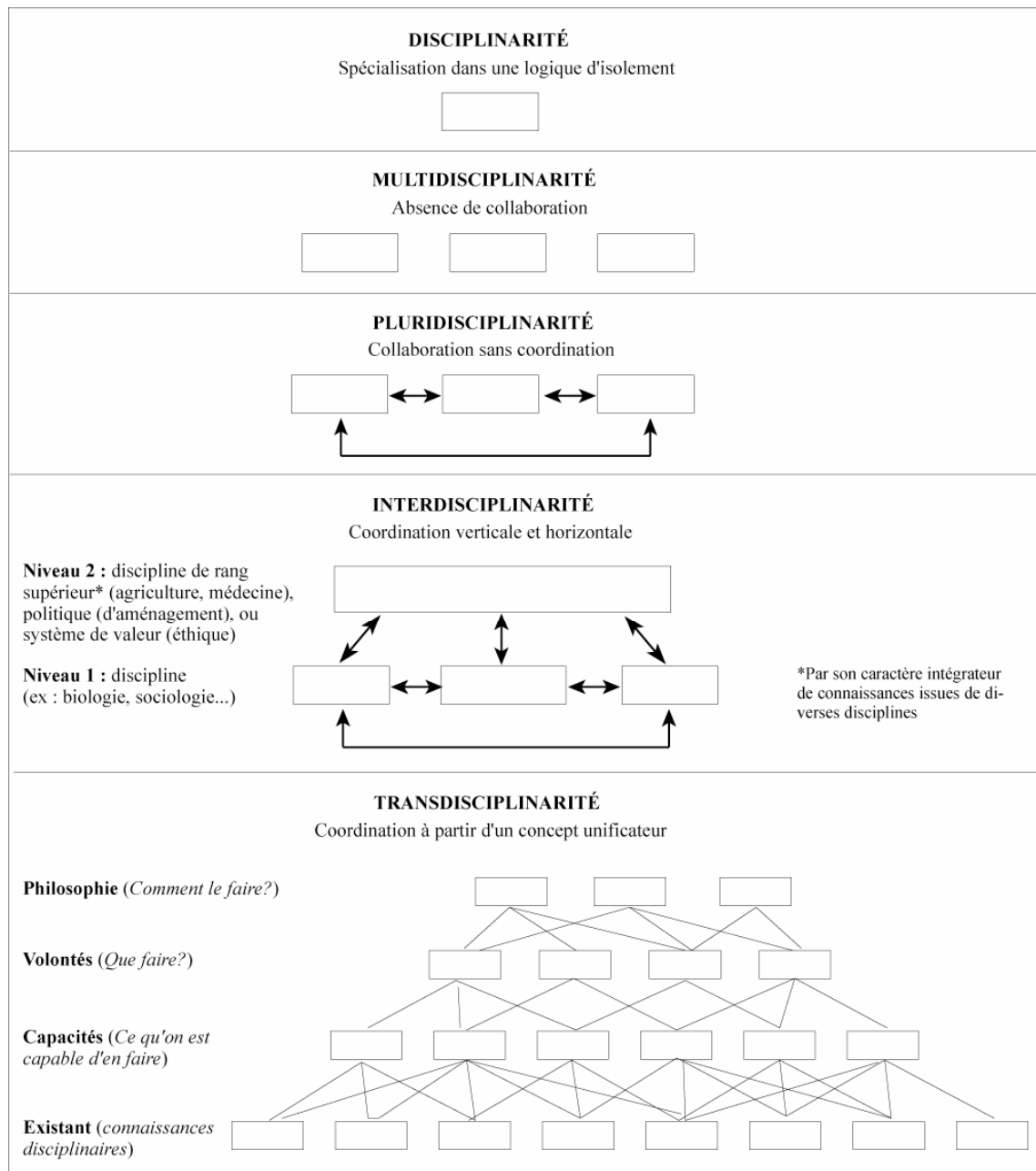


Figure 1 - Définitions et logiques des différentes stratégies de recherche scientifique de la disciplinarité à la transdisciplinarité (d'après M.A. Max-Neef, 2005).

Le « système corallien »

Les milieux coralliens constituent un système dont les composantes marine et terrestre sont en interaction permanente.

Deux composantes principales

Le « système corallien » est constitué de deux entités contiguës et interdépendantes, un récif corallien et un corps sédimentaire. Le

premier est une construction biologique qui requiert des conditions strictes pour se développer : la présence d'un support solide situé entre 0 et 60 m de profondeur (récif ancien, substrat volcanique ou plateau continental), et des eaux claires, salées (30 à 38‰), bien oxygénées et chaudes (18-30°C).

Le récif corallien dit actuel s'est formé pendant la dernière remontée du niveau de la mer qui a commencé vers 19 000 ans

BP¹ (Bard *et al.*, 1996). Là où les conditions écologiques ont été les plus favorables, il a connu un développement important vers le large (Montaggioni, 1974). Par ordre croissant de taille et de diversité morphologique et écologique, et en ne retenant que les principaux types de récifs, on distingue les plates-formes récifales, les récifs frangeants, les récifs barrières, les atolls et les bancs récifaux (Battistini *et al.*, 1975 ; Montaggioni et Faure, 1980 ; Guilcher, 1988) (figures 2 et 3). Les trois premiers types se rencontrent sur la bordure des îles hautes d'origine volcanique ou continentale (Woodroffe, 2002). Ils sont schématiquement composés de deux parties, un platier subaffleurant de largeur variable qui se termine vers le large par un front récifal et des pentes externes qui se raccordent aux fonds marins vers vingt mètres de profondeur. Quant aux atolls, ils présentent une morphologie particulière, celle d'un anneau récifal troué d'un lagon central dont la profondeur varie de quelques mètres dans le cas des atolls comblés² à environ 80 m. En milieu océanique et dans les lagons de certains atolls, on trouve également des récifs de forme elliptique ou circulaire, les bancs récifaux, dont certains atteignent la surface alors que d'autres se sont laissés submerger pendant la dernière transgression marine.

À certains de ces récifs coralliens, sont associés des corps sédimentaires qui diffèrent selon que les îles sont hautes ou basses. Sur les premières, sous les latitudes tropicales, les formations sédimentaires prennent la forme de plages de sable blanc adossées à des dunes qui se sont développées sur ou au contact de plaines littorales (figure 2). La dimension des espaces terrestres est, jusqu'à un certain stade (celui du récif frangeant), proportionnelle au degré de développement du récif. Au-delà du stade du récif frangeant, on observe en général une réduction de la dimension des plages et des dunes. Dans certains cas, la dune s'adosse directement aux reliefs montagneux. À proximité de l'équateur, il n'existe pas de dunes en raison de la faiblesse du vent et de l'importance de l'humidité atmosphérique qui concourent à maintenir le sable mouillé, donc compact, entre deux hautes mers (Cazes-Duvat, 1999). Ces espaces sédimentaires se sont formés au cours des derniers millénaires. Ils correspondent à une période d'abondance sédimentaire qui a probablement pris fin il y a 500 à 2 000 ans à la suite de la stabilisation du niveau de la mer (Bayliss-Smith, 1988 ; Cazes-Duvat, 1999 ; Cazes-Duvat et Paskoff, 2004).

Les îles basses constituent un deuxième type de corps sédimentaire que l'on peut rencontrer sur les platiers des récifs barrières, sur la couronne des atolls et au sommet des bancs récifaux (figure 3). Caractérisées par leur petite taille (0,2 à 5 km²

en général) et par leur faible altitude (< 4 m le plus souvent³), elles se répartissent en plusieurs types dont trois principaux (Stoddart et Steers, 1977 ; Duvat, 2007a). Le premier est constitué par les cayes, îlots sableux occupant des zones relativement abritées des houles de tempête par leur latitude (proche de l'équateur) et/ou par leur position (sous le vent⁴). Le deuxième type comprend les motus, des îles dissymétriques dont la côte exposée aux houles est faite d'une plage de débris coralliens grossiers et la côte abritée d'une plage de sable fin. Dans la partie centrale de ces îles, il existe en général un marécage (fig. 3). Enfin, on peut parler de « complexe insulaire » pour désigner les situations dans lesquelles plusieurs formes d'accumulation (cayes, motus, remparts de débris, bancs de sable...) se combinent à la surface d'un seul et même récif. La formation des îles basses date de la fin de la transgression holocène (5 000 à 3 000 ans BP⁵) (Siddiquie, 1980 ; Woodroffe, 1992 ; Woodroffe *et al.*, 1990 ; Cazes-Duvat *et al.*, 2002 ; Kench, 2006). Le contexte hydrosédimentaire⁶ actuel, probablement moins favorable à leur développement que celui qui a régné il y a 2 000 à 5 000 ans, serait responsable de l'érosion naturelle de la majorité d'entre elles (Bayliss-Smith, 1988).

La cellule morpho-sédimentaire au cœur du système

Le concept de « système corallien » se justifie par le fait que l'ensemble récif/corps sédimentaire constitue une entité fonctionnelle que l'on appelle cellule ou compartiment morpho-sédimentaire en géomorphologie littorale. Autrement dit, la plage et la dune qui bordent un récif corallien forment avec lui une unité morphodynamique au sein de laquelle s'opèrent des échanges de matériel (figure 2). Cette cellule possède des limites transversales et longitudinales précises. Sur le plan transversal, elle s'arrête, d'un côté, aux reliefs continentaux, et de l'autre, aux pentes externes du récif corallien. Sur le plan longitudinal, deux cellules successives sont séparées par une discontinuité physique majeure, en général un cap ou une falaise. De la même manière, cayes, motus et complexes insulaires constituent, avec le récif corallien qui les porte, un système morphodynamique à part entière (figure 3).

¹ On appelle transgression post-glaciaire la dernière remontée du niveau de la mer qui l'a fait passer de - 120 m il y a 15 000 ans à sa position actuelle il y a 3 000 à 5 000 ans suivant les provinces océaniques. Dans l'océan Indien occidental, le récif actuel a commencé à se former il y a 7 000 à 8 000 ans alors que le niveau de la mer était de 20 m inférieur à l'actuel.

² Il en existe aux Seychelles, ceux de Poivre et de Saint-Joseph, par exemple.

³ Celles qui sont exposées au flux régulier de l'alizé possèdent en général de belles dunes, qui peuvent atteindre une trentaine de mètres d'altitude. C'est le cas d'Assomption et de Farquhar dans les Seychelles du sud.

⁴ Les faces dites « au vent » sont exposées aux houles et aux vents dominants, à l'inverse de celles qui se trouvent « sous le vent ».

⁵ BP signifie Before Present, le présent correspondant par convention à 1950.

⁶ Ce terme se justifie par le fait que l'accumulation de sédiments requiert, non seulement l'existence d'un stock de matériel suffisant, mais aussi sa mobilisation par les agents marins.

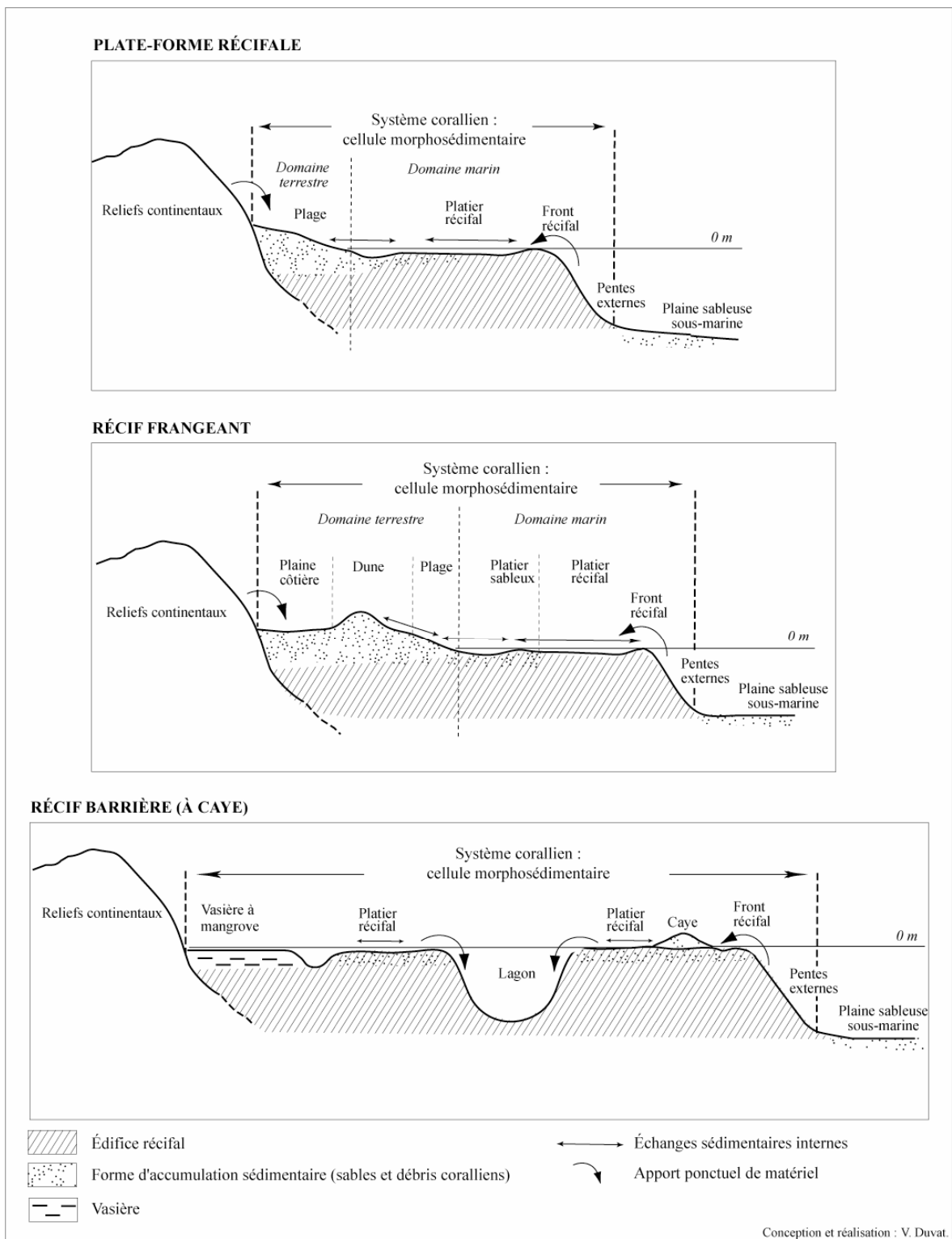


Figure 2 - Les systèmes coralliens des îles hautes.

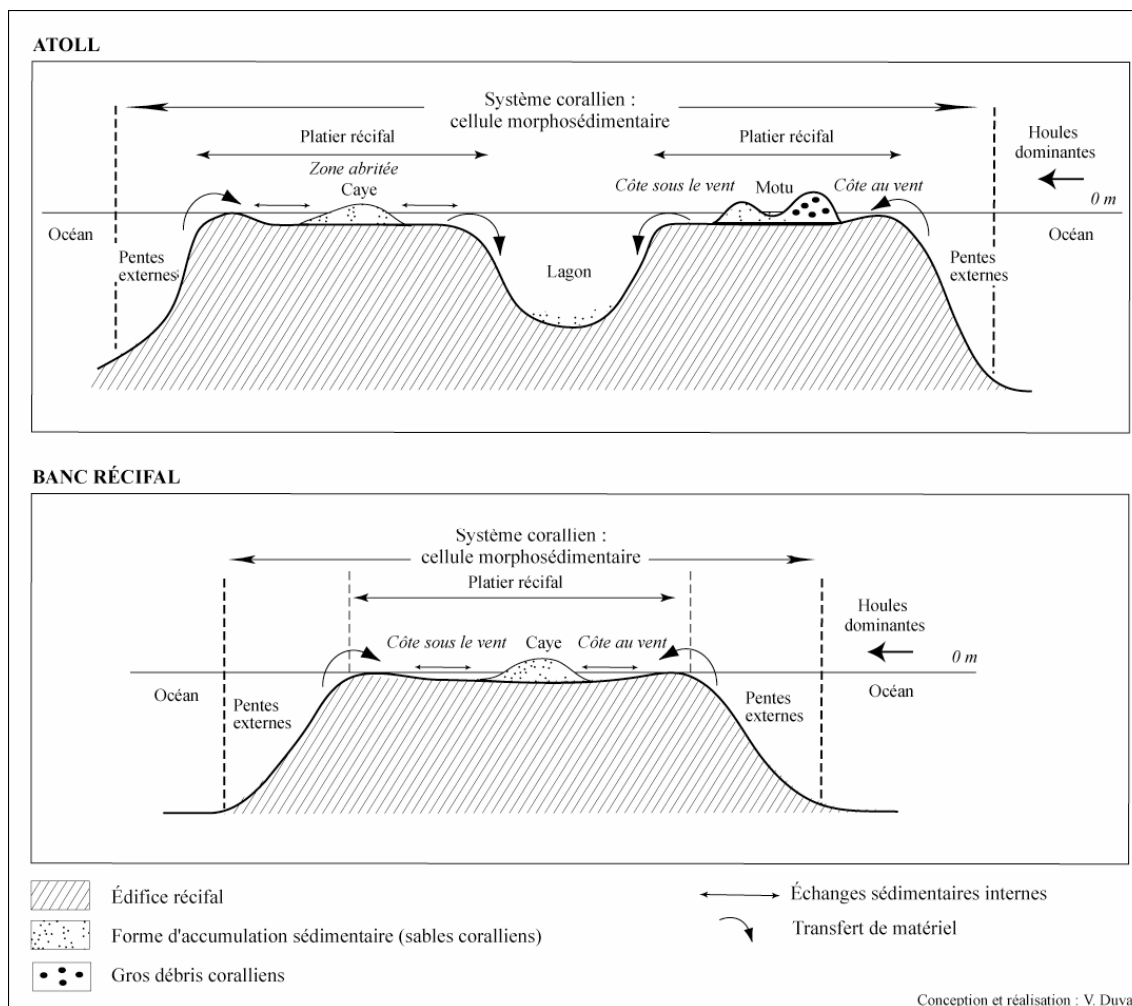


Figure 3 - Les systèmes coralliens des îles basses.

Au sein de ce système, le récif constitue le principal pourvoyeur de sédiments. Il a donné naissance aux plages, aux dunes et aux îles basses qui lui sont associées, et il continue à les alimenter en sables, débris et blocs de corail. Des matériaux inertes, produits par des récifs antérieurs et stockés sur les petits fonds marins, entrent pour une part variable dans leur budget sédimentaire (Cazes-Duvat *et al*, 2002 ; Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Sur les îles hautes, il faut y ajouter des matériaux d'origine continentale issus de l'érosion des reliefs terrestres, qui constituent en général 10 à 40 % du volume sédimentaire total (Cilek, 1978).

Des échanges de matériel s'opèrent entre le récif et son corps sédimentaire. Les tempêtes y contribuent. Ce sont des événements majeurs dont les effets sont complexes, car caractérisés par une forte variabilité spatio-temporelle⁷ (Woodley, 1989 ; McIntire et Walker, 1964 ; Duvat, 2007a). Les

⁷ Au cours d'un même épisode tempétueux, les vagues peuvent être d'abord érosives, puis engraisantes, car leur intensité et leur direction de provenance changent.

houles qu'elles génèrent arrachent des blocs de corail sur les pentes externes et le front des récifs, et les projettent sur les platiers où ils s'accumulent sous la forme de nappes, d'amas de débris et de blocs isolés, avant de migrer progressivement vers le rivage dans des proportions variables (Stoddart, 1966 ; Battistini *et al*, 1975 ; Scoffin, 1993). Ce processus d'accumulation peut être à l'origine de la formation de conglomérats qui constituent le soubassement de nombreuses îles coralliennes de la province indo-pacifique (Woodroffe *et al.*, 1990 ; Woodroffe et McLean, 1994) là où un niveau marin supérieur à l'actuel a existé. En raison de leur puissance énergétique, les vagues de tempête érodent souvent les côtes, emportant sables et débris sur le platier récifal et dans les passes⁸ par lesquelles s'opèrent des pertes définitives de sédiments au profit des fonds marins. Sur les atolls,

⁸ Les passes sont des vallées sous-marines héritées des périodes de bas niveau marin qui traversent perpendiculairement le front des récifs et la couronne des atolls. Elles atteignent des profondeurs de 15-20 m sur les îles hautes et de 50-80 m sur les îles basses, et elles abritent de forts courants.

les phénomènes de submersion marine associés au passage de cyclones peuvent être responsables de l'érosion des îles et du transfert des matériaux qui leur sont arrachés vers les lagons (Stoddart, 1971a). Lorsque ces différents types de pertes ne sont pas compensés par des réengraisements, les cellules sédimentaires possèdent un budget déficitaire, ce qui se traduit par le recul du trait de côte et par une réduction de la surface des espaces émergés. C'est ainsi que certaines îles basses ont disparu, comme F. Doumenge (1966) a pu l'observer dans l'océan Pacifique. Plusieurs conditions sont en effet nécessaires pour que les côtes se rechargent pendant les périodes de beau temps : une production sédimentaire suffisante et/ou des pertes de matériel limitées, et un hydrodynamisme suffisamment actif pour assurer le transport des sédiments disponibles vers les côtes. Ainsi, le régime d'eaux calmes qui caractérise les grands platiers récifaux pendant les périodes de beau temps explique que les plages qui les bordent connaissent des recharges post-tempête limitées (Cazes-Duvat, 2005).

La présence d'un récif corallien a pour effet de créer des conditions hydrodynamiques spécifiques qui exercent à leur tour une influence sur la morphologie littorale et insulaire. Les pentes externes et le front récifal provoquent le déferlement. Des vagues moins hautes se reforment sur le platier récifal et dans les lagons à la condition que ceux-ci soient suffisamment vastes et ventés, donnant lieu à un second déferlement sur la côte. Seul celui-ci a un impact morpho-sédimentaire sur l'estran. Dans ce système, le flux d'eau entrant (dû au déferlement) est compensé par un flux de retour (courants de décharge et de passe) qui vidange platiers et lagons. Ces deux mouvements sont renforcés par la marée. Les courants qui s'organisent à la surface du récif transportent également des sédiments. La direction et la force des vagues et des courants déterminent ainsi la position, la forme et la dimension des îles basses (Richmond, 1992).

Un milieu côtier original qui joue la fonction de marqueur environnemental

Le système corallien constitue un type de milieu côtier très différent des autres. Sa première originalité tient au fait que son évolution est commandée par une communauté d'êtres vivants très sensibles à toute modification des conditions écologiques (variation de la température, de la salinité ou du niveau de la mer, par exemple). Ceci se traduit par l'alternance de périodes de croissance (conditions écologiques favorables) et de mortalité (conditions défavorables) qui se succèdent à différents pas de temps. Les plus courts correspondent aux épisodes pluriannuels El Niño (*cf. infra*) qui peuvent être responsables du blanchissement du corail et les plus longs aux générations successives de récifs⁹. Cette évolution cyclique concerne, non seulement le biologiste marin, qui s'intéresse au récif en tant

qu'écosystème, mais aussi le géologue et le géomorphologue, pour lesquels la production sédimentaire du récif est la condition *sine qua non* de l'alimentation des plages et des îles à différentes échelles temporelles.

En second lieu, et ceci explique le vif intérêt que leur porte une large partie de la communauté scientifique, les récifs coralliens constituent de véritables archives à l'échelle de la terre en raison de leur fonction d'enregistreur, non seulement de formes (systèmes récifaux) et de processus passés (croissance corallienne, en particulier), mais aussi d'anciens niveaux marins (Bourrouilh-Le Jan, 1994 ; Battistini et Lebigre, 1994). Sous les différentes latitudes, on trouve en effet des restes de récifs anciens qui permettent de définir des paléo-environnements. Le récif actuel s'est d'ailleurs développé sur des récifs antérieurs à lui dont la surface a été karstifiée¹⁰ sous l'effet des émergences multiples qui se sont produites au cours des derniers millions d'années (Marshall et Jacobson, 1985 ; Woodroffe *et al.*, 2004). La datation d'échantillons de ces récifs qui sont situés au-dessus et au-dessous du zéro marin actuel¹¹ permet de reconstituer les courbes des variations du niveau de la mer dans les différentes provinces océaniques, et par là même de mieux connaître les oscillations climatiques de l'ère quaternaire.

Le fonctionnement spécifique du système corallien et sa grande utilité scientifique au-delà des intérêts strictement disciplinaires qu'il présente pour le biologiste marin, le géologue ou le géomorphologue, permettent de comprendre pourquoi il a été un objet scientifique privilégié et précurseur pour le développement de l'interdisciplinarité dans le domaine des sciences de la nature au cours des cinquante dernières années.

Un objet interdisciplinaire en sciences de la nature

Les relations étroites qui existent entre le contexte géophysique, l'hydrodynamisme et la formation des récifs coralliens et des corps sédimentaires associés, ont été favorables, dès les années 1960-1970, à l'émergence de travaux de recherche interdisciplinaires.

La position d'interface interdisciplinaire de la géomorphologie

Parce qu'ils mobilisent les résultats des campagnes de géophysique ainsi que des connaissances qui relèvent du champ de la biologie marine, les travaux de recherche en

⁹ Dans l'océan Indien occidental, trois générations de récifs ont pu être identifiées dont les deux premières ont été datées de 220 000 et de 125 000 BP (Veeh, 1966 ; Montaggioni, 1974 ; Braithwaite, 1971 ; Stoddart, 1971b), la dernière correspondant au récif actuel.

¹⁰ Par sa nature calcaire, le récif corallien est sensible à la dissolution sous l'action d'eau chargée de gaz carbonique. Son émergence pendant les périodes de bas niveau marin s'est par conséquent traduite par un processus de karstification responsable du creusement de grottes et de galeries à sa surface.

¹¹ Dans le Pacifique, le niveau de la mer a été de quelques mètres supérieur à l'actuel il y a 3 000 à 5 000 ans, avant de se stabiliser autour de sa position d'aujourd'hui. La présence de formations récifales émergées le prouve là où aucun réhaussement d'origine tectonique n'a eu lieu.

géomorphologie littorale constituent une entrée pertinente pour aborder la question de l'interdisciplinarité en milieu récifal.

L'on ne peut effectuer de reconstitution géomorphologique sans prendre en compte le contexte géophysique : c'est un principe général qui vaut pour tous les milieux, y compris pour ceux qui ne sont pas coralliens. En effet, l'histoire géologique apporte d'abord au géomorphologue des connaissances relatives à la tectonique qui lui permettent d'établir si les littoraux qu'il étudie se situent dans un environnement actif ou passif (manifestations volcaniques ou sismiques) et s'ils sont stables, émergents ou subsidents¹². Courant dans les îles océaniques, le dernier scénario joue un rôle important dans l'évolution des îles (passage d'un type d'île à un autre) et dans le développement récifal (compensation de la subsidence par la croissance corallienne qui permet le passage d'un type de récif à un autre, conformément à la théorie darwinienne) (Guilcher, 1988 ; Nunn, 1994).

En deuxième lieu, le contexte géophysique détermine l'environnement bathymétrique dont dépend l'organisation de l'hydrologie océanique et côtière. En effet, la force et l'orientation des vagues et des courants marins sont déterminées, d'une part, par la direction de provenance des houles, et d'autre part, par la répartition des profondeurs et par la configuration des reliefs sous-marins (Guilcher, 1979). Les îles basses qui surmontent des dorsales volcaniques situées en plein océan sont exposées à des vagues puissantes parce que celles-ci n'ont pas été réfractées par les fonds marins. Dans l'océan Indien, c'est le cas des Maldives, des Chagos et des îles situées dans l'ouest et le sud de l'archipel des Seychelles. À l'inverse, les îles qui se trouvent au sommet d'un plateau continental peu profond, comme les Seychelles du Nord dans la même région¹³, sont soumises à un hydrodynamisme moins actif parce que les houles ont été amorties avant d'atteindre les côtes. Ainsi, le contexte bathymétrique constitue l'un des facteurs d'explication de la nature et de l'ampleur des impacts des événements tempétueux. Par ailleurs, l'existence d'un plateau sous-marin peu profond est favorable au réengraissement des plages après les tempêtes, car les matériaux qui s'y accumulent restent mobilisables par les houles et les vagues. En revanche, lorsque les côtes sont accores, comme c'est le cas sur les îles volcaniques jeunes, les pertes sédimentaires qui s'opèrent pendant les tempêtes sont définitives, car les sédiments arrachés aux plages sont évacués vers les fonds marins (Duvat, 2007b). Rappelons que le contexte bathymétrique explique aussi la répartition et la nature des récifs coralliens dont le rôle central a déjà été souligné (Montaggioni et Faure, 1980 ; Cazes-Duvat, 1999). Là où les profondeurs sont importantes, les récifs sont peu développés et inversement.

¹² On parle d'émergence là où s'observe un relèvement des reliefs et de subsidence dans le cas contraire. Dans les archipels volcaniques, la subsidence est due à divers facteurs, dont l'effondrement de l'édifice volcanique sur lui-même suite à l'évidement des chambres magmatiques et la contraction associée au refroidissement de la lave.

¹³ Le banc des Seychelles se situe entre 20 et 70 m de profondeur. C'est une portion dérivée du Gondwana qui a trouvé sa position actuelle il y a 47 millions d'années (Plummer, 1996).

En dernier lieu, l'identification par les géologues des différentes générations de récifs coralliens permet de mieux connaître les cycles de production sédimentaire (alternance construction /destruction) qui sont à l'origine de la formation et de l'évolution des îles, des plages et des dunes. La datation d'échantillons extraits de carottes récifales permet également de reconstituer les variations du niveau de la mer, et en particulier sa vitesse de remontée au cours de la dernière transgression dans les différentes régions océaniques (Braithwaite, 1984 ; Montaggioni, 1988 ; Montaggioni et Faure, 1997 ; Braithwaite *et al.*, 2000 ; Camoin *et al.*, 1997, 2004¹⁴). Ces reconstitutions ont souvent été effectuées par des équipes interdisciplinaires, car elles intéressent également les biologistes marins qui étudient les réponses des coraux aux variations climatiques. La connaissance des réponses des récifs coralliens aux oscillations climatiques récentes permet de poser des hypothèses quant au comportement qu'ils pourraient avoir face aux facteurs de stress associés au changement climatique (Neumann et McIntyre, 1985).

S'il ne peut négliger les apports de la géologie, le géomorphologue qui travaille en milieu corallien doit par ailleurs intégrer le récif à son champ de recherche, comme l'illustrent les travaux d'A. Guilcher et de D.R. Stoddart. La morphologie récifale, les espèces de coraux, et les formes d'accumulation qui s'observent sur les platiers récifaux et sur les terrasses sous-marines situées le long des pentes externes, fournissent des indications importantes sur l'hydrodynamisme, et en particulier sur le rôle des tempêtes (Woodley, 1981). Elles apportent donc des éléments essentiels pour l'interprétation des formes actuelles et pour la compréhension de leurs modalités et de leurs rythmes d'évolution. Ainsi, la présence de mégablocs (blocs de corail de grande dimension provenant des pentes externes du récif corallien) et/ou de remparts de débris sur un platier récifal témoigne du rôle des événements extrêmes dans la mobilisation et le transport des sédiments, donc dans l'évolution des côtes (Scoffin, 1993). C.D. Woodroffe (2002) a par ailleurs démontré la relation causale qui existe entre la répartition des espèces de coraux et l'hydrodynamisme : plus la contrainte des vagues est forte, moins les coraux branchus se développent, cédant la place à des espèces encroûtantes. Enfin, la quantification de la productivité récifale par les biologistes marins peut aider le géomorphologue à expliquer l'érosion côtière, car celle-ci peut être due à une chute de la calcification corallienne (Yamano *et al.*, 2000).

La construction d'une terminologie et d'un savoir communs

Dès les années 1970, les échanges interdisciplinaires qui s'étaient développés sur les milieux récifaux ont donné lieu à l'élaboration d'une terminologie commune valable pour l'ensemble de la zone indopacifique. Publiée dans un numéro spécial de la revue *Téthys* intitulé *Éléments de terminologie récifale indopacifique* (Battistini *et al.*, 1975), elle se présente sous la forme d'un

¹⁴ Références pour l'océan Indien occidental, pris ici à titre d'exemple.

ouvrage collectif de 111 pages auquel ont contribué 24 spécialistes issus de différentes disciplines (géographie, biologie marine, géologie, océanographie, paléontologie). Cet ouvrage remarquablement illustré propose la définition de 125 termes de morphologie récifale ainsi que leur traduction en anglais et en allemand. Il a valeur de dictionnaire et reste à ce jour la principale référence en la matière.

Parallèlement à ce travail de mise au point terminologique, les décennies 1970 et 1980 se caractérisent par la publication de plusieurs ouvrages de base qui traduisent également l'émergence de l'interdisciplinarité. On peut prendre l'exemple de *Biology and geology of coral reefs*, livre dirigé par le géologue O.A. Jones et le zoologue R. Endean (1977), qui comporte un important chapitre sur l'origine et l'évolution des récifs coralliens et des îles basses, réalisé par les géographes anglais D.R. Stoddart et J.A. Steers. Comme celui d'A. Guilcher (1988) – *Coral reef geomorphology* – cet ouvrage montre bien le rôle central des récifs coralliens dans les travaux de géomorphologie. On peut d'ailleurs s'étonner que cette synthèse récifale ait été écrite par un géographe, mais la construction d'un savoir commun ne passe-t-elle pas par l'appropriation de connaissances et de références extra-disciplinaires ? À ce titre, l'originalité de la contribution scientifique de D.R. Stoddart tient à l'approche globale (récifale et insulaire) qu'il a développée dès les années 1960. Ses études pionnières, dont la plupart ont été publiées par la revue *Atoll Research Bulletin*, traduisent l'adoption précoce d'une démarche systémique associant des compétences en biologie marine, en géologie et en géomorphologie.

Les tempêtes, événements significatifs fédérateurs de recherches ?

Parce qu'elles jouent un rôle majeur dans l'évolution des systèmes coralliens, les tempêtes cycloniques ont retenu l'attention de géologues, de biologistes marins et de géographes qui se sont employés à étudier leurs impacts. Cet objet d'étude a favorisé l'émergence d'analyses croisées qui relèvent d'une démarche pluridisciplinaire.

Peu de travaux traitent des impacts des cyclones en milieu récifal. Néanmoins, les connaissances établies montrent qu'ils varient fortement dans le temps et dans l'espace.

Les biologistes marins se sont d'abord intéressés aux effets immédiats et destructeurs des cyclones sur les platiers et les pentes externes des récifs coralliens. Les travaux effectués dans plusieurs îles de la Polynésie française par M.L. Harmelin-Vivien et P. Laboute (1986) ont montré que les colonies coralliennes profondes sont exposées à une destruction mécanique totale là où les pentes externes sont raides, et par conséquent soumises à des avalanches de débris. L'action destructrice des tempêtes conduit à la régularisation de ces pentes, au moins dans leur partie supérieure (Stoddart, 1963, 1971a). Sur les îles hautes, la détérioration des conditions écologiques qui se produit au cours d'un épisode cyclonique (arrivée d'eau douce et de matériaux

terrigenes sur les récifs) est souvent responsable d'un pic de mortalité sur le platier (Harmelin-Vivien, 1994), qui peut affecter la totalité des coraux (Naïm *et al.*, 2000a). Le taux de destruction dû aux cyclones varie néanmoins beaucoup (Treml *et al.*, 1997), tout comme le temps de régénération des coraux, compris entre 5 et 50 ans. Certains chercheurs ont montré que sur le long terme les tempêtes pouvaient avoir des effets positifs sur l'évolution des récifs. En répandant des fragments de coraux sur de vastes surfaces, elles contribuent en effet à la propagation des espèces (Harmelin-Vivien, 1994). Elles peuvent également avoir une action revitalisante sur les platiers en enlevant les amas de sédiments qui tendent à asphyxier les colonies coralliennes (Hubbard, 1986 et 1992 ; Hubbard *et al.*, 1991 ; Hillis et Bythell, 1998 ; Jokiel, 2006). Ces travaux de biologie marine ont apporté des connaissances majeures sur la production sédimentaire associée au passage des cyclones et démontré que les terrasses sous-marines situées entre 15 et 20 m de profondeur jouent un rôle important dans le stockage, puis le transfert de ce matériel vers les côtes (Baines *et al.*, 1974). On sait aujourd'hui que la position et l'alimentation des îles basses sont directement liées, pour la première, à la morphologie récifale, et pour la seconde, à la fréquence des cyclones (Woodley, 1989 ; Scoffin, 1993).

Le rôle déterminant de la production récifale dans la formation et l'évolution des corps sédimentaires explique la forte implication des géographes sur ce même thème de recherche. On peut citer les travaux précurseurs de D.R. Stoddart (1963, 1971a) sur les changements morphologiques survenus sur les récifs et les îles situés au large de Belize lors du passage du cyclone Hattie (octobre 1961). Le temps de régénération des récifs intéresse inévitablement les géomorphologues (géographes et géologues), car il détermine la capacité d'alimentation des côtes. Là où la vitesse de croissance corallienne est élevée et la fréquence des cyclones faible, ces événements peuvent favoriser la progradation des côtes (Scoffin, 1993). À une autre échelle de temps qui va du siècle au millénaire, les variations de la fréquence des tempêtes expliquent la formation, les rythmes d'accrétion/érosion et les changements morphologiques majeurs des différents types d'îles coralliennes (Blumenstock, 1961 ; Baines et McLean, 1976 ; Siddiquie, 1980 ; Bayliss-Smith, 1988). L'agrandissement de 20 % de celle de Funafuti à la suite du passage du cyclone Bebe (octobre 1972) constitue probablement le cas le plus connu (Baines *et al.*, 1974, Maragos *et al.*, 1973). Les observations dont on dispose pour les océans Indien et Pacifique montrent que les cyclones font évoluer le nombre, la taille et la configuration des îles basses (Xue, 1997 ; Duvat, 2007a). Ce faisant, les tempêtes qui se succèdent ouvrent ou au contraire obturent les chenaux peu profonds (hoas) qui séparent les îles basses situées sur la bordure des atolls (Bourrouilh-Le Jan et Talandier, 1985). Parce qu'ils modifient la courantologie, ces changements de la morphologie récifale et insulaire intéressent tout autant les biologistes, concernés par l'évolution des conditions écologiques, que les géologues et les géographes qui étudient leurs impacts morpho-sédimentaires.

Le suivi des impacts des cyclones sur les côtes coralliennes des îles hautes révèle une complexité équivalente, d'abord parce qu'ils varient ici aussi dans l'espace et dans le temps (McIntire et Walker, 1964 ; Cazes-Duvat, 2005). Les études disponibles montrent par ailleurs que les plages sans récif ou bordées par des édifices étroits peuvent s'éroder moins que celles qui semblent pourtant protégées des impacts érosifs des cyclones par des récifs barrières (Duvat, 2007b).

Bien qu'elles demeurent à ce jour relativement peu nombreuses, les études qui traitent du rôle des cyclones dans l'évolution des systèmes coralliens constituent à l'évidence un champ privilégié pour le développement de l'interdisciplinarité.

Des méthodes de recherche largement partagées

Le processus d'émergence d'une science commune qui s'est affirmé dans les années 1970-1980 se retrouve à travers l'utilisation de méthodes de recherche similaires par les chercheurs des différentes disciplines, comme le montre l'analyse d'une série de publications tirées des principales sources scientifiques sur les milieux récifaux¹⁵.

Les techniques de datation d'échantillons prélevés sur site jouent un rôle central dans la progression de la connaissance et sont indifféremment employées par les géologues, les géographes, les océanographes et les biologistes marins. À l'échelle des temps géologiques, la datation d'échantillons extraits de carottes parfois très longues (près de 1 400 m pour celle d'Eniwetok dans les îles Marshall en 1961) a apporté la démonstration de la subsidence des édifices volcaniques et de la succession sur le temps long de différentes générations de récifs coralliens (Nunn, 1994 ; Woodroffe, 2002). À l'échelle du Quaternaire¹⁶, les datations qui peuvent être effectuées grâce à des procédés techniques divers (carbone 14, uranium, thermo-luminescence) constituent la base des reconstitutions géomorphologiques et des études visant à établir la courbe de remontée holocène du niveau de la mer¹⁷.

Un deuxième ensemble de méthodes de recherche repose sur des relevés morphologiques. Ceux-ci peuvent être réalisés *in situ* sur les pentes externes et les platiers récifaux (notamment en plongée sous-marine) ainsi que sur les côtes (levés topographiques,

stratigraphiques et de la position du trait de côte). Ils peuvent également être effectués à partir de photographies et d'images aériennes prises à différentes dates (évaluation des impacts morphologiques d'un cyclone, cartographie de l'évolution du trait de côte). Ces deux approches complémentaires qui appréhendent le milieu à des échelles temporelles différentes sont couramment associées pour établir des connaissances de base sur les différentes régions récifales.

Une troisième catégorie regroupe les études morphodynamiques, réalisées en période calme (études couplées de la courantologie et de la sédimentation dans les lagons, par exemple) ou perturbée (passage de cyclone). Elles associent en général les relevés topographiques (profils de plage, modèles numériques de terrain), stratigraphiques (analyse de coupes) et sédimentologiques, les mesures courantologiques *in situ*, et l'analyse de photographies aériennes et d'images satellitales. Elles permettent de progresser dans la compréhension des processus d'évolution des corps sédimentaires, et débouchent sur l'élaboration de typologies ou de modèles (Kench, 2006 ; Barry *et al*, 2007). Ces différentes méthodes de recherche sont utilisées conjointement pour la réalisation de reconstitutions géomorphologiques.

Ainsi, les travaux scientifiques des décennies 1970 à 1990 relèvent de pratiques scientifiques variées, des logiques disciplinaires à celles qui sont interdisciplinaires (figure 4).

L'émergence de la transdisciplinarité

Au cours des deux dernières décennies, la reformulation des enjeux de société et leur affirmation à l'échelle planétaire ont favorisé l'émergence d'une science récifale plus globale, renouvelée dans ses concepts, ses méthodes et son positionnement. Le double processus d'intégration qui la caractérise (science/gestion et scientifique) qualifie bien une évolution vers la transdisciplinarité.

¹⁵ Il s'agit en particulier des actes des symposiums internationaux sur les récifs coralliens qui ont lieu tous les 4 ans et des publications des revues spécialisées comme *Coral Reefs* et *Atoll Research Bulletin*, et à champ thématique plus large comme *Marine Geology*, *Journal of Coastal Research*, *Science*, *Nature*, par exemple.

¹⁶ L'ère quaternaire qui couvre les deux derniers millions d'années est composée du Pléistocène et de l'Holocène, ce dernier couvrant les dix derniers millénaires.

¹⁷ Sur les techniques de datation, le lecteur peut consulter les sites suivants : <http://giik.net/carbone14/bibliographie.phl>;

[http://geosciences.geol.u-](http://geosciences.geol.u-psud.fr/geochrono/fr/tech/thermo/principe)

[psud.fr/geochrono/fr/tech/thermo/principe](http://geosciences.geol.u-psud.fr/geochrono/fr/tech/thermo/principe) ;

<http://www.inrp.fr/acces/biotic/envIRON/paleoclimats/html/datation-comment.htm>

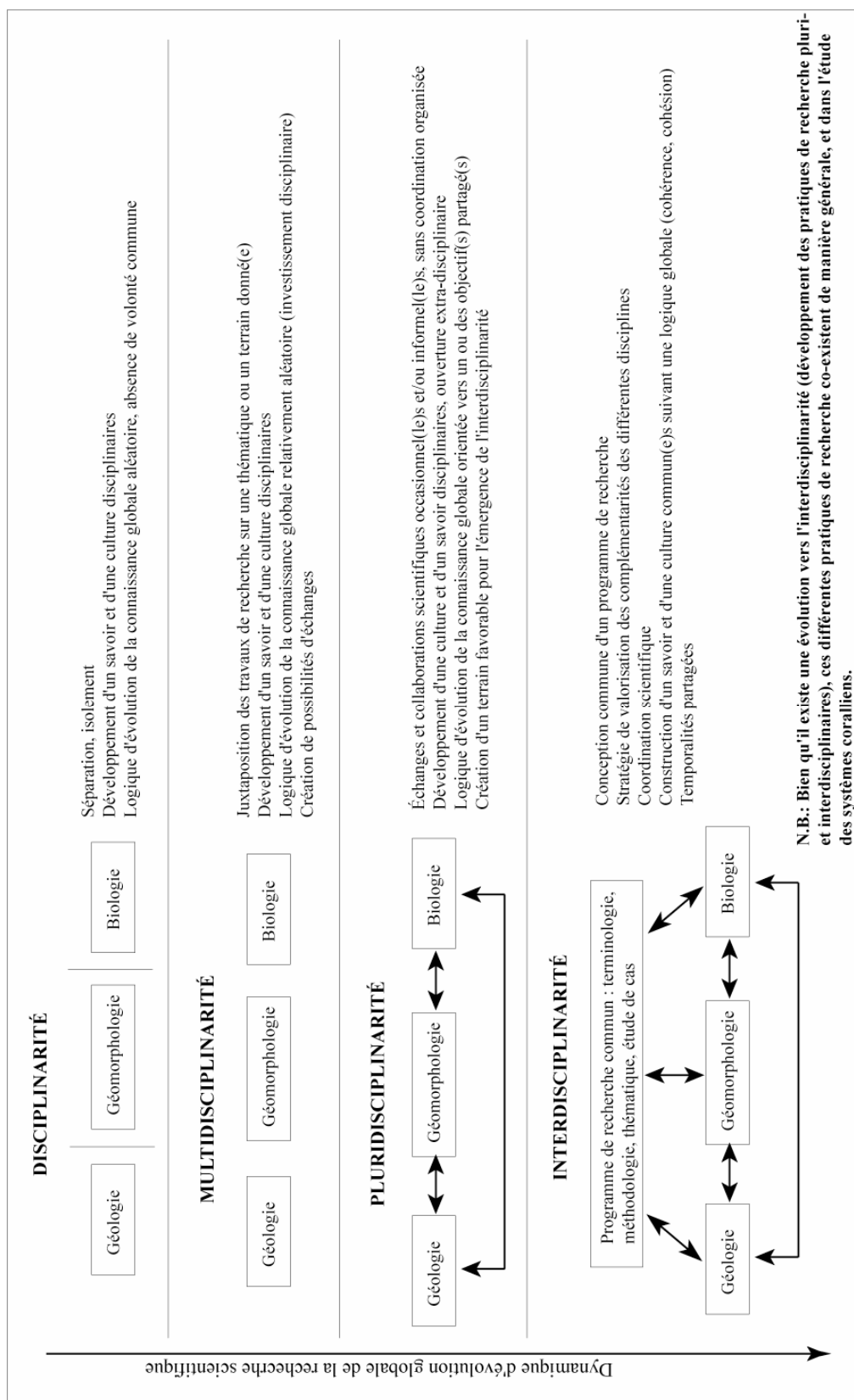


Figure 4- État et évolution des stratégies de recherche scientifique : application à l'étude des systèmes coralliens. Situation dans les années 1990. (D'après M.A. Max-Neef, 2005, adapté).

L'intégration des politiques de gestion et de recherche scientifique

Les acteurs et les mécanismes de financement de la recherche scientifique se sont renouvelés au cours des deux dernières décennies. Le rôle des organisations, gouvernementales et non gouvernementales, et des acteurs politiques et sociaux, s'est renforcé. Ils participent aujourd'hui activement à l'évolution des paradigmes, des champs thématiques, des concepts et des méthodologies de la recherche. Cette situation résulte d'abord du développement de la coopération internationale, qui a favorisé l'affirmation d'un paradigme dominant porteur d'intégration, celui du développement durable¹⁸, ainsi que de la mise en œuvre de programmes d'action et de recherche à l'échelle globale. L'Organisation des Nations unies joue un rôle central dans cette dynamique, en particulier à travers les actions de l'UNESCO¹⁹. À un deuxième niveau, les organisations régionales participent au renforcement de l'intégration horizontale (entre disciplines) et verticale (entre acteurs), comme l'illustre la politique de développement de la recherche scientifique de la Commission européenne (Van Kerkhoff, 2005). Les politiques nationales s'inscrivent aujourd'hui dans des réseaux supranationaux hiérarchisés et de plus en plus cohérents, qui reposent sur cette logique d'intégration. Aux différentes échelles, les logiques de financement de la recherche scientifique encouragent le développement des travaux transdisciplinaires et appliqués.

L'évolution des politiques de gestion et de promotion de la recherche scientifique en milieu corallien illustre bien cette tendance (fig. 5). On se limitera ici à en rappeler les grandes lignes, l'objectif étant de mettre en évidence le poids des facteurs exogènes dans le développement de la transdisciplinarité. Le lancement de l'Initiative Internationale pour les récifs coralliens (ICRI) par les États-Unis (1995) a été suivi par des actions nationales, dont celle de la France. Sur la décision du Premier Ministre, l'Initiative française pour les récifs coralliens (IFRECOR) a vu le jour en mars 1999 dans le but de protéger et de gérer ceux des outre-mer. Créé par le décret du 7 juillet 2000, son comité national est chargé de l'élaboration d'une stratégie et d'un plan d'action que chacun des 8 comités locaux met en œuvre par des opérations spécifiques. Ce décret précise qu'il a, entre autres missions, celles de : 1) favoriser les échanges entre élus, socioprofessionnels, administratifs, techniciens et scientifiques ; 2) développer la recherche de financements nationaux, européens et internationaux dans le but de mettre en œuvre ses actions ; 3) donner un avis sur les programmes de recherche. On voit bien à travers cet exemple que la structuration des politiques de gestion à l'échelle internationale a des effets directs sur le développement de la recherche scientifique aux niveaux national et local.

¹⁸ Le développement durable repose en effet sur la recherche de l'équilibre et de l'intégration entre différents domaines (l'économie, la société, la culture et l'environnement) et entre différentes catégories de population (nord/sud, générations).

¹⁹ United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.

Le contenu du plan d'action national qui a été adopté en 2000 révèle une forte volonté politique de renforcer l'intégration de la recherche scientifique, d'une part, par le développement d'interfaces entre sciences de la nature et sciences humaines et sociales, et d'autre part, par le soutien financier des travaux scientifiques d'aide à la gestion. L'axe 3 de ce plan d'action, qui concerne le développement de la recherche, la surveillance des récifs coralliens et les outils d'aide à la décision, le démontre par les objectifs qu'il poursuit : renforcer les connaissances et les études appliquées nécessaires à la gestion ; intégrer les sciences humaines, économiques et juridiques dans l'approche du milieu récifal ; surveiller à long terme l'état de santé des récifs coralliens ; mesurer les impacts des mesures prises en leur faveur ; créer des outils d'aide à la décision. La recherche expérimentale est encouragée et il est attendu des équipes scientifiques qu'elles participent à la production de données d'état²⁰ sur le temps long par la création d'observatoires²¹. Le caractère transversal et la nature même des thèmes qui ont été retenus dans le deuxième plan d'action (adopté en mars 2007) – aires marines protégées, écosystèmes associés aux récifs coralliens, changement climatique, éducation et sensibilisation, en particulier – traduisent bien la volonté des acteurs de promouvoir le développement de la recherche transdisciplinaire sur des questions relatives aux grands enjeux de société. À tous les niveaux (international, régional, national et local), les appels à projets de recherche encouragent la transdisciplinarité, favorisant les équipes qui possèdent une structure propice à son développement et une pratique réelle des échanges interdisciplinaires²².

L'exemple du département d'outre-mer de la Réunion

À la Réunion, le financement des travaux de recherche portant sur les systèmes coralliens est assuré par un réseau d'acteurs qui traduit bien l'emboîtement des politiques et des actions aux échelles internationale, régionale, nationale et locale (fig. 6). À l'échelle internationale, trois acteurs jouent un rôle majeur dans l'impulsion des politiques de protection et de gestion des océans et des côtes, l'Organisation des Nations unies, à travers ses différentes commissions, (l'Intergovernmental Oceanographic Commission, en particulier), les États-Unis (lancement de l'ICRI et de la GIZC) et l'Union européenne (aide au développement).

²⁰ État de l'écosystème et des pressions anthropiques, en particulier.

²¹ Ils se créent à toutes les échelles (mondiale, régionale, nationale et locale).

²² Les programmes de recherche financés par les comités locaux de l'IFRECOR et par l'Agence Nationale de la Recherche l'illustrent.

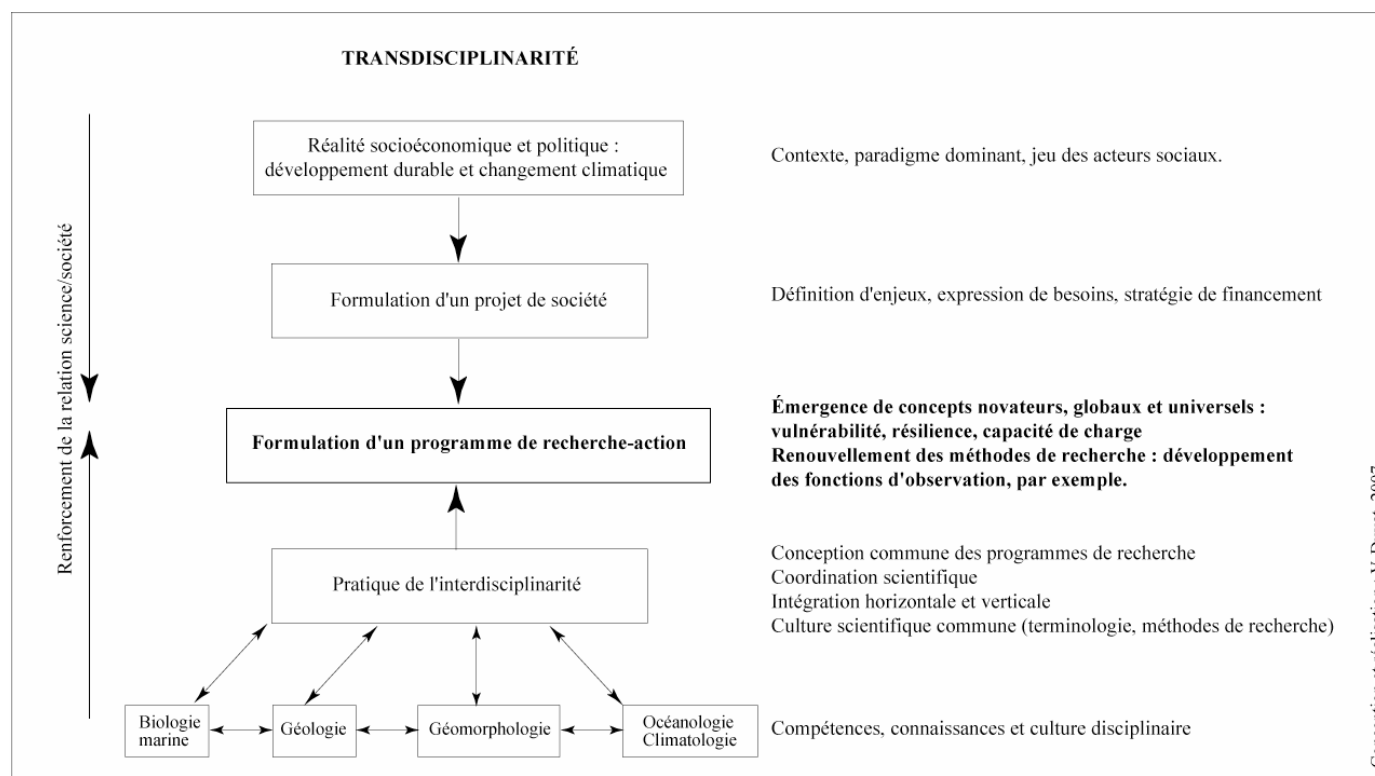


Figure 5 - Processus d'émergence de la transdisciplinarité.

Émanant d'une organisation internationale (l'ICRI) et représentée par un comité local, l'IFRECOR joue un rôle central dans la mise en œuvre de la politique nationale de préservation des récifs coralliens ainsi que dans le développement de la recherche scientifique. Le comité local, qui a officialisé l'existence d'un réseau de chercheurs et d'acteurs²³, soutient le développement de travaux transdisciplinaires et de la gestion intégrée des côtes coralliennes.

À l'échelle régionale, deux organisations sont à l'origine de la constitution de réseaux d'acteurs (constitués de chercheurs et de gestionnaires), et du développement de programmes de recherche scientifique, d'éducation et de formation. Il s'agit d'abord de la Commission de l'Océan Indien²⁴. Sur la période 1995-2003, son Programme régional environnement (PRE-COI) a soutenu la préservation et la connaissance des systèmes coralliens à travers deux actions : la création d'un réseau de surveillance des récifs et la réalisation d'études sur l'érosion côtière. Elle porte aujourd'hui (2006-2009) trois programmes qui concourent à la consolidation des réseaux existants et au renforcement des

politiques de protection des milieux coralliens, relatifs à l'éducation à l'environnement, à la gestion durable des zones côtières et à la constitution d'un réseau d'aires marines protégées. Une deuxième organisation mène des programmes à l'échelle de l'Afrique de l'est, îles de la Commission de l'océan Indien incluses, la Western Indian Ocean Marine Science Association²⁵ (WIOMSA). Grâce à des financements internationaux, elle soutient la coopération internationale, la recherche scientifique et des actions d'éducation/formation. Enfin, la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (IOC) possède un programme dans l'ouest de l'océan indien, qui vise à développer la coopération entre science et gestion, et à renforcer les dispositifs de surveillance (Indian Ocean Global Ocean Observing System).

²³ La construction de ce réseau est antérieure, car liée à l'émergence du projet de parc marin. Celui-ci, qui date de la fin des années 1970, s'est traduit par la création de l'association parc marin de la Réunion en juillet 1997, puis de la réserve marine en février 2007.

²⁴ La COI est une organisation régionale créée en 1984 qui regroupe Madagascar, les Seychelles, les Comores, Maurice et la Réunion. Elle bénéficie d'importants financements européens.

²⁵ En plus des pays de la COI, la WIOMSA inclut la Somalie, le Kenya, la Tanzanie, le Mozambique et l'Afrique du Sud. Elle a été créée en 1993 pour promouvoir l'éducation, la recherche scientifique et la coopération technique dans le domaine des sciences marines et côtières. Elle compte plus d'un millier de membres individuels et une cinquantaine d'institutions. Elle finance la recherche à travers deux programmes, MASMA (Marine Science for Management) et MARG (Marine Research Grant), dont le premier soutient des travaux appliqués. Elle a aussi pour mission d'assister l'UNEP dans les domaines scientifique, technique et de la gestion. Elle a en particulier été chargée de constituer un réseau d'experts au service des gestionnaires de la région Afrique de l'Est. Ceci atteste bien du processus d'intégration régionale.

À l'île de la Réunion comme dans d'autres régions françaises et européennes²⁶, ce processus d'intégration est aujourd'hui conforté par la mise en œuvre de la politique de gestion intégrée des zones côtières. Initiée par les États-Unis en 1972, elle est aujourd'hui portée par diverses organisations, internationales comme la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (Van Kerkhoff, 2005), et régionales (Union européenne et Commission de l'océan Indien, en particulier). À l'échelle nationale, la Réunion fait partie des 25 lauréats de l'appel à projets lancé en 2005 par la Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires (DIACT).

Au niveau local, le Conseil régional de la Réunion finance diverses structures qui jouent un rôle majeur dans la préservation de l'environnement récifal (aquarium, parc marin, centre d'étude et de découverte des tortues marines...) ainsi que les programmes de recherche scientifique portés par diverses institutions (université, Bureau de recherches géologiques et minières, Institut de recherche pour le développement, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Centre de coopération internationale en recherche agronomique).

Vers des concepts et des méthodes universels ?

Le processus d'intégration qui vient d'être décrit est tout d'abord favorable à l'émergence de concepts transdisciplinaires à portée universelle. On en considèrera ici trois qui ont trouvé un champ d'application fructueux en milieu corallien, ceux de vulnérabilité, de résilience et de capacité de charge.

Le passage du concept de sensibilité écologique (fragilité d'un écosystème au regard de ses caractéristiques propres) à celui de vulnérabilité marque la prise en compte des interventions anthropiques. Ce deuxième concept inclut en effet les impacts des activités humaines, négatifs (dégradations et risques écologiques) comme positifs (politiques de protection et de réhabilitation des milieux). Divers indices synthétiques de vulnérabilité environnementale ont été mis au point dans le cadre de l'élaboration d'outils d'aide à la décision sur les littoraux. Dans l'ouest de l'océan Indien, deux démarches similaires ont été initiées en parallèle, l'une s'appliquant aux récifs coralliens et l'autre aux plages. L'Association pour la recherche et la valorisation des ressources marines (ARVAM) a évalué la vulnérabilité des récifs coralliens des Seychelles et de la Réunion (Bigot *et al.*, 1998 ; Garnier *et al.*, 1999). Afin de valoriser ces travaux novateurs, l'UNESCO et la COI ont soutenu la réalisation d'un guide méthodologique (Dutrieux *et al.*, 2000). Parallèlement, cette dernière a financé l'étude de la vulnérabilité à l'érosion des plages coralliennes des Seychelles (Cazes-Duvat, 2001) et de l'île Rodrigues (Cazes-Duvat, 2003a). À la Réunion, l'élaboration du plan de gestion des plages coralliennes a donné

lieu à la conduite d'une étude similaire pour le compte de l'Association parc marin (Cazes-Duvat, 2003b).

Dans le contexte du changement climatique, l'utilisation du concept de résilience s'est généralisée dans les recherches en biologie récifale (Hughes *et al.*, 2003 ; Bellwood *et al.*, 2004). Il désigne la capacité d'un écosystème à intégrer dans son fonctionnement une perturbation sans changer de structure qualitative. La perturbation, qui met le système en déséquilibre, constitue le principal facteur de son évolution (Aschan-Leygonie, 2000). S'il relève du champ de la science, qui procède à des évaluations, ce concept est porteur pour les gestionnaires, qui doivent préserver et favoriser la résilience en limitant les facteurs de perturbation du milieu et en procédant à des opérations de réhabilitation. Deux types de facteurs naturels extrêmes ont donné lieu à des études de résilience au cours des deux dernières décennies, les cyclones et les épisodes ENSO²⁷. La première a porté sur la régénération des récifs coralliens de l'ouest de la Réunion après le passage du cyclone Firinga en janvier 1989 (Naïm *et al.*, 2000b). D'autres travaux ont été réalisés à la suite de l'épisode ENSO 1997-1998 qui a généré une mortalité corallienne supérieure à 90 % aux Seychelles et aux Maldives (Naeem *et al.*, 1998 ; Teleki et Spencer, 2002). Ils ont montré que la régénération des coraux s'effectue à des vitesses variables et qu'elle n'est pas forcément plus rapide là où les pressions anthropiques sont faibles, comme l'illustrent les résultats obtenus à Aldabra, à Alphonse (Seychelles) et à Komandhoo (atoll de Lhaviyani, Maldives) (Schuhmacher *et al.*, 2006 ; Downing *et al.*, 2006 ; Hagan et Spencer, 2006). En géomorphologie, une étude de résilience a été réalisée à la suite du passage du cyclone Kalunde (mars 2003) à proximité des côtes de l'île Rodrigues (Cazes-Duvat, 2003a).

²⁶ La recommandation du parlement européen de mai 2002 est à l'origine, en France, du lancement de l'appel à projets de 2005 par la DIACT.

²⁷ Dans l'océan Indien, aux latitudes proches de l'équateur, les épisodes El Niño (El Niño Southern Oscillation) s'accompagnent d'une augmentation anormale de la température océanique de surface. Il en résulte une forte mortalité corallienne, le blanchissement des coraux étant dû à l'expulsion des zooxanthelles, algues vertes qui assurent la photosynthèse.

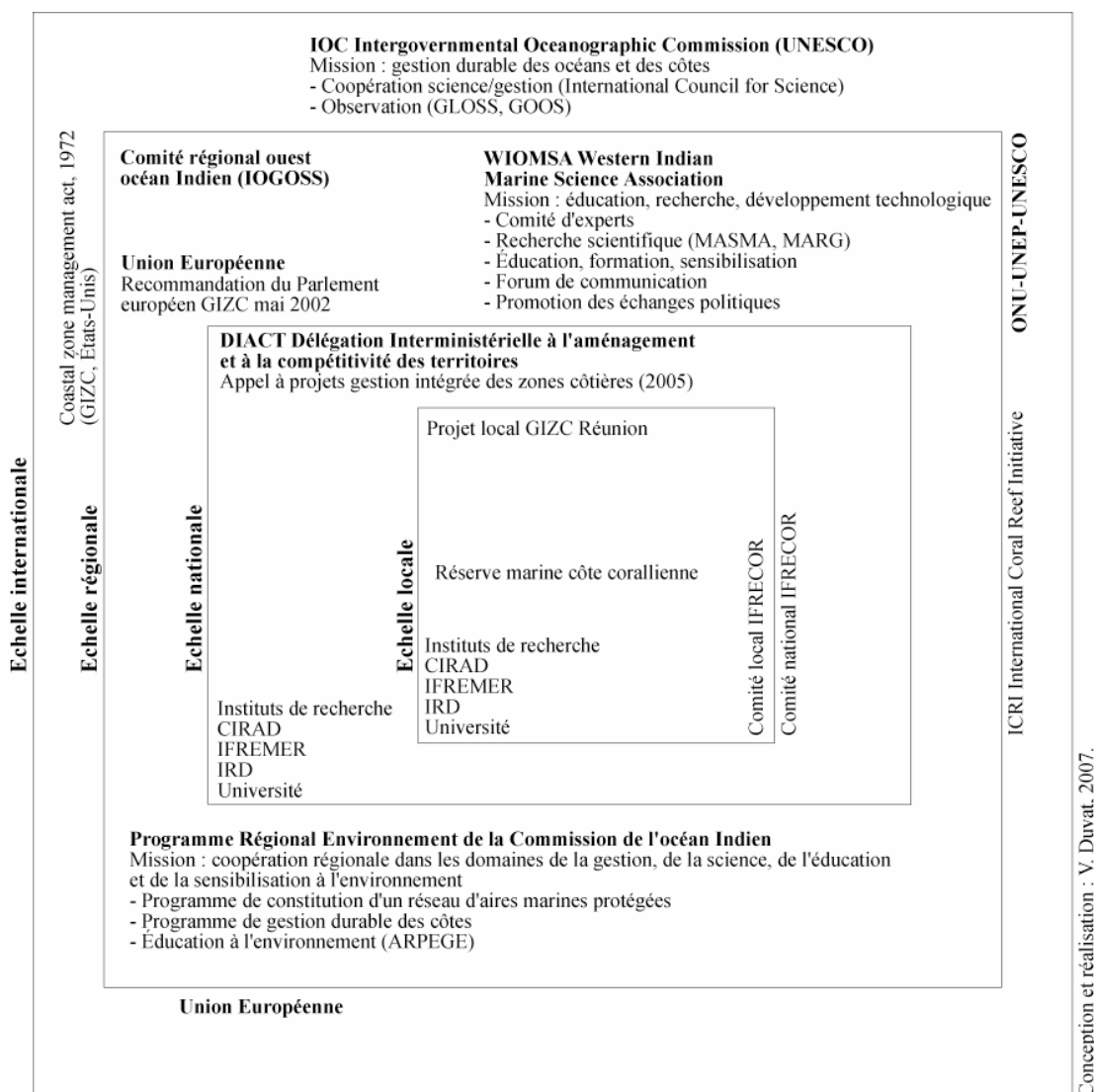


Figure 6 - Le processus d'intégration science/gestion du global au local : application aux systèmes coralliens à partir de l'exemple du département d'outre-mer de la Réunion.

La volonté de limiter les impacts de la fréquentation sur des milieux sensibles et/ou protégés a fait émerger un troisième concept dans le champ de la gestion, celui de capacité de charge (Duvat, à paraître). Celle-ci se définit comme le seuil au-delà duquel la fréquentation se traduit par des dégradations environnementales irréversibles (perte de biodiversité, prélèvements ou destructions menaçant l'équilibre des communautés en présence) et/ou par des problèmes sociaux (conflits d'usage, violence). Bien qu'il reste controversé²⁸, ce concept a donné lieu à diverses études scientifiques. Les biologistes marins J.P. Hawkins et C.M. Roberts (1997) ont mis au point une méthodologie qu'ils ont appliquée à des récifs de la

mer Rouge et de la Caraïbe. Aucune application de ce type n'a jusqu'à présent été effectuée dans l'océan Indien occidental. Néanmoins, une étude à portée globale, qui intègre les connaissances disponibles sur l'état et la vulnérabilité des récifs coralliens, a été réalisée sur le littoral corallien de la Réunion (Cazes-Duvat et Pesme, 2002). Fondée sur l'évaluation de la vulnérabilité de l'environnement et de la société, d'un côté, et sur les limites du changement acceptable de l'autre, elle a abouti à la proposition de valeurs de fréquentation maximale pour chacun des secteurs de côte et à la réalisation d'une cartographie générale destinée aux gestionnaires.

Les concepts de vulnérabilité, de capacité de charge et de résilience s'inscrivent dans le même champ d'action, l'aide à la gestion intégrée des milieux. Ils s'appliquent aujourd'hui à différents types de systèmes environnementaux et sociétaux, ce

²⁸ On se reportera à l'ouvrage critique de F. Deprest intitulé *Enquête sur le tourisme de masse. L'écologie face au territoire* (1997), Belin, Paris, 207 p.

qui traduit bien l'universalité relative des préoccupations des gestionnaires, au moins dans l'hémisphère nord.

Conclusion

Cet article a d'abord permis de montrer que certains objets scientifiques se sont précocement prêtés aux travaux de recherche interdisciplinaires, comme cela a été le cas des systèmes coralliens à partir des années 1960. Deux faits expliquent cette situation, les caractéristiques de ces milieux – originaux par le rôle des facteurs biologiques dans leur formation et leur évolution – et la fonction d'indicateur environnemental des récifs coralliens. D'où la construction, à partir des années 1970, d'une culture scientifique interdisciplinaire dont témoignent la réalisation d'ouvrages majeurs, la mise au point d'une terminologie commune et l'utilisation de méthodes de recherche identiques par les géologues, les biologistes marins, les géomorphologues et les océanographes. Il n'y a donc rien de surprenant à ce que nombre d'études régionales aient été réalisées par des équipes pluridisciplinaires entre 1970 et 1990. Deux axes de recherche ont été particulièrement favorables à ce mouvement, l'eustatisme et les impacts des tempêtes. Au cours de cette première période, l'émergence de l'interdisciplinarité a donc relevé d'une dynamique endogène.

La décennie 1990 marque l'ouverture d'une deuxième période, caractérisée par le renouvellement des pratiques et des fonctions de la recherche scientifique en réponse à l'affirmation d'un nouveau paradigme, le développement durable, et à l'apparition d'enjeux de société planétaires. Des facteurs exogènes (coopération internationale, demande des acteurs, politiques de financement) ont alors impulsé une nouvelle évolution de la recherche scientifique, qui correspond à l'émergence de la transdisciplinarité. Celle-ci est marquée par une ouverture vers les sciences de la société (prise en compte des impacts anthropiques dans l'évolution des milieux ; études globales associant facteurs naturels et humains) et par le développement rapide de la recherche appliquée. Néanmoins, on constate que les travaux en sciences de la nature et en sciences sociales se développent encore le plus souvent séparément, ce qui s'explique certainement par l'existence d'un fossé culturel entre ces deux champs disciplinaires. Des concepts globaux à portée universelle (vulnérabilité, résilience, capacité de charge) se sont néanmoins affirmés, contribuant à enrichir le langage commun.

Par ailleurs, on constate que le développement de l'inter- et de la transdisciplinarité ne remet aucunement en cause les approches disciplinaires et pluridisciplinaires. Les progrès de l'intégration scientifique ne sont ni linéaires, ni irréversibles. Une même période se caractérise par la réalisation de travaux relevant de différents niveaux d'intégration scientifique et certaines décennies sont marquées par des recherches essentiellement disciplinaires. Ainsi en a-t-il été des années 1980, au cours desquelles les progrès de l'interdisciplinarité ont été mineurs par rapport à ceux réalisés pendant la décennie précédente.

Le développement de la recherche-action fait à juste titre redouter à certains chercheurs l'évolution vers une science « unique » par ses pratiques, ses fonctions et ses objets. Cette tendance n'est pas souhaitable, car elle pourrait remettre en cause l'objectivité et la liberté de la science ainsi que le développement de travaux de recherche fondamentale qui ne trouvent pas (encore) d'application pour la société.

Biographie

V. Duvat (anciennement Cazes-Duvat) est spécialiste de géomorphologie, aménagement et gestion des littoraux, en particulier tropicaux (océan Indien, Petites Antilles). Elle coordonne par ailleurs le programme de recherche transdisciplinaire « Qualiplates » (2007-2010) qui accompagne la mise en œuvre de la GIZC dans le Pays Marennes Oléron.

Bibliographie

- Aram J.D., 2004, Concepts of interdisciplinarity : configurations of knowledge and action. *Human Relations*, 57,4, 379-412.
- Aschan-Leygonie C., 2000, Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux. *L'Espace Géographique*, 1, 64-77.
- Baines G.B.K., Beveridge P.J., Maragos J.E., 1974, Storms and island building at Funafuti atoll, Ellice islands. *Proc. 2nd Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 485-496.
- Baines G.B.K., McLean R.F., 1976, Resurveys of 1972 hurricane rampart on Funafuti atoll. *Search*, 7, 36-37.
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G., Rougerie F., 1996, Sea level record from Tahiti corals and the timing of deglacial meltwater discharge. *Nature*, 382, 241-244.
- Barry S.J., Cowell P.J., Woodroffe C.D., 2007, A morphodynamic model of reef-island development on atolls. *Sedimentary Geology*, 197, 47-63.
- Battistini R., Bourrouilh F., Chevalier J.-P., Coudray J., Denizot M., Faure G., Fisher J.-C., Guilcher A., Harmelin-Vivien M., Jaubert J., Laborel J., Montaggioni L., Masse J.-P., Mauge L.-A., Peyrot-Clausade M., Pichon M., Plante R., Plaziat J.-C., Plessis Y.B., Richard G., Salvat B., Thomassin B.A., Vasseur P., Weydert P., 1975, *Éléments de terminologie récifale indopacifique*. Téthys, 7, 1, 1-111.
- Battistini R., Lebigre J.-M., 1994, Les littoraux tropicaux, enregistreurs de l'évolution de l'environnement. In : R. Maire, S. Pomel, J.-N. Salomon (eds.) – *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*, n°13, p. 255-273. Presses Universitaires de Bordeaux, Espaces Tropicaux.
- Bayliss-Smith T.P., 1988, The role of hurricanes in the development of reef islands, Ontong Java atoll, Solomon islands. *The Geographical Journal*, 154, 3, 235-248.
- Bellwood D.R., Hughes T.P., Folke C., Nyström M., 2004, Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827-833.
- Bigot L., Maharavo J., Dutrieux E., 1998, Étude pilote de la cartographie des zones peu profondes de Mahé (Seychelles). Programme IOC/UNESCO-PRE-COI/UE.
- Blumenstock D.I. (ed.), 1961, A report on typhoon effects upon Jaluit atoll. *Atoll Research Bulletin*, 15, 75, 105 p.
- Bosch O.J.H., Ross A.H., Beeton R.J.S., 2003, Integrating science and management through collaborative learning and better information management. *Syst. Res. Behav. Sci.*, 20, 2, 107-118.
- Bourrouilh-Le Jan F., 1994, Les récifs coralliens : indicateurs de l'environnement et des paléoenvironnements, p. 275-297. In : R. Maire, S. Pomel et J.-N. Salomon (coord.), *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*, Presses Universitaires de Bordeaux, 492 p.
- Bourrouilh-Le Jan F., Talandier J., 1985, Sédimentation et fracturation de haute énergie en milieu récifal : tsunamis, ouragans et cyclones et leurs effets sur la

- sédimentologie et la géomorphologie d'un atoll : motu et hoa à Rangiroa, Tuamotu, SE du Pacifique. *Marine Geology*, 67, 263-333.
- Braithwaite C.J.R., 1971, Seychelles reefs structure and development. *Regional variations in Indian ocean reefs. Symp. Zool. Soc. Lond.*, 28 : 39-63.
- Braithwaite C.J.R., 1984, Geology of the Seychelles. In : D.R. Stoddart (ed.) – *Biogeography and ecology of the Seychelles islands*, p.17-38. La Haye/Boston/Lancaster.
- Braithwaite C.J.R., Montaggioni L.F., Camoin G.F., Dalmasso H., Dullo W.-Ch., Mangini A., 2000, Origins and development of holocene reefs : a revisited model based on boreholes in the Seychelles, Indian Ocean. *Int. J. Earth Sci.*, 89, 431-445.
- Camoin G.F., Colonna M., Montaggioni L.F., Casanova J., Faure G., Thomassin B.A., 1997, Holocene sea-level changes and reef development in the southwestern Indian ocean. *Coral Reefs*, 16, 247-259.
- Camoin G.F., Montaggioni L., Braithwaite C.J.R., 2004, Late glacial to post-glacial sea levels in the western Indian ocean. *Marine Geology*, 206, 119-146.
- Cazes-Duvat V., 1999, Les littoraux des Îles Seychelles. L'Harmattan, Paris, 365 p.
- Cazes-Duvat V., 2001, Évaluation de la vulnérabilité des plages à l'érosion : application à l'archipel des Seychelles. *Géomorphologie*, 1, 31-40.
- Cazes-Duvat V., 2003a, Étude de vulnérabilité des plages de l'île Rodrigues. Rapport final. Programme Régional Environnement de la Commission de l'océan Indien (PRE-COI/UE), 7. ACP.RPR.068, 94 p.
- Cazes-Duvat V., 2003b, Étude de vulnérabilité des plages du littoral corallien de l'île de la Réunion. Étude réalisée pour le compte de l'ONF et de l'Association parc marin de la Réunion, 59 p.
- Cazes-Duvat V., 2005, Les impacts morphologiques du cyclone Kalunde sur les côtes sableuses de l'île Rodrigues (océan Indien occidental). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 3, 293-308.
- Cazes-Duvat V., Paskoff R., Durand P., 2002, Évolution récente des deux îles coralliennes du banc des Seychelles (océan Indien occidental) : Denis et Bird. *Géomorphologie*, 3, 211-222.
- Cazes-Duvat V., Pesme J.-O., 2002, Étude de capacité de charge des plages des côtes ouest et sud de l'île de la Réunion. Rapport de synthèse. Étude réalisée pour le compte du Conseil régional de la Réunion, Programme de recherche en gestion des zones côtières, 63 p.
- Cazes-Duvat V., Paskoff R., 2004, Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement. L'Harmattan, Paris, Coll. Milieux naturels et sociétés, 187 p.
- Cilek V., 1978, Geological investigations on the beaches of Mahe in the Seychelles archipelago. *Cas. Mineral. Geol.*, roc. 23, c/2/1978, p. 149-157.
- Doumenge F., 1966, L'homme dans le Pacifique Sud. Étude géographique. Publications de la société des océanistes, Paris, Musée de l'homme, n 19, 633 p.
- Downing N., Stobart B., Buckley R., Teleki K., 2006, Recovery of coral and fish following the 1998 El Nino event at Aldabra atoll, southern Seychelles : a site of minimal anthropogenic influence. *Proc. of the 10th Intern. Coral Reef Symp.*, Okinawa, Japan, 28 juin-2 juillet 2004, p. 664-675.
- Dutrieux E., Canovas S., Denis J., Hénocque Y., Quod J.-P., Bigot L., 2000, Guide méthodologique pour l'élaboration de cartes de vulnérabilité des zones côtières de l'océan Indien. Réalisé par CRÉOCÉAN, IFREMER et ARVAM pour le compte de l'UNESCO/IOC et le PRE-COI/UE, Manuels et guides n°38, 40 p.
- Duvat V., 2007a, Les littoraux coralliens des petites îles de l'océan Indien (Mascareignes, Seychelles, Maldives). Volume 1 – Géomorphologie. *Océanis*, fascicules n°31, 1/2, 189 p.
- Duvat V., 2007b, Proposition de typologie des plages coralliennes (océan Indien occidental). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51, 3, 307-325.
- Duvat V., à paraître, L'intérêt d'une approche en termes de capacité de charge pour la gestion des littoraux : l'exemple de l'île de la Réunion (océan Indien). Colloque International de Lille. Le littoral : subir, dire, agir, 15-17 janvier 2008.
- Garnier R., Bigot L., Naïm O., Moine-Picard M., Troadec R., 1999, Projet de mise en réserve du littoral ouest et sud de la Réunion. Cartographie de la sensibilité des écosystèmes marins. Rapport ARVAM pour la DIREN Réunion, 93 p.
- Guilcher A., 1979, Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson, Paris, 344 p.
- Guilcher A., 1988, Coral reef geomorphology. Wiley, Chichester, 288 p.
- Hagan A.B., Spencer T., 2006, Reef recovery at Alphonse atoll, western Indian ocean, following the 1997-1998 ocean warming event. *Proc. of the 10th Intern. Coral Reef Symp.*, Okinawa, Japan, 28 juin-2 juillet 2004, p. 676-682.
- Harmelin-Vivien M.L., Laboute P., 1986, Catastrophic impacts of hurricanes on atoll outer reef slopes in the Tuamotu (French Polynesia). *Coral Reefs*, 5 : 55-62.
- Harmelin-Vivien M.L., 1994, The effects of storms and hurricanes on coral reefs : a review. In : C.W. Finkl (ed.) – *Coastal hazards, perception, susceptibility and mitigation. Journal of Coastal Research, Special Issue 12*, 211-231.
- Hawkins J.P., Roberts C.M., 1997, Estimating the carrying capacity of coral reefs for scuba diving. *Proc. 8th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 1923-1926.
- Hillis Z.M., Bythell J.C., 1998, « Keep-up or give-up » : hurricanes promote coral survival by interrupting burial from sediment accumulation. *Coral Reefs*, 17 : 262.
- Hirsch Hadorn G., Bradley D., Pohl C., Rist S., Wiesmann U., 2006, Implications of transdisciplinarity for sustainable research. *Ecological Economics*, 60, 119-128.
- Hubbard D.K., 1986, Sedimentation as a control of reef development : St Croix, U.S.V.I. *Coral Reefs*, 5, 117-125.
- Hubbard D.K., 1992, Hurricane-induced sediment transport in open-shelf tropical systems – an example from St Croix, United States Virgin Islands. *J. Sed. Petrol.*, 62, 946-960.
- Hubbard D.K., Parsons K.M., Bythell J.C., Walker N.D., 1991, The effects of hurricane Hugo on the reefs and associated environments of St Croix, US Virgin Islands. A preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, 8, 33-48.
- Hughes T.P., Baird A.H., Bellwood D.R., Card M., Connolly S.R., Folke C., Grosberg R., Hoegh-Guldberg O., Jackson J.B.C., Kleypas J., Lough J.M., Marshall P., Nyström M., Palumbi S.R., Pandolfi J.M., Rosen B., Roughgarden J., 2003, Climate change, human impacts and the resilience of coral reefs. *Science*, 301, 929-933.
- Jokiel P.L., 2006, Impact of storm and waves and storm flood on Hawaiian reefs. *Proc. 10th Intern. Coral Reef Symp.*, 28 juin-2 juillet 2004, Okinawa, Japon, p. 390-399.
- Jones O.A., Endean R., 1977, Biology and geology of coral reefs. Academic Press, New York.
- Kench P.S., 2006, Morphology and formation of Dhakandhoo island, South Maalosmadulu atoll, Maldives. *Proc. 10th Intern. Coral Reef Symposium*, 28 juin-2 juillet 2004, Okinawa, Japon, p. 504-511.
- Maragos J.E., Baines G.B.K., Beveridge P.J., 1973, Tropical cyclone Bebe creates a new land formation on Funafuti atoll. *Science*, 1161-1163.
- Marshall J.F., Jacobson G., 1985, Holocene growth of a mid-Pacific atoll : Tarawa, Kiribati. *Coral Reefs*, 4 : 11-17.
- Max-Neef M.A., 2005, Foundations of transdisciplinarity. *Ecological Economics*, 53 : 5-16.
- McIntire W.G., Walker H.J., 1964, Tropical cyclones and coastal morphology in Mauritius. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, LIV : 582-596.
- Montaggioni L., 1974, Coral reefs and quaternary shorelines in the Mascarene archipelago, Indian Ocean. *Proc 2nd Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 579-583.
- Montaggioni L.F., 1988, Holocene reef growth history in mid-plate high volcanic islands. *Proc. 5th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 3, p. 455-460.
- Montaggioni L., Faure G., 1980, Les récifs coralliens des Mascareignes. *Coll. des Travaux du Centre Universitaire de la Réunion*, 151 p.
- Montaggioni L.F., Faure G., 1997, Response of coral reef communities to sea level rise : a Holocene model from Mauritius (Western Indian Ocean). *Sedimentology*, 44 : 1053-1070.
- Naem I., Rasheed A., Zuhair M., Riyaz M., 1998, Coral bleaching in the Maldives. Survey carried out in the North and South Male atolls. Male, Marine Research Section and Environment Research Unit, unpublished report.
- Naïm O., Cuët P., Mangar V., 2000a, The Mascarene islands, p. 353-380. In : T.R. McClanahan, C.R.C. Shepard, D.O. Obura (eds.) – *Coral reefs of the Indian Ocean. Their ecology and conservation*. Oxford University Press, New York.
- Naïm O., Chabanet P., Done T., Tourrand C., Letourneur Y., 2000b, Regeneration of a reef flat ten years after the impact of the cyclone Firinga (Reunion, SW Indian Ocean). *Proc. 9th Intern. Coral reef Symp.*, vol. 1, p. 547-553.
- Neumann A.C., Macintyre I.G., 1985, Reef response to sea level rise : keep-up, catch-up or give-up. *Proc. 5th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 3, p. 105-119.

- Nunn P.N., 1994, *Oceanic islands*. Blackwell Publishers, Cambridge, 413 p.
- Plummer P.S., 1996, Geological evolution of the Seychelles bank, achievements and prospects. University of St Andrews.
- Richmond B.M., 1992, Development of atoll islets in the Central Pacific. *Proc. 7th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 1185-1194.
- Rip A., 1997, A cognitive approach to relevance of science. *Social Sci. Inform.*, 36(4) : 615-640.
- Schuhmacher H., Loch K., See W., 2006. Post-bleaching development of a Northern Maldivian Reef (1998-2004). *Proc. of the 10th Intern. Coral Reef Symp.*, Okinawa, Japan, 28 June-2 July 2004, p. 657-663.
- Scoffin T.P., 1993, The geological effects of hurricanes on coral reefs and the interpretation of storm deposits. *Coral Reefs*, 12, 203-221.
- Siddiquie H.N., 1980, The ages of the storm beaches of the Lakshadweep (Laccadives). *Marine Geology*, 38, M11-M20.
- Stoddart D.R., 1963, Effects of hurricane Hattie on the British Honduras reefs and cays, October 30-31, 1961. *Atoll Research Bulletin*, 95, 142 p.
- Stoddart D.R., 1966, Reef studies at Addu atoll, Maldives islands. Preliminary results of an expedition at Addu atoll. *Atoll Res. Bull.*, 116 : 1-22.
- Stoddart D.R., 1971a, Environment and history in Indian ocean reef morphology. Regional variation in Indian Ocean Reefs. *Symp. Zool. Soc. London*, 28 : 3-38.
- Stoddart D.R., 1971b, Coral reefs islands and catastrophic storms, p. 155-197. In J.A. Steers (ed.) – *Applied coastal geomorphology*, Macmillan, London.
- Stoddart D.R., Steers J.A., 1977, The nature and origin of coral reef islands, p. 59-105. In : O.A. Jones et R. Endean (eds.) – *Biology and geology of coral reefs*, Academic Press, New York, vol. 4, *Geology* 2.
- Teleki K.A., Spencer T., 2002, Large-scale ocean-atmosphere dynamics of the Indian Ocean and coral bleaching. *Proc. 9th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 1149-1153.
- Tremblé E., Colgan M., Keevican M., 1997, Hurricane disturbance and coral reef development : geographic information system analysis of 501 years of hurricane data from the Lesser Antilles. *Proc. 8th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 1, p. 541-546.
- Van Kerkhoff L., 2005, Integrated research : concepts of connection in environmental science and policy. *Environmental Science and Policy*, 8, 452-463.
- Veeh H.H., 1966, The 230/U 238 and U234/U238 ages of Pleistocene high sea-level stand. *Journal Geophys. Res.*, 71, 3379-3386.
- Woodley J.D., 1989, The effects of hurricane Gilbert on coral reefs of Discovery Bay. UNEP assessment. *Regional Seas Reports and Studies*, vol. 1, p. 541-546.
- Woodley J.D., 1981, Hurricane Allen's impacts on Jamaican coral reefs. *Science*, 214, 749-755.
- Woodroffe C.D., 1992, Morphology and evolution of reef islands in the Maldives. *Proc. 7th Intern. Coral Reef Symp.*, vol. 2, p. 1217-1226.
- Woodroffe C.D., McLean R.F., 1994, Reef islands of the Cocos (Keeling) islands. *Atoll Res. Bull.*, 403, 1-36.
- Woodroffe C.D., 2002, *Coasts : form, process and evolution*. Cambridge University Press, 623 p.
- Woodroffe C.D., Stoddart D.R., Spencer T., Scoffin T.P., Tudhope A.W., 1990, Holocene emergence in the Cook islands, South Pacific. *Coral Reefs*, 9 : 31-39.
- Woodroffe C.D., Kennedy D.M., Jones B.G., Phipps C.V.G., 2004, Geomorphology and late quaternary development of Middleton and Elizabeth reefs. *Coral Reefs*, 23 : 249-262.
- Xue C., 1997, Coastal erosion and management of Majuro atoll, Marshall islands, *Journal of Coastal Research*, 17, 4, 909-918.
- Yamano H., Miyajima T., Koike I., 2000, Importance of foraminifera for the formation and maintenance of a coral sand cay : Green Island, Australia, *Coral Reefs*, 19, 51-58.