

VERS UNE CARTOGRAPHIE DES TRAJECTOIRES DES COMMUNAUTÉS RÉCIFALES EN RÉPONSE AUX PERTURBATIONS : APPROCHE DU BLANCHISSEMENT CORALLIEN SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION

Gwenaëlle Pennober

UMR 228 ESPACE-DEV (IRD, UM2, UAG, UR)
Université de la Réunion BP 50172 - 97492 Sainte-Clotilde Cedex
Tél : +262 2 62 29 93 15 – Fax : +262 2 62 28 48 79
gwenaëlle.pennober@univ-reunion.fr

Résumé

L'élévation de la température de l'eau associée à El Niño Southern Oscillation (ENSO) en 1997/98 a provoqué un blanchissement généralisé des récifs coralliens à l'échelle de la planète. Après cet événement, un peu partout dans le monde, des projets ont été lancés afin d'évaluer les impacts de la phase aiguë de blanchissement. Les données de télédétection ont été largement utilisées pour caractériser et prévoir le blanchissement des coraux. Les images satellites ont permis de développer des outils opérationnels en phase d'alerte de blanchissement. Pourtant, la détection du corail blanchi se cantonne aux épisodes aigus de blanchissement. Jusqu'à présent, il n'existe pas de données de télédétection qui contribuent à un suivi régulier des formes interannuelles de blanchissement dont l'occurrence devrait augmenter en raison des changements climatiques en cours. La principale raison est que, dans les longueurs d'onde du visible, il n'est pas possible d'identifier une signature du blanchissement des coraux sans confusion avec d'autres entités récifales. À partir de l'exemple d'un épisode de blanchissement sur l'île de La Réunion (sud-ouest de l'Océan Indien), cet article présente une nouvelle contribution de la télédétection pour caractériser le blanchissement des coraux, mais aussi et surtout les contraintes et limites méthodologiques de telles méthodologies. L'approche orientée objet et l'analyse diachronique dans un temps très court ouvrent de nouvelles perspectives. Quatre images Spot 5 orthorectifiées ont été utilisées pour tenter de caractériser l'épisode de blanchissement de l'été austral 2003-2004.

Mots-clés : île de La Réunion, blanchissement corallien, télédétection, Spot 5, analyse d'image orientée objet

Abstract

Elevated water temperatures associated with the 1997/98 El Niño Southern Oscillation (ENSO) caused widespread bleaching of coral reefs around the world. After this event, all over the world, different projects were launched in order to assess the impacts of the acute of bleaching. Remote sensing data have been widely used to characterize and predict coral bleaching events. Satellite images have led to develop operational tools in alert phase of bleaching. Yet, the detection of bleached coral is still the result of some specific studies – when the coral is severely affected. Until now, there is no remote sensing data which contributes to a regular monitoring on reef affected each year by bleaching events. However, the climatic change should increase the occurrence of this phenomenon. The principal reason for this is that a coral bleaching signature cannot be identified in the visible wavelengths without confusion with other spatial entities. Starting from the example of the Reunion Island located in the south-west of Indian Ocean, this paper presents a new contribution of remote sensing to characterize coral bleaching. In satellite image processing, the object-oriented approach and diachronic analysis over very short time open new perspectives. Four Spot 5 ortho-images have been used to attempt characterizing the 2003-2004 bleaching event.

Keywords: Reunion Island, coral bleaching, remote sensing, Spot 5, object based image analysis

1. Introduction

Les récifs coralliens constituent l'un des écosystèmes les plus riches en biodiversité de la planète et offrent une grande variété de services écosystémiques à près d'un milliard d'individus, parmi lesquels la pêche vivrière ou commerciale, les activités touristiques et de loisirs, des ressources dans le secteur pharmaceutique et la protection des côtes contre la houle et les phénomènes de surcotes (Moberg et Folke, 1999 ; Bellwood et al., 2004). Mais ce sont aussi des écosystèmes qui se

dégradent rapidement sous l'effet de la surexploitation, de l'hyper-sédimentation et des apports de nutriments associés aux activités anthropiques sur les bassins versants, des événements paroxysmaux (cyclones) ainsi que des dérèglements climatiques (Hoegh-Guldberg, 1999 ; Hughes et al., 2003 ; Bellwood et al., 2004 ; Fabricius, 2005).

La vulnérabilité de ces écosystèmes n'est plus à démontrer malgré leur persistance à travers les temps géologiques sur les littoraux tropicaux (Hoegh-Guldberg, 1999). Selon le dernier bilan de l'état de santé des récifs coralliens, 54 % des récifs mondiaux sont menacés.

Parmi eux, 20 % sont menacés de disparition d'ici 20 à 40 ans (Wilkinson, 2008). Étudier les trajectoires de ces écosystèmes, c'est-à-dire l'évolution au sens biologique (altération, résilience) face aux changements globaux ou suite à des événements exceptionnels, constitue donc un enjeu de recherche et de conservation.

Le blanchissement corallien est devenu le principal facteur de mortalité des coraux et, par conséquent, de dégradation des formations récifales. Il se traduit par des périodes où le corail devient pâle ou blanc. Ce processus de dépigmentation des colonies coralliennes correspond à une détérioration de la symbiose qui existe entre les zooxanthelles et les polypes du corail. Cette symbiose permet la construction du squelette corallien (Goreau et Hayes, 1994). Si les conditions de résilience ne sont pas réunies, outre la mort des coraux blanchis, le phénomène entraînerait une perte importante de biodiversité. Le coût financier d'un épisode de blanchissement tel que celui qui s'est produit en 1997-1998 dans l'Océan Indien durant l'épisode ENSO (El Niño Southern Oscillation), bien que difficile à évaluer, serait ainsi été estimé entre 700 millions et 8,9 milliards de dollars (Wilkinson et al., 1999). Appréhender l'impact écologique et identifier les principaux stress à l'origine de ces perturbations constituent encore des enjeux de recherche.

Dans l'arsenal d'outils développés pour l'étude des trajectoires des écosystèmes coralliens (Andréfouët et al., 2002 ; Palandro et al., 2003 ; Andréfouët et Riegl, 2004 ; Scopélitis et al., 2007), l'information spatialisée commence depuis une dizaine d'années à s'imposer. Les données de télédétection ont été utilisées pour mesurer l'étendue et prédire l'occurrence d'épisodes de blanchissement corallien (Clark et al., 2000). La combinaison temporelle d'images de télédétection obtenues à partir d'un seul ou de plusieurs capteurs a été expérimentée pour l'analyse des dynamiques des herbiers à phanérogames marines ou pour le suivi des habitats récifaux (Palandro et al., 2003). Les séries temporelles d'images de télédétection (satellites et ariennes) permettent, grâce à la détection de changements, de retracer à l'échelle d'un récif les trajectoires écologiques sur plusieurs décennies. Des altérations coralliennes pérennes et temporaires, ainsi que des processus de type recouvrement et résilience corallienne, peuvent être observés. Cependant, du point de vue méthodologique, ces cartographies diachroniques sont jusqu'à présent réalisées à partir de numérisations interactives à l'écran (Scopélitis et al., 2009). Les règles de segmentation ne sont pas formalisables, et donc non reproductibles. De nouvelles approches doivent être explorées telles que l'analyse d'image orientée objet (OBIA pour Object-Based Image Analysis), ainsi que la Très Haute Résolution Spatiale (THRS) et la Très Haute Répétitivité Temporelle (THRT).

Sur l'île de La Réunion, les premières initiatives dans ce sens ont été réalisées à partir de l'exploitation des images Spot 5 disponibles dans la base de données

Isle-Réunion du programme Kalideos du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Ces résultats, s'ils sont significatifs, peuvent constituer un prélude à l'inscription de ce type de recherche dans les objectifs du projet de Surveillance Environnementale Assistée par Satellite dans l'Océan Indien (SEAS-OI). Ce projet vise en effet à mettre en œuvre à La Réunion, un « pôle d'excellence » en télédétection, à vocation régionale sur le sud-ouest de l'Océan Indien (SOOI) à partir d'une station de réception et de traitement des images produites par les satellites dédiés à l'observation de la Terre. En se positionnant comme observatoire de l'environnement pour le développement durable, La Réunion sera un acteur majeur dans le réseau international d'observatoires en cours de constitution autour des initiatives régionales, nationales, européennes et internationales. L'antenne de réception d'images satellites devrait dans le cadre de ce programme offrir une meilleure maîtrise sur l'acquisition des images et garantir une THRT pouvant contribuer à une meilleure détection des phénomènes de blanchissement.

2. Contexte de l'étude

2.1. Détection du blanchissement corallien à La Réunion

La Réunion est une île volcanique de 207 km de circonférence qui culmine à 3 070 m, située par 55° 29' de longitude est et 21° 53' de latitude sud dans le sud-ouest de l'Océan Indien.

Ce département français d'outre-mer, se situe dans la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Il est sous l'influence du courant sud équatorial qui arrive de l'est et apporte des eaux chaudes dont les températures de surface varient entre 21 et 27°C. Cette île volcanique, qui a commencé à émerger il y a 2 millions d'années, repose sur le plancher océanique du bassin des Mascareignes à - 4200 m de profondeur. Les récifs actuels de l'île de La Réunion auraient commencé à s'installer vers 8 500 BP, époque à laquelle le niveau de la mer devait être 20 mètres plus bas (Montaggioni et Faure, 1980). Bien que les premières colonisations récifales soient relativement anciennes, les formations actuelles sont de types bancs récifaux et récifs frangeants. Ils constituent une ceinture discontinue d'une longueur totale de 25 km sur la côte ouest de l'île, entre le Cap La Houssaye et Grand Bois (**Figure 1**), soit à peine 8 % du linéaire côtier. Seule la côte ouest de l'île, sous le vent, présente un contexte relativement favorable au développement de complexes récifaux.

Le site d'expérimentation se localise dans le complexe nord au sud de la plage de l'Ermitage, au cœur de la Réserve Nationale Marine de la Réunion (RNMR). Dans ce secteur, le récif frangeant se caractérise par un platier externe de très faible profondeur émergeant à marée basse de vives-eaux (marnage de 0,90 m). Il est colonisé par une majorité d'Acropores de forme massive

en raison de l'hydrodynamisme important. Le platier interne accueille des colonies d'Acropores branchus, alors que l'on trouve des Montipores et Millepores au niveau de la dépression d'arrière récif (Dar) qui peuvent s'étendre jusqu'au rivage (NAIM). Les trajectoires écologiques qui semblent se mettre en place sur ce secteur sont une régression corallienne et le développement des algues et d'herbiers. Depuis 1998, ce site est concerné par un blanchissement interannuel des récifs par taches pouvant expliquer en partie ces phénomènes. Un suivi des épisodes de blanchissement tend à se mettre en place depuis 2001.

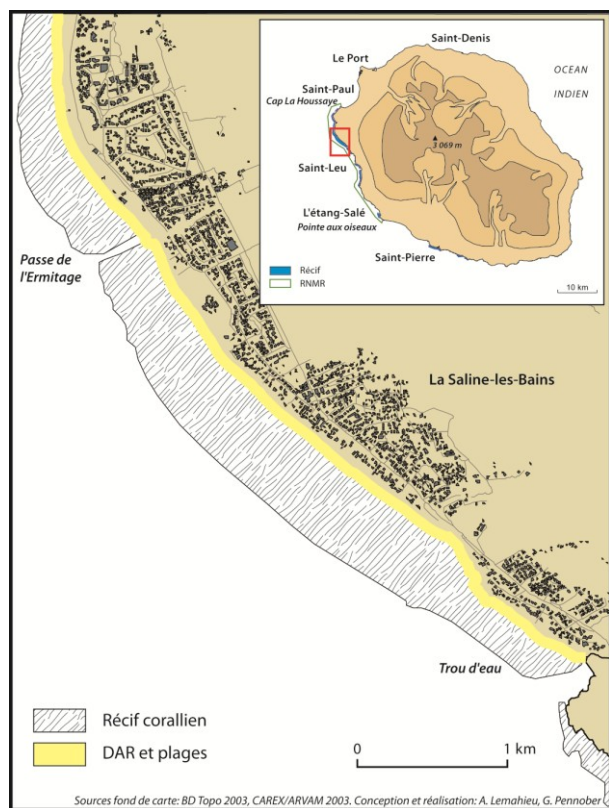


Figure 1 : Localisation du site d'étude.

2.2. Détection du blanchissement corallien à La Réunion

2.2.1. La phase d'alerte

Depuis 2006, les alertes de blanchissement des coraux à La Réunion sont élaborés dans le cadre du projet « Bleaching Alert Systems project of the IUCN Climate Change and Coral Reefs Working Group » en partenariat avec le programme CORDIO (Coastal Oceans Research and Development in the Indian Ocean). Ce système d'alerte est un sous-produit du programme Coral Reef Watch (CRW) de la NOAA.

Afin d'estimer le blanchissement, les informations sur la température de surface de la mer (SST) et un degré de blanchissement observé par un réseau informel de surveillance des récifs sont mises à la disposition des chercheurs et des gestionnaires. Le système NOAA's Satellite Bleaching Alert (SBA) se traduit par un envoi

automatique d'informations par email montrant l'état de stress thermique. Ce système permet d'avoir une vue synoptique des océans de la planète en quasi-temps réel et la possibilité de surveiller à distance des zones de récif sans moyen de suivi sur place. Les données sont mises à jour deux fois par mois durant la période estivale. Cependant, un stress thermique ne se traduit pas de manière systématique par un blanchissement. Ce système doit donc être complété par des mesures de la réalité ou de l'ampleur du phénomène.

2.2.2. La mesure sur le terrain

Actuellement sur l'île de La Réunion, le blanchissement corallien est estimé selon deux modes :

- Les programmes opérationnels de suivi de l'état de santé des récifs tel que le Global Coral Reef Monitoring (GCRMN) intègrent des levés de terrain sous forme de transects ou de quadrats afin d'évaluer l'ampleur d'un épisode de blanchissement ;
- La cartographie des surfaces blanchies est réalisée à partir de un ou deux survols ULM par saison. Depuis 2001, des cartes (CAO) sont produites par report des informations lues sur les prises de vues aériennes obliques. Mais c'est seulement depuis 2003 que des couches d'information géographique sont créées pour la base d'information géographique de la RNM. Ces cartes ont pour unique objectif de localiser le blanchissement. La représentation de l'extension spatiale n'est pas recherchée. En outre, ces cartes n'offrent pas une vue synoptique d'un épisode de blanchissement par manque de répliques des survols ULM.

3. Matériel et méthode

L'objectif de cette étude est de tester une chaîne d'acquisition et de traitement d'images satellites permettant de cartographier le phénomène de blanchissement et d'en suivre la dynamique spatiale sur l'île de La Réunion. Le blanchissement est ici considéré comme un exemple d'altération du récif corallien sur le court terme dont la détection par la seule signature spectrale peut poser problème. Les contraintes d'échelle, de temps et les paramètres environnementaux sont à considérer dès lors que l'on désire acquérir des images pour la cartographie ou le suivi de l'état de santé des récifs coralliens. Il existe en effet une demande de la RNMR pour ce type d'information afin de compléter l'arsenal d'outils d'ores et déjà opérationnel.

3.1. Paramètres environnementaux contraignant l'acquisition d'images

Le blanchissement des coraux est généralement un phénomène de courte durée pendant le mois le plus humide, mais il peut se dérouler sur une plus longue période (tout le long de l'été austral). Lorsqu'il blanchit, le corail est rapidement colonisé par des formations algales (± 15 jours). Le corail blanchi se trouve alors

confondu avec l'ensemble des coraux morts anciennement nécrosés majoritairement colonisés par des algues. Cette colonisation le rend donc indétectable par sa signature spectrale dans les longueurs d'onde du visible.

Pour détecter l'extension spatiale d'une crise de blanchissement, il est donc nécessaire de disposer d'images ciblées dans le temps. Des images montrant l'état du récif avant et après le blanchissement permettent d'appréhender le blanchissement non plus uniquement à travers sa signature spectrale mais en termes de changement. Ces images peuvent être acquises quelques mois avant ou après le phénomène quand les conditions climatiques sont le plus favorables (pas de nuages, pas de déferlement). D'autres images doivent être acquises tous les 15 jours durant la période de blanchissement et dans les 15 jours qui suivent celle-ci afin d'avoir une mesure « exhaustive » du phénomène. Et, afin de maximiser la qualité des acquisitions réalisées en milieu côtier, ces images doivent être obtenues dans de bonnes conditions climatiques et hydrologiques (pas de réflexion spéculaire, ni de nuages et/ou d'ombre portée, pas de houle, et à marée basse ou en début de flot afin de limiter les particules fines en suspension).

3.2. Données images

Dès lors que l'on veut tester une méthode de traitement d'images impliquant des images de télédétection à HRS ou THRS et à THRT, se pose la question de la disponibilité des images. Le projet SEAS-OI devrait nous permettre ce type d'approche à partir de 2012. En 2010, sur l'île de La Réunion, peu de données étaient d'ores et déjà exploitables. Cependant, le Centre National d'Études Spatiales (CNES), via la base de données Isle-Réunion du programme Kalideos, met gratuitement à disposition de la communauté scientifique une base de données de télédétection de référence. Ce programme bénéficie entre autres du programme ISIS pour la mise à jour régulière de la base de données des images Spot et Spot 5 en particulier. Spot 5 possède deux instruments HRG1 et HRG2 qui, couplés, permettent de passer d'une fauchée de 60 km à 120 km. Ils acquièrent le rayonnement réfléchi dans quatre bandes spectrales à HRS. Cependant, hors programmation du satellite dans cette région du monde, les deux instruments travaillent de manière indépendante en raison de la petite taille des îles Mascareignes.

Mais pour un travail à partir de données d'archives dans le visible, une faible occurrence d'images est attendue car le blanchissement corallien se déroule durant l'été austral, période qui présente la plus forte nébulosité sur l'île même si l'absorption atmosphérique est potentiellement moins forte sur le littoral. Ainsi, seule une image a été archivée dans la base de données pour tout l'été austral 2009 alors que la programmation initiale du programme Kalideos prévoyait jusqu'à l'acquisition et l'archivage de 9 scènes pour la fenêtre du 1/01/2009 au

30/06/2009. Les critères d'enregistrement d'image par Spot 5 sont d'ordres :

- Commerciaux : il met en concurrence financière les différentes programmations demandées ;
- Techniques : la capacité de stockage sur le satellite est limitée. S'il existe une station de réception d'images au sol en visée directe, ce critère peut être nul ;
- Météorologiques : les sorties du modèle météorologique prévoient en particulier la nébulosité sur l'ensemble de l'image, ce qui détermine la faisabilité de l'acquisition.

En outre, il est important de noter que dans cette partie de l'Océan Indien, le satellite Spot 5 n'acquiert qu'une seule trace à cause de la petite taille des îles Mascareignes. L'instrument HRG pointé sur La Réunion a une fauchée de 60 km alors que l'île dans sa plus grande largeur d'est en ouest mesure 75 km. Donc, en fonction du pointage réel, la zone du volcan au sud-est de l'île, le Cap la Houssaye et le nord du récif de l'Ermitage au sud de Saint Paul ne sont pas toujours couverts par toutes les scènes (**Figure 2**). Dans cette phase de mise au point de la méthode, la zone d'étude est donc réduite au sud du récif de l'Ermitage.

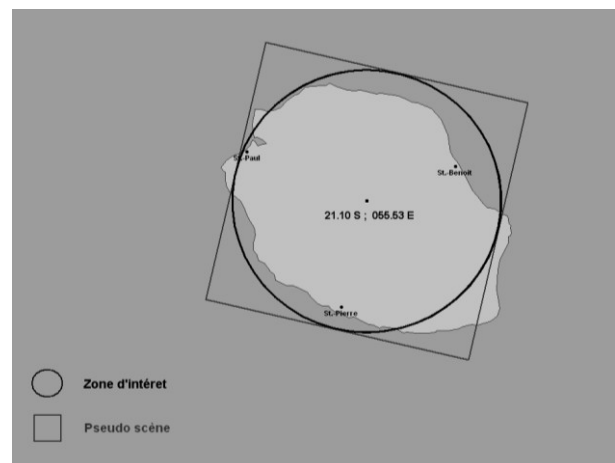


Figure 2 : Couverture de l'île de La Réunion par Spot 5.

L'été austral 2003-2004 s'est révélé le plus pertinent pour cette étude en raison de la disponibilité en images et de la relative intensité du phénomène de blanchissement. Cet événement est considéré comme l'un des événements les plus importants de ces dix dernières années. Durant cette période, des taches d'une dizaine de mètres carrés ont été observées sur tous les platiers récifaux. Il s'agit là d'une forme classique du blanchissement interannuel sur l'île de La Réunion. Le sud du récif de l'Ermitage semble le plus touché ainsi que la pente externe (NICET04). En outre, à partir des survols ULM réalisés au cours de cet été austral, deux périodes de blanchissement ont été signalées : la première, fin 2003 ou début 2004 et la seconde autour de février / mars 2004. Quatre images Spot 5 ont été archivées dans la base de données Isle-Réunion durant l'été austral 2003-2004 (**Tableau 2**).

Dans la base de données, chaque image est stockée au format BSQ (Band SeQuential). Ce format d'image raster brut, utilisé entre autres par Spot Image, est lié aux extensions HDR, REP et RSC. Toutes les images sont orthorectifiées et enregistrées dans le système de coordonnées WGS84 UTM (zone 40 sud) avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 0,5 pixel par image. Ces données sont donc parfaitement

superposables et offrent des perspectives pour l'analyse diachronique. Dans ce contexte, les images sont mises à disposition en étant corrigées des effets atmosphériques pour fournir des valeurs de réflectance au sommet de la canopée (Top of Canopy ou TOC) (El Hajj et al., 2008). La base de données offre alors des images en réflectance codées sur 16 bits.

Instruments	Fauchée	Bandes et résolutions spectrales	Résolution spatiale
HRG1 et 2	60 km	P : 0,48 à 0,71 μm (Panchromatique)	5 m
		B1 : 0,50 à 0,59 μm (Bleu)	10 m
		B2 : 0,61 à 0,68 μm (Vert)	10 m
		B3 : 0,78 à 0,89 μm (Rouge)	10 m
		B4 : 1,58 à 1,75 μm (Proche Infrarouge)	20 m

Tableau 1 : Caractéristiques des instruments du satellite Spot 5.

Date d'acquisition	Heure d'acquisition	Hauteur d'eau	Phase de la marée	Nuages	Couverture de la zone d'étude
2003/10/08	6 h 21	0,47	flot	oui	25 %
2003/12/19	6 h 36	0,75	étales	non	50 %
2004/03/17	6 h 24	0,69	flot	non	100 %
2004/04/11	6 h 43	0,41	jusant	non	50 %
2004/05/13	6 h 28	0,60	jusant	non	50 %

Tableau 2 : Caractéristiques des images et conditions environnementales lors de l'acquisition.

3.3. Procédure de classification

L'extraction d'informations thématiques d'images à THRS ou de résolution métrique peut être manuelle ou automatisée. Alors que la THRS devient de plus en plus courante dans les applications d'observation de la Terre, des limites méthodologiques sont apparues lors de classifications d'images sur l'information spectrale associée à chaque pixel (Gougeon, 1995 ; Fisher, 1997 ; Townshend et al., 2000). De même, si la numérisation interactive à l'écran satisfait les thématiciens, son utilisation pose problème car les règles de segmentation ne peuvent être formalisées. Cette méthode est typiquement non reproductible.

Dès lors que les objets à cartographier ou détecter sont complexes, l'approche orientée objet serait la plus prometteuse (Baatz et Schaepe, 2000 ; Leckie et al., 2003). Comme alternative, les systèmes de classification basée sur les objets ont été largement utilisés dans les applications de télédétection dans les dernières années, notamment avec les données à THRS. La classification orientée objet ne traite plus le pixel de manière isolée mais des groupes de pixels, appelés objets ou segments, dans leur contexte à différentes échelles de perceptions du paysage. Dès lors, les capacités d'extraction de l'information sont considérablement multipliées. L'interprète peut se baser non seulement sur

les valeurs spectrales mais aussi sur des paramètres morphologiques (taille, forme, voisinage des objets), ce qui améliore considérablement la qualité de l'information extraite des images. Dans le cas de tache de blanchissement corallien, l'objet n'est pas en soit complexe ; par contre, sa détection pose problème car il n'a pas une réponse spectrale remarquable de par sa signature spectrale. D'autres paramètres doivent donc être utilisés pour son extraction.

La démarche de classification basée sur les objets peut être divisée en deux grandes étapes (Schowengerdt, 1997). Une phase de segmentation multi-résolution, basée sur une procédure d'optimisation qui minimise localement l'hétérogénéité moyenne des pixels, permet de définir des objets sur l'image pour une résolution donnée. L'opérateur a donc une certaine maîtrise de l'agrégation des pixels en objets (segments) ou sous-objets. Ces segments peuvent être assimilés à la notion de polygones dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ceci doit permettre d'appréhender des objets homogènes ou très hétérogènes en termes de signature dans l'image.

À partir du moment où des segments sont créés, pour chacun des segments toute une série d'attributs qui renseignent sur leurs caractéristiques spectrales (réflectances moyennes dans différentes longueurs d'onde, écart-type au sein d'un segment...), spatiales

(surface, indices de forme...) texturales (paramètres d'Haralick...) et contextuelles (distance à une classe...) sont calculés par défaut ou peuvent être implémentés par l'opérateur (NDVI...). Dans la seconde phase dite de classification, l'opérateur utilise les attributs qu'il juge pertinents pour extraire les objets géographiques cibles. On parle d'approches par construction de règles dans laquelle l'utilisateur génère des règles d'agrégation, d'exclusion ou de classification de manière cognitive à partir de ses connaissances ou de la littérature. En outre, l'implémentation de ces règles peut se faire dans certains logiciels comme Definiens à partir de « fonctions d'appartenance floues », de manière à prendre en compte les incertitudes inhérentes à une approche d'un territoire par des données images de télédétection.

3.4. Contribution de séries d'images diachroniques

L'analyse des séries diachroniques d'images peut fournir les données nécessaires pour valider la cartographie des récifs et de ses communautés, mais aussi assurer le suivi des modifications dans la structure des communautés (Palandro et al., 2003).

Sur le long terme, cette approche est assez classique (Scopélitis et al., 2009). Les trajectoires des habitats récifaux sont analysées depuis plusieurs décennies à partir de programmes de monitoring sur le terrain. L'analyse diachronique des signatures spectrales des objets sur le terrain a également été explorée (Andréfouët et al., 2002 ; Yamano et Tamure, 2003; Elvidge et al., 2004). Mais dans la partie visible du spectre, de nombreux objets peuvent être confondus avec un corail blanchi : le sable corallien, la zone de déferlement des vagues, la zone de réflexion spéculaire... Cette confusion est d'autant plus grande que la résolution spatiale des images est haute (Pennober et al., 2010a ; Pennober et al., 2010b). Dans un processus de classification d'image, les critères de discrimination ne sont pas toujours faciles à trouver. Bien qu'encore non utilisé jusqu'à aujourd'hui, le changement de signature spectrale dans un temps donné peut être considéré comme la signature d'un objet ou d'une altération.

Les techniques de détection de changement (soustraction d'images...) sur les images numériques ont été formalisées dès 1972 par (Lillestrand, 1972). Dans le cas d'une approche orientée objet en contexte côtier, il est nécessaire de circonscrire cette analyse des changements à un ou deux attributs pertinents et à un certain domaine de valeurs en travaillant sur la notion de seuil. En effet, le changement le plus important que l'on risque de mesurer, sans précautions préalables, est la différence d'intensité du déferlement des vagues entre deux images. Dans le cas du blanchissement corallien, on peut en outre utiliser le caractère temporaire de l'augmentation ou de la diminution de la signature spectrale dans certaines longueurs d'ondes.

3.5. Mise en œuvre sous le logiciel Definiens

3.5.1. La segmentation

Le logiciel Definiens permet d'utiliser une segmentation de référence pour une échelle donnée applicable à l'ensemble des images. Chaque groupe de pixels homogènes défini peut être assimilé à un polygone sur lequel des informations statistiques sont disponibles.

Cette approche constitue une alternative intéressante à la numérisation interactive. L'opérateur peut en effet contraindre la segmentation sur la taille des entités (notion de paramètre d'échelle ou « Scale parameter »), sur leur forme, mais aussi en assignant un poids en fonction du niveau de pertinence de chaque bande (notion d'« Image Layer Weight ») en fonction de la thématique d'étude.

Des couches vectorielles peuvent être utilisées au cours du processus de segmentation et de classification afin de centrer l'étude sur la zone pertinente. Ici, le trait de côte de la BD Topo[®] de l'IGN est utilisé pour masquer la partie émergée de l'île. La segmentation est réalisée sur une image de référence afin de limiter l'analyse diachronique à l'étude des variations au sein des objets-segments. Dans le cadre de cette première analyse des altérations, on se limite à l'étude des variations de la valeur moyenne des polygones dans certaines longueurs d'onde. L'image multispectrale acquise en avril 2004 sert ici de référence car elle couvre la totalité des récifs de l'Ermitage.

Lors de la segmentation, le paramètre d'échelle « 3 » sur le récif aboutit à des segments de taille comprise entre 100 et 1000 m². Notons que la notion de paramètre d'échelle est en fait un terme abstrait non explicité pour l'utilisateur qui détermine « l'hétérogénéité maximale autorisée » pour les objets résultants. Ainsi, pour un paramètre d'échelle donné, les objets résultants sont d'autant plus petits que les données sont hétérogènes. Les autres paramètres pouvant contraindre la segmentation ne sont pas utilisés (pondération des couches, type de voisinage, type de forme) et leurs valeurs par défaut sont conservées.

3.5.2. La classification

La première étape consiste à créer par synthèse de l'information sur la dynamique des surfaces segmentées ou segments d'image.

Les modifications de signatures spectrales sur une courte période ont été identifiées comme discriminantes pour le blanchissement des coraux. Une soustraction entre les longueurs d'onde proche du bleu (B1) à deux dates différentes - avril et mai d'une part et avril et mars d'autre part - s'est avérée la méthode la plus pertinente pour mettre en évidence ce changement (Tableau 3 et Tableau 4).

Segments	Oct. 03	Déc. 03	Mars 04	Avril 04	Mai 04
1	71	76	67	74	52
2	71	76	68	76	48
3	60	61	60	62	42
4	57	59	71	67	42

Tableau 3 : Réflectance moyenne dans la bande B1 calculée pour les segments identifiés comme blanchis en avril 2004.

Segments	Oct. 03	Déc. 03	Mars 04	Avril 04	Mai 04
1	57	59	71	67	36
2	58	67	67	60	37
3	63	70	67	52	42
4	46	49	55	46	26

Tableau 4 : Réflectance moyenne dans la bande B1 calculée pour les segments identifiés comme blanchis en mars 2004.

Différents seuils ou intervalles sont alors déterminés pour discriminer les zones de variation significative d'une altération de type blanchissement sur le platier. Les caractéristiques retenues sont (Figure 3) :

- Un seuil de brillance,
- Un seuil minimal de différence entre images,
- Une taille de surface minimale,
- Un seuil de valeur moyenne sur la bande bleue.

L'information ainsi produite peut nourrir une base d'information géographique multi-dates permettant d'évaluer la fréquence de blanchissement des différents secteurs du récif.

4. Résultats et discussion

Les cartes proposées ci-dessous constituent les premiers résultats de ce type d'approche (Figure 4).

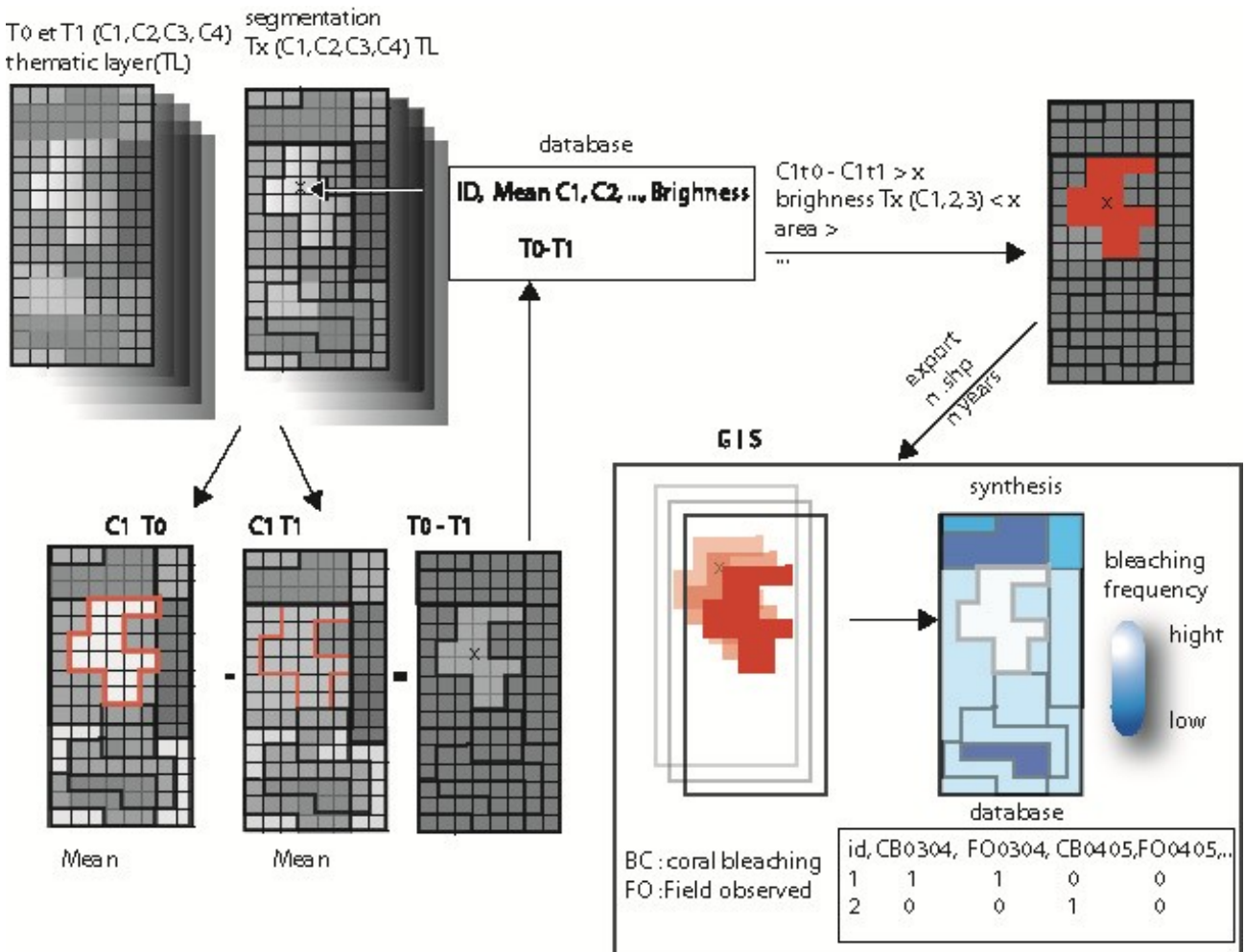


Figure 3 : Synthèse de la démarche méthodologique d'extraction des taches de coraux blanchis sur les images Spot 5 et de la bancarisation de la donnée.

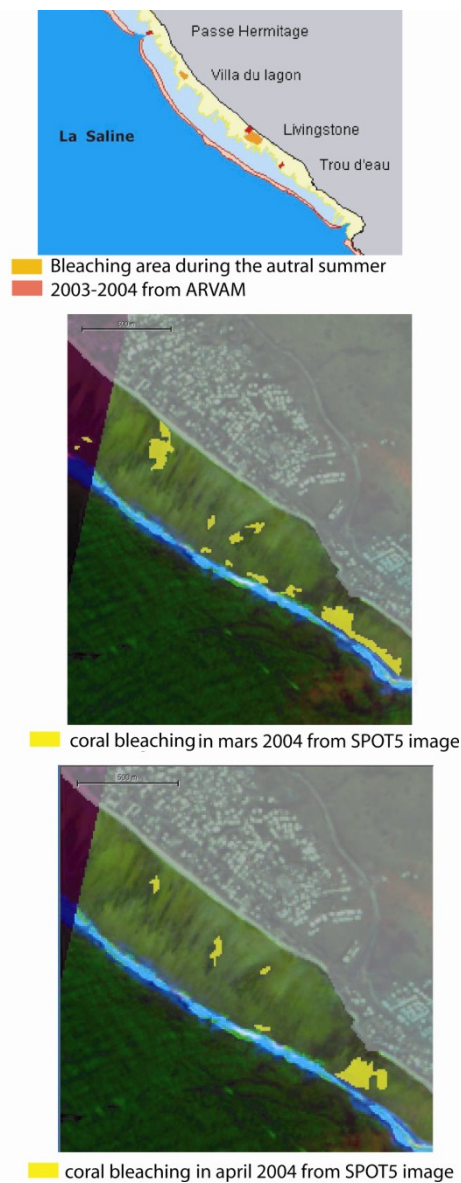


Figure 4 : Cartographie des surfaces de corail blanchies détectées durant l'été austral 2003-2004.

Les cartes produites par l'ARVAM (Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines) en 2004 (NICET04), utilisées ici comme « vérité terrain », ont été réalisées à partir de survols ULM les 29 mars et 16 juin de cette année. Elles ont pour objectif de localiser mais non d'estimer les surfaces blanchies.

Les images Spot traitées ont été acquises les 11 mars et 17 avril. La durée de blanchissement d'un corail pouvant se limiter à 15 jours pour certaines patates de corail, l'écart de date peut expliquer la différence entre les deux documents. Réaliser une matrice de confusion entre ces documents est donc peu pertinente pour valider la mesure.

Après avoir utilisé une couche d'information « trait de côte » pour exclure de l'analyse la partie émergée de l'île, le facteur le plus discriminant pour détecter ces mêmes surfaces est un changement temporaire mais significatif de la signature spectrale dans le canal B1 de

Spot 5. Toutes les taches de blanchissement cartographiées par l'ARVAM ont montré ce type de comportement spectral spécifique au cours de la période. Cette trajectoire spectrale a donc été ici assimilée à un blanchissement du corail. Il est toutefois nécessaire d'intégrer un seuillage sur l'indice de brillance pour la discrimination des surfaces blanches des zones concernées par un déferlement sur les images acquises en période de blanchissement. Le blanchissement se traduirait par une augmentation de la réflectance de l'ordre de dix unités dans la bande B1 durant une courte période. Une augmentation supérieure a été assimilée à de l'écume.

Cependant, d'autres surfaces plus au sud sur l'image montrent un comportement spectral similaire, alors que l'ARVAM n'y avait pas noté de blanchissement. Ces surfaces situées dans la zone bioconstruite attestent d'une altération de la signature spectrale identique pour la même période à celle observée sur les zones signalées comme blanchies. L'écart entre les dates des survols aériens et des acquisitions d'images satellitaires pourrait être un facteur explicatif. Ceci confirmerait donc la rapidité de la colonisation par les algues ou la résilience corallienne, deux survols aériens au cours d'un épisode de blanchissement étant alors insuffisants pour estimer la réelle ampleur de cet épisode. Ce constat est toutefois à valider par un suivi sur le plus long terme.

Dans cette phase exploratoire vers l'élaboration d'un outil opérationnel pour le suivi de la trajectoire des écosystèmes des récifs coralliens de La Réunion et du SOOI, les résultats ne sont pas encore robustes. Ils démontrent toutefois l'intérêt de l'analyse diachronique à THRT, mais aussi de l'approche orientée objet et de l'imagerie Spot 5 à 10 mètres de résolution pour ce type de problématique. La THRT offre ici un nouvel éclairage sur un épisode de blanchissement en permettant la détection de tache de blanchissement non identifiable par leur seule signature spectrale à un instant « t ». Cette approche montre en outre que la contrainte temporelle de la détection est réelle. La THRT est nécessaire pour évaluer l'extension spatiale du blanchissement interannuel.

L'analyse d'image orientée objet représente une véritable révolution technologique et conceptuelle dans le domaine du traitement d'images satellitaires. Elle est constituée d'une première étape de segmentation d'image, à la suite de laquelle chaque segment d'image est considéré comme un objet que l'on peut assimiler à la notion de polygone dans une base d'information géographique. Chacun possède alors des caractéristiques spectrales, texturales, contextuelles, de forme et d'échelle que l'on peut explorer pour discriminer une classe d'objets. L'analyse diachronique d'images peut en outre être facilitée en utilisant une seule image de référence pour la segmentation, les segments calculés pour cette première image servant au découpage des autres images utilisées. L'analyse des

changements se résume alors à des analyses statistiques au sein de ces objets.

Le satellite Spot 5, lancé en 2002, fournit des images multispectrales à HRS d'une résolution spatiale de 10 m sans fusion avec le panchromatique. Cette résolution s'est révélée suffisante pour étudier l'extension spatiale des événements de blanchissement interannuels qui affectent les 14 km du récif frangeant de La Réunion. Cependant, en raison de la très grande confusion qui existe entre les signatures spectrales dans les zones récifales, il est nécessaire d'intégrer l'altération des signatures spectrales sur le court terme pour discriminer les surfaces blanchies. Donc, immanquablement, plus la résolution est grande, plus les procédures d'extraction sont complexes. La THRT peut donc s'imposer dans de nombreux domaines.

Afin de valider ces premiers constats, dans le cadre du programme Kalideos, une série d'images Formosat a été acquise sur les récifs de l'Ermitage et de Saint Leu au cours de l'été austral 2010 avec une répétitivité temporelle de 15 jours, la programmation du satellite Spot 5 n'étant pas possible sur cette période. Le traitement de ces images devrait permettre de poursuivre l'approche initiée ici. Le stress pour La Réunion est déclaré maximal pour cette période par le « Bleaching Alert Systems project of the IUCN Climate Change and Coral Reefs working group ». Les messages d'alerte ont déclenché l'acquisition des images satellitaires, mais sur le terrain aucun blanchissement n'a été observé.

5. Conclusion

Ces premiers résultats, loin d'être consolidés, posent toutefois des jalons pour des études futures. Ils montrent que la résolution spatiale de Spot 5 à 10 m peut être suffisante pour approcher le blanchissement interannuel à La Réunion. Ils confortent également la nécessité d'une approche orientée-objet pour la classification. Le travail à partir d'un seuillage sur l'indice de brillance et l'étude des variations des réponses spectrales dans la bande 1 de Spot 5 serait une bonne piste de travail.

Le principal problème qui se pose alors est la disponibilité des données présentant une répétitivité temporelle suffisante. La programmation Formosat réalisée en 2010 dans le cadre du programme Kalideos montre la faisabilité de l'étude pour ce satellite. La résolution temporelle de Spot 5 est ramené de 26 jours à 5 jours pour La Réunion avec la fonction de dépointage d'un capteur et à 1 jour dans les mêmes conditions d'acquisition.. L'antenne de réception d'images satellitaires du programme SEAS-OI devrait offrir dès 2012 une meilleure maîtrise sur l'acquisition et surtout l'enregistrement des images en routine en minimisant le facteur météorologique et garantir ainsi la THRT nécessaire à la détection de phénomènes de blanchissement. En outre, le cercle d'acquisition d'images prévu pour cette antenne, centré sur La

Réunion et de 2500 km de diamètre, devrait permettre de travailler sur l'ensemble des récifs du sud-ouest de l'Océan Indien.

Références

- Andréfouët, S., Berkelmans, R., Odriozola, L., Done, T., Oliver, J., Muller-Krager, F., 2002. *Choosing the appropriate spatial resolution for monitoring coral bleaching events using remote sensing*. Coral Reefs 21(2), 147-154.
- Andréfouët, S., Riegl, B. 2004. *Remote sensing: a key tool for interdisciplinary assessment of coral reef processes*. Coral Reefs 23(2), 1-4.
- Bellwood, D.R., Hughes, T.P., Folke, C., Nystrom, M., 2004. *Confronting the coral reef crisis*. Nature 429(6994), 827-833.
- Baatz, M., Schaepke, A., 2000. *Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. In J. Strobl, and T. Blaschke (Eds.), *Angewandte geographische informationsverarbeitung*, vol. XII., Heidelberg, Germany, Wichmann, 12-23.
- Clark, C.D., Mumby, P.J., Chisholm, J.R.M., Jaubert, J., Andréfouët, S., 2000. *Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event*. International Journal of Remote Sensing 21(11), 2321-2327.
- El Hajj, M., Bégué, A., Lafrance, B., Hagolle, O., Dedieu, G., Rumeau, M., 2008. *Relative radiometric normalization and atmospheric correction of a Spot 5 time series*. Sensors 8(4), 2774-2791.
- Elvidge C.D., Dietz J.B., Berkelmans R., Andréfouët S., Skirving W.J., Strong A.E., Tuttle B.T., 2004. *Satellite observation of Keppel Islands (Great Barrier Reef) 2002 coral reef bleaching using Ikonos data*. Coral Reefs, 23(2), 123-132.
- Fabricius, K.E., 2005. *Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis*. Marine Pollution Bulletin 50: 125-146.
- Fisher, P., 1997. *The pixel: a snare and a delusion*. International Journal of Remote Sensing 18(3), 679-685(7).
- Goreau, T.J., Hayes, R.L., 1994. *Coral bleaching and ocean Hot Spots*. Ambio 23: 176-180.
- Gougeon, F.A., 1995. *Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS Images*. Journal Canadien de Télédétection 21(1), 1-9.
- Hoegh-Guldberg, O., 1999. *Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs*. Marine and Freshwater Research 50: 839-866.
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nystrom, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B., Roughgarden, J., 2003. *Climate change, human impacts and the resilience of coral reefs*. Science 301(5635), 929-933.

- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Walsworth, N., Paradine, D., 2003. *Stand delineation and composition estimation using semiautomated individual tree crown analysis*. *Remote Sensing of Environment* 85(3), 355–369.
- Lillestrand, R. L., 1972, *Techniques for change detection*, IEEE Transactions on Computers 21(7), 654-659.
- Moberg, F., Folke, C., 1999. *Ecological goods and services of coral reef ecosystems*. *Ecological Economics* 29: 215-233.
- Montaggioni, L.F., Faure G., 1980. *Les récifs coralliens de l'archipel des Mascareignes*. Coll. Trav. Université de la Réunion, 150 p.
- Naim, O., Cuet, P., 1989. *Les platiers récifaux de l'Île de la Réunion*. Université de la Réunion, Faculté des Sciences, Direction scientifique : G. Faure et J.Y. Conan, Rapport non publié AUR-ECOMAR., Université de la Réunion, 150 p.
- Nicet, J.B., Turquet, J., 2004. *Réponse au phénomène de blanchissement corallien observé en 2004 à La Réunion*. Rapport technique DIREN/ARVAM/APMR, 27 p.
- Palandro, D., Andréfouët, S., Muller-Karger, F.E., Dustan, P., Hu, C., Hallock, P., 2003. *Detection of changes in coral reef communities using Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ data*. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(2), 201-209.
- Pennober, G., Borius, A., 2010a. *Détection et cartographie à grande échelle du blanchissement corallien sur les récifs de l'île de la Réunion*. *Téledétection* 9(1), 5-17.
- Pennober, G., Borius, A., 2010b. *Coral bleaching alert and mapping in Reunion Island (SWIO): a remote sensing contribution*. In: M. Robin & M. Maanan (Eds) *Geomatic solutions for coastal environment*, Nova Publishers: 33-47.
- Schowengerdt, R.A., 1997. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Second Edition, Academic Press, N. Y., 522 p.
- Scopélitis, J., Andréfouët, S., Largouët, C., 2007. *Modelling habitat evolution in coral reefs at decadal scale: a timed automata and remote sensing approach*. *Ecological Modelling* 205: 59-80.
- Scopélitis, J., Andréfouët, S., Phinn, S., Chabanet, P., Naim, O., Tourrand, C., Done, T., 2009. *Changes of coral communities over 35 years: integrating in situ and remote-sensing data*. *Estuarine Coastal Shelf Science* 84 (3), 342-352.
- Townshend, J.R.G, Huang, C., Kalluri, S., DeFries, R., Liang, S. Yang, K., 2000. *Beware of Per-pixel Characterization of Land Cover*. *International Journal of Remote Sensing* 21(4), 839-843.
- Wilkinson, C.R., Lindén, O., Cesar, H., Hodgson, G., Rubens, J., Strong, A.E., 1999. *Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral mortality in the Indian Ocean: an ENSO impact and a warning of future change*. *Ambio* 28(2), 188-196.
- Wilkinson, C.R., 2008. *Status of coral reefs of the world: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australie, 296 p.
- Yamano, H., Tamura, M., 2003. *Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: simulation and data analysis*. Remote sensing of environment, Social and environmental systems Division, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki: 305-8506, Japon.