

Projet Bio indication à La Réunion

Contribution au développement d'indicateurs récifs coralliens à La Réunion



Rapport d'activité 2010, rapport intermédiaire

Ronan Le Goff	Ifremer
Michel Ropert	Ifremer
Pierre Scolan	Ifremer
Touria Bajjouk	Ifremer
Pierre-Olivier Liabot	Ifremer
Pascal Mouquet	Aamp
Jean Pascal Quod	Arvam
Mayalen Zubia	Arvam
Harold Cambert	Arvam
Jean Turquet	Arvam



En partenariat avec
Pascale Cuet
Jean Benoit Nicet
Amélie Fontcuberta
Bruce Cauvin
Emmanuel Tessier

Université de La Réunion
Pareto Ecoconsult
Pareto Ecoconsult
Réserve Naturelle Marine de La Réunion
Réserve Naturelle Marine de La Réunion

Février 2011

Contexte de programmation et de réalisation

Convention Onema/Ifremer 2010 ; projet bio indication à la Réunion ; contribution au développement d'indicateurs récifs coralliens à La Réunion.

L'action comprend deux volets qui s'appuient chacun sur des projets parallèles :

Volet 1 : Définition d'indicateurs d'eutrophisation en zone lagunaire : projet parallèle « Eutrolag » mené par l'Arvam, en collaboration avec Pareto Ecoconsult, l'Université de La Réunion et le GIP Réserve Marine de La Réunion sous financement de la Diren de la Réunion et l'Office de l'Eau de La Réunion.

Volet 2 : Cartographie des habitats benthiques en zone lagunaire : projets parallèles « Litto3D en océan Indien » d'une part (projet mené par le SHOM et l'IGN sous financement de la Diren de La Réunion et l'Aamp), et « Spectrhabet OI » d'autre part (cartographie des habitats benthiques subtidiaux des îles françaises de l'océan Indien par traitement d'images hyperspectrales ; projet mené par l'Ifremer, l'Aamp, les Taaf et la Diren de La Réunion, avec la participation de l'Arvam, de Pareto Ecoconsult, d'Actimar et du SHOM).

Les auteurs

Ronan Le Goff, Michel Ropert et Pierre Scolan, Ifremer,
Délégation Ifremer de l'océan Indien, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port
Ronan.Le.Goff@ifremer.fr ; Michel.Ropert@ifremer.fr ; Pierre.Scolan@ifremer.fr

Touria Bajjouk, Pierre-Olivier Liabot Ifremer
Ifremer centre de Brest, 29280 Plouzané
Touria.Bajjouk@ifremer.fr ; Pierre.Olivier.Liabot@ifremer.fr

Pascal Mouquet, Aamp
Délégation Ifremer de l'océan Indien, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port
Pascal.Mouquet@ifremer.fr

Mayalen Zubia, Harold Cambert, Jean Pascal Quod et Jean Turquet, ARVAM
C/O CYROI, 2, rue Maxime Rivière,
97490 Sainte-Clotilde, La Réunion
mayalen.zubia@arvam.com ; harold.cambert@arvam.com ; jpascal.quod@arvam.com ; jean.turquet@arvam.com

Avec la collaboration de :

Jean Benoit Nicet, Amélie Fontcuberta, Pareto Ecoconsult
16, rue Albert Lougnon, Village entreprises
97490 Sainte-Clotilde, La Réunion
jbnicet.pareto@wanadoo.fr

Pascale Cuet, Université de la Réunion, Lab. ECOMAR
15, rue René Cassin, BP 7151
97715 Saint-Denis Messag cedex 9
Pascale.CUET@univ-reunion.fr

Les correspondants

Onema : Marie-Claude Ximénès, marie-claude.ximenes@onema.fr

Droits d'usage :	accès libre
Couverture géographique :	La Réunion
Niveau géographique :	Océan Indien
Niveau de lecture :	Tous niveaux
Nature de la ressource :	Document

TITRE : PROJET BIO INDICATION A LA REUNION

STATUT DU DOCUMENT : RAPPORT D'ACTIVITE 2010, RAPPORT INTERMEDIAIRE ; ACCES LIBRE

AUTEUR(S) : RONAN LE GOFF, MICHEL ROPERT, PIERRE SCOLAN, TOURIA BAJJOUK, PIERRE-OLIVIER LIABOT, PASCAL MOUQUET, MAYALEN ZUBIA, HAROLD CAMBERT, JEAN BENOIT NICET, PASCALE CUET, JEAN PASCAL QUOD ET JEAN TURQUET

SOMMAIRE

Résumé	page 4
Introduction	pages 5
1. définition d'indicateurs d'eutrophisation en zone lagonaire.	page 5
1.1. Éléments de contexte et présentation du projet	page 6
1.2. Les objectifs	page 6
1.3. Principaux éléments méthodologiques du projet.	page 7
1.4. Objectifs 2010	page 8
1.5. La campagne exploratoire de novembre 2010	page 8
1.6. La première campagne de suivi de décembre 2010	page 14
2. utilisation d'images hyperspectrales et de données Lidar pour la cartographie des habitats benthiques	page 19
2.1. Le contexte	page 19
2.2. Les principes de la méthode	page 19
2.3. Etat d'avancement du projet à la fin 2010	page 21
2.4. Conclusion	page 26
3. Références bibliographiques	page 28

PROJET BIO INDICATION A LA REUNION

RONAN LE GOFF, MICHEL ROPERT, PIERRE SCOLAN, TOURIA BAJJOUK, , PIERRE-OLIVIER LIABOT, PASCAL MOUQUET, MAYALEN ZUBIA, HAROLD CAMBERT, JEAN PASCAL QUOD ET JEAN TURQUET

RESUME

Le présent document présente les travaux réalisés en 2010 dans le cadre du projet « Bio Indication à La Réunion ; contribution à la définition d'indicateur récifs coralliens à La Réunion ».

Suite à la récupération et à l'analyse des données « milieu marin » déjà disponibles à La Réunion et aux premiers travaux des groupes d'experts thématiques créés dans le cadre de la mise en place de la DCE, il est apparu que les indicateurs d'état faisant le plus cruellement défaut localement étaient ceux permettant de suivre et qualifier les **niveaux dystrophie se traduisant par des développements de macro algues en zone lagonaire.**

Décision a donc été prise de remanier profondément le projet initial ou plus précisément ses deux premiers volets « eutrophisation » et « MES », et de les fusionner et les ré-organiser afin d'atteindre l'objectif de définition des indicateurs précités.

2010 a permis de définir la stratégie globale de ce « nouveau projet », c'est-à-dire d'arrêter la stratégie d'échantillonnage, de mettre en place les partenariats nécessaires, de monter et faire valider le dossier de projet et enfin de lancer les premières opérations terrain (en fin d'année).

Concernant le dernier volet du projet visant à **cartographier les habitats benthiques littoraux** par utilisation d'imagerie hyperspectrale, il a connu des retards liés principalement à une livraison décalée de près d'un an des données LIDAR et hyperspectrales par le SHOM. 2010 a néanmoins permis d'achever la banque de signatures hyperspectrales pures par réalisation de nouvelles campagnes de mesures sur le terrain, à La Réunion, mais aussi dans certaines îles Eparses, et de lancer les toutes premières analyses du signal.

Au final, le projet global a donc dû être totalement remanié, et son achèvement reporté dans le temps, la nouvelle date de remise du rapport final étant aujourd'hui fixée à la mi 2012.

Mots clés (thématique et géographique)

Habitats benthiques, indicateurs d'eutrophisation ou de dystrophie, algues, cartographie des habitats benthiques, zone lagonaire, zone intertropicale, La Réunion, océan Indien, DCE

Les auteurs remercient l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (partenariat ONEMA-Ifremer 2010) pour sa participation

PROJET BIO INDICATION A LA REUNION : DEFINITION D'INDICATEURS

RONAN LE GOFF, MICHEL ROPERT, PIERRE SCOLAN, PASCAL MOUQUET, TOURIA BAJJOUK, PIERRE OLIVIER LIABOT, MAYALEN ZUBIA, HAROLD CAMBERT, JEAN PASCAL QUOD ET JEAN TURQUET

Introduction

L'objectif du présent projet « Bio indication à La Réunion » est de développer des indicateurs « récifs coralliens » pour la DCE (indicateurs de dystrophie ou d'eutrophisation à macroalgues, et indicateurs d'hétérogénéité spatiale notamment).

L'action a évolué par rapport au prévisionnel initial établi fin 2008. Cette action comprenait en effet initialement 3 volets :

- sensibilité à l'eutrophisation
- sensibilité aux apports en MES
- élaboration d'un indicateur d'hétérogénéité spatiale par traitement d'imageries hyperspectrales et LIDAR

Sur recommandation des groupes d'expertise thématique mis en place pour la DCE, et du fait des spécificités du contexte environnemental (hydrodynamisme, climatologie...) au niveau de la zone lagunaire, l'indicateur de sensibilité aux apports de MES a été abandonné courant 2010 car jugé non pertinent. L'indicateur « sensibilité à l'eutrophisation » a profondément été revu, et le volet d'études correspondant totalement remanié et développé.

Le projet ne comprend donc aujourd'hui plus que deux volets :

- un volet « définition d'indicateurs de dystrophie ou d'eutrophisation à macroalgues en zone lagunaire » ayant pour objectif de définir des indicateurs d'eutrophisation simples, basés sur différentes espèces de macroalgues en compétition avec le corail. Le lien avec les pressions sera étudié via les paramètres physico-chimiques explicatifs que sont les nitrate, nitrite, ammonium et phosphate (considérés comme des « proxys des pressions »). Les paramètres biologiques (coraux, algues) relevés seront ceux des suivis de type « GCRMN », mais adaptés à la problématique. Au final, l'objectif est de proposer des métriques et des seuils adaptés au contexte récifal réunionnais.

- et le volet « indicateur d'hétérogénéité spatiale par traitement d'images hyperspectrales et LIDAR » qui est maintenu.

Les deux volets s'achèveront en 2012, ce qui reporte d'un an la fin de ce projet. Ce report s'explique par les retards pris dans la livraison des images hyperspectrales et Lidar par le SHOM (volet 2) et la nécessité de réaliser un suivi *in situ* des développements algaux pendant une période productive complète (novembre 2010-juillet 2011). La remise du rapport final n'interviendra par conséquent que mi 2012.

Outre la refonte complète du premier volet du projet au cours de l'année 2010 (qui a nécessité réunions, négociations, et rédaction du nouveau document de projet, rédaction et passation des conventions annuelles ou de sous traitance), les principales réalisations sont présentées ci après :

1. définition d'indicateurs d'eutrophisation en zone lagunaire.

Le projet est aujourd'hui redéfini. Il s'appuie sur un projet parallèle, le projet « Eutrolag », mené par l'ARVAM en collaboration avec l'Université de La Réunion, PARETO Ecoconsult et le GIP Réserve Naturelle Marine de La Réunion, et sous financement de l'Office de l'Eau de La Réunion et de La Diren/DEAL de La Réunion.

Les réalisations 2010 sur ce volet ont donc consisté à redéfinir le projet d'une part, et à lancer les premières opérations de terrain en fin d'année d'autre part.

La toute première de ces opérations terrain a consisté en une campagne exploratoire ayant pour objet de parfaitement valider la stratégie et les stations/radiales à suivre au cours du projet. En toute fin d'année, la première campagne de prélèvements proprement dite a pu être réalisée.

1.1. Éléments de contexte et présentation du projet

Les suivis des biocénoses marines effectués depuis les années 80 sur les espaces récifaux de la côte ouest de l'île de La Réunion montrent que les structures coralliennes sont affectées par un enrichissement « chronique » en sels nutritifs. Cette dégradation des écosystèmes récifaux semble en partie due aux apports issus des bassins versants jouxtant les plateformes récifales. Les phénomènes générés par les pollutions chroniques de l'écosystème récifal ont été décrits et en partie quantifiés dès le début des années 1980 à La Réunion (Guillaume et al., 1983 ; Cuet, 1989 ; Cuet et Naïm, 1992 ; Naïm, 1993 a et b). Ces enrichissements sont principalement liés aux infiltrations d'eaux souterraines qui apportent des quantités significatives d'azote et dans une moindre mesure de phosphate (Cuet et al., 1988 ; Naïm et al., 2000).

Cet enrichissement des eaux récifales réunionnaises, lié aux activités anthropiques, provoque une augmentation de l'abondance des peuplements algaux (Cuet et al., 1988 ; Naïm, 1993b ; Semple, 1997).

A La Réunion, les faciès algaux de pollution apparaissent principalement durant la saison chaude et disparaissent avec le retour de la saison fraîche.

Sur les dernières années, une extension dans le temps et dans l'espace des proliférations algales est remarquée (Chabanet, 1994). L'analyse du suivi GCRMN depuis 10 ans montre en effet une augmentation qui semble significative du recouvrement algal sur la majorité des sites échantillonnés entre 1998 et 2009 (Bigot, com. pers.). La couverture algale aurait doublé, voire triplé, sur certains sites et la majorité des sites présenterait aujourd'hui une couverture algale supérieure à 50 %, ce qui est caractéristique d'un mauvais état écologique (Bruno et al., 2009).

L'étude « Caractérisation de l'état de référence biologique des masses d'eau côtières au regard de la Directive Cadre de l'Eau » (2010) a permis de compléter ces premiers constats sur la masse d'eau récifale de Saint-Gilles/La Saline. Les relevés réalisés pour la faune et la flore (corail / algue) ont mis en évidence certaines limites de la méthode GCRMN utilisée jusqu'à présent, en particulier (i) du fait qu'elle n'intègre pas la composition spécifique des algues et (ii) qu'elle prend mal en compte les coraux partiellement « enalgués » (ce qui est une caractéristique des zones à risque d'eutrophisation). Cette étude préliminaire a été réalisée uniquement sur le platier récifal de St Gilles/La Saline et ses premiers résultats doivent être complétés et étendus à l'ensemble des récifs coralliens de La Réunion. Le présent volet « Définition de bio-indicateurs d'eutrophisation en zone lagunaire » doit poursuivre et compléter cette première approche.

1.2. Les objectifs

Ce volet intègre à la fois un suivi des paramètres physico-chimiques (nitrate, phosphate) et un suivi des peuplements algaux et coralliens afin de pouvoir appréhender le phénomène d'eutrophisation dans son ensemble et définir des bio indicateurs pertinents (coraux/macroalgues) pour les récifs coralliens de La Réunion dans le cadre de la DCE.

Les objectifs spécifiques sont :

- d'évaluer l'impact de l'eutrophisation sur l'ensemble des peuplements benthiques : coraux, algues, certains herbivores (oursins) et filtreurs (éponges, bivalves, macroperforants). Cette étude représente le premier suivi des communautés algales (composition taxonomique et biomasse) des récifs coralliens de La Réunion, qui plus est intégrant les facteurs clés du développement des macroalgues (coraux, herbivores, nutriments) ;
- d'identifier les espèces algales opportunistes et déterminantes ;
- de définir les bio indicateurs pertinents à intégrer au réseau GCRMN / DCE « benthos de substrat dur ».

Il s'agit donc de définir :

- des paramètres, des métriques, des valeurs de référence et des valeurs interclasses pour élaborer des indicateurs permettant de qualifier l'état de santé des récifs coralliens et le retranscrire au sein de grilles DCE,
- et des paramètres et des métriques physicochimiques soutenant les éléments biologiques,

1.3. Principaux éléments méthodologiques du projet.

Les 4 masses d'eau récifales définies dans le cadre de la DCE doivent être échantillonnées :

Saint Gilles (LC06) ; Saint Leu (LC08) ; Etang Salé (LC10) ; Saint Pierre (LC11)

Sur chaque site, des radiales et des transects doivent permettre de caractériser différents niveaux d'eutrophisation, depuis des points de « bas de plage » où les manifestations d'eutrophisation sont patentes à des points « de référence » (points de prélèvements exempts d'apports anthropiques, car nettement sous influence océanique).

Pour le site de Saint-Gilles, les deux radiales, déjà positionnées dans le cadre du projet « Etat de référence » précité, méritent d'être retenues : il s'agit de la radiale « Toboggan » (TO) choisie comme référence et de la radiale « Trou d'eau » (TD) impactée par des résurgences (Figure 1).



Figure 1 : Positionnement des radiales de Saint Gilles

Sur les autres sites (Saint Leu, Etang Salé et Saint Pierre), nous ne disposons pas de connaissances préalables suffisantes, et le positionnement des radiales nécessite la réalisation d'une campagne exploratoire avant la fin novembre 2010, pour permettre un démarrage effectif de l'échantillonnage en décembre 2010, juste avant le début de la saison des pluies.

A chaque radiale, trois transects de 60 m doivent être effectués à différentes distances de la plage (Figure 1) : 40m, 80m et 120m

Pour chaque site, un transect sur le front récifal (REF) doit également être effectué ; il sera considéré comme le témoin d'une zone lagonaire non impactée car strictement sous influence océanique.

Ces différents transects doivent donc permettre de caractériser des zones différemment impactées par l'eutrophisation, depuis la plage jusqu'au front récifal.

Tableau 1 : Synthèse du plan d'échantillonnage

SITE	Saint Gilles		Saint Leu	Etang Salé	Saint Pierre
STATIONS	TO	TE	SL	ES	SP
TRANSECTS	40	40	40	40	40
	80	80	80	80	80
	120	120	120	120	120
	REF		REF	REF	REF

La fréquence d'échantillonnage est fixée à 4 campagnes par an (décembre, février, avril, juin) pour l'ensemble des stations, sauf celle de Trou d'eau qui sera échantillonnée mensuellement du mois de décembre au mois de juillet (8 mois).

Les paramètres mesurés sont les paramètres classiques des suivis hydrologiques d'une part (température, salinité, oxygène dissous, nitrite (NO₂), Nitrate (NO₃), Ammonium (NH₄) et orthophosphate (PO₄)), et les peuplements benthiques d'autres part (communautés coralliennes, invertébrés benthiques -herbivores et filtreurs-, communautés algales -algues brunes, algues vertes, algues rouges et cyanobactéries-).

1.4. Objectifs 2010

Les objectifs spécifiques arrêtés pour 2010 ont été :

- de finaliser le choix des radiales pour les sites de Saint Leu, Etang Salé et Saint Pierre par la réalisation d'une campagne exploratoire devant être achevée avant fin novembre 2010 ;
- et de réaliser le premier suivi en décembre 2010, juste avant les premiers lessivages de la saison des pluies.

1.5. La campagne exploratoire de novembre 2010.

Une campagne exploratoire a donc été organisée sur les sites de Saint Leu, d'Etang Salé et de Saint Pierre du 22 au 25 novembre 2010. Cette campagne avait pour objectif de sélectionner une radiale par site, radiale devant présenter différentes caractéristiques et différents niveaux d'eutrophisation, conditions *sine qua non* pour élaborer des indicateurs biologiques pertinents.

Les intervenants sur cette campagne ont été Pascale Cuet du laboratoire ECOMAR de l'Université de La Réunion, et Jean Turquet, Mayalen Zubia et Harold Cambert de l'ARVAM.

Le plan d'échantillonnage de chaque site a été établi en s'appuyant sur des données antérieures quand elles étaient disponibles (Cuet, 1989), et grâce à la connaissance du terrain des différents intervenants. Les points d'échantillonnage ont été répartis de façon régulière entre le bas de plage et le front récifal (figures 1, 2 et 3 ; les coordonnées GPS de ces points sont données § 2.2).

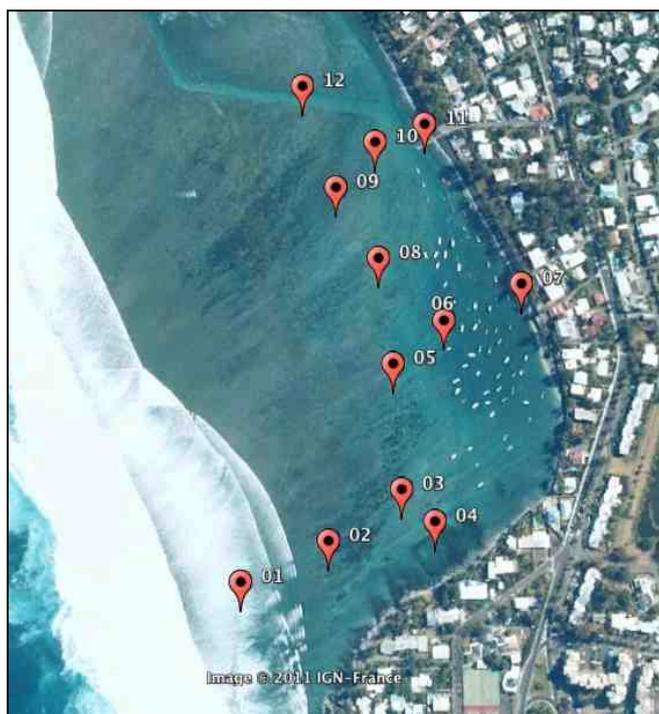


Figure 1 : Plan d'échantillonnage des paramètres hydrologiques sur le site d'Etang Salé



Figure 2 : Plan d'échantillonnage des paramètres hydrologiques sur le site de Saint Leu
A/ Zone nord ; B/ Zone centrale ; C/ Zone sud



Figure 3 : Plan d'échantillonnage des paramètres hydrologiques sur le site de Saint Pierre : A/ Zone nord ; B/ Zone sud

Sur chaque point de prélèvement, deux flacons d'eau de mer ont été prélevés à mi profondeur à marée basse :

- un flacon de 250mL pour les mesures de salinité, réalisées à la sortie de l'eau
- un flacon de 250mL pour les mesures de nitrate

Une sonde multiparamètre « YSI Professional Plus » a été utilisée (Figure 4) pour les mesures de **température et de salinité** (Les capteurs sont régulièrement contrôlés).

Pour le **dosage de nitrate**, les échantillons ont été conditionnés (filtrés et placés au frais) dès la sortie de l'eau, puis congelés dès retour au laboratoire. Le dosage du nitrate a été réalisé par flux continu au laboratoire ECOMAR selon la méthode préconisée par Aminot et Kerouel (2007).



Figure 4 : Sonde multiparamètre « YSI professional Plus » utilisée lors de cette campagne. La mesure de température est réalisée avec une résolution de 0,1 °C, et une précision $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Le calcul de la salinité est intégré à l'électronique de l'appareil à partir des valeurs de conductivité et de température. La mesure de salinité est réalisée avec une résolution de 0,01 ppt, et une précision $\pm 0,1$ ppt soit $\pm 1\%$.

Les résultats obtenus lors de cet échantillonnage pour les sites d'Etang Salé, Saint Leu et de Saint Pierre sont synthétisés dans les tableaux 2, 3 et 4 respectivement.

Tableau 2 : Résultats bruts de l'échantillonnage effectué sur le site d'Etang Salé le 22/11/2010

POINTS	Latitude S	Longitude E	Température (°C)	Salinité (ppt)	NO3 + NO2 (µM)
1	-21.27129	55.33160	26,0	34,71	0,40
2	-21.27093	55.33239	25,7	34,83	0,47
3	-21.27048	55.33307	25,5	34,43	1,81
4	-21.27076	55.33338	25,3	20,78	67,1
5	-21.26838	55.33289	25,7	34,64	0,54
6	-21.26900	55.33346	25,4	34,72	0,78
7	-21.26868	55.33418	25,3	31,96	8,65
8	-21.26846	55.33286	25,9	34,92	0,46
9	-21.26784	55.33246	25,8	34,87	0,39
10	-21.26744	55.33282	25,8	34,86	0,52
11	-21.26729	55.33328	25,6	33,32	4,28
12	-21.26695	55.33215	25,8	34,83	0,38

Tableau 3 : Résultats bruts de l'échantillonnage effectué sur le site de Saint Leu le 24/11/2010

POINTS	Latitude S	Longitude E	Température (°C)	Salinité (ppt)	NO3 + NO2 (µM)	Distance à la côte (m)
1	-21.18295	55.28596	20,6	33,95	1,04	150
2	-21.18285	55.28622	19,6	33,97	0,97	123
3	-21.18275	55.28658	20,7	33,74	1,78	78
4	-21.18269	55.28692	17,4	33,75	2,38	45
5	-21.18261	55.28716	19,8	33,33	3,09	19
6	-21.18110	55.28562	23,9	34,53	0,57	143
7	-21.18096	55.28599	16,5	35,15	0,56	102
8	-21.18103	55.28637	19,4	34,52	0,54	63
9	-21.18106	55.28670	17,7	34,25	0,84	30
10	-21.18106	55.28687	24,3	33,97	1,03	16
11	-21.17949	55.28514	25,6	34,63	0,70	158
12	-21.17947	55.28550	25,2	34,69	0,59	122
13	-21.17947	55.28594	25,6	34,58	0,59	78
14	-21.17948	55.28635	24,3	34,60	0,57	34
15	-21.17947	55.28658	25,0	33,92	1,40	11
16	-21.17802	55.28555	25,8	34,80	0,73	133
17	-21.17801	55.28592	25,8	34,82	0,65	96
18	-21.17795	55.28636	25,6	34,68	0,79	52
19	-21.17789	55.28656	25,6	33,74	1,77	34
20	-21.17781	55.28674	25,8	34,21	2,04	17
21	-21.17476	55.28552	24,6	34,57	1,82	131
22	-21.17476	55.28574	25,2	34,82	1,81	109
23	-21.17476	55.28604	24,4	34,70	0,43	79
24	-21.17475	55.28641	24,4	34,25	2,17	39
25	-21.17473	55.28664	24,4	33,44	5,97	15
26	-21.17422	55.28654	24,9	34,34	1,03	15
27	-21.17357	55.28644	25,5	34,55	1,02	18
28	-21.17294	55.28629	25,1	34,34	1,06	12
29	-21.17205	55.28613	25,3	34,47	1,17	11
30	-21.17159	55.28601	25,7	34,71	1,30	15
31	-21.17103	55.28454	26,2	34,83	0,59	170
32	-21.17100	55.28502	26,2	34,83	0,47	125
33	-21.17100	55.28537	25,9	34,90	0,44	88
34	-21.17102	55.28576	26,1	34,79	0,44	45
35	-21.17095	55.28614	26,4	34,62	0,83	6
36	-21.16903	55.28450	26,8	34,79	0,53	157
37	-21.16909	55.28481	26,8	34,88	0,48	128
38	-21.16915	55.28525	26,9	34,78	0,29	83
39	-21.16916	55.28559	26,7	32,61	5,48	48
40	-21.16923	55.28581	26,4	29,92	9,95	21
41	-21.16837	55.28512	26,2	34,52	0,60	20 (digue)
42	-21.16775	55.28508	26,5	34,39	0,78	24 (digue)
43	-21.16682	55.28507	26,9	34,93	0,34	96
44	-21.16617	55.28510	27,4	34,76	0,63	83
45	-21.16570	55.28504	27,1	34,82	0,74	87
46	-21.16564	55.28574	27,2	34,75	0,76	14
47	-21.16556	55.28552	27,0	34,70	0,70	36
48	-21.16544	55.28529	27,2	34,80	0,72	83
49	-21.16534	55.28504	27,1	34,92	0,90	92
50	-21.16530	55.28490	27,0	34,89	0,65	105

Tableau 4 : Résultats bruts de l'échantillonnage effectué sur le site de Saint Pierre le 25/11/2010

POINTS	Latitude S	Longitude E	Température (°C)	Salinité (ppt)	NO3 + NO2 (µM)	Distance à la côte (m)
1	-21.34591	55.47460	24,9	34,56	0,84	141
2	-21.34566	55.47462	24,9	34,58	0,64	115
3	-21.34536	55.47462	25,7	34,80	0,74	80
4	-21.34505	55.47466	25,4	34,73	0,55	44
5	-21.34473	55.47463	26,0	34,74	0,65	9
6	-21.34591	55.47283	25,8	34,74	0,86	140
7	-21.34554	55.47296	25,6	34,64	0,97	101
8	-21.34514	55.47298	24,9	34,32	1,52	55
9	-21.34486	55.47290	25,9	34,40	2,40	23
10	-21.34469	55.47282	25,6	34,62	1,67	3
11	-21.34479	55.47142	26,2	33,30	8,03	14
12	-21.34514	55.47145	25,9	33,55	5,76	55
13	-21.34546	55.47146	25,6	33,63	3,83	91
14	-21.34674	55.47149	25,8	34,30	1,59	121
16	-21.34660	55.47071	26,2	34,46	0,88	86
17	-21.34510	55.47070	26,0	34,38	1,42	39
18	-21.34485	55.47075	26,2	33,52	5,24	12
19	-21.34525	55.46952	26,0	34,55	1,63	92
20	-21.34490	55.46959	26,4	34,53	1,44	53
15	-21.34466	55.46976	26,1	33,95	3,83	15
21	-21.34522	55.46866	26,8	34,60	1,27	119
22	-21.34499	55.46887	26,8	34,37	1,41	80
23	-21.34475	55.46896	26,7	34,30	2,69	82
24	-21.34452	55.46903	26,6	32,88	10,34	33
25	-21.34433	55.46905	26,6	31,80	11,90	13
26	-21.34439	55.46704	26,7	33,98	3,34	75
27	-21.34429	55.46704	26,7	33,10	7,51	64
28	-21.34418	55.46699	26,7	32,67	10,76	56
29	-21.34380	55.46706	26,7	32,68	10,80	29
30	-21.34354	55.46713	27,0	32,39	12,05	8
31	-21.34329	55.46644	27,0	32,60	13,15	5
32	-21.34312	55.46589	27,0	33,05	6,32	2
33	-21.34303	55.46544	27,0	32,64	12,35	4
34	-21.34219	55.46353	27,0	32,21	12,80	12
35	-21.34206	55.46275	26,9	31,81	17,05	16
36	-21.34354	55.46425	26,9	34,49	1,36	113
37	-21.34325	55.46445	26,9	34,50	0,96	76
38	-21.34303	55.46454	26,7	34,46	0,91	51
39	-21.34281	55.46465	26,9	34,45	1,40	24
40	-21.34272	55.46467	27,2	32,34	17,00	14
41	-21.34233	55.46107	27,4	34,62	1,48	58
42	-21.34222	55.46119	27,3	34,61	2,08	44
43	-21.34214	55.46130	27,4	34,60	1,80	33
44	-21.34189	55.46136	27,4	34,37	3,40	4
45	-21.34168	55.46051	27,2	34,26	4,11	1
46	-21.34181	55.45886	27,4	34,66	0,83	108
47	-21.34165	55.45900	27,4	34,74	0,83	81
48	-21.34139	55.45915	27,3	34,58	1,02	51
49	-21.34123	55.45933	27,5	34,03	3,41	25
50	-21.34115	55.45941	27,5	33,66	4,02	11

Après concertation entre les différents intervenants du projet, l'emplacement des suivis pour les sites d'Etang Salé, Saint Leu et Saint Pierre a été arrêté en fonction des données obtenues et des contraintes naturelles (hydrodynamisme, accessibilité).

Ces stations sont décrites dans la partie 1.6. suivante.

1.6. La première campagne de suivi de décembre 2010.

Cette campagne a été effectuée par Jean Turquet, Harold Cambert, Mayalen Zubia et Fabien Tona de l'ARVAM, par Jean Benoit Nicet et Amélie Fontcuberta de PARETO et par Pierre Scolan de l'Ifremer. 4 journées ont été nécessaires pour le suivi des 4 sites (Tableau 5), entre le 14 et le 21 décembre 2010.

Tableau 5 : Campagne de suivi du mois de décembre 2010

SITE	STATIONS	TRANSECTS	DATE
Saint Gilles	TO	40	14/12/10
		80	14/12/10
		120	14/12/10
		REF	14/12/10
	TE	40	16/12/10
		80	14/12/10
		120	14/12/10
Saint Leu	SL	40	21/12/10
		80	21/12/10
		120	21/12/10
		REF	NON
Etang Salé	ES	ES2	21/12/10
		ES3	21/12/10
		ES5	21/12/10
		REF	NON
Saint Pierre	SP	30	15/12/10
		60	15/12/10
		80	15/12/10
		REF	15/12/10

-TO : Toboggan ; TE : Trou d'eau ; SL : station Saint Leu ; ES : station Etang Salé ; SP : station Saint Pierre

Les transects REF proches du front récifal de Saint Leu et d'Etang Salé n'ont pu être réalisés du fait de mauvaises conditions météorologiques (houle, vent). Ces transects sont difficilement accessibles et sont sous influence océanique ce qui laisse supposer que les peuplements de ces transects sont relativement stables dans le temps (excepté bien sûr lors des phénomènes paroxysmiques tels que les cyclones, le blanchissement, ...). Il a donc été décidé que ces deux transects REF disposés sur les front récifaux de Saint Leu et d'Etang Salé ne seront suivi qu'à deux reprises dans le cadre du présent projet, en février puis en juin.

1.6.1. Matériels et Méthodes

Les prélèvements d'eau de mer et les suivis des peuplements benthiques sont réalisés à marée basse sur tous les points de mesures.

Hydrologie : les paramètres hydrologiques suivis et les méthodes d'analyse sont donnés par le tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres hydrologiques mesurés lors de cette campagne

PARAMETRES	MESURES	METHODES
Paramètres physico-chimiques		
Température/salinité/Oxygène dissous	Sonde Ysi	In situ
Teneurs en nutriments		
Nitrite (NO ₂)/ Nitrate (NO ₃)	Flux continu	Aminot & Kérouel, 2007
Ammonium (NH ₄) / Orthophosphate (PO ₄)	Spectrophotomètre	Aminot & Kérouel, 2004

Suivi des communautés coralliennes : pour chacune des stations, 4 transects linéaires de 60m sont réalisés selon la méthode GCRMN (Conand et al., 1997), mais adaptée à la problématique. Sont pris en compte la couverture corallienne et les formes des colonies, le substrat et les différents groupes fonctionnels des algues (algue calcaire, algue dressée, gazon algal ; Tableau 7).

Tableau 7 : Paramètres suivis lors de chaque transect GCRMN

PARAMETRES ECHANTILLONNES	CATEGORIES
Acropore Branchu	CORAIL
Acropore Digité	
Acropore Encroûtant	
Acropore Submassif	
Acropore Tabulaire	
Corail Branchu	
Corail Encroûtant	
Corail Foliacé	
Corail Massif	
Corail Submassif	
Corail champignon	
Helipore	
Millépore	
Tubipore	
Corail Mou	
Algue Calcaire	
Algue dressée molle	
Algue dressée dure	
Turf Algal	
Corail Mort	ABIOTIQUE
Dalle/Roche	
Débris	
Sable	
Vase	
Eponge	AUTRE
Zoanthaire	
Autre	

En ce qui concerne les colonies d'Acropores branchus, il a semblé pertinent, dans le cadre du présent projet, de distinguer entre 3 catégories d'état :

- Acropore branchu vivant, mais avec les bases des branches mortes et recouvertes de « gazon algal à Stegastes », de turf ou d'algues calcaires (photo 1A) ;
- Acropore branchu récemment mort (photo 1A), encore sur pied, recouvert de turf, d'algue calcaire, de « gazon à Stegastes », de Dictyota sp. ou de Turbinaria sp. ;
- Acropore branchu vivant et en bonne santé (photo 1B).



Photo 1 : A- Colonies d'Acropores branchus présentant quelques branches vivantes avec leurs bases nécrosées et recouvertes de gazon algal et de nombreuses branches mortes recouvertes de gazon algal ; B- Colonies d'Acropores branchus présentant un bon état de santé avec l'ensemble des branches dépourvues de nécroses.

Suivi des invertébrés benthiques : pour ce suivi, les taxons pris en compte sont les échinodermes (herbivores) et les filtreurs (favorisés par des conditions eutrophes) comme les éponges, les bivalves, ainsi que certains macroperforants. L'échantillonnage est centré sur quelques groupes ou espèces clés :

- Holothuries (échinodermes) : herbivores ;
- Oursins (échinodermes) : herbivores, espèces bio indicatrices (recouvrement algal, déséquilibre du milieu) ;
- *Acanthaster planci* : étoile de mer dévoreuse de corail ;
- Macrogastéropodes : espèces bioindicatrices
 - Porcelaine – *Cypraea* sp. : herbivores
 - Bénitier -*Tridacna* sp. : filtreurs
 - Eponges (*Cliona* sp., *Dysidea* sp.) : filtreurs ; espèces bio indicatrices
- Macroperforants (serpulidae) : filtreurs.

Les comptages reposent sur la méthode des « belts transects » (Figure 5) préconisée classiquement pour le suivi de la faune benthique vagile (mobile), notamment des oursins (Hill et Wilkinson, 2004). Les « belts transects » sont positionnés en cohérence avec les transects utilisés pour le suivi GCRMN des communautés coralliennes. Ainsi, l'échantillonnage se fait au même emplacement pour l'ensemble des peuplements. Pour chaque station, une « bande » de 2 mètres de large, sur 60 mètres de long, est donc échantillonnée (120 m²).

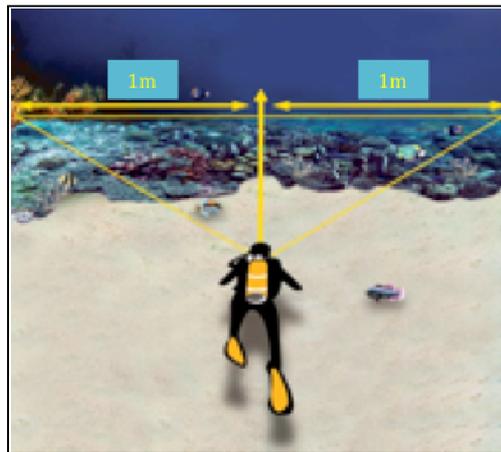


Figure 5 : Méthode des Belt Transect (2m de large)

Suivi des communautés algales : les différents groupes d'algues étudiés sont les algues vertes, les algues brunes, les algues rouges et les cyanobactéries.

Différents paramètres sont pris en compte :

- Composition taxonomique de la communauté algale : les différentes espèces de macroalgues présentes sur chaque transect (méthode du « Belt transect » décrite précédemment) sont photographiées et échantillonnées (pour une identification ultérieure au laboratoire en cas de besoin).
- Estimation du pourcentage (%) de recouvrement des algues : sur chaque station, 7 à 10 quadrats de 0,25m² sont échantillonnés. Pour chacun des quadrats, une estimation du % de recouvrement est réalisée à partir de photographies qui, de retour au laboratoire, sont « détournées » à l'aide du logiciel CPCE© afin d'évaluer la proportion de turf (assemblages algaux d'une hauteur inférieure à 1 cm), d'algues dressées, d'algues calcaires et de cyanobactéries. Parmi les algues dressées, les différentes proportions des 4 phyla sont également évaluées (% algues brunes, % algues vertes, % algues rouges et % cyanobactéries).
- Biomasse des espèces proliférantes (quadrats) : la biomasse des espèces proliférantes (ou opportunistes) est estimée par collecte exhaustive dans 5 quadrats de 0,25 m² (éventuellement de 0,0625 m² en fonction des surfaces de prolifération) pour chaque espèce.
- Présence / absence d'espèces que nous avons retenues comme déterminantes et opportunistes pour chaque « Belt transect » (Tableau 8).

Tableau 8 : Espèces de macroalgues identifiées comme déterminantes pour le projet et l'élaboration d'indicateurs d'eutrophisation en zone lagonaire.

ALGUES VERTES	ALGUES BRUNES	ALGUES ROUGES
<i>Boergesenia forbesii</i> <i>Boodlea composita</i> <i>Bryopsis pennata</i> <i>Caulerpa spp</i> <i>Dictyosphaeria cavernosa</i> <i>Dictyosphaeria verluysii</i> <i>Ernodesmis verticillata</i> <i>Halimeda spp</i> <i>Neomeris spp.</i> <i>Valonia spp</i>	<i>Dictyota spp</i> <i>Lobophora variegata</i> <i>Padina spp</i> <i>Turbinaria ornata</i>	<i>Actinotrichia fragilis</i> <i>Amphiroa fragillissima</i> <i>Asparagopsis taxiformis</i> <i>Dichotomaria spp</i> <i>Digenea simplex</i> <i>Galaxaura spp</i> <i>Gelidiella acerosa</i> <i>Gracilaria spp</i> <i>Jania spp.</i> <i>Liagora spp</i> <i>Peyssonnelia spp</i>

1.6.2. Positionnement des stations de suivi

La position géographique des différents transects suivis durant cette campagne 2010, et retenus pour l'ensemble du projet, est donnée par le tableau 9.

Tableau 9 : Coordonnées GPS des stations de suivi du projet

SITE	STATIONS	TRANSECTS	LATITUDE S	LONGITUDE E
Saint Gilles	TO	40	21.08100	55.22258
		80	21.08120	55.22230
		120	21.08142	55.22197
		REF	21.08175	55.22155
	TE	40	21.09734	55.23753
		80	21.09763	55.23724
120		21.09800	55.23703	
Saint Leu	SL	40	21.18256	55.28691
		80	21.18265	55.28650
		120	21.18265	55.28616
		REF	21.18101	55.28561
Etang Salé	ES	ES2	21.27063	55.33219
		ES3	21.27039	55.33317
		ES5	21.26952	55.33295
		REF	21.27129	55.33160
Saint Pierre	SP	30	21.34484	55.47223
		60	21.34509	55.47216
		80	21.34526	55.47204
		REF	21.34570	55.47289

1.6.3. Planning prévisionnel 2011

Le chronogramme prévisionnel 2011 est donné par le tableau 10

Tableau 10 : Chronogramme prévisionnel 2011

Mois		JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET
Date du suivi		17/01/11	semaine 7	semaine 11	semaine 15	semaine 20	semaine 25	semaine 28
Sites suivi	SAINT GILLES							
	SAINT LEU							
	ETANG SALE							
	SAINT PIERRE							

En janvier, mars, mai et juillet, une seule journée de terrain sera nécessaire pour réaliser les 4 transects de Saint Gilles (TOB REF, TE40, TE80 et TE120).

Aux mois de février, avril et juin, 4 journées de terrain seront nécessaires pour réaliser l'ensemble des transects sur les 4 sites suivis.

Le traitement des données produites, puis leur synthèse, seront réalisés fin 2011/début 2012.

2. Volet 2 : utilisation d'images hyperspectrales et de données Lidar pour la cartographie des habitats benthiques.

2.1. Le contexte

L'Etat, par l'intermédiaire des Services de la DDE/DIREN de La Réunion et du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, a décidé le lancement du projet Litto3D[®] sur les îles françaises de l'océan Indien (Réunion, Mayotte et Iles Éparses). Ce projet consiste en la réalisation d'un modèle numérique de terrain continu entre la terre et la mer, donnant une représentation tridimensionnelle de la forme et de la position du sol sur la frange littorale. La constitution de ce référentiel a été confiée à l'IGN (Institut Géographique National) pour la partie terrestre et au SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) pour la partie marine. Elle repose sur l'acquisition de données au moyen d'un capteur laser aéroporté (Lidar bathymétrique pour la partie mer et altimètre laser pour la partie terrestre).

A cette occasion, l'État, les Terres Antarctiques et Australes Françaises (Taaf), l'Agence des Aires Marines Protégées (Aamp) et l'Ifremer se sont associés dans un projet de cartographie par télédétection hyperspectrale (projet Spectrhabet OI). Des images ont été acquises simultanément aux levés bathymétriques Litto3D grâce à l'incorporation, lors des mêmes vols, d'un capteur hyperspectral en plus du Lidar bathymétrique. La mutualisation des moyens mis en œuvre a permis une réduction des coûts liés aux différentes missions, dans des secteurs géographiques isolés et difficiles d'accès.

Spectrhabet OI a pour objectif le développement d'une nouvelle méthode de cartographie par télédétection pour des habitats benthiques subtidiaux du pourtour des îles françaises de l'océan Indien, et l'évaluation de la pertinence de cette méthode pour une application à d'autres secteurs côtiers (facilité de mise en œuvre, précision des cartographies, coûts...). L'information bathymétrique apportée par le Lidar devrait permettre pour la première fois de corriger, de manière automatique pour tout pixel immergé de l'image, l'atténuation du signal lumineux dans la masse d'eau et de s'affranchir ainsi d'un problème récurrent de la télédétection en milieu sous-marin.

Le présent projet « bio indication à La Réunion » a pour objectif, en s'appuyant sur les données et méthodes de traitement de Spectrhabet OI, de réaliser des cartographies, à l'échelle de l'ensemble de la zone lagunaire à La Réunion, des secteurs coralliens, des zones d'herbier, des zones à forte couverture algale... ainsi que des cartes de synthèse (par exemple d'hétérogénéité spatiale) utiles à l'évaluation de la qualité de ces secteurs dans le cadre de la DCE, et représentant des données de base qui, dans le cadre des suivis à long terme (contrôle de surveillance) permettront de statuer sur l'évolution des secteurs coralliens.

2.2. Les principes de la méthode

Une image hyperspectrale est composée d'un empilement de plusieurs centaines de bandes spectrales (Figure 6). Ces bandes adjacentes de quelques nanomètres de largeur, permettent de réaliser un échantillonnage continu du spectre lumineux, sur une gamme de longueurs d'ondes s'étendant généralement de l'ultraviolet au proche infrarouge (400 à 1000 nm, jusqu'à plus de 2500 nm pour certains capteurs). Acquisées depuis un vecteur aéroporté volant à basse altitude, elles sont de résolutions spatiales décimétriques à métriques, ce qui permet une bonne reconnaissance des objets au sol. La haute résolution spectrale de ces images aéroportées permet, après application des corrections atmosphériques, de reconstituer finement le spectre de réflectance des objets, avec une résolution proche de celle enregistrée par un spectroradiomètre au niveau du sol.

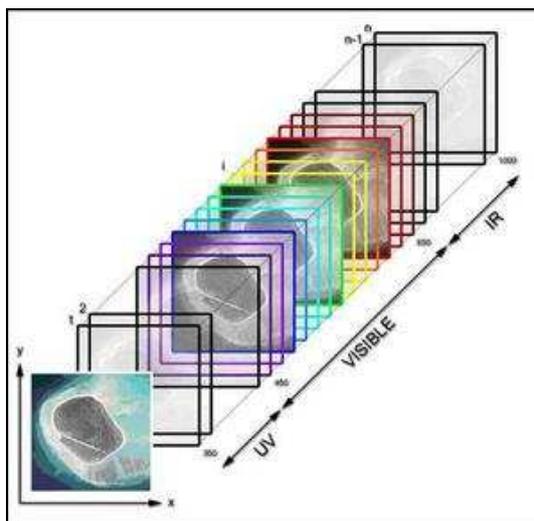


Figure 6 : Représentation schématique d'une image hyperspectrale en trois dimensions (x,y, longueur d'onde).

Une « image » hyperspectrale peut donc *a priori*, mieux qu'une simple photographie aérienne qui ne permet pas de différencier les différentes longueurs d'ondes (elle ne restitue, tout comme le perçoit l'œil humain, qu'une composition colorée de trois larges bandes spectrales s'inscrivant dans le « visible »), permettre d'identifier la nature des objets ou structures, à la condition que leur « signature spectrale » soit connue. En effet, les objets ou structures n'absorbent pas tous de la même manière la lumière solaire incidente : l'absorption se fait à des longueurs d'ondes préférentielles, ce qui a pour conséquence que la réflectance mesurée (part réémise, ou réfléchi, de la lumière incidente) est variable avec la longueur d'onde (on parle de spectre de réflectance). Ce spectre est dépendant de la nature et de la composition de la cible analysée. Chaque objet peut donc en théorie être identifié à partir de son niveau de réflectance et du panel de longueurs d'ondes auxquelles il absorbe ou renvoie le rayonnement. Chaque type d'objet, chaque type de structure, possède ainsi une « signature hyperspectrale » qui lui est propre (Figure 7).

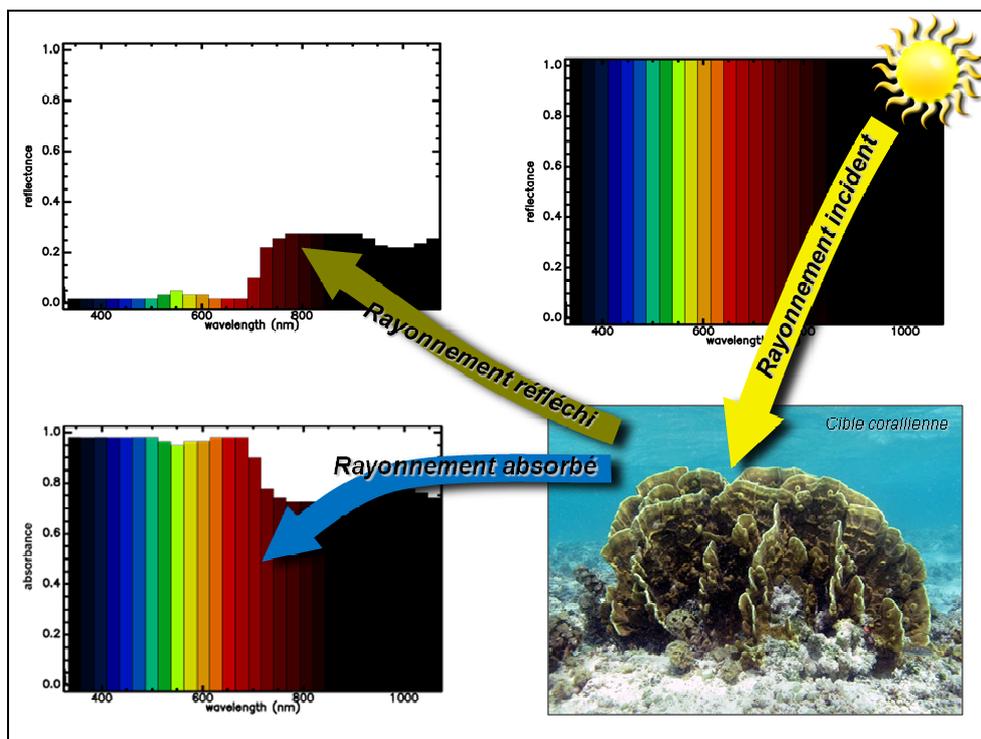


Figure 7 : La réflectance est la fraction de la lumière incidente réfléchi par la cible

Les objectifs des deux projets parallèles Spectrhabet OI et Bio indication sont donc de :

- constituer une banque de signatures hyperspectrales, contenant les signatures de toutes les structures, types de fonds, développements coralliens ou algaux... caractéristiques des zones littorales et subtidales des îles françaises de l'océan Indien,
- pouvoir ré-identifier de façon automatisée, via une chaîne de traitement informatique de reconnaissance/discrimination de spectres qui est à développer, ces structures à partir des images hyperspectrales acquises par avion,
- cartographier, de manière automatisée et globale, les structures ou objets «reconnus», et de constituer des cartes dites «d'habitats benthiques».

Un autre objectif des deux projets est de vérifier l'efficacité de la méthode et des chaînes de traitement développées. Les cartographies ainsi réalisées devront donc être validées, par confrontation des structures «prédites» (i.e. définies par le calcul) avec les structures réelles (que l'on identifiera en plongée, dans le cadre d'opérations qualifiées de «Vérité Terrain»). Le niveau de concordance entre prévisions et Vérité Terrain permettra d'évaluer l'efficacité de la méthode, et d'envisager les modifications à y apporter afin de minimiser les coûts et durées d'acquisition et de traitement des données, tout en permettant d'obtenir la précision et la sensibilité (capacité de discrimination entre les différentes structures) souhaitées.

2.3. Etat d'avancement du projet à la fin 2010

2.3.1. Acquisition des données en 2010

La livraison des données Lidar et hyperspectrales a connu d'importants retards par rapport au prévisionnel initial du projet Litto3D : après examen des données acquises en 2009, notamment sur La Réunion, des survols complémentaires ont été exigés par le SHOM à son sous traitant, les données Lidar livrées ne répondant pas au cahier des charges initial (faible densité de points bathymétriques, forte turbidité, zones de déferlement). Ceci a eu pour conséquence qu'à la fin 2010, soit avec plus d'un an de retard, nous ne disposons pas encore du jeu de données complet (livraison au plus tard à la fin du premier trimestre 2011).

Dans le but d'intégrer au maximum la diversité des récifs coralliens des différentes îles du sud ouest de l'océan Indien, le catalogue de signatures spectrales in situ, débuté en 2009 sur les îles Glorieuses, le banc de Geyser, Mayotte et la Réunion, a été complété courant mai et juin 2010 au cours d'une mission de terrain sur les îles Juan de Nova et Europa. Le but de ces acquisitions complémentaires de signatures pures était de produire une librairie spectrale aussi complète et exhaustive que possible permettant une meilleure compréhension des phénomènes radiométriques, et d'aider au traitement des données hyperspectrales. L'identification et la précision de critères radiométriques discriminatifs des différents types de nature de fond (coraux, algues, herbiers, substrats minéraux nus, etc.) devrait en effet permettre d'élaborer des chaînes de traitements plus robustes, et la prise en compte d'une grande diversité (au niveau des espèces, des habitats, de la localisation géographique, etc.) devrait permettre de s'assurer l'applicabilité des algorithmes de traitements développés à des secteurs géographiques étendus et variés.

2.3.2. Organisation de la phase de développement des chaînes de traitement

Un atelier de travail d'une semaine a été organisé en octobre 2010 sur La Réunion afin d'initialiser la phase de développement méthodologique et de traitement de données hyperspectrales et Lidar. Cet atelier a réuni les partenaires d'Ifremer/Dynéco Brest, de l'Aamp, de l'Arvam, de Pareto Ecoconsult, et de l'Ifremer Réunion. Il a permis de fixer une organisation entre les partenaires, et a également eu pour objectifs de permettre à l'équipe Ifremer de Dynéco Brest de mieux s'approprier le contexte local et de répondre à ses principales questions concernant :

- les acteurs du projet lors de la phase de développement méthodologique,
- le niveau de détail des habitats de récif à cibler et le référentiel typologique à utiliser,
- les zones tests sur lesquelles le développement méthodologique sera effectué,

- les attentes plus spécifiques dans le cadre du présent projet bio indication, et les apports de cette technique à la DCE,
- la disponibilité des données (Imagerie, Lidar et données de terrain).

Les décisions suivantes ont été prises :

a. Le référentiel typologique retenu pour la cartographie est celui développé par l'ARVAM. Les objets récifaux concernent trois éléments :

- La géomorphologie,
- Le substrat,
- La biocénoses/peuplements en place.

L'entrée principale est la géomorphologie en visant le niveau 3 référencé dans le catalogue d'habitats proposé par l'Arvam (13 entités y sont listées). Sur chaque zone géomorphologique, il faut examiner par la suite les possibilités de distinction du benthos. Une approche hiérarchique qui intègre la problématique de changement d'échelle doit cependant être mise en place.

b. S'agissant des besoins de la DCE et des attentes particulières dans le cadre du **projet bio indication**, les entités retenues sont le substrat dur, le corail mort, le corail vivant, la couverture algale, les herbiers, la pente externe et un paramètre permettant de traduire l'hétérogénéité du milieu (indispensable pour pouvoir positionner certaines stations de suivi DCE).

c. Sur les 6 sites pilotes (i.e. de développement de algorithmes) préconisés initialement, l'équipe de projet a retenu en priorité 1 la zone « **Passé de l'Ermitage** », en priorité 2 la zone « Roche Marocain » et en priorité 3 la zone de « Sud de la coulée 2007 ».

d. L'équipe du projet a convenu de tester l'utilisation de plusieurs outils et méthodes résumés dans le Tableau 11 suivant :

Tableau 11 : liste des développements/traitements à développer et à tester

Développement méthodologique	
Prétraitements	selection de données & génération MNT
	reprojection (Lidar)
	extraction zones de test (imagerie)
	selection et élimination bandes inutiles
	mosaïque
	Passage en reflectance fond
	correction de sunglint
	Mise en forme des données vectorielles (TC, Points suivi, VT)
Traitements	Typologie (cdrage niv hierarchic (geomorpho, substrat, bio)
	Lidar Geomorphologique
	Outils classiques (CS+CNS+ACP+...)
	Spectres de référence
	Bandes Utiles+pics
	Segmentation
	Unmixing
	Utilisation de bases de connaissance
	notes techniques
	Mise en commun des resultats
Validation	validation (phase développement terrain)
	Traitements statistiques
	Matrices de contingence
Rapport	Proposition de chaine de traitement
	syntheseredaction finale

Il a également été retenu de tester :

- La « Cotation de dalles » (% Corail vivant, Corail mort, Autres)
- L'agrégation des données hyperspectrales et bathymétriques ainsi que ses produits dérivés, sachant la valeur ajoutée du Lidar par rapport à ce qui a été fait dans le domaine jusqu'ici.
- Les données à basse altitude sont également à examiner sur les trois zones test.

2.3.3. Elaboration et premières analyses de la librairie spectrale

2010 a également permis une première analyse de la librairie spectrale. De cette analyse il ressort la mise en évidence d'un certain nombre de caractéristiques spécifiques des différents types de nature de fond constitutifs des récifs coralliens. Ces résultats ont fait l'objet d'un rapport RST Ifremer publié en août 2010 (Mouquet Pascal, Quod Jean-Pascal (2010). Spectrhabent-OI - Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00005/11647/>).

Il ressort notamment une forte similarité spectrale de l'ensemble des coraux analysés (qu'ils soient de la forme bleue ou brune ; Figure 8), compliquant les discriminations possibles entre les différents types coralliens.

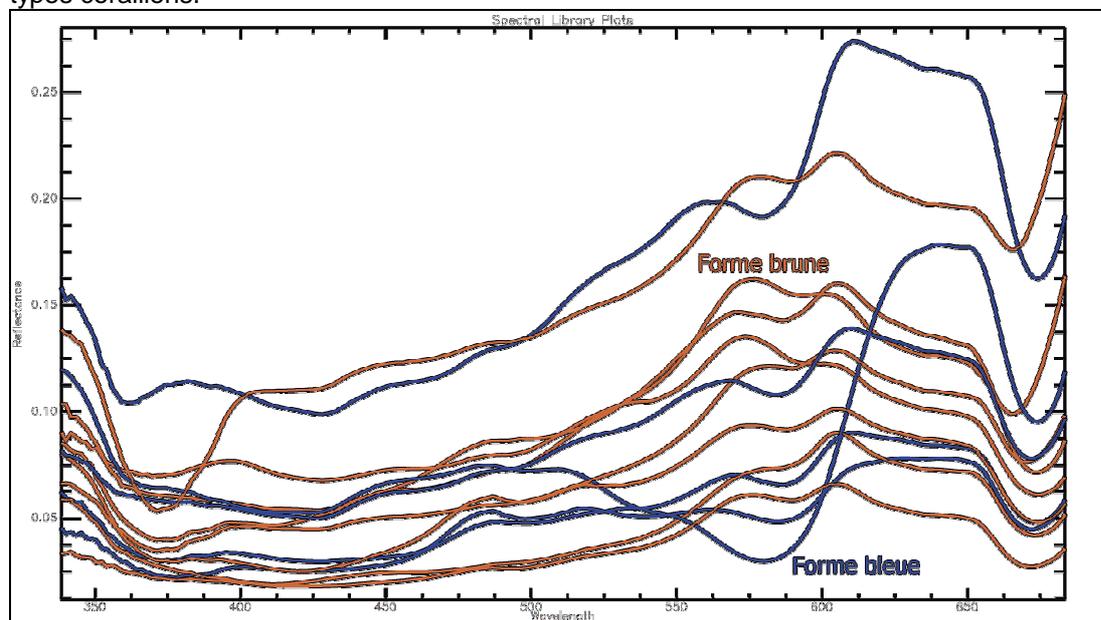


Figure 8. Les coraux appartiennent à l'une ou l'autre des deux formes spectrales brune ou bleue. La forme brune, la plus fréquente, est caractérisée par une réflectance faible entre 400 et 550 nm, suivie de trois pics (ou « épaulements », c'est-à-dire des maximums peu marqués) vers 575, 600 et 650 nm (générés par la présence des pigments photosynthétiques contenus dans les zooxanthelles symbiotiques). Chez la forme bleue, le premier pic à 575 nm est généralement absent, laissant un plateau de réflectance entre 600 et 650 nm. La disparition de ce pic serait due à l'action d'une protéine contenue dans le corail hôte, dont le pic d'absorption se situe autour de 560 nm.

Au contraire, les coraux présentent des particularités spectrales par rapport aux autres groupes, les algues notamment (Figure 9). La réalisation de cartographies Corail vs Algues devrait donc être envisageable.

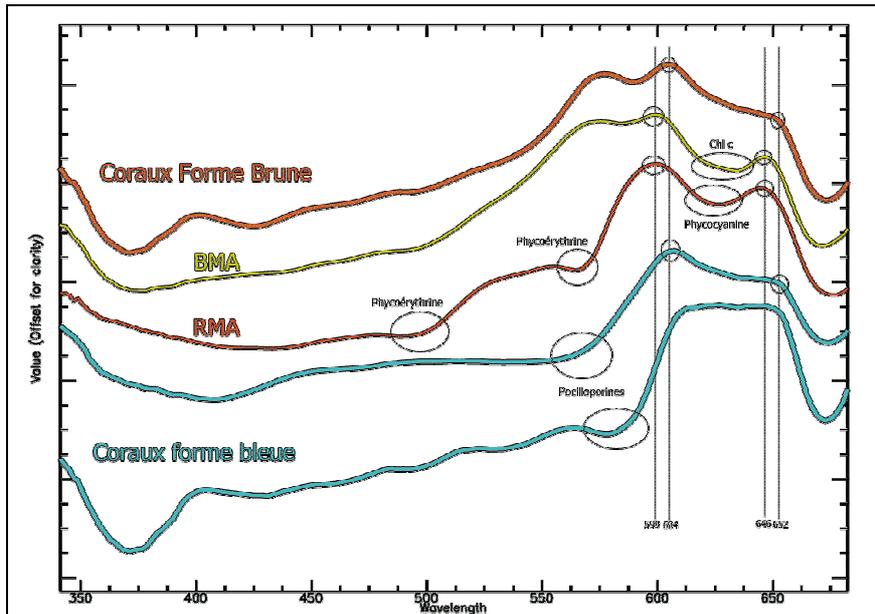


Figure 9 : Spectre de formes coralliennes et d'algues. La comparaison des spectres des formes coralliennes avec des spectres algues (BMA, RMA) met en évidence des différences significatives entre les coraux et les algues. Grâce à leurs compositions pigmentaires spécifiques, ces deux types de « cibles » peuvent toujours être discriminés par les caractéristiques des figures d'absorption et notamment par les positions et largeurs des pics de réflectance.

2.3.4. Premiers traitements des données Lidar

Des MNT (Modèles Numériques de Terrain) Lidar à 5 mètres de résolution ont pu être générés par le SHOM à partir du jeu de données Litto3D de 2009, notamment sur l'île de la Réunion.

L'objectif est d'utiliser cette donnée comme support pour l'approche géomorphologique de cartographie des récifs coralliens.

Il est possible d'améliorer la résolution du MNT pour une analyse plus fine qui tient compte de la grande hétérogénéité spatiale du milieu récifal. Un test a été effectué sur la zone de l'Ermitage (Fig. 10). Des sondes Lidar ont été intégrées dans le logiciel ISATIS et une interpolation a été réalisée par Krigeage pour générer un MNT à plus grande résolution. L'objectif étant d'attendre la résolution d'1m si la densité finale des points le permet.

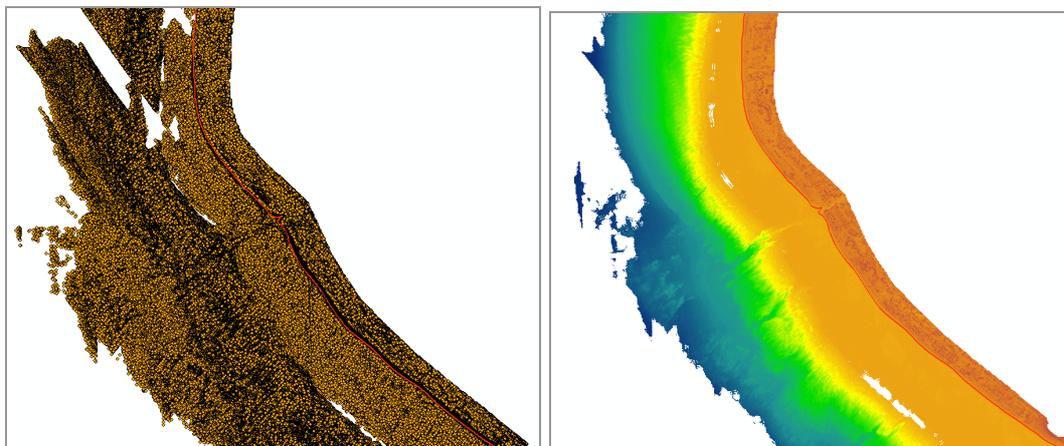


Figure 10. Génération de MNT à partir de sonde Lidar

Ces tests ont également permis de résoudre les questions techniques de prétraitements et de mise en cohérence des données imagerie/Lidar et notamment celui du système de projection en X,Y et Z.

La génération du MNT final est cependant en attente de la livraison complémentaire par le SHOM de sondes «Lidar bathymétrique » acquises en 2010.

2.3.5. Premiers traitements d'imagerie hyperspectrale

Il était prévu que les opérations de prétraitements des images hyper spectrales soient réalisées par Actimar dans le cadre d'un contrat Actimar/Aamp. Parmi ces prétraitements, les corrections de la réflexion spéculaire et l'effet de la colonne d'eau sont tout à fait primordiaux. En attendant ces livraisons, l'équipe de projet a entrepris des tests de ces corrections sur les zones pilotes. L'ensemble des algorithmes a été implanté à l'aide du langage IDL.

a) Correction des réflexions spéculaires

Les images en réflectance issues de la phase 1 du projet présentent en certains endroits des réflexions spéculaires importantes (l'inclinaison de la surface de l'eau induit des reflets du soleil dans la direction du capteur). Comme on peut le voir sur l'exemple de la figure 11, image de gauche, ces réflexions empêchent la distinction entre les différents objets du benthos.

Nous avons utilisé l'algorithme présenté par Hedley et al. [2005] pour corriger ce phénomène. La figure 11, image de droite, illustre les résultats obtenus par cette méthode. On constate que la majorité des réflexions spéculaires n'apparaît plus. Les éléments du benthos se distinguent alors plus facilement les uns des autres.

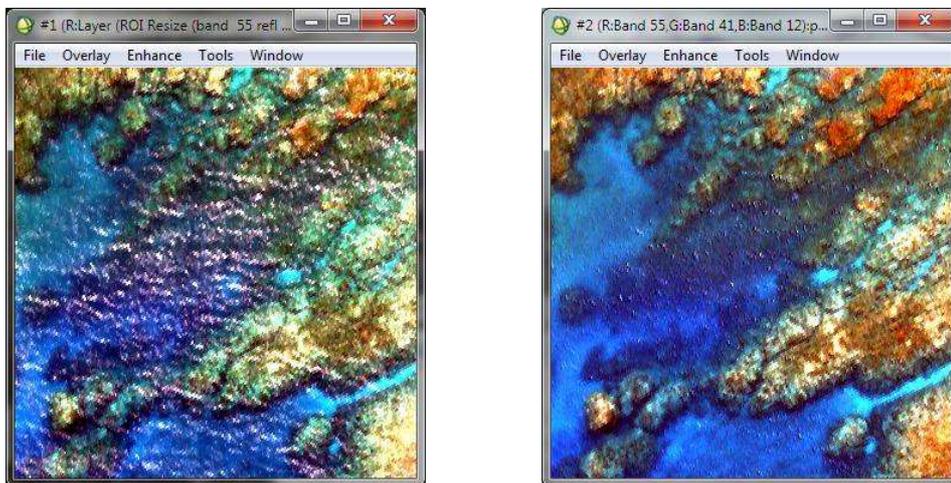


Figure 11 : Zone pilote de la passe de l'Hermitage en fausses couleurs. La profondeur est partout supérieure à 2,30 m. A gauche, l'image en réflectance brute. A droite, l'image en réflectance corrigée par la méthode de Hedley et al [2005].

La principale limite à l'application de cette méthode est la profondeur. Cet algorithme se base sur l'hypothèse que le benthos n'apporte aucune contribution dans la bande du proche infrarouge. Or, même si le rayonnement proche infrarouge est très vite absorbé par la colonne d'eau, cette hypothèse reste fautive pour des eaux aussi peu profondes que le lagon (environ 1 m de profondeur). On restreindra donc l'utilisation de cet algorithme à des zones plus profondes, telles que la pente externe.

b) Correction de la colonne d'eau

L'eau de mer absorbe une partie du rayonnement qui la traverse en fonction de l'épaisseur de la colonne d'eau et de la longueur d'onde considérée. Les grandes longueurs d'ondes sont les plus absorbées, c'est pourquoi au-delà de quelques mètres le rouge n'apparaît plus alors que le bleu et le vert restent toujours visibles.

La méthode proposée dans le rapport de synthèse Spectrhabent OI (partie 1/2) permet de corriger le signal radiométrique de l'absorption de la colonne d'eau. La figure 12 montre le secteur de la Passe de l'Ermitage avant et après la correction de la colonne d'eau.

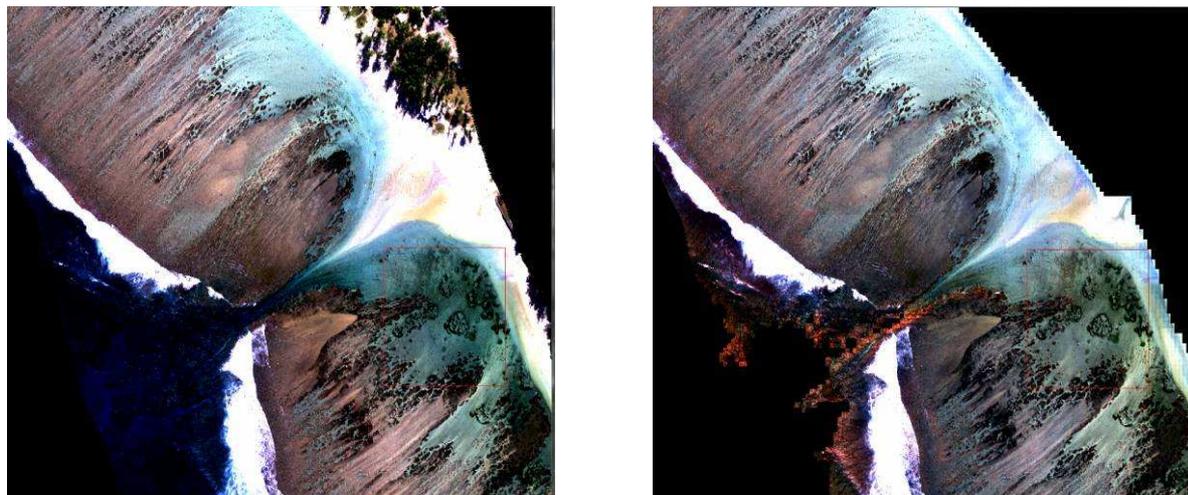


Figure 12 : Lagon de la Passe de l'Ermitage (fausses couleurs). A gauche, image en réflectance sans aucune correction. A droite, image en réflectance après correction de l'absorption de la colonne d'eau.

On constate dans la partie lagonaire que la correction augmente le contraste de l'image. Les motifs du sable sont mieux dessinés et les herbiers au centre du carré rouge sont plus contrastés.

Là encore, l'application de cette méthode est limitée par la profondeur. En effet, au-delà de quelques mètres, lorsque le signal est presque entièrement absorbé, le rapport signal/bruit devient très faible et rehausser le signal entraîne une croissance exponentielle de l'erreur due au bruit de mesure. Il devient alors impossible de retrouver la réflectance du fond. C'est ce qui explique la présence de la couleur rouge au niveau de la pente externe. Au-delà de cette profondeur, les données ont été masquées car l'on sait que l'application de cette méthode engendrerait trop d'erreurs.

Cette correction se heurte aussi à la différence de résolution entre le MNT (pixel de 5 m de côté) et l'image (pixel de 40 cm de côté). Tous les pixels de l'image contenus dans une même maille de MNT subiront la même correction. Or, au sein d'une même maille, la bathymétrie peut varier de plus de 3 m au niveau de la pente externe. Ainsi, un autre algorithme permettant de déterminer la bathymétrie avec une résolution égale à celle de l'image est en cours de développement en cette fin 2010. Elle se base sur une méthode développée par Mishra et al., 2007.

2.4. Conclusion

Les projets Spectrhabent OI et Bioindication ont rencontré en 2010 des retards par rapport au prévisionnel initial. Ces retards trouvent leur origine dans:

- les livraisons tardives, et encore partielles, des données Lidar et hyperspectrales, du fait de la qualité jugée inacceptable par le SHOM des acquisitions aériennes sur la Réunion en 2009, et de l'obligation faite à son sous traitant de réaliser de nouveaux vols en 2010. La livraison finale des jeux de données complets est aujourd'hui prévue pour la fin du premier trimestre 2011. En cas de non respect de ce nouveau délai, les deux projets risquent de ne pouvoir être menés à leur terme¹,
- des délais plus longs que prévu initialement pour établir ou renouveler les conventions de collaboration entre différents organismes partenaires. Ainsi, Actimar, partenaire essentiel du projet sur la partie physique (traitement des données Lidar), n'a toujours pas commencé, faute

¹ A titre d'exemple, un CDD de 10 mois Ifremer/Dynéco a été embauché à Brest en novembre 2010 sur les deux projets. Il était prévu qu'il travaille en étroite collaboration avec l'équipe de développement Ifremer/AAMP/Arvam basée à La Réunion, et notamment qu'il réalise l'ensemble des cartographies finales, une fois les méthodes de traitement définies et validées. Le retard dans la livraison par le SHOM d'un jeu de données parfaitement exploitables fait que la généralisation des traitements à l'ensemble de la zone lagonaire de La Réunion ne pourra plus intervenir avant la fin de son CDD, et qu'il faudra trouver une solution à ce problème.

de contractualisation avec l'Aamp, le développement d'algorithmes concernant les corrections à apporter aux données hyperspectrales relativement aux effets de la masse d'eau (effets de surface, et absorption du signal dans la colonne d'eau).

Néanmoins, des avancées ont été obtenues :

- la base de signatures spectrales pures (« librairie spectrale ») est achevée, et les campagnes de terrain réalisées partout dans les îles françaises de l'océan Indien ont permis d'obtenir les signatures de plus de 700 « cibles » différentes.
- les premières analyses du signal montrent que les réflectances, par exemple entre les structures coralliennes et les algues, apparaissent comme suffisamment différentes pour que leur discrimination soit envisageable.
- Une méthode pour la réalisation d'un MNT à partir des données Lidar a été testée sur le site pilote de l'Ermitage, et ses résultats sont tout à fait satisfaisants,
- Des tests de méthodes de correction de la réflexion spéculaire et de correction de la colonne d'eau ont été menés, et donnent des résultats satisfaisants, mais pour certaines hauteurs d'eau seulement, et d'autres méthodes, adaptées aux différentes profondeurs rencontrées, devront être testées.

3. Références bibliographiques

Aminot A, Kerouel R, 2007. Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines. Editions de l'Ifremer. 188 p. ISBN 978-2-7592-0023-8.

ARVAM, 2010. Caractérisation de l'état de référence biologique des masses d'eau côtières au regard de la directive cadre sur l'eau – Etude Pilote. Rapport d'avancement Juin 2009. 17pp.

Bruno JF, Sweatman H, Precht WF, Selig ER, Schutte VGW, 2009. Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology* 90:1478-1484.

Chabanet P, 1994 : Etude des relations entre les peuplements benthiques et les peuplements ichtyologiques sur le complexe récifal de Saint-Gilles / La Saline. Île de la Réunion. Thèse de Doctorat, Université de la Réunion. 235 pp + Annexes.

Conand C., Chabanet P, Quod JP, Bigot L, 1997. Manuel méthodologique pour le suivi de l'état de santé des récifs coralliens du sud-ouest de l'Océan Indien. Commission de l'Océan Indien.

Cuet P, Naïm O, Faure G, Conan JY, 1988. Nutrient-rich groundwater impact on benthic communities of a Saline fringing reef (Reunion Island, Indian Ocean) : preliminary results. Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., Townsville, August 8-12: 207-212.

Cuet P, 1989 : Influence des résurgences d'eau douce sur les caractéristiques physico-chimiques et métaboliques de l'écosystème récifal à La Réunion. Doctorat en Chimie de l'Environnement, Université d'Aix- Marseille III, Marseille. 295 pp.

Cuet P, Naim O, 1992. Analysis of a blatant reef flat degradation in la Reunion Island (l'Etang-Salé fringing reef). Proc. 7th Int. Coral Reef Symp., Guam, June 22-26: 313-322.

Hedley et al., 2005. "Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos"

Hill J., Wilkinson C., 2004. Methods for ecological monitoring of coral reefs : a resource for managers. Version 1. Australian Institute of Marine Science (AIMS). Townsville, Australia. 117p.

Guillaume M, Payri C, Faure G, 1983. Blatant degradation of coral reefs at la Reunion Island (West Indian Ocean). Int. Soc. Reef Stud. Ann. Meet. Nice, 8-9/12/1983 : 28.

Naim O, 1993a. Critical period for an eutrophication-trending fringing reef (Reunion Island, Western Indian Ocean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 99: 137-151.

Mishra et al., 2007, "Enhancing the detection and classification of coral reef and associated benthic habitats: A hyperspectral remote sensing approach"

Naim O, 1993b. Seasonal responses of a fringing reef community to eutrophication (Reunion island, Western Indian ocean). *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 99: 307-315.

Naïm O, Cuet P, Mangar V, 2000. The Mascarene Islands. In: Coral reefs of the Indian Ocean: their ecology and conservation. T. McClanahan, Sheppard & Obura (eds), Oxford University Press, pp 353-381.

Semple R, 1997. Algal growth on two sections of a fringing coral reef subject to different levels of eutrophication in Reunion Island. *Oceanologica Acta* 20: 851-861.

SPECTRHABENT-OI, avril 2010, Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine, B-2-2.3, p54