DÉTECTION À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE DU BLANCHISSEMENT CORALLIEN SUR LES RÉCIFS DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

Gwenaëlle PENNOBER[1], Alice BORIUS[2]

[1]US ESPACE IRD, Université de La Réunion, 15 Av. René Cassin, BP 7151, 97 715 Saint Denis Messag Cedex 9
E_mail : gwenaelle.pennober@univ-reunion.fr
[2]16 rue Nélaton, 75015 Paris
Tel : 06 86 94 83 46
E_mail : alice.borius@geo212.fr

Soumis le 13 janvier 2009, accepté le 29 octobre 2009 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 1, p. 5-17

Résumé

Les récifs coralliens des zones intertropicales font partie des écosystèmes marins les plus riches mais aussi des plus vulnérables. Le blanchissement corallien, qui affecte de plus en plus fréquemment ces formations, est un processus de dépigmentation des colonies coralliennes qui traduit 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). Les causes de ces dégradations seraient aussi bien liées aux changements climatiques qu'au résultat des actions anthropiques sur les récifs ainsi que sur les bassins versants associés (Faure, 1994).

Détecter et cartographier ce phénomène constitue depuis plusieurs années un enjeu scientifique et opérationnel (Andréfouet et al.*, 2000). Encore aujourd'hui aucun satellite ne fournit la résolution spectrale, spatiale et temporelle nécessaire à la détection et au suivi de ce phénomène des zones intertropicales permettant de déboucher sur des indicateurs de perte de biodiversité. L'objectif de cette étude est une contribution à l'élaboration d'une chaîne opérationnelle d'acquisition et de traitement d'images destinée au suivi à grande échelle de la santé de ces écosystèmes. Cette recherche intègre une réflexion sur l'adéquation entre plates-formes d'acquisition d'image et thématique. Elle comporte deux étapes principales : la production de prises de vue aériennes d'Ultra-Léger Motorisé (PVA/ULM) à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) orthorectifiées en zone faiblement immergée et l'extraction d'objets géographiques pertinents par classification orientée-objet. L'étude mise en œuvre montre les difficultés que représente l'extraction des parties du récif ayant subi un blanchissement à THRS et propose une amorce de solution à travers une esquisse d'analyse diachronique.*

Mots-clés : blanchissement corallien, cartographie récifale, télédétection, très haute résolution spatiale, segmentation d'image, classification orientée objet.

USING VERY HIGH SPATIAL RESOLUTION AIRBORNE IMAGES TO DETECT CORAL REEF BLEACHING AT LA RÉUNION ISLAND

Abstract

Intertropical coral reefs are one of the most elaborate marine ecosystems but also one of the most vulnerable. Consequently, reefs colonies are suffering from bleaching. This depigmentation process reflects a symbiosis worsening between zooxanthellae and coral polyps which allow the construction of the coral skeleton (Goreau and Hayes, 1994). Such damages could be both related to climate change as a result of human actions on the reefs and the associated watersheds (Faure, 1994). Since several years, bleaching detection and mapping is an issue, both scientific and operational (Andréfouet and al. 2000). Even today, any satellites are providing spectral, spatial and temporal resolution necessary for its detection and monitoring, which is leading on indicators of biodiversity loss. The objective of this study is to suggest an operational acquisition workflow and image processing for the large-scale monitoring of these ecosystems health. It has two main stages : the production of orthorectified aerial shots by ULM at very high resolution in submerged area and the extraction of relevant spatial objects by object-oriented classification. This study

shows the difficulties posed by the extraction of coral reef bleached at very high spatial resolution and offers element of solution through diachronic analysis.

Keys-words : coral bleaching, coral reef mapping, remote sensing, aerial imagery, very high spatial resolution, image segmentation, object-oriented classification.

1. INTRODUCTION

L'Année internationale des récifs coralliens a été lancée, à Washington, le 24 janvier 2008 à l'occasion de la conférence de l'Initiative Internationale sur les Récifs Coralliens (ICRI). Cette campagne mondiale de sensibilisation sur les récifs coralliens coïncide avec la publication d'un rapport scientifique de l'UNESCO qui traite du blanchissement.

Les récifs coralliens sont, en effet, des écosystèmes très vulnérables malgré leur persistance à travers les temps géologiques sur les littoraux tropicaux (Hoegh-Guldberg, 1999). Divers dérèglements d'ordre naturel et/ou provenant directement ou indirectement de l'activité humaine (réduction de la couche d'ozone, augmentation des UV ou du CO^2 et réchauffement de l'atmosphère, pollution et turbidités des eaux littorales, cyclones, anomalies climatiques, ancrages sauvages, pêche à l'explosif ou au cyanure, prédations) entraînent un accroissement rapide d'un certain nombre de maladies sur les récifs. 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 corail1. 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. Appréhender l'impact écologique et identifier les principaux stress à l'origine de ces perturbations constituent encore des enjeux de recherche.

Les programmes opérationnels de suivi de l'état de santé des récifs tel que le Global Coral Reef Monitoring (GCRMN)2 intègrent des levés terrain sous forme de transects ou de quadrats afin d'évaluer l'ampleur d'un épisode de blanchissement. Se pose toutefois le problème de la quantification des surfaces blanchies à l'échelle d'un récif et de la détermination de la fréquence de blanchissement des différentes entités récifales : deux éléments déterminants pour estimer l'impact écologique du phénomène et la capacité de résilience d'un récif.

Quelques récifs, ont fait l'objet d'observations spatiales concernant ce phénomène grâce à des images à haute résolution spatiale (HRS) (SPOT, Landsat) et à très haute résolution spatiale (THRS) (Andréfouët *et al*., 2002 ; Andréfouët et Riegl, 2004 ; Elvidge *et al*. 2004, Rowlands *et al*., 2008). D'autres structures récifales plus jeunes, moins développées telles que des bancs récifaux ou des récifs frangeants n'ont pu faire l'objet de telles observations en raison de l'inadéquation qui existe :

- pour la HRS, entre la résolution spatiale des satellites et la taille des entités récifales ;
- pour la THRS entre les planifications pérennes d'acquisition d'images et la thématique « blanchissement corallien ».

Quelle que soit la résolution, l'extraction de l'objet « corail blanchi » reste problématique en raison de la confusion possible avec d'autres objets ayant une signature spectrale proche.

Sur l'île de La Réunion, dans le sud-ouest de l'Océan indien, les constructions récifales s'étendent sur 12 km2. Pourtant, l'importance des zones récifales et leur fragilité ne sont plus à démontrer (Faure 94, Naim et Cuet, 1989). Ce département d'outre-mer français tente de protéger depuis 1976 ses récifs par des réglementations locales et depuis le 21 février 2007 par un décret ministériel (n° 2007-236) créant une réserve naturelle nationale marine (RNMR) de 3 500 ha sur les récifs de la côte ouest de La Réunion3. L'étude et la préservation de ces petites entités récifales constituent un enjeu local, régional et international.

Le développement de la THRS (photographies aériennes, images satellitaires) dans les applications civiles ouvre de nouvelles opportunités de suivi et de description de ces formations coralliennes. En effet, la résolution des images satellites d'observation civile atteint le niveau métrique et infra-métrique. Ainsi, les satellites Spot5 (Cnes, France), Ikonos (Space Imaging, Etats-Unis), Quickbird (DigitalGlobe, Etats-Unis) fournissent des images entre 2,5 m et 0,6 m de résolution (modes : multispectrale, panchromatique, fusionné). Les prises de vues aériennes (PVA) verticales acquises par des plates-formes ultra-légères, de type ULM, permettent de produire des images encore plus fines, sans véritable limite en fonction de l'altitude de vol. Ces progrès ont été réalisés en un laps de temps très court (Cocquerez *et al*., 1995). Cependant, les techniques de traitement d'images n'ont pas évolué aussi vite que les technologies d'acquisition, laissant d'énormes volumes de données stockées, peu exploitées (Lopez-Ornelas E *et al*., 2005 ; Lopez-Ornelas et Sèdes, 2005) au statut de belles images de la Terre.

[1] Il consiste à la décoloration des coraux soit par l'expulsion de leurs algues symbiotiques (les zooxanthelles) soit par une réduction de la concentration en pigments photosynthétiques associés à ces algues.

[2] http://www.environnement.gouv.fr/IMG/pdf/Etat_de_sante_recifs_Salvat.pdf

[3] http://www.ecologie.gouv.fr/Reserve-naturelle-marine-de-la.html

La démarche que nous proposons ici vise à définir une chaîne opérationnelle d'acquisition et de traitement d'imagespermettant de suivre la dynamique spatiale du phénomène de blanchissement à l'île de La Réunion. Cette méthode de détection du blanchissement est réalisée à l'aide de PVA-ULM. Elles permettent une acquisition ciblée dans le temps et l'espace et offrent une restitution d'image à une résolution compatible avec la problématique.

2. SITE D'ÉTUDE

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°C et 27°C. Cette île volcanique, qui a commencé à émerger il y 2 millions d'années, repose sur le plancher océanique du bassin des Mascareignes à – 4 200 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, & Faure 1980). Bien que les premières colonisations récifales dateraient de cette période, 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 (fig. 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 au sud de la plage de l'Ermitage au cœur de la Réserve Nationale Marine (RNM), à l'embouchure de la ravine et au sud de la passe[4] du même nom (fig. 2). 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'*Acropore* de forme massive en raison de l'hydrodynamisme important. Le platier interne accueille des colonies d'*Acropore* branchus alors que l'on trouve des *Montipora* et *Millepora* au niveau de la dépression d'arrière récif (Dar) qui peuvent s'étendre jusqu'au rivage (Naim et Cuet, 1989).

Au moment de l'expérimentation, ce secteur est signalé, par le réseau informel de surveillance des récifs, comme étant « entrain de subir un épisode de blanchissement ». Cette zone est régulièrement atteinte en raison de l'eau douce et des matières en suspension apportées par la ravine. Elles entraînent de fortes turbidités des eaux littorales qui se combinent avec le phénomène de dessalure aggravé par la percolation des eaux souterraines. L'étalement urbain associé à la croissance de la population sur l'île aggrave considérablement ces phénomènes[5].

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'objectif de cette étude est de tester une chaîne d'acquisition et de traitement d'images permettant de cartographier le phénomène de blanchissement et d'en suivre la dynamique spatiale sur l'île de La Réunion. Il existe en effet une demande de la RNM pour ce type d'information afin de compléter l'arsenal d'outils dors et déjà opérationnel.

3.1. Paramètres environnementaux contraignant l'acquisition d'images

Lorsqu'il blanchit, le corail est rapidement colonisé par des formations algales (±15 jours) (G. Faure com. Pers.). 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 et acquises dans des conditions très particulières :

- dans les 15 jours qui suivent une phase de blanchissement ;
- dans de bonnes conditions climatiques : pas de réflexion spéculaire, ni de nuage et/ou d'ombre portée ;
- dans de bonnes conditions hydrologiques : pas de houle, à marée basse – début de flot afin de limiter les particules fines en suspension.

3.2. Choix de la plate-forme d'acquisition d'images

La plate-forme d'acquisition d'images a été choisie sur deux critères principaux : disponibilité/opérationnalité et résolution spatiale et spectrale possible.

L'analyse des bases de données en ligne (Sirius de Spot Image, Digital Globe d'Eurimage,..) nous montre la faible disponibilité d'images satellitaires à THRS exploitables sur les formations récifales de l'île. Le recours à la programmation ne nous est pas permis en raison du caractère aléatoire des crises de blanchissement et de la courte période de détection. Les PVA verticales s'imposent donc. Une publication dans la revue « XYZ » (Ducandas, 1998) a

[4] Note du conseil scientifique de la réserve nationale marine de la réunion. Roland Troadec (13/12/2007) Les termes appropriés à La Réunion pour désigner ces entités géomorphologiques seraient ceux de « fausses-passes ou de déversoirs »

[5] L'île comptait d'après les enquêtes de l'Insee 270 000 habitants en 1950, 774 600 habitants en 2005 et les perspectives démographiques annoncent un million en 2020.

orienté définitivement le choix du mode d'acquisition d'images vers une plate forme légère type ULM. L'utilisation d'un Drone est rapidement écartée en raison de son manque de réactivité dans un contexte de courants d'air ascensionnels fréquents qui sont source d'instabilité sur ces côtes. L'ULM d'acquisition d'images verticales est équipé d'une trappe de prises de vues par en dessous, d'une centrale inertielle, d'un GPS et d'un boîtier numérique 24*36 muni d'un zoom 17/55 2,8. La résolution des images est fixée entre 0,12 et 0,18 m de résolution. Cette résolution est déterminée en fonction de l'altitude de vol, de la taille des objets à détecter et de la compatibilité avec le référentiel géographique existant sur les zones récifales. En avril 2003, une orthophotographie à 0,10 m de résolution au sol, a été réalisée sur l'ensemble des formations récifales de l'île afin de produire le référentiel spatial sur ces littoraux. Les couvertures IGN[6] (à 1 ou à 0,5 m de résolution) réalisées tous les 5 ans sur l'ensemble du territoire français n'étant pas, jusque là, produites dans des conditions hydrologiques satisfaisantes pour la cartographie des formations faiblement immergées.

3.3. Mise en œuvre des survols aériens

L'acquisition des PVA repose sur le signalement de zones blanchies par un réseau d'alerte informel qui s'est organisé sur l'île. Ce signalement déclenche dans le cadre de cette étude la réalisation d'un vol ULM de confirmation. Les acquisitions en ULM ont lieu le 14 avril 2006. Les clichés ont été pris à 7h00 du matin lorsque le soleil n'était pas trop haut pour minimiser la réflexion spéculaire avec une hauteur d'eau de 0.3 m au port de référence. L'avion était stable et les conditions météorologiques optimales avec un ciel dégagé, un vent faible et une mer calme.

3.4. Prétraitements

L'ortho-rectification des images est réalisée selon le principe de prise de points d'amer sur une image de référence ici l'orthophographie acquise à 0,10 cm de résolution en avril 2003. Les faibles variations d'altitude (inférieures à 5 m.) dans la zone d'étude permettent de s'abstenir de l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour produire les orthophotographies. Les PVA sont corrigées des déformations liées à l'instabilité de l'ULM et à l'inclinaison de l'axe des prises de vue puis géoréférencées dans le système des images de référence. Ces corrections sont réalisées simultanément avec un modèle aérien du logiciel de télédétection GEOimage® et du logiciel Leica Photogrammetry Suite 9.0® dans une perspective de comparaison des résultats.

3.5. Extraction d'informations thématiques

A priori deux démarches semblent pertinentes pour extraire les surfaces blanchies :

- Une sélection de pixels à partir de signatures spectrales caractéristiques ;
- l'analyse de changements de signatures spectrales.

Les méthodes d'extraction automatique par classification basée sur la seule réflectance des pixels ne sont pas adaptées. En effet, l'affinement de la résolution spatiale des images fait ressortir l'hétérogénéité des objets. Ceux-ci se décrivent alors à la fois par leur signature spectrale et leur relation topologique (voisinage) aux autres objets. Sur les PVA acquises pour cette étude, des confusions dans la signature spectrale apparaissent entre le corail blanchi et le sable corallien, l'eau (déferlement et réflexion spéculaire) et les murs blancs des constructions littorales.

De même, les approches classiques en détection de changements par soustraction d'images ne sont pas adaptées aux nouvelles problématiques présentées par les images à THRS. En effet, l'approche qui consiste à mesurer le degré de changement au niveau d'un pixel, s'appuie sur les deux hypothèses suivantes : les images sont parfaitement superposables et le changement a une signature sur les pixels et leurs caractéristiques (textures). Ces deux hypothèses sont souvent fausses en THRS. En effet, l'orthorectification d'images doit aboutir à une superposabilité exacte de pixel à pixel. En milieux côtiers, il est souvent impossible d'obtenir des points d'amer bien répartis sur l'image (principe garantissant une correction d'image de qualité).

La démarche qui s'impose donc est une démarche intégrant une segmentation multi-échelle permettant d'agréger des pixels hétérogènes entre eux afin de définir nos objets géographiques. La segmentation, rappelons le, consiste à diviser l'ensemble des pixels de l'image en régions connexes, homogènes et différentes de leurs voisines (Gonzalez et Woods, 1993). Lors de la classification, la localisation d'une signature spectrale intervient donc dans le processus de rattachement d'un pixel à telle ou telle classe dès lors qu'une démarche multi-échelle est intégrée.

[6] Institut Géographique National : http://www.ign.fr/

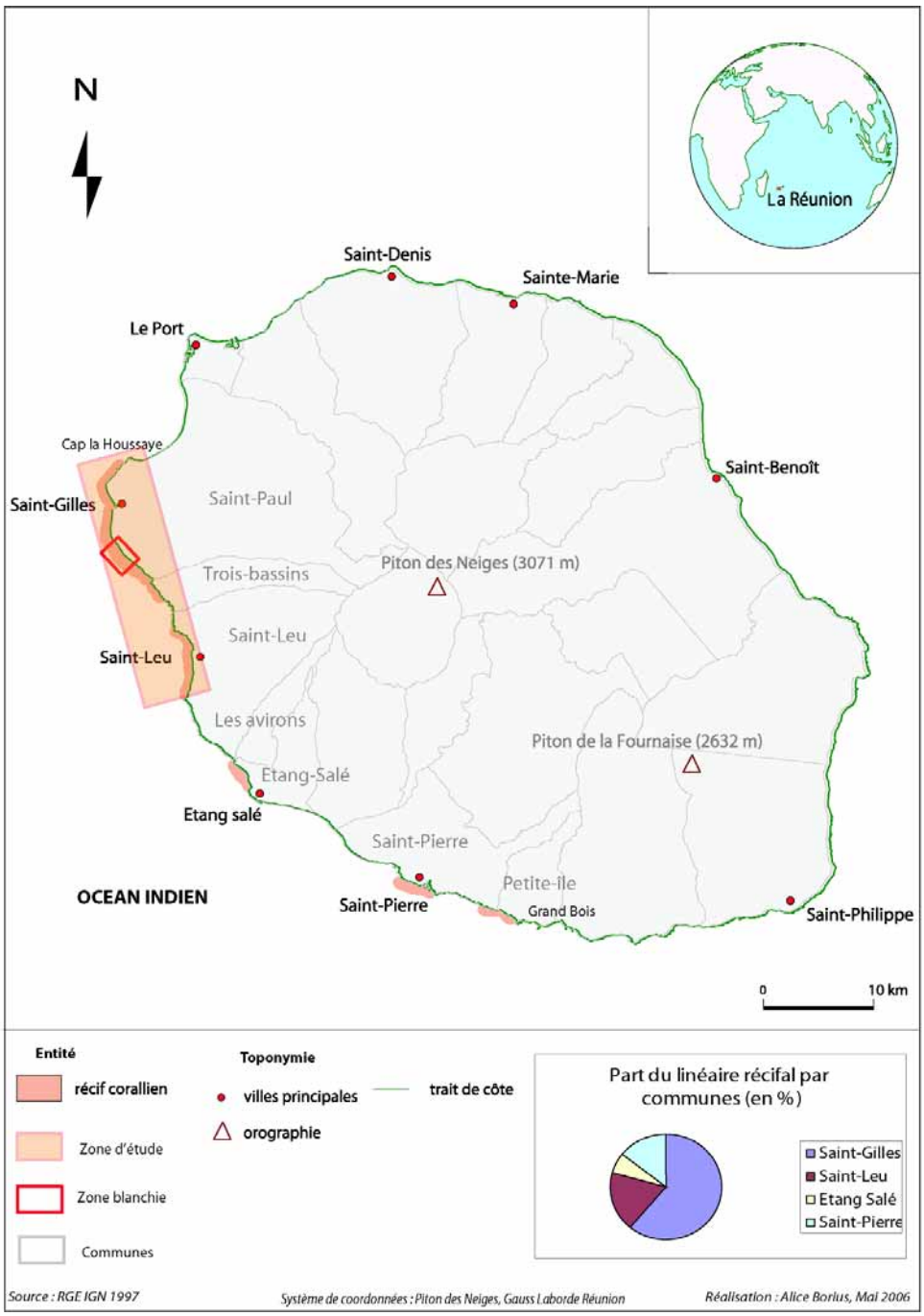


Figure 1 : Présentation de l'île de la Réunion.
***Figure 1** : Reunion's island.*

Le logiciel Definiens® choisi pour effectuer la segmentation et la classification est basé sur le concept suivant : l'information sémantique, nécessaire à l'interprétation d'une image, n'est pas représentée dans des pixels isolés mais dans des objets possédant une signification thématique ainsi que dans leurs relations mutuelles (Oruc *et al.*, 2004). Ces objets naissent d'une segmentation d'image qui est définie par Darwish, Leukbert et Reinhard (2003) comme « La recherche de régions homogènes au sein d'une image et ensuite la classification de ces régions ». Celle-ci doit être effectuée en adéquation avec la résolution des objets et suivant les classes qui veulent être distinguées (Oruc, Marangoz, Buyuksalih, 2004), afin d'obtenir une discrétisation de l'information pertinente. La classification dite « floue » permet enfin de définir : le choix des fonctions d'appartenance, des règles d'inférence et des combinaisons de règles.

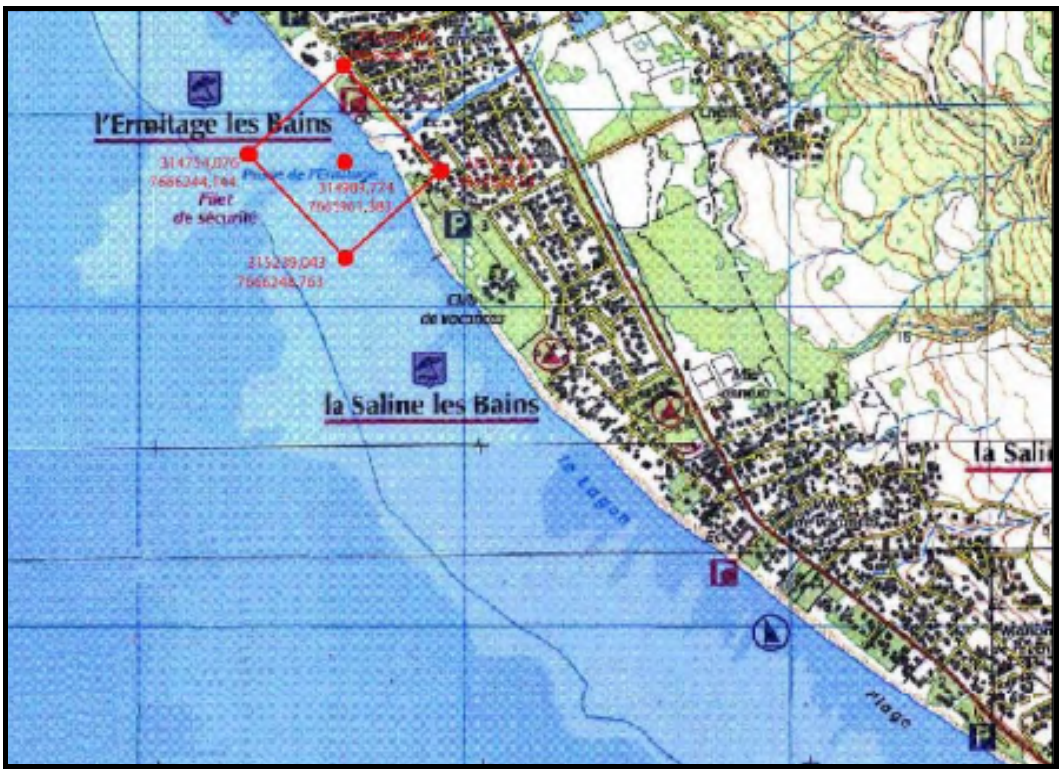


Figure2 : Localisation du site d'étude.
Figure 2 : *Localisation of the study area.*

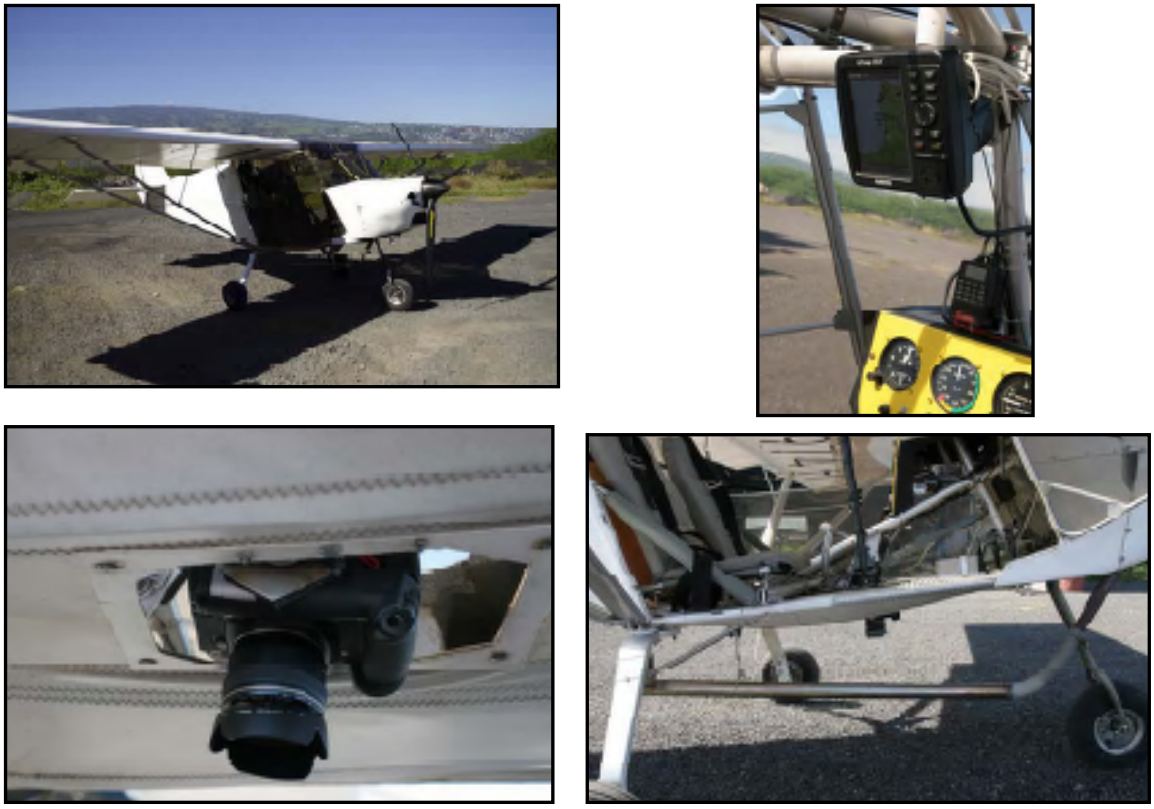


Figure 3: ULM Skyranger utilisé pour les prises de vue, GPS et appareil photographique.
Figure 3: *ULM Skyranger used for aerial shooting, GPS and camera.*

3.6. Validation terrain

La validation terrain, a été réalisée par un cheminement en PMT (Palme-Masque-Tuba). Une tablette et d'un GPS étanche ont permis de reporter les observations. Seules les différentes parties du récif accessibles depuis la plage ont été prospectées (fig. 4).

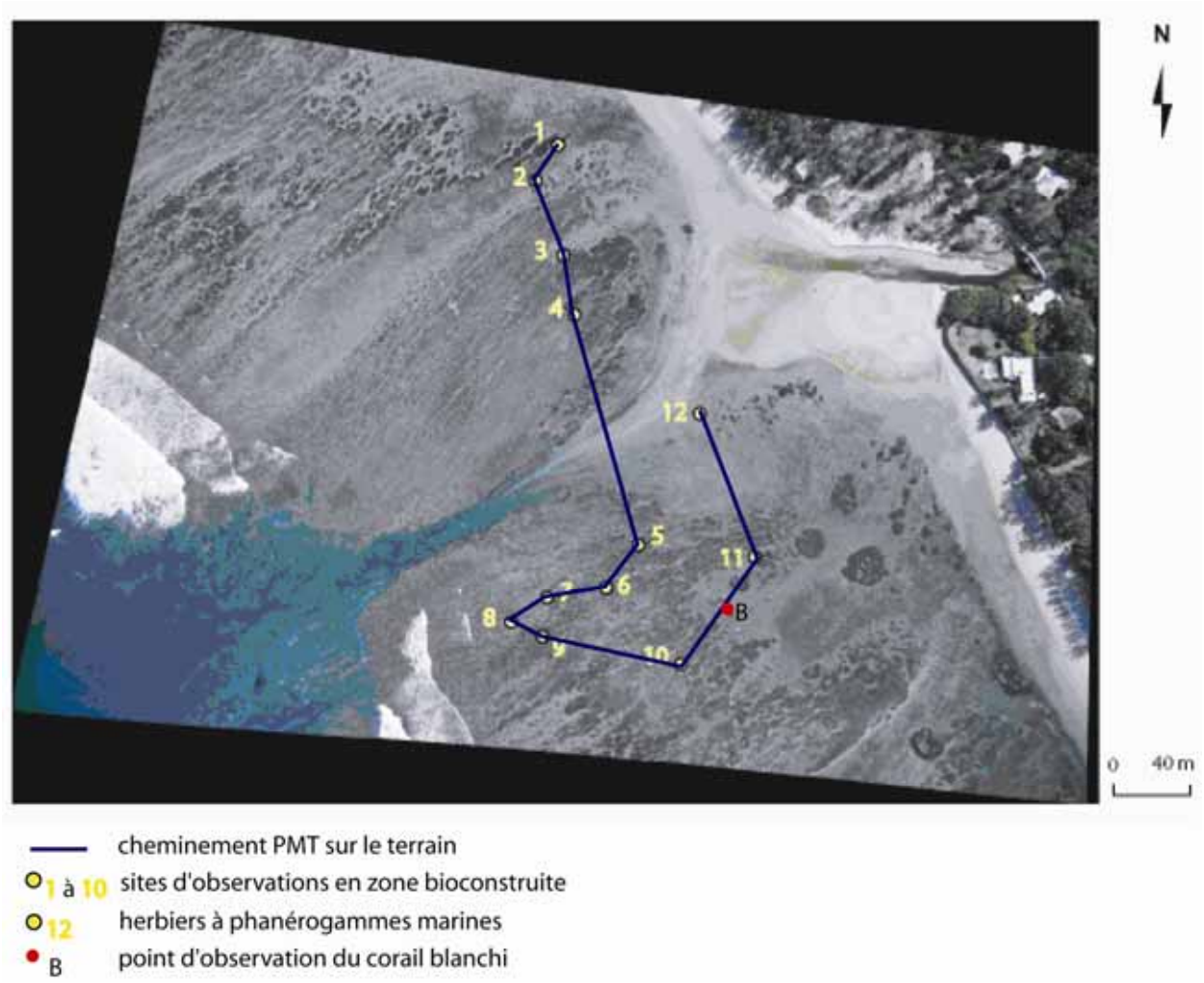


Figure 4 : Sortie terrain sur la plage de l'Ermitage.
Figure 4 : *Field mission on Ermitage's beach.*

4. RÉSULTATS

Le principal résultat de cette étude est le développement d'une méthode d'acquisition et de traitement d'images à THRS sur la problématique du blanchissement. Les données produites sont :

- des images à THRS orthorectifiées ;
- l'analyse de la fiabilité de leur calage ;
- l'extraction de connaissances : les surfaces coralliennes blanchies ;
- l'analyse des conditions d'extractions de cette information.

En l'absence de grand épisode de blanchissement ces 3 dernières années sur l'île de La Réunion la méthode a été uniquement testée durant un épisode de blanchissement mineur de l'été austral 2006.

4.1. Production d'orthophotographies

Les orthophographies produites à partir des logiciels GEOimage® et Leica Photogrammetry Suite 9.0® présentent certaines distorsions par rapport à l'image de référence (tableau 1).

La moyenne des écarts et les écarts mesurés en mètres sont plus importants sur les PVA orthorectifiées avec le logiciel de traitement d'images que sur celles orthorectifiées avec le logiciel de photogrammétrie. La moyenne des écarts mesurés, sur les points d'amer par le *Root Mean Square* (RMS), la plus faible est celle calculée sur les PVA à 18 cm. de résolution avec LPS (tableau 2).

Tableau 1 : Synthèse des RMS calculées.
Tableau 1 : *Synthesis of RMS measured.*

	Géoimage	LPS
RMS PVA 0,12 m	0,86	0,4123
RMS PVA 0,18 m	1,23	0.3687

Tableau 2 : Synthèse des écarts (en m) calculés sur les PVA.
Tableau 2 : *Synthesis of deviations (in meters) measured on the aerial image.*

	Logiciel de télédétection		Logiciel de photogrammétrie	
	Centre de la PVA	Bords de la PVA	Centre de la PVA	Bords de la PVA
Ecart (en m) PVA à 12 cm	3	5,72	1,02	0,70
Ecart (en m) PVA à 18 cm	1,70	4,25	1,16	2,37

Une analyse spatiale de la distribution de ces écarts est réalisée sous ArcGis®, en superposant à l'écran l'image de référence et les images orthorectifiées (figs. 5 et 6).

L'image à 0,18 m. orthorectifiée par le logiciel LPS offre le meilleur résultat. Les patates de corail blanchi sont détectables à cette échelle. Ces images sont donc retenues pour extraction automatique des surfaces blanchies.

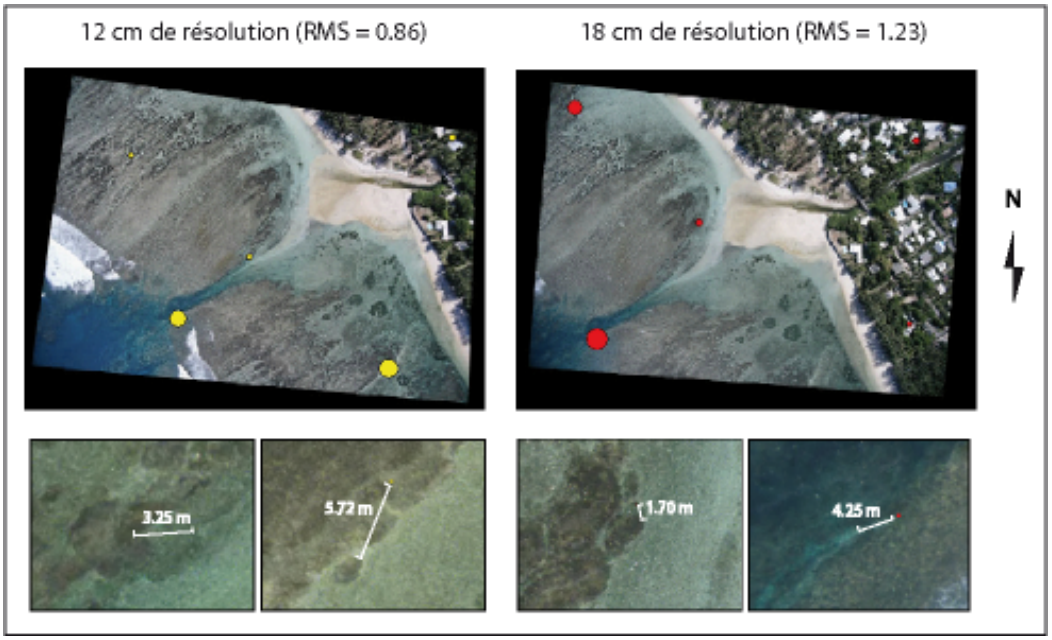


Figure 5 : Analyse spatiale des distorsions des images ortho-rectifiées par rapport à l'image de référence avec le logiciel de télédétection (Les cercles proportionnels indiquent les écarts mesurés).
Figure 5 : *Spatial analysis of ortho-rectified image within reference image with the remote-sensing software. (The proportional's circles show the distortion measured).*

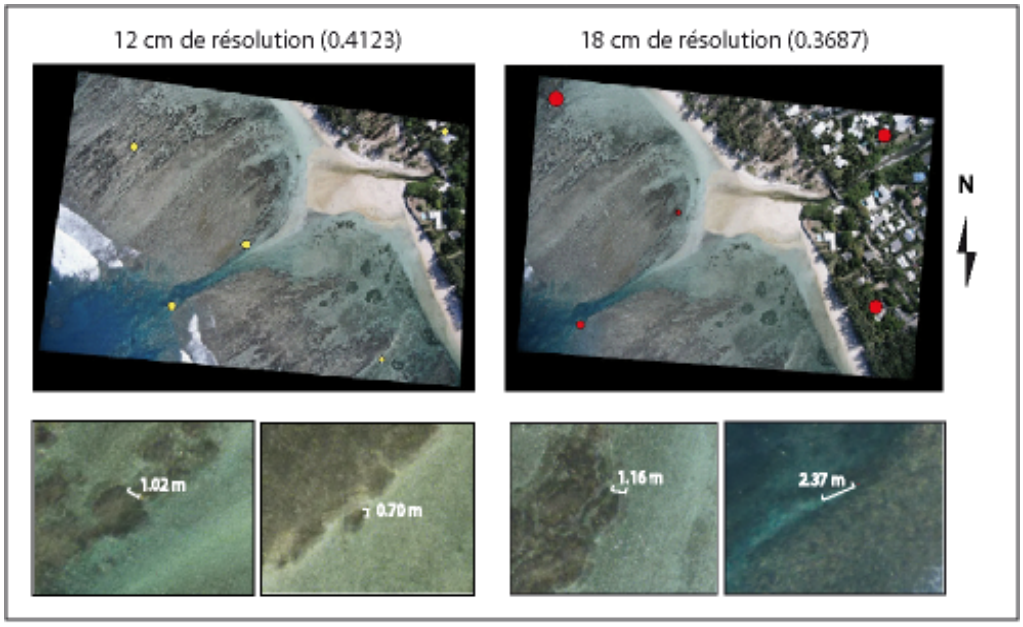


Figure 6 : Analyse spatiale des distorsions des images ortho-rectifiées par rapport à l'image de référence avec le logiciel de photogrammétrie *(Les cercles proportionnels indiquent les écarts mesurés).*
Figure 6 : *Spatial analysis of ortho-rectified image's within reference image with the photogrammetric software* (The proportional's circles show the distortion measured).

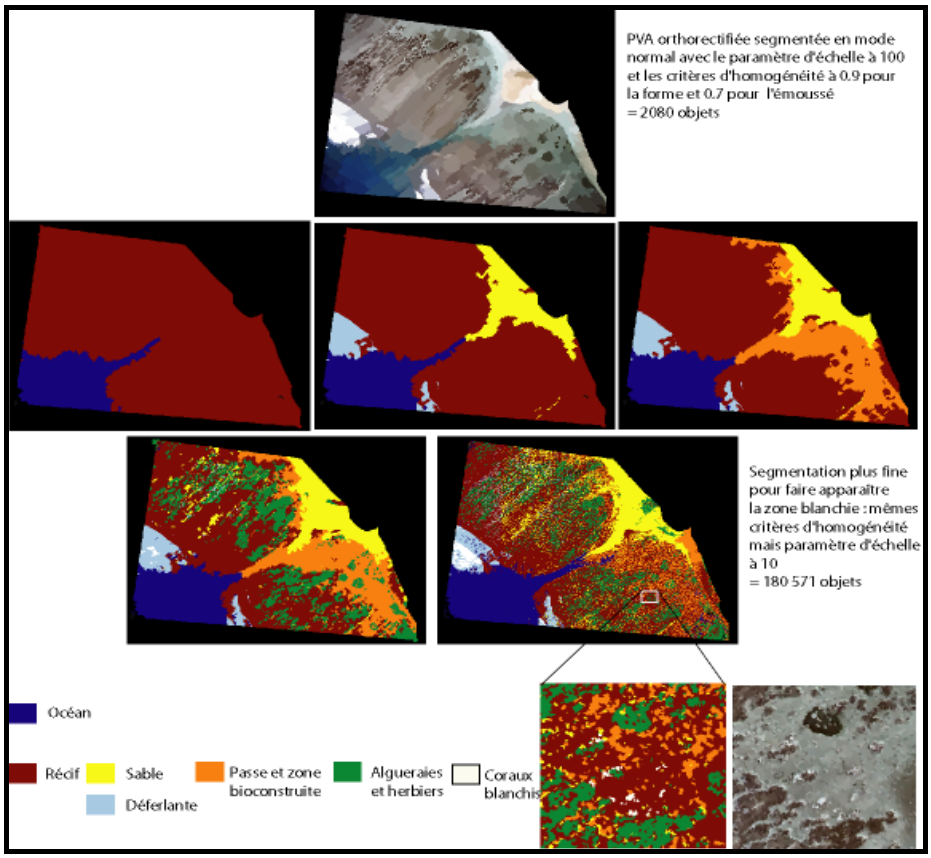


Figure 2 : Classification-objet de la PVA orthorectifiée (Source : PVA-ULM 2006 orthorectifiée)
Figure 3 *: Object-oriented classification of orthorectified aerial image (Source : PVA-ULM 2006 orthorectified)*

4.2. Extraction de connaissances : segmentation multirésolution ou analyse diachronique ?

Deux niveaux de segmentation sont réalisés (fig. 4). Le premier est le résultat d'une segmentation avec un paramètre d'échelle à 100. Ce niveau est défini pour partitionner l'image selon les grandes entités paysagères sur l'image : océan, sable, plateforme récifale, herbiers et phanérogames marines et/ou algueraies. Le second, plus fin est réalisé avec un paramètre d'échelle à 10 permettant d'agréger les pixels dans des polygones ayant des tailles compatibles avec celles des patates de corail blanchies. Les coraux blanchis sont représentés sur l'image par une petite centaine de pixels. Pour cette dernière segmentation, un poids plus important est évidemment donné à la signature spectrale. La forme est en effet peu déterminante. En ce qui concerne ces paramètres géométriques les valeurs proposées par défaut dans le logiciel sont conservées : forme : 0.1 et compacité : 0.5. Le tableau 3 synthétise les critères utilisés pour classer les pixels avec un paramètre d'échelle à 100.

A l'échelle « 10 » quelle que soit la méthode utilisée, des confusions persistent entre les pâtés de corail blanchis et des îlots de sable insérés dans la plate-forme récifale. L'approche multi-echelle ne solutionne donc rien. Le corail blanchi et ces entités sableuses appartiennent tous deux à l'objet « plate-forme récifale ». Le petit nombre de pixels concernés par le blanchissement explique sans doute en partie cela. Il est toujours possible dans un tel cas de procéder au reclassement des polygones blanchis de manière interactive puisque grâce à la segmentation la plus fine les objets existent. La question des critères scientifiques de réaffectation de certains pixels se pose donc.

La notion de changement de réponse spectrale des coraux pendant la période de blanchissement doit être explorée malgré les réticences émises concernant la superposabilité. Cette analyse est ici simplement réalisée visuellement car :

- la soustraction d'image impose une très bonne superposabilité difficile à obtenir avec des modèles de corrections différents ;

- les images de référence ont fait l'objet d'amélioration de contrastes (saturation, étalement d'histogramme) importants qui augmentent la confusion dans le domaine des fortes réflectance dans le visible.

Deux types de trajectoires peuvent être observées : une stabilité de signature (les zones sableuses), un changement important (les coraux).

Afin d'évaluer la classification finale une matrice de confusion est réalisée (tableau 4). Une dizaine de parcelles d'entraînement ont été délimitées par classe ce qui permet d'analyser en particulier le nombre de pixels mal classés. Le tableau 4 résultant confronte les classes obtenues, en colonne, avec les classes désirées, en ligne. Sur la diagonale se trouvent les valeurs bien classées et hors de la diagonale, les éléments mal classés. L'objet « corail blanchi » est ici parfaitement caractérisé. Le caractère très localisé du phénomène explique sans doute la très bonne qualité de ces résultats.

Tableau 3: règles de classification des pixels de la photographie aérienne.
Tableau 3: *rules used to classify aerial photography pixels.*

Objet	Fonction & canal	Type de segmentation	intervalle
Ocean	Ratio canal bleu	Courbe Gaussienne	0.22-1
sable	brillance	intervalle	170-255
passe	Ratio canal vert	Courbe Gaussienne	0,26-6
Pâtés de corail et plateforme	Moyenne canal rouge	intervalle	42-180
Phanérogames et algues	Ratio canal bleu	intervalle	0-0.3

Tableau 4: Matrice de confusion de la classification de la PVA-ULM du 14/04/2006.
Tableau 4: *Confusion's matrix of aerial image's classification (2006/04/14).*

	Océan	Déferlante	Sable	Passe et zone bioconstruite	Platier récifal	Algueraie et herbier	Coraux blanchis
Océan	96765	0	0	0	0	0	0
Déferlante	0	21651	0	0	0	0	0
Sable	0	59583	65212	18926	0	0	0
Passe et zone bioconstruite	6502	0	0	77661	0	0	0
Platier récifal	0	4545	2903	0	114861	6924	0
Algueraie et herbier	0	0	0	6524	11973	67948	0
Coraux blanchis	0	0	0	0	0	0	490

5. DISCUSSION

Si cette étude n'apporte pas l'information nécessaire pour analyser l'événement de blanchissement de 2006 sur le récif de l'Ermitage elle nous permet d'évaluer l'intérêt et la faisabilité de la production d'information à THRS sur les dégradations des formations récifales à La Réunion.

5.1. Positionnement de la chaîne de traitement en télédétection aéroportée en zone littorale

Au cours des années 90 certains problèmes cités comme récurant en télédétection aéroportée en milieu littoral (Green *et al.*, 1996) ont été solutionnés par cette chaîne de traitement d'images :

- Les perturbations et corrections atmosphériques sont négligeables avec des prises de vues à une faible altitude ;

- La grande variabilité des conditions hydrologiques sont « maîtrisées » : l'utilisation d'un ULM offre une grande flexibilité de prises de vues. Il est possible de caler des acquisitions de PVA sur les grandes marées bases, sans déferlement important dans les jours qui suivent l'observation de surfaces blanchies. Ceci est d'autant plus aisé qu'il existe une base ULM à seulement quelques kilomètres des côtes récifales ;

- Dans le contexte spécifique de La Réunion, l'écart entre le temps d'acquisition, le traitement de l'image et la phase de vérité-terrain peut être très faible : les PVA-ULM offrent ici un rendu photographique rapide et ciblé. Sur l'île, le réseau de structures à vocation scientifique (public, privé) garanti la rapidité de mise en œuvre des vérités terrains.

5.2 Validation de l'approche orientée objet

Dans la littérature, la démarche orientée objet est présentée en traitement d'images comme une solution pour détecter des objets complexes (combinaison de plusieurs signatures spectrales, plusieurs primitives graphiques,…) (Baatz et Schaepe, 2000 ; Benz *et al.* 2004). Dans cet article nous montrons qu'elle offre aussi une solution pour détecter des objets simples mais pour lesquels l'environnement et la faible couverture spatiale sont source de confusion. Le sable propre et sec (débris coralliens), est ainsi plus reflétant que le corail sain et peut être interprété comme étant du corail blanchi (Yamano et Tamura, 2003). Les jeunes pousses de corail souvent de couleur claire peuvent aussi être source de confusion. L'hypothèse testée ici était que seule l'analyse contextuelle implémentée par une approche hiérarchique permettant de définir une appartenance à de super-objet permettait de discriminer ces différents objets géographiques aux signatures spectrales proches. Elle s'est révélée ici insuffisante. C'est sur ce même type d'hypothèse que Benfied *et al.* (2007) ont construit leur démarche de cartographie des formations récifales à partir d'une approche orientée objet en introduisant des notions de distances (contexte) théorique (à la côte, etc.).

5.3 Notion d'épisode de blanchissement : nécessité et contrainte de l'analyse diachronique

L'imagerie satellitaire et aérienne reste faiblement utilisée pour caractériser des épisodes de blanchissement. Elle concerne quelques très importants événements de blanchissement sur des récifs bien développés. La petite taille de la communauté des télédétecteurs qui travaillent dans ce domaine, le coût des images et des validations de terrain sont sans aucun doute des facteurs explicatifs majeurs de cet état de fait. Dans le cas où elle est testée, le traitement d'images s'effectue, comme ici, sur 1 image acquise durant la période de blanchissement. Attendu que :

- toutes les espèces de coraux ne répondent pas de la même façon au stress donc ne blanchissent pas en même temps ;

- au cours d'un été austral différents stress peuvent aboutir à un blanchissement ;

- le recouvrement algal est très rapide après une mortalité corallienne.

La représentativité d'une étude uni-date est donc limitée. Elle est même discutable dès lors que l'on sort d'un contexte de blanchissement massif et brutal.

Cependant, du point de vue de la correction géométrique et de l'analyse diachronique d'images aériennes qui plus est en milieu littoral, on retrouve ici des problèmes récurant. La recherche de points d'amers fiables en nombre suffisant (15/20 selon les modèles) est très difficile. Les formations littorales, notamment sédimentaires, sont par définition très mobiles et la pose de repères fixes (croix de repérage) sur le terrain lors de l'acquisition ne peut se faire sur les formations coralliennes sans dégradations de celles-ci. On pourra noter aussi que les métadonnées concernant la production et la correction d'images aériennes ne sont souvent pas disponibles ou diffusées donc les modèles de correction d'images sont difficilement reproductibles.

Les limites de la mise en œuvre d'une telle démarche sur le long terme sont donc d'ordre géométrique (qualité de l'orthorectification). Les modèles aériens aboutissent à des déformations non négligeables de l'image. Le calage géographique obtenu ne garantit pas une superposabilité parfaite permettant l'analyse diachronique au pixel prêt. Une réflexion est donc à menée sur les conditions d'une analyse diachronique : comment, quelle information diffuser, à quelle échelle pour quel objectif ?

6. CONCLUSION

Cette réflexion menée, à La Réunion, sur la détection d'une forme de dégradation du récif tel que le blanchissement à partir d'images à THRS est complémentaire des approches menées à l'échelle mondiale pour évaluer les épisodes de blanchissement (Andréfouët *et al.*, 2000) grâce à des images à HRS. L'objectif de cette étude est d'aboutir à une information qui soit en cohérence spatiale (échelle) avec les bases de données sur le monitoring et les inventaires de biodiversité en milieu récifal (Bourmaud, *et al*, 2005). A l'instar de toute cartographie, elle doit contribuer à une meilleure quantification des phénomènes à l'échelle d'un récif : mieux connaître pour mieux gérer. Dans cet article nous montrons la nécessité d'associer à une approche multi-échelle et l'analyse diachronique pour solutionner les confusions entre objets ayant une signature spectrale proche. Le processus de blanchissement corallien correspond en effet à une altération de la signature spectrale du corail : altération définitive ou temporaire.

Dans cette étude nous nous sommes bornés à la détection du blanchissement corallien mais d'autres formes d'altérations ou modifications sont observables sur ces images à THRS (localisation des nouvelles pousses, dynamiques sédimentaires, étalement des herbiers à phanérogames marines). En fonction de la pertinence de leur cartographie et du questionnement des scientifiques et des gestionnaires, de nouvelles investigations pourront être mises en œuvre à partir de la chaîne de traitement ainsi définie.

Les épisodes à venir de blanchissement sur l'île de La Réunion qui ne sont que trop prévisibles dans ces contextes de changement climatique. Ils imposent de développer un outil opérationnel de mesure, d'analyse temporelle du blanchissement afin de mesurer les stress affectant les écosystèmes coralliens. L'imagerie aérienne ou satellitaire à THRS peut et doit y contribuer.

REMERCIEMENTS

Gabriel Ducandas, Catherine Tourand, Erwan Lagabrielle, Chantal Conand, Gilbert David.

RÉFÉRENCES

Andréfouët, S., Maritorena, S., Loubersac, L. (2000) « Un bilan de la télédétection appliquée aux milieux coralliens ». *Océanis*, vol. 26, no 3, p. 311-349.

http://www.crseo.ucsb.edu/~stephane/Andrefouet_et_al_oceanis02.pdf

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, 147-154.

Andréfouët, S., & Riegl, B. (2004). "Remote sensing: a key tool for interdisciplinary assessment of coral reef processes". *Coral Reefs*, 23, 1–4.

Benfield S.L., Guzman H.M., J.M. Guzman , Mair J.M. et YOUNG A.T. (2007) "Mapping the distribution of coral reefs and associated sublittoral habitats in Pacific Panama: a comparison of optical satellite sensors and classification methodologies". *International Journal of Remote Sensing* Vol. 28, No. 22, 20 November 2007, 5047–5070

Benz, U., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Eynen M. (2004) "Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information." *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, p. 239-258.

Bourmaud, C., Abounaidane, A., Boissier, P., Leclere, L., Mirault, E., Pennober, G. (2005) "Coastal and Marine Biodiversity of Réunion". *Indian Journal of Marine Science*, vol. 34, no 1, p. 98-103.

Cocquerez, J.P., Philipp, S. (1995) *Analyse d'images : filtrage et segmentation.* Masson, 488 p.

Despinoy, M.; Naim, O. (1997) Étude des récifs coralliens à l'île de La Réunion par télédétection multibande. Coral reefs studied in the Reunion Island by multispectral remote sensing. Congrès La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes : (Saint Foy, 13-17 octobre 1997) AUPELF-UREF N°7, Sainte Foy PQ, CANADA (13/10/1997), p. 29-36.

Ducandas, G. (1998) « Photogrammétrie et PVA ULM ». *XYZ*, vol.26, no 1/98, p. 35-38.

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, 123–132.

Faure, G. (1994) Principales dégradations de l'écosystème récifal. Environnement en milieu tropical. Coudray, J. et Bouguerra, M.L. (eds), p. 86-97. http://www.bibliotheque.refer.org/livre50/l5003.pdf.

Gonzalez, R., Woods, R. (1993) *Digital Image Processing*. Ed. Addison-Wesley.

Goreau, T.J., Hayes, R.L. (1994) "Coral bleaching and ocean « Hot spot »". *Ambio*, vol. 23, no 3, Royal Swedish Academy of Sciences.

Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J., Clark, C.D. (1996) "A review of remote-sensing for the assessment and management of tropical coastal resources". *Coastal management*, No. 24, p. 1-40.

Hoegh-Guldberg (1999) "Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs". *Marine and Freshwater Research* 50, p. 839-866.

Lopez-Ornelas, E., Sèdes, F. (2005) Génération de descripteurs d'images satellitaires à THRS. Cybergeo, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005, article 385.

URL : http://www.cybergeo.eu/index8212.html.

Lopez-Ornelas E. ,Sédes F., Flouzat G. Laporterie-Dejean F. LOUZAT G. (2005) « Une approche objets pour la description des images à très haute résolution spatiale et l'extraction de connaissances ». *Revue Télédétection*, 2005, Vol. 5, n° (1-2-3), p. 261-273

http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20051026170144.pdf

Montaggioni, L.F., & Faure, G. (1980). Les récifs coralliens des Mascareignes (Océan Indien). Collection des Travaux du Centre Universitaire. Université de La Réunion. 151pp.

Naim, O, Cuet, P. (1989) Les platiers récifaux de l'Ile de La Réunion. Université de La Réunion, Faculté des Sciences, Direction scientifique : G. Faure et J.Y. Conan. Rapport non publié AUR-Lab. Écol. mar., Univ.Réunion, 150 pp.

Oruc, M., Marangoz, A.M., Buyuksalish, G. (2004) "Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands". *Proceedings of the ISRPS 2004 Annual Conference*, Istanbul, Turkey, p. 19-23.

Rowlands G.P., Purkis S., Riegl B., (2008) "The 2005 coral-bleaching event Roatan (Honduras): use of pseudo-invariant features (PIFs) in satellite assessment", *Journal of Spatial Science* 53**,** pp. 99–112

Spalding, M.D., Ravilious, C., Green, E.P. (2001) *World Atlas of Coral Reefs*, University of California.

Yamano, H., Tamura, M. (2003) Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing : simulation and data analysis. Remote sensing of environnment, Social and environmental systems division, national institute for environmental studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan.