

Ifremer



Ifremer – Délégation de La Réunion

Agence des aires marines protégées

Rapport Ifremer n°: RST-Délégation Réunion/2010-02-1

Pascal MOUQUET – AAMP
Jean-Pascal QUOD – ARVAM

Spectrhabent-OI

Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine



1/2. Rapport de synthèse

AVRIL 2010

Partenaire scientifique et technique :



Partenaires financiers :



Spectrhabent-OI

**Cartographie des habitats benthiques littoraux et
subtidaux des îles françaises de l'océan Indien à
partir de données hyperspectrales**

Phases 1 & 2

Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine

1/2. Rapport de synthèse

FICHE DOCUMENTAIRE

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : R. LEGOFF (IFREMER) – P. WATREMEZ (AAMP) Adresses électroniques : ronan.legoff@ifremer.fr pierre.watremez@aires-marines.fr	date de publication : Avril 2010 nombre de pages : 98 bibliographie : Oui illustration(s) : Oui langue du rapport : Français
Titre et sous-titre du Rapport : Spectrhabent-OI : Cartographie des habitats benthiques littoraux et subtidaux des îles françaises de l'océan Indien à partir de données hyperspectrales Phases 1 & 2 : Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine 1/2. Rapport de synthèse	
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteurs principaux : Pascal MOUQUET Jean-Pascal QUOD	Organisme / Direction / Service, laboratoire <i>Agence des aires marines protégées</i> ARVAM
Autres collaborateurs : Hugues Evano Stéphanie Bollard	Organisme / Direction / Service, laboratoire <i>Ifremer</i> <i>Université de la Réunion</i>
Cadre de la recherche : Convention cadre entre la Préfecture de la Réunion, les TAAF, l'Agence des AMP et l'Ifremer. Référence : 09-1217795	
Résumé : Dans le cadre des projets Litto3D et Spectrhabent-OI, des campagnes de vérités-terrains ont été menées sur les récifs coralliens du sud-ouest de l'océan Indien (Glorieuses, Geysier, Mayotte et la Réunion). Les mesures sous-marines acquises sur les principaux types de nature de fond ont permis de constituer une base de données de signatures spectrales de plus de 600 cibles animales, végétales et minérales. Après analyse des facteurs physiques et biologiques ayant un impact sur les mesures, les données ont été traitées dans le but d'identifier des critères radiométriques permettant la discrimination des différents types de cibles entre elles, étape préalable au traitement des images hyperspectrales aéroportées. Ce rapport, en deux parties, est constitué d'un rapport de synthèse et d'un document annexe présentant les fiches par type (ce document).	
Abstract : An underwater spectral library has been acquired at four different study sites in the Southwest Indian Ocean (Glorioso Islands, Banc du Geysier, Mayotte and Reunion). More than 600 different targets were collected (corals, algae, seagrass and mineral substrates) with a portable spectroradiometer in an underwater housing. The physical and biological parameters affecting the measurements were analyzed. Spectral data were formatted and processed in order to identify radiometric discrimination criteria between the different target types. The results will be used to develop a hyperspectral data processing chain.	
Mots-clés : radiométrie sous-marine, coraux, récifs coralliens, spectres, réflectance, pigments photosynthétiques, librairie spectrale, télédétection hyperspectrale	
Keywords : reflectance, coral, coral reefs, spectra, hyperspectral remote sensing, photosynthetic pigments, spectral library, underwater housing, spectroradiometer	

SOMMAIRE

FICHE DOCUMENTAIRE	5
SOMMAIRE	7
TABLE DES FIGURES	8
CONTEXTE ET OBJECTIFS	13
A. ACQUISITIONS RADIOMETRIQUES	15
1. Localisation des zones d'étude	15
1.1. Glorieuses & Geyser	16
1.2. Mayotte	18
1.3. La Réunion	20
2. Protocole d'échantillonnage	21
2.1. Acquisitions radiométriques sous-marines	22
2.1.1. Collecte de la librairie spectrale des cibles benthiques	23
#1 Temps d'intégration : Automatique	23
#2 Nombre de mesures moyennées par enregistrement : 32	24
#3 Nombre d'enregistrements par cible : entre 2 et 5	24
#4 Distance à la cible	25
#5 Fréquence du blanc : à chaque changement de profondeur	27
#6 Orientation du plongeur lors de la mesure : face au soleil	27
2.1.2. Mesures de validation	30
Paramètres optiques de la colonne d'eau	30
Autres paramètres	30
2.2. Collecte de la librairie spectrale - invariants de référence	31
B. ANALYSE DES DONNEES SPECTRALES	32
1. Présentation de la Base de données	32
2. Facteurs physiques	34
2.1. Paramètres liés à l'environnement	34
2.1.1. Wave focusing	34
2.1.2. Ombre et soleil	36
2.1.2.1. Matériel et méthode	36
2.1.2.2. Résultats	37
2.2. Paramètres liés à la méthode de mesure	41
2.2.1. Moyenne des spectres, éclairement et saturation	41
2.2.1.1. Matériel et méthode	41
2.2.1.2. Résultats	43
2.2.2. Importance de la mesure Spectralon	46
2.2.2.1. Effets d'une variation de hauteur d'eau (1. Expérimentation)	46
2.2.2.2. Effets d'une variation d'épaisseur d'eau (2. Modélisation)	49
2.3. Autres expérimentations	52
2.3.1. Atténuation de la luminance avec la profondeur	52
2.3.2. Effet de la profondeur sur les réflectances mesurées	56
3. Facteurs biologiques	60
3.1. Paramètres de la base de données	60
3.2. Remarque préalable	61
3.3. Analyses intra-types	64
3.3.1. Coraux - Généralités	64
3.3.2. Fiches types	66

3.3.3. Bilan	66
3.4. Analyses inter-types	71
3.4.1. Coraux / Macroalgues	71
3.4.2. Tendance rouge	72
3.4.3. Fluorescence	74
3.4.4. Variabilité géographique	75
3.4.5. Profondeur	77
3.4.6. Evolution radiométrique d'une nécrose corallienne	78
CONCLUSIONS	81
BIBLIOGRAPHIE	84
Annexe 1. Saturation des Spectres	86
Annexe 2. Profondeur de mesure	90
Annexe 3. Réflectance des Sables	94
Annexe 4. Feuilles de VT	96
Annexe 5. Agrandissement de la Figure 11	98

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des 4 sites de radiométrie : les trois premiers, les Iles Glorieuses, le banc de Geysers-Zélée et Mayotte sont situés dans le canal du Mozambique au nord-ouest de Madagascar, et l'île de la Réunion à l'est. Les mesures ont été réalisées entre mai et septembre 2009.	15
Figure 2. A gauche, localisation des mesures réalisées autour des Iles Glorieuses. Les cercles représentent les points où ont été réalisées les mesures radiométriques, les lignes continues représentent les traces GPS de cheminement et de prospection. Une couleur par journée d'acquisition. Les deux mouillages du voilier Antsiva sont représentés à proximité de Grande Glorieuse et l'île du Lys. A droite, carte de localisation des mesures terrain sur le Banc du Geysers. Journée du 3 juin en violet sur la partie sud-ouest. Journée du 4 juin sur l'arc nord-est en orangé. La position du voilier Antsiva au mouillage est représentée par les icônes bleues. (Image de fond : Courtesy of the Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center - ISS011-E-8554 - http://eol.jsc.nasa.gov/).	16
Figure 3. A gauche, carte de localisation des mesures terrain sur Mayotte. Journée du 28 juillet (en bleu) consacrée à la recherche d'un site abrité par la terre en raison des mauvaises conditions météo. Journées des 29 et 30 juillet (en vert et mauve) dans le lagon au nord et au sud de Petite-Terre. A droite, cartes de localisation détaillées des mesures dans le lagon pour les journées du 29 (en haut) et du 30 juillet (en bas). Les cercles représentent les points où ont été réalisées les mesures radiométriques, les lignes continues représentent les traces GPS de cheminement et de prospection.	18
Figure 4. Carte de localisation des mesures terrain sur la Réunion. Une couleur par journée de mission, les dates sont figurées à proximité.	20
Figure 5. Détail du matériel utilisé pour la radiométrie sous-marine. Le caisson étanche (en haut) dans lequel est placé le spectroradiomètre (au milieu) permet au plongeur de réaliser des mesures jusqu'à une profondeur de 30 mètres sans lien avec la surface. En bas, la surface blanche de référence (Spectralon) est utilisée pour calibrer les données en fonction de la luminosité ambiante.	21
Figure 6. Exemples de mesures réalisées à l'aide du spectroradiomètre. De gauche à droite, en haut : calibration de l'appareil à l'aide du Spectralon (surface de référence revoyant 99% de l'énergie lumineuse incidente) avant mesures sur le fond sableux (Profondeur : 10 m) et mesures sur un acropore branchu par 2 m de fond. En bas, mesures sur acropores digités et pocillopores par 3,5 m de fond, et dans un herbier de <i>Thalassodendron ciliatum</i> par 1,5 m de profondeur devant l'île du Lys (Glorieuses).	22
Figure 7. Plongeur réalisant les mesures sur diverses cibles en maintenant le spectroradiomètre immobile à une distance d'environ 40 cm avec le fond.	26

Figure 8. Protocole d'échantillonnage du fond sous-marin pour une localisation (= 1 point GPS). Des mesures (points noirs) sont réalisées sur chacune des principales cibles identifiées (numéros 1 à 7). La prise de plusieurs mesures successives sur une même cible (à l'intérieur des surfaces bleues) permet de réaliser une moyenne spatiale (hétérogénéité due à la structure tridimensionnelle des objets) et temporelle (variations de luminosité dans la masse d'eau dues principalement à l'état de surface de la mer). _____	28
Figure 9. Photographies verticales de différents peuplements rencontrés aux Glorieuses et à Geysier. La plaque blanche de référence (Spectralon) posée sur le fond permet de donner l'échelle (25 cm x 25 cm). _	29
Figure 10. Protocole de mesure sur pente sableuse homogène. Depuis la surface des mesures immergées sont effectuées d'abord sur le Spectralon puis sur un fond sableux homogène de profondeur croissante. _	30
Figure 11. Ensemble des métadonnées de la librairie spectrale OI stocké dans un tableau Excel (à gauche). Un hyperlien permet l'affichage des photos de terrain correspondantes (à droite). _____	32
Figure 12. Les spectres de la librairie spectrale OI sont nommés d'après les informations contenues de la base de données Excel. Dans le tableau du Spectral Library Viewer ENVI ci-dessus, chaque ligne représente un spectre. _____	33
Figure 13. Illustration du phénomène de wave focusing. A gauche fond sableux homogène avec une hauteur d'eau d'environ 1 m. Au centre, la même image après filtrage des hautes fréquences par une transformée de Fourier. A droite, différence par rapport à la luminosité moyenne, en rouge les zones supérieures, en bleu les zones inférieures. _____	35
Figure 14. Illustration du phénomène de wave focusing. A gauche fond sableux homogène avec une hauteur d'eau d'environ 8 m. Au centre, la même image après filtrage des hautes fréquences par une transformée de Fourier. A droite, différence à la luminosité moyenne, en rouge les zones supérieures, en bleu les zones inférieures. _____	36
Figure 15. Carte de localisation des cibles échantillonnées dans le lagon de l'Ermitage (fond de carte : image hyperspectrale en couleurs visibles du 3 juin 2009). _____	37
Figure 16. Comparaison entre mesures au soleil (trait continu) et mesures à l'ombre (trait en pointillés) pour quelques cibles benthiques (une couleur par cible). _____	38
Figure 17. Comparaison entre les moyennes des valeurs à l'ombre (violet) et au soleil (orange). La surface représente la différence relative entre les mesures au soleil et les mesures à l'ombre. _____	39
Figure 18. Comparaison des écarts-types relatifs moyens entre les cibles au soleil (trait continu) et les cibles ombrées (trait en pointillés). _____	40
Figure 19. Localisation des mesures radiométriques dans le lagon de l'Ermitage. _____	42
Figure 20. Porites sp. sur lequel ont été réalisées les mesures. _____	42
Figure 21. Synthèse des mesures effectuées sur une colonie corallienne (Porites sp.) avec plusieurs niveaux de moyennes. A gauche, courbes de réflectance. Les traits fins continus représentent les différentes mesures, la courbe épaisse la moyenne, et les deux courbes en pointillés la moyenne plus ou moins un écart type. A droite, les courbes de réflectance normalisée se superposent parfaitement. _____	44
Figure 22. Détail des différentes mesures réalisées. Les traits fins continus représentent les différentes mesures, la courbe épaisse la moyenne, et les deux courbes en pointillés la moyenne plus ou moins un écart type. En haut à gauche mesures réalisées à l'ombre et à droite au soleil, avec une moyenne de 32 mesures par spectre. En bas, mesures réalisées au soleil, à gauche avec une moyenne de 16 mesures et à droite 2 mesures par spectre. _____	44
Figure 23. Comparaison des réflectances à l'ombre et au soleil avec 32, 16 et 2 mesures. En jaune, violet, rouge et vert les types 1 à 4 respectivement. A gauche, les moyennes, à droite, les écarts types relatifs. _	45
Figure 24. Illustration des deux hauteurs de mesures sur le Spectralon à 50 cm et 2 m. La distance cible-Spectralon reste constante. _____	47
Figure 25. A gauche, spectres de luminance au capteur par 2 mètres de hauteur d'eau dans le lagon de Mayotte. Deux mesures successives ont été réalisées sur le Spectralon posé au le fond, avec le spectroradiomètre depuis la surface (2 m d'épaisseur d'eau, courbe continue), avec le spectroradiomètre au fond (50 cm d'épaisseur d'eau, courbe en pointillées). A droite, le rapport entre les mesures sur le Spectralon à 50 cm et à 2 m montre une atténuation plus forte entre 600 et 900 nm. _____	47
Figure 26. Comparaison des réflectances calculées avec deux mesures Spectralon différentes : à gauche Spectroradiomètre à 50 cm du Spectralon, à droite à 2 mètres. Les profils de courbes sont nettement modifiés par cette différence de hauteur d'eau. _____	48
Figure 27. Illustration de possibles variations d'épaisseur de la colonne d'eau traversée par le signal lumineux entre le Spectralon et la cible. ΔZ = différence d'épaisseur d'eau entre la mesure Spectralon R et la mesure cible T, par exemple positive si le Spectralon est plus profond (à gauche), et négative si la mesure sur la cible est réalisée de plus loin (à droite). _____	50

Figure 28. Illustration des effets théoriques d'un changement de profondeur (différence de longueur des chemins optiques dans l'eau entre les mesures Spectralon et cible) sur les spectres calculés à partir du modèle d'atténuation du signal lumineux dans l'eau sur trois cibles de terrain. En jaune un acropore digité, en vert un herbier de <i>Syringodium isoetifolium</i> , en rouge un gazon algal recouvrant un corail mort. En trait épais les spectres initiaux, en traits fins les différents spectres calculés. _____	51
Figure 29. Mesures de luminance sur une pente sableuse au nord ouest de l'île de Grande Glorieuse. A gauche la carte de localisation, à droite mesures en cours par 3 mètres de profondeur. _____	53
Figure 30. Evolution de la luminance mesurée sur un fond sableux en fonction de la profondeur. _____	54
Figure 31. Calcul du coefficient d'absorption du signal lumineux dans l'eau en fonction de la longueur d'onde. A gauche, droites pour différentes longueurs d'ondes ayant pour coefficient directeur la valeur $-2K_\lambda$. A droite, coefficient K_λ calculé par régression linéaire sur les valeurs 3, 6, 9 et 12m (courbe rouge), et paramètre KI-SQR donnant une statistique de qualité de la régression (courbe verte). _____	56
Figure 32. Calcul du coefficient d'absorption du signal lumineux dans l'eau en fonction de la longueur d'onde en piscine. A gauche, droites de pente $-2K_\lambda$. A droite, K_λ calculé entre 0 et 1,85 m (courbe rouge), et paramètre KI-SQR donnant une statistique de qualité de la régression (courbe verte). _____	56
Figure 33. Evolution de la position du minimum de réflectance dans le rouge en fonction de la profondeur, sur des fonds sableux. _____	57
Figure 34. Codes substrats utilisés pour classer les différents types biologiques et de substrats analysés (d'après document ARVAM). _____	60
Figure 35. Evolution des luminances à 16 mètres de profondeur le 29 mai 2009 aux Glorieuses. Entre 400 et 600 nm les courbes de luminance ont une forme en cloche avec un maximum atteint dans le bleu, autour de 500 nm. La luminance du Spectralon est environ deux fois supérieure à celle du sable (graphique de gauche). A partir de 600 nm, la luminance du Spectralon comme celle du sable chutent fortement (très forte absorption du signal lumineux par la colonne d'eau). A 675 nm, la luminance mesurée sur le sable remonte brusquement pour passer au dessus de celle de Spectralon, à partir de cette longueur d'onde et jusqu'à 900 nm, luminances du sable et du Spectralon sont très proches. _____	61
Figure 36. Evolution des réflectances mesurées sur les sables de Glorieuses en fonction de la longueur d'onde et la profondeur. _____	63
Figure 37. Profondeurs de mesure de chaque type corallien de la base de données triées par valeur de médiane décroissante. Les courbes représentent les hauteurs d'eau minimales, maximales, et les quartiles. La majorité des mesures a été réalisée entre 1 et 5 mètres de hauteur d'eau. _____	64
Figure 38. Exemples de spectres coralliens. Forme bleue ou brune selon la présence ou non d'un pic de réflectance à 575 nm. _____	65
Figure 39. A gauche, comparaison des moyennes normalisées des différents types de coraux. Les coraux encroûtants CE, courbe cerclée en orange, sont les seuls à se différencier : non significatif à cause du nombre peu élevé de mesures (3). A droite, réflectances moyennes des différents types coralliens. Les spectres des 4 types comportant moins de 5 mesures (CB, CE, CF, CL), non significatifs, ne sont pas affichés. _____	68
Figure 40. Comparaison des spectres de réflectance des deux formes coralliennes bleue et brune avec les spectres algaux les plus proches RMA et BMA. _____	72
Figure 41. A gauche, spectres de réflectance moyens des types de substrats minéraux sable, débris et roches, et des deux types algaux turf algal et algues rouges. A droite, spectres de réflectance après retrait du continuum entre 320 et 685 nm. _____	73
Figure 42. Réflectance normalisée de différentes colonies coralliennes présentant des pics de fluorescence. _____	75
Figure 43. A gauche, ensemble des spectres de réflectance des coraux massifs de la librairie spectrale, une couleur par localisation géographique. A droite, _____	76
Figure 44. Test Kruskal-Wallis réalisé sur le type CM pour les 4 localisations géographiques. Pour toutes les longueurs d'ondes, la probabilité (courbe en trait épais) est toujours supérieure au seuil des 5 %. _____	77
Figure 45. Le 30 juillet 2009 par 3 m de profondeur dans le lagon de Mayotte, colonie d'acropores tabulaires partiellement nécrosée (à gauche). Image de droite, agrandissement de la limite entre le corail vivant (B) et le corail mort recouvert d'un gazon algal (A). _____	79
Figure 46. Spectres de réflectance mesurés sur les deux parties de la colonie. Photo en haut à gauche sur le corail vivant, courbe du haut continue. Photo en bas à droite sur le corail nécrosé colonisé par un gazon algal, courbe du bas avec les astérisques. _____	80
Figure 47. Spectres de luminance enregistrés le 16 juin 2009 dans le lagon de la Réunion. Le spectre 52 (orange) présente un profil de saturation sinusoïdal caractéristique. _____	86

Figure 48. La division des 3 dernières mesures par la première permet de mettre en évidence des différences relatives.	87
Figure 49. Spectres de luminance du Spectralon dans le lagon de la Réunion.	87
Figure 50. Différences relatives entre les différentes mesures. Pour comparaison, le spectre saturé de l'expérience précédente a été représenté (courbe orange).	88
Figure 51. Saturation sur différentes cibles. Plus les valeurs de réflectance sont fortes, plus le risque de saturation est élevé.	89
Figure 52. Spectres émergés des différents carreaux de couleur. De haut en bas : bleu, vert, rouge, violet et beige.	90
Figure 53. A gauche, évolution des luminances du Spectralon en fonction de la profondeur. A droite, réflectance relative entre la mesure émergée et les différentes profondeurs d'immersion. La mesure à 1,05 m de profondeur, qui semble peu en accord avec les mesures encadrantes (0,6 m et 1,85 m) a été figurée en pointillés.	90
Figure 54. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface bleue. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.	91
Figure 55. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface verte. 4 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm et 105 cm (résultats de la série de mesures à 185 cm, saturés, non montrés).	91
Figure 56. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface rouge. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm. En raison des fortes variations de réflectance dans le PIR, un zoom de la partie visible est présenté à droite.	92
Figure 57. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface violette. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.	92
Figure 58. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface beige. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.	93
Figure 59. Différents sables et leurs réponses spectrales.	95
Figure 60. Exemple de feuille de terrain utilisée pour la radiométrie émergée.	96
Figure 61. Exemple de feuille de terrain pour la radiométrie sous-marine.	97
Tableau 1. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site des Iles Glorieuses & Banc de Geyser – Zélée.	17
Tableau 2. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site de Mayotte.	19
Tableau 3. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site de l'île de la Réunion.	20
Tableau 4. Principales caractéristiques du spectroradiomètre dans le caisson étanche.	21
Tableau 5. Tableau de synthèse des différents paramètres retenus pour les mesures spectrales. A la ligne 5, Fréquence du blanc de référence, la lettre R représente un enregistrement sur la référence (Spectralon) et la lettre T représente un enregistrement sur la cible (target).	23
Tableau 6. A gauche, formule de calcul du diamètre de la surface analysée en fonction de l'ouverture du spectroradiomètre et de la distance à la cible. A droite, tableau de synthèse pour des distances à la cible croissantes, dans l'air et dans l'eau.	25
Tableau 7. Saturation au soleil et à l'ombre.	40
Tableau 8. Synthèse des paramètres d'acquisition.	43
Tableau 9. Comparaison des valeurs de réflectance et des écarts types relatifs à la longueur d'onde 605 nm.	45
Tableau 10. Déplacement et modification du pic d'absorption de la chlorophylle en fonction de la profondeur. Les valeurs de profondeur sont tronquées (la ligne 1m correspond ainsi aux profondeurs comprises entre 1 m et 1,9 m).	58
Tableau 11. Forme en fonction du type corallien. * : Les types Coraux branchus, encroûtants, foliacés et libres comportant moins de 5 individus chacuns sont peu significatifs, la fréquence de la forme bleue n'a pas été calculée.	67
Tableau 12. Fréquences d'occurrence des pics de réflectance en fonction du type de nature de fond.	70
Tableau 13. Nombre de mesures et profondeur moyenne du type corallien CM en fonction de la localisation géographique.	76

CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'Etat, par l'intermédiaire des Services de la DDE/DIREN, a décidé le lancement du projet **Litto3D** à la Réunion. Ce programme consiste en la réalisation d'un modèle numérique de terrain unique et continu terre-mer donnant une représentation tridimensionnelle de la forme et de la position du sol sur la frange littorale du territoire français (métropole, départements et collectivités d'Outre-Mer). 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 collectées au moyen d'une tête laser aéroportée (lidar bathymétrique pour la partie mer et altimètre laser pour la partie terre).

A l'occasion des vols prévus pour Litto3D dans l'océan Indien, l'Etat, par l'intermédiaire de la DIREN de Réunion, a procédé à des acquisitions complémentaires en domaine marin où des images numériques ont ainsi été acquises, en associant un capteur **hyperspectral** en sus du système **LIDAR bathymétrique** initialement prévu. Les hautes résolutions spatiales (quelques dizaines de centimètres) et spectrales (quelques nanomètres entre 400 et 1000 nm) de ces images permettent une discrimination fine des objets au sol.

L'Etat, les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), l'Agence des aires marines protégées (AAMP) et l'Ifremer ont signé une convention de coopération afin de mener en commun le projet **Spectrhabet-OI** de cartographie des habitats subtidaux benthiques des îles françaises de l'océan Indien à partir d'images aériennes hyperspectrales.

L'objectif du projet Spectrhabet-OI est double :

- Développer une méthode de cartographie des habitats benthiques subtidaux utilisable sur le pourtour des îles françaises de l'océan Indien, et notamment sur les barrières coralliennes et les récifs frangeants à partir d'images hyperspectrales aéroportées. Après son développement sur le site pilote de la Réunion, puis évaluation de sa pertinence (facilité de mise en œuvre, précision des cartographies, coûts...), cette méthode pourra être appliquée aux autres îles de l'océan Indien,
- Contribuer, en caractérisant l'hétérogénéité des formations récifales, à l'élaboration d'un indicateur « DCE » sur l'état biologique des récifs intégrant les différents suivis et protocoles patrimoniaux existants.

La première phase, qui concernait l'acquisition des données (aériennes et de terrain), s'est déroulée entre avril et octobre 2009. Durant cette période, les secteurs de la Réunion, Mayotte et la plupart des îles Eparses (Glorieuses, Geyzer-Zélée, Juan de Nova, Bassas da India), ont été couvertes par les survols. Europa et Tromelin le seront courant 2010. Dans chaque secteur, deux survols réalisés à des altitudes différentes ont permis

d'obtenir deux jeux d'images hyperspectrales de résolutions spectrales et spatiales différentes (mais néanmoins submétriques).

En complément de l'acquisition de ces images, des opérations de terrain, qualifiées de vérités-terrains (VT), spécifiques au Projet, ont été conduites. Ces campagnes ont été engagées sur les 4 sites de Glorieuses – Geyser (mai – juin), Mayotte (juillet) et la Réunion (juin – septembre). Elles ont permis de constituer une banque de données spectrales sous-marines des principales espèces et formations présentes dans les ceintures coralliennes. Les données ont été recueillies à des profondeurs comprises entre 0 et 20 mètres sur des habitats diversifiés (lagon, pentes externes, coulées volcaniques, etc.). Au total, la librairie spectrale est composée de plus de 2500 spectres acquis sur environ 600 cibles différentes des récifs coralliens.

L'exploitation de ces données est un préalable indispensable à la phase de traitement d'images. Les particularités des différents types de cibles (coraux, algues, herbiers, substrats minéraux) sont analysées dans le but d'identifier des critères de discrimination pertinents pour les cartographies (niveaux de réflectance, position et amplitude des pics d'absorption, etc.).

La mise en évidence éventuelle de variabilités géographique, bathymétrique, et intra ou inter spécifique, permettra de définir des zones d'application et donc les limites de validité des algorithmes de traitement.

De plus, un certain nombre d'expérimentations complémentaires ont été réalisées dans le but de préciser les influences de paramètres physiques (la profondeur ou l'éclairement) ou liées à la méthode d'acquisition des spectres (temps d'intégration, nombre de spectres moyennés, etc.). Ces données sont analysées dans le but d'affiner le protocole d'échantillonnage de futures campagnes de vérités-terrains.

Ce rapport de synthèse porte sur les première et seconde phases de la radiométrie sous-marine. Il présente :

- **La localisation des secteurs géographiques et des points de mesure**
- **Le protocole et les paramètres d'acquisition des données radiométriques sous-marines**
- **La base de données spectrale et ses paramètres constitutifs**
- **L'analyse des données (facteurs physiques, biologiques)**

A. ACQUISITIONS RADIOMETRIQUES

1. Localisation des zones d'étude

Les données de la librairie spectrale sous-marine ont été acquises sur différents récifs coralliens du sud-ouest de l'océan Indien (Figure 1 ci-dessous) :

- Aux Glorieuses et le banc du Geyser entre le 22 mai et le 6 juin 2009
- A Mayotte, du 27 au 31 juillet 2009
- A la Réunion, entre le 16 juin et le 1^{er} septembre 2009.

Au cours de ces 20 journées de mission sur le terrain, un total de 2787 spectres a été enregistré sur 626 cibles, qui se répartissent ainsi :

- Iles Glorieuses : 1069 spectres, 197 cibles
- Banc de Geyser : 251 spectres, 60 cibles
- Mayotte : 342 spectres, 123 cibles
- Réunion : 1125 spectres, 246 cibles

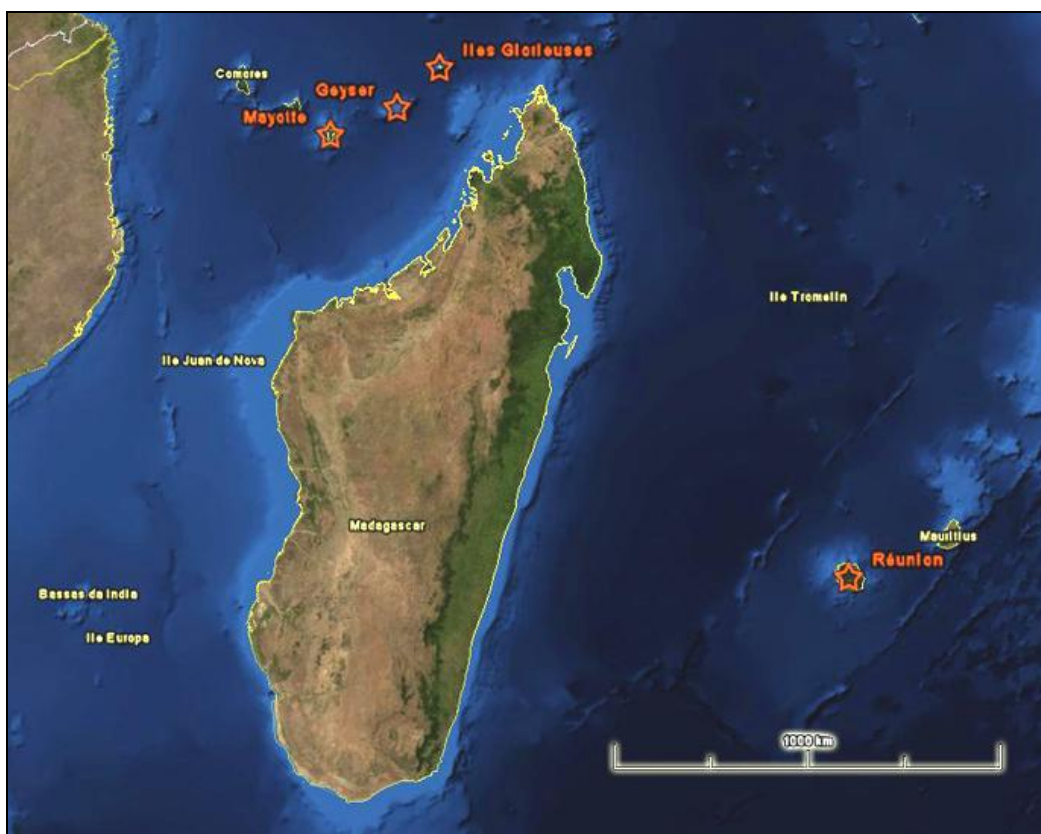


Figure 1. Localisation des 4 sites de radiométrie : les trois premiers, les Iles Glorieuses, le banc de Geyser-Zélee et Mayotte sont situés dans le canal du Mozambique au nord-ouest de Madagascar, et l'île de la Réunion à l'est. Les mesures ont été réalisées entre mai et septembre 2009.

1.1. Glorieuses & Geyser

Aux Glorieuses, les mesures ont été principalement réalisées entre les îles de Grande Glorieuse et du Lys (Petite Glorieuse), à l'abri des deux arcs coralliens nord et nord-est. Lorsque les conditions météorologiques le permettaient (vent, nébulosité & houle faibles), des VT ont pu être effectuées en dehors du platier jusqu'aux limites du tombant au sud et à l'est. Sur le banc du Geyser les deux journées de mesures ont été réalisées autour des deux bancs de sable affleurant à basse mer. Les cartes de la Figure 2 ci-dessous présentent la localisation des points de mesure ainsi que les différents trajets suivis lors des investigations.

Les profondeurs de travail se sont échelonnées entre 0 m (sur le platier) et 16 m (herbier à *Thalassodendron ciliatum* au nord de Glorieuses, waypoints 042 & 043).

En complément des mesures sous-marines, des mesures émergées sur cibles invariantes (substrats minéraux secs), ont été réalisées sur Grande Glorieuse, l'îlot des Roches Vertes, l'île du Lys et ses bancs de sable, ainsi que les deux îlots sableux de Geyser. Ces mesures serviront à la calibration radiométrique des images aériennes.

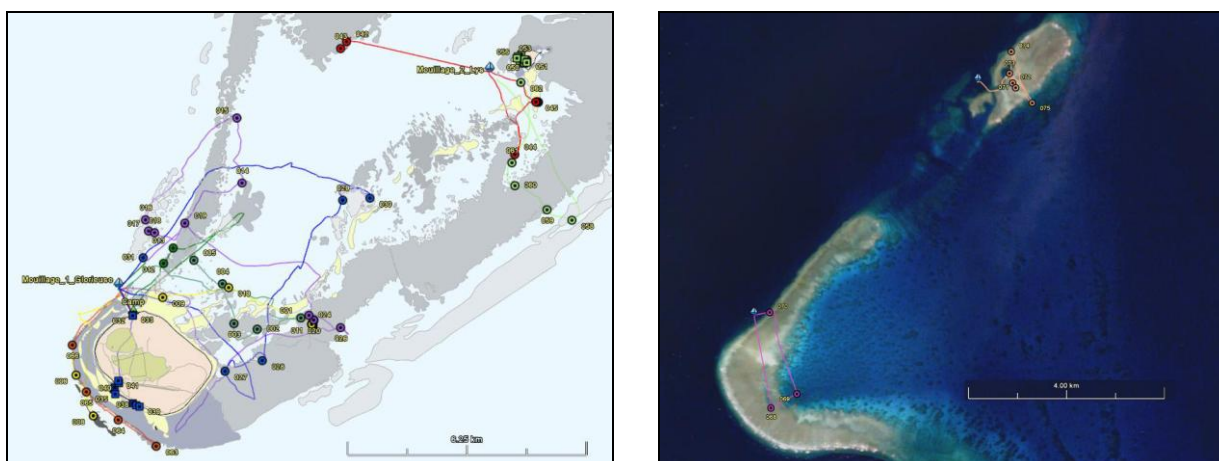


Figure 2. A gauche, localisation des mesures réalisées autour des îles Glorieuses. Les cercles représentent les points où ont été réalisées les mesures radiométriques, les lignes continues représentent les traces GPS de cheminement et de prospection. Une couleur par journée d'acquisition. Les deux mouillages du voilier Antsiva sont représentés à proximité de Grande Glorieuse et l'île du Lys. A droite, carte de localisation des mesures terrain sur le Banc du Geyser. Journée du 3 juin en violet sur la partie sud-ouest. Journée du 4 juin sur l'arc nord-est en orangé. La position du voilier Antsiva au mouillage est représentée par les icônes bleues. (Image de fond : Courtesy of the Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center - ISS011-E-8554 - <http://eol.jsc.nasa.gov/>).

Le Tableau 1 ci-dessous présente une synthèse des 10 journées d'acquisition sur les sites de Glorieuses – Geyser. Au total, entre le 24 mai et le 4 juin 2009, 1320 spectres ont été enregistrés sur plus de 70 localisations géographiques différentes.

ID	Date	Localisation	N° WPT	Nb spectres
01	24/05/2009	Glorieuse	001-005	92
02	25/05/2009	Glorieuse	006-010	122
03	26/05/2009	Glorieuse	012-013	48
04	27/05/2009	Glorieuse	014-026	167
05	28/05/2009	Glorieuse	027-031	276
06	29/05/2009	Ile du Lys	042-047	77
07	30/05/2009	Ile du Lys	048-062	228
08	31/05/2009	Glorieuse	063-066	59
Glorieuse				1069
09	03/06/2009	Geyser	068-070	119
10	04/06/2009	Geyser	071-075	132
Geyser				251
TOTAL				1320

Tableau 1. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site des Iles Glorieuses & Banc de Geyser – Zélée.

1.2. Mayotte

A Mayotte, les mesures sous-marines ont été réalisées dans le lagon est, autour de Petite Terre (Figure 3). En raison des mauvaises conditions météo, la journée du 28 juillet a été consacrée à la recherche d'un site abrité par la terre. La météo plus calme des deux journées suivantes a permis de travailler au nord (29/07) et au sud (30/07) de Petite Terre.

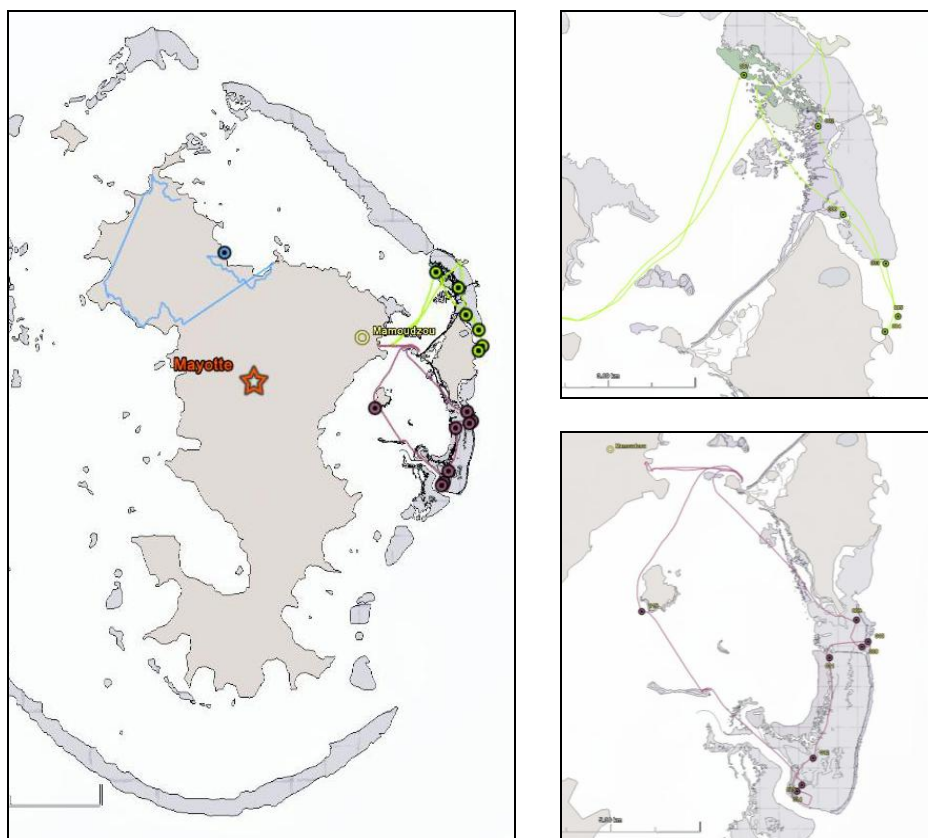


Figure 3. A gauche, carte de localisation des mesures terrain sur Mayotte. Journée du 28 juillet (en bleu) consacrée à la recherche d'un site abrité par la terre en raison des mauvaises conditions météo. Journées des 29 et 30 juillet (en vert et mauve) dans le lagon au nord et au sud de Petite-Terre. A droite, cartes de localisation détaillées des mesures dans le lagon pour les journées du 29 (en haut) et du 30 juillet (en bas). Les cercles représentent les points où ont été réalisées les mesures radiométriques, les lignes continues représentent les traces GPS de cheminement et de prospection.

Le Tableau 2 ci-dessous présente une synthèse des 3 journées d'acquisition sur le site de Mayotte. Au total, entre le 28 et le 30 juillet 2009, 342 spectres ont été enregistrés sur une quinzaine de localisations.

ID	Date	Localisation	N° WPT	Nb spectres
01	28/07/2009	Mgouedajou	001	12
02	29/07/2009	Nord Petite-Terre	002-007	164
03	30/07/2009	Sud Petite-Terre	008-015	166
TOTAL Mayotte				342

Tableau 2. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site de Mayotte.

1.3. La Réunion

La campagne radiométrique sur la Réunion s'est déroulée du 6 juin au 1^{er} septembre 2009. 6 journées de terrain en mer (4 dans les lagons de l'ouest et 2 sur les coulées volcaniques plus récentes de l'est) et une journée d'expérimentations en piscine ont été menées. La carte Figure 4 ci-dessous présente la localisation et la date des différents points de mesure.

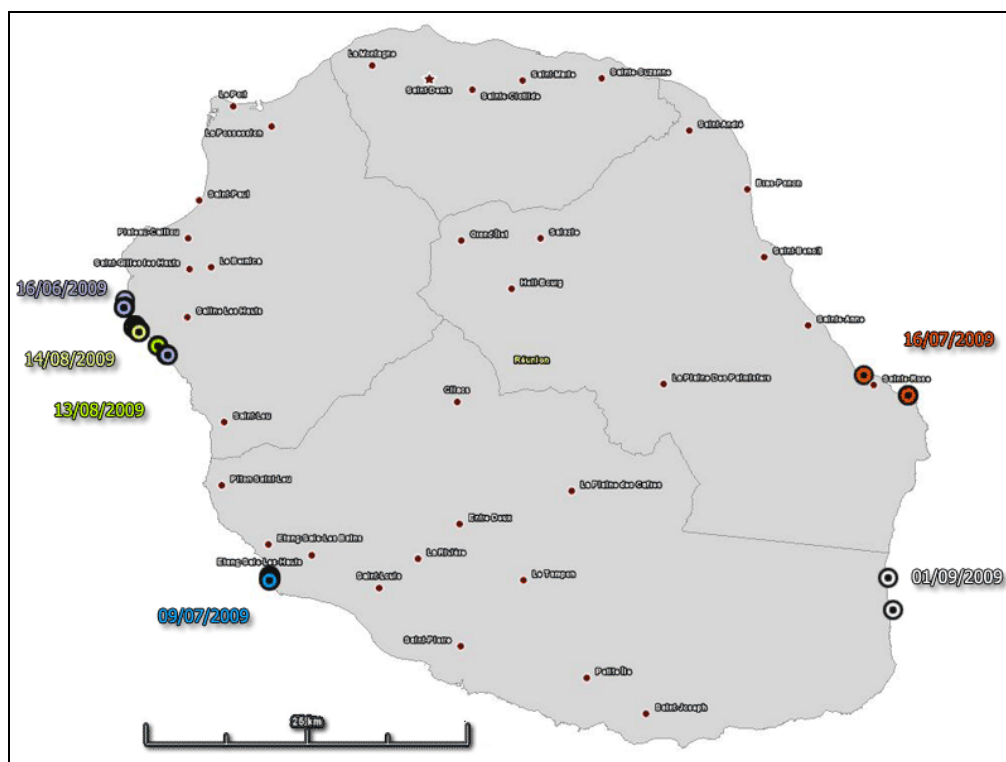


Figure 4. Carte de localisation des mesures terrain sur la Réunion. Une couleur par journée de mission, les dates sont figurées à proximité.

Le Tableau 3 ci-dessous présente une synthèse des 7 journées d'acquisition sur le site de la Réunion. Au total, entre le 16 juin et le 1^{er} septembre 2009, 1125 spectres ont été enregistrés sur plus de 40 localisations.

ID	Date	Localisation	N° WPT	Nb spectres
01	16/06/2009	Lagon	001-010	211
02	09/07/2009	Etang-Salé	010-018	121
03	16/07/2009	Sainte-Rose	019-020	98
04	18/07/2009	Piscine JPQ	-	122
05	13/08/2009	Lagon – Hermitage	016-024	390
06	14/08/2009	Lagon – La Saline	001-009	100
07	01/09/2009	Volcan – Coulée 2007	010-011	83
TOTAL Réunion				1125

Tableau 3. Synthèse par journée d'acquisition : date, localisation, identifiants GPS et nombre de spectres. Site de l'île de la Réunion.

2. Protocole d'échantillonnage

Les mesures de réflectance ont été réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre *GER1500* de marque *SVC (Spectral Vista Corporation)* placé dans un caisson étanche et permettant une manipulation autonome (sans lien avec un PC en surface) par le plongeur jusqu'à une profondeur de 30 mètres.

La Figure 5 montre le spectroradiomètre, le caisson étanche et le Spectralon. Le Tableau 4 synthétise les principales caractéristiques du matériel utilisé.

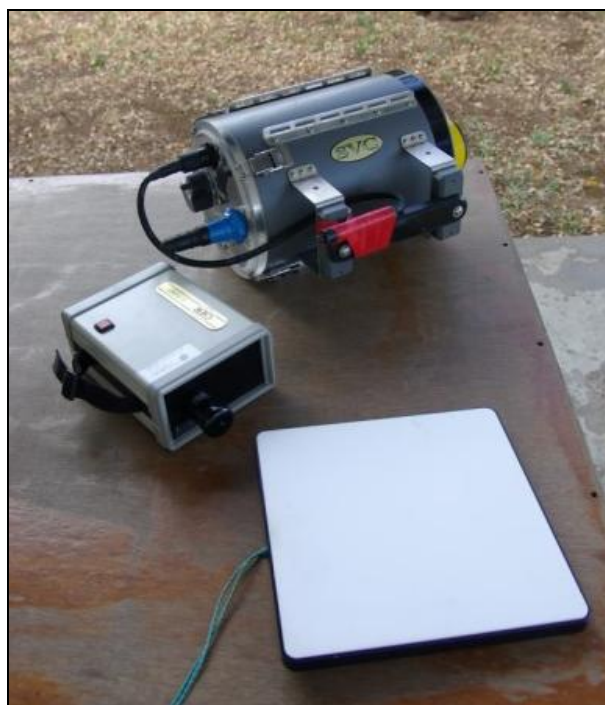


Figure 5. Détail du matériel utilisé pour la radiométrie sous-marine. Le caisson étanche (en haut) dans lequel est placé le spectroradiomètre (au milieu) permet au plongeur de réaliser des mesures jusqu'à une profondeur de 30 mètres sans lien avec la surface. En bas, la surface blanche de référence (Spectralon) est utilisée pour calibrer les données en fonction de la luminosité ambiante.

Gamme spectrale	350 – 1050 nm
Résolution spectrale	1,5 nm entre 300 – 1100 nm
Ouverture (FOV)	4° émergé / 3° immergé
Dimensions	37cm x 40cm x 22cm
Poids	10,8 kg
Profondeur maximale d'utilisation	30 m
Flottabilité	Positive – négative avec 2 kg de lest
Autonomie	Emergée (spectro seul) : 4 h x 2 batteries Immergée (dans le caisson) : 8h x 2 batteries
Visualisation et sauvegarde des données	PC portable + clés USB
Spectralon	Surface lambertienne renvoyant 99% du signal lumineux incident sur toute la gamme spectrale

Tableau 4. Principales caractéristiques du spectroradiomètre dans le caisson étanche.

2.1. Acquisitions radiométriques sous-marines

Les mesures sont réalisées en plongée, appareil immergé, directement au dessus de l'objet à analyser. Une première série de mesures sur le Spectralon placé à proximité de la cible (même profondeur) permet de calibrer l'appareil en fonction de la luminosité ambiante. La seconde série de mesures est réalisée sur la cible d'intérêt. La Figure 6 ci-dessous montre quelques photos sous-marines de l'enregistrement des spectres.



Figure 6. Exemples de mesures réalisées à l'aide du spectroradiomètre. De gauche à droite, en haut : calibration de l'appareil à l'aide du Spectralon (surface de référence revoyant 99% de l'énergie lumineuse incidente) avant mesures sur le fond sableux (Profondeur : 10 m) et mesures sur un acropore branchu par 2 m de fond. En bas, mesures sur acropores digités et pocillopores par 3,5 m de fond, et dans un herbier de *Thalassodendron ciliatum* par 1,5 m de profondeur devant l'île du Lys (Glorieuses).

2.1.1. Collecte de la librairie spectrale des cibles benthiques

Le Tableau 5 ci-dessous synthétise les principaux paramètres retenus pour les acquisitions radiométriques. Ils ont été définis et affinés suite au travail bibliographique et aux premières expérimentations de terrain.

Le *temps d'intégration* (1) et le *nombre de mesures moyennées* (2) sont réglés directement sur le spectroradiomètre en début de mission. Le *nombre d'enregistrements par cible* (3), la *distance à la cible* (4), la *fréquence du blanc* (5) et l'*orientation du plongeur* (6) sont des préconisations pour le plongeur, paramètres ajustables en fonction des cibles et de l'environnement.

Id	Paramètre	Valeur
1	Temps d'intégration (paramètre spectroradiomètre)	Auto (ajusté automatiquement par l'appareil en fonction de l'éclairement ambiant)
2	Nombre de mesures moyennées par enregistrement (paramètre spectroradiomètre)	32
3	Nombre d'enregistrements par cible	2 – 5
4	Distance entre le spectroradiomètre et la cible (et Spectralon)	20 – 40 cm
5	Fréquence du blanc de référence	A chaque profondeur (RRRTTTTTT-RRRTTTTT)
6	Orientation du plongeur	Face au soleil (appareil à bout de bras)

Tableau 5. Tableau de synthèse des différents paramètres retenus pour les mesures spectrales. A la ligne 5, *Fréquence du blanc de référence*, la lettre *R* représente un enregistrement sur la référence (Spectralon) et la lettre *T* représente un enregistrement sur la cible (*target*).

#1 Temps d'intégration : Automatique

Le temps d'intégration est la durée durant laquelle le capteur du spectroradiomètre est exposé à l'énergie lumineuse renvoyée par la cible. Il doit être ajusté en fonction de l'éclairement ambiant, qui peut être très variable (profondeur, altitude solaire, passages nuageux, etc.), et de la réflectance de la cible. Il doit être ni trop long (risque de saturation) ni trop court (bruit).

Le spectroradiomètre *GER1500* est doté d'une fonction permettant un ajustement de ce temps d'intégration en fonction de la luminance de la cible. En mode *Automatique* l'appareil détermine de manière optimale ce paramètre avant chaque mesure en effectuant une série de tests à temps d'intégration croissants jusqu'à saturation du capteur, la dernière valeur non saturée est retenue. Cette méthode, qui permet de maximiser le SNR (rapport signal sur bruit), est efficace pour la radiométrie émergée où les conditions d'éclairement sont stables. Dans le cas de rapides et fortes variations lumineuses (en immergé dans les petits fonds avec le phénomène du *wave focusing* par exemple – Voir Annexe 1 page 86), une saturation du capteur est possible.

Compte tenu des profondeurs très variables auxquelles les mesures ont été réalisées (entre 10 cm et plus de 15 m), et de la forte absorption du signal lumineux dans la colonne d'eau, ce paramètre a été laissé en automatique durant toutes les campagnes.

Pour réaliser les mesures avec un temps d'intégration fixe, il aurait été nécessaire d'étalonner et de régler manuellement le matériel avant chaque mesure, ce qui aurait été incompatible avec le protocole d'échantillonnage retenu (nombre et diversité des cibles, profondeurs variables) et les conditions de météo aléatoires (état de mer, hauteur solaire, etc.).

#2 Nombre de mesures moyennées par enregistrement : 32

Lors de chaque enregistrement, il est possible de paramétrer le spectroradiomètre de manière à moyenner de manière systématique plusieurs mesures successives. Entre 1 et 256 mesures peuvent ainsi être moyennées. L'avantage de cette fonction est :

- de pouvoir intégrer automatiquement dans un seul enregistrement :
 - o la variabilité temporelle du signal (les n mesures sont effectuées successivement),
 - o la variabilité spatiale de la cible (les n mesures peuvent être effectuées sur une surface plus grande par un léger déplacement à chaque mesure du radiomètre par le plongeur lors de l'enregistrement),
- de réduire le bruit. Celui-ci étant aléatoire, la moyenne de plusieurs mesures successives permet d'augmenter le rapport signal sur bruit (SNR).
- de ne produire qu'un seul fichier en sortie et ainsi d'économiser l'espace mémoire de l'appareil (limité à moins de 500 enregistrements). Par exemple, sur la journée du 28 mai 2009 aux Glorieuses, les 276 enregistrements représentent près de 9000 mesures (qu'il aurait été nécessaire d'acquérir en 19 fois si chaque spectre avait été enregistré individuellement).

L'inconvénient de cette moyenne est que le temps nécessaire à chaque enregistrement est multiplié par le nombre de mesures, avec apparition de nouvelles contraintes :

- nécessité pour le plongeur de se stabiliser sur le fond durant une plus longue période et donc augmentation du risque de « sortir » de la cible si les conditions sont mauvaises (houle, courants, cible de petite taille, déplacement de la cible).
- risque de variation de la luminosité (passages nuageux)
- risque de saturation

Ce paramètre n'étant pas facilement modifiable dans les conditions de terrain, il a été fixé une fois pour toutes en début de mission à 32 : compromis entre le temps nécessaire à l'enregistrement des mesures (en moyenne entre 10 et 20 secondes pour une cible corallienne), le nombre de mesures et la taille de la mémoire disponible pour une journée d'acquisition.

#3 Nombre d'enregistrements par cible : entre 2 et 5

En plus de la moyenne automatique, il a été décidé d'acquérir plusieurs enregistrements successifs de chaque cible :

- ces mesures, réalisées sur une seule ou différentes parties de la cible (parfois trop éloignées et non accessibles par le point #2), permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale (différences de structure, texture, coloration) et ses impacts potentiels sur la réflectance.

- la multiplication de spectres d'une même cible (sensée être pure et invariante) permet une vérification *a posteriori* des données. Lors du post-traitement, des spectres aberrants sont régulièrement retrouvés (niveau de réflectance trop haut ou trop bas, position et amplitude des pics d'absorption différents, etc.). Lorsque l'origine de ces variations est identifiée (brusque changement de conditions atmosphériques ou de l'état de mer, *wave focusing*, visée approximative en partie sur une autre cible, erreur dans la prise de notes, etc.), qu'elle n'est pas « naturelle » (variabilité spatiale ou temporelle) et le spectre douteux ne peut pas être corrigé, l'enregistrement est éliminé.

En moyenne, entre 2 et 5 spectres par cible ont été acquis. Ce nombre, variable, est déterminé par le plongeur sur le terrain selon l'hétérogénéité de la cible et les conditions du milieu.

Dans un second temps, un spectre moyen représentatif de l'ensemble de l'objet est calculé lors de l'étape de post-traitement.

#4 Distance à la cible

L'objectif du GER1500 a un angle d'ouverture (FOV) dans l'air de 4°. Dans l'eau de mer, compte-tenu du changement d'indice de réfraction, cette ouverture est d'environ 3°. Le Tableau 6 ci-dessous présente le diamètre de la surface couverte au sol en fonction de la distance et de l'angle d'ouverture.

Distance h (cm)	Ouverture α	
	Air : 4°	Eau : 3°
1	0,1	0,1
5	0,3	0,3
10	0,7	0,5
20	1,4	1,0
30	2,1	1,4
40	2,8	2,1
50	3,5	2,6
100	7,0	5,2
150	10,5	7,9
200	14,0	10,5
400	27,9	20,9
500	34,9	26,2
1000	69,8	52,4

Tableau 6. A gauche, formule de calcul du diamètre de la surface analysée en fonction de l'ouverture du spectroradiomètre et de la distance à la cible. A droite, tableau de synthèse pour des distances à la cible croissantes, dans l'air et dans l'eau.

Toutes les mesures ont été réalisées à une distance de la cible comprise entre 20 et 40 cm. Pour une meilleure interprétation des résultats, il est important de maintenir cette distance constante tout au long de la campagne de mesures. Elle présente plusieurs avantages :

- Le plongeur peut se stabiliser sur le fond à l'aide des genoux, important quand il s'agit de maintenir dans le courant l'appareil en position verticale et immobile durant plusieurs secondes (Figure 7).
- Le diamètre de la tache au sol est d'environ 2 cm. Compatible avec la prise de mesures sur des cibles pures et de petite taille.

Une distance à la cible inférieure ne serait pas opportune : tache au sol vraiment petite (objets souvent très hétérogènes et nécessité de multiplier le nombre de mesures pour obtenir une bonne représentativité spatiale) et risque d'ombrage par l'appareil ou le plongeur.

A une distance supérieure, la surface échantillonnée serait plus grande (à 5 m de distance par exemple, le diamètre au sol est d'environ 25 cm), ce qui a un intérêt car la prise en compte de la variabilité spatiale serait meilleure (spectres moyens sur des surfaces proches de celles des pixels des images hyperspectrales, pouvant caractériser des habitats), mais avec le risque d'une pollution du signal par l'environnement pour les objets de petite taille (obtention de spectres mixtes difficilement interprétables). De plus, sans une surface de référence plus grande (le Spectralon utilisé est un carré de 25 cm de côté) et sans moyen de stabilisation dans la colonne d'eau, une visée imprécise lors de la calibration pourrait avoir un impact important sur la qualité des résultats.

L'eau absorbant fortement le signal lumineux, il est important d'effectuer la mesure sur le Spectralon à la même profondeur et à la même distance que la cible. Il n'a pas été développé de support fixe visant à maintenir cet écartement constant :

- Peu pratique dans un environnement corallien tridimensionnel rarement plan et horizontal.
- Difficilement adaptable sur cet appareil dans le peu de temps imparti.



Figure 7. Plongeur réalisant les mesures sur diverses cibles en maintenant le spectroradiomètre immobile à une distance d'environ 40 cm avec le fond.

#5 Fréquence du blanc : à chaque changement de profondeur

Pour limiter l'impact des variations d'illumination, il est conseillé de réaliser un spectre de référence (R) avant chaque enregistrement (T) selon le schéma suivant : RT-RT-RT-RT-RT-etc. [1]. Ce schéma théorique demande beaucoup temps, de manipulation et d'espace mémoire (dans le radiomètre), de plus il ne permet pas de prendre en compte les variations de luminosité dans la masse d'eau, très rapides par rapport à l'intervalle de temps entre la mesure de référence et la mesure cible.

Comme les mesures sur les cibles proches sont effectuées dans un laps de temps court (quelques minutes maximum), et que les variations d'intensité lumineuse atmosphériques sont faibles durant cette période, le schéma d'échantillonnage retenu est le suivant : RRRTTTT-RRRRTTTT-etc., avec (R) la référence, (T) la (les) cible(s). Chaque nouvelle série de référence est prise après un déplacement ou lors d'un changement de profondeur. L'acquisition de plusieurs références successives permet une prise en compte des variations temporelles et un filtrage des données (valeurs aberrantes ou saturées).

Lors de chaque série de mesures, il est important que toutes les cibles soient à la même profondeur que le Spectralon pour minimiser l'impact de l'absorption par la colonne d'eau, phénomène peu visible à l'œil nu mais important, notamment dans le rouge et le proche infrarouge. Une nouvelle série de (R) doit ainsi être prise lors du déplacement du plongeur ou d'un changement de profondeur.

#6 Orientation du plongeur lors de la mesure : face au soleil

L'opérateur du spectroradiomètre doit faire attention à perturber le moins possible l'environnement et la mesure. Il est important que le plongeur garde toujours la même orientation par rapport au soleil : en se plaçant face à lui, il évite de projeter son ombre sur le Spectralon et les différents objets analysés.

Sous l'eau, dans les petits fonds notamment, le phénomène de *wave focusing* provoque de fortes variations de luminosité. L'analyse des premiers résultats montre que ces variations importantes et rapides sont responsables de nombreuses saturations dans les mesures. Le plongeur, en se plaçant dos au soleil plutôt que face à lui, et donc projetant son ombre sur les objets à analyser, pourrait réduire ce phénomène. Des expérimentations ont été menées pour tester cette hypothèse dans le lagon de la Réunion (voir Partie B §2.1.2 page 36 et §2.2.1 page 41).

Le protocole de mesure sur le fond est synthétisé sur la Figure 8 ci-dessous. Il a été établi sur la base des réflexions menées en amont des phases de terrain.

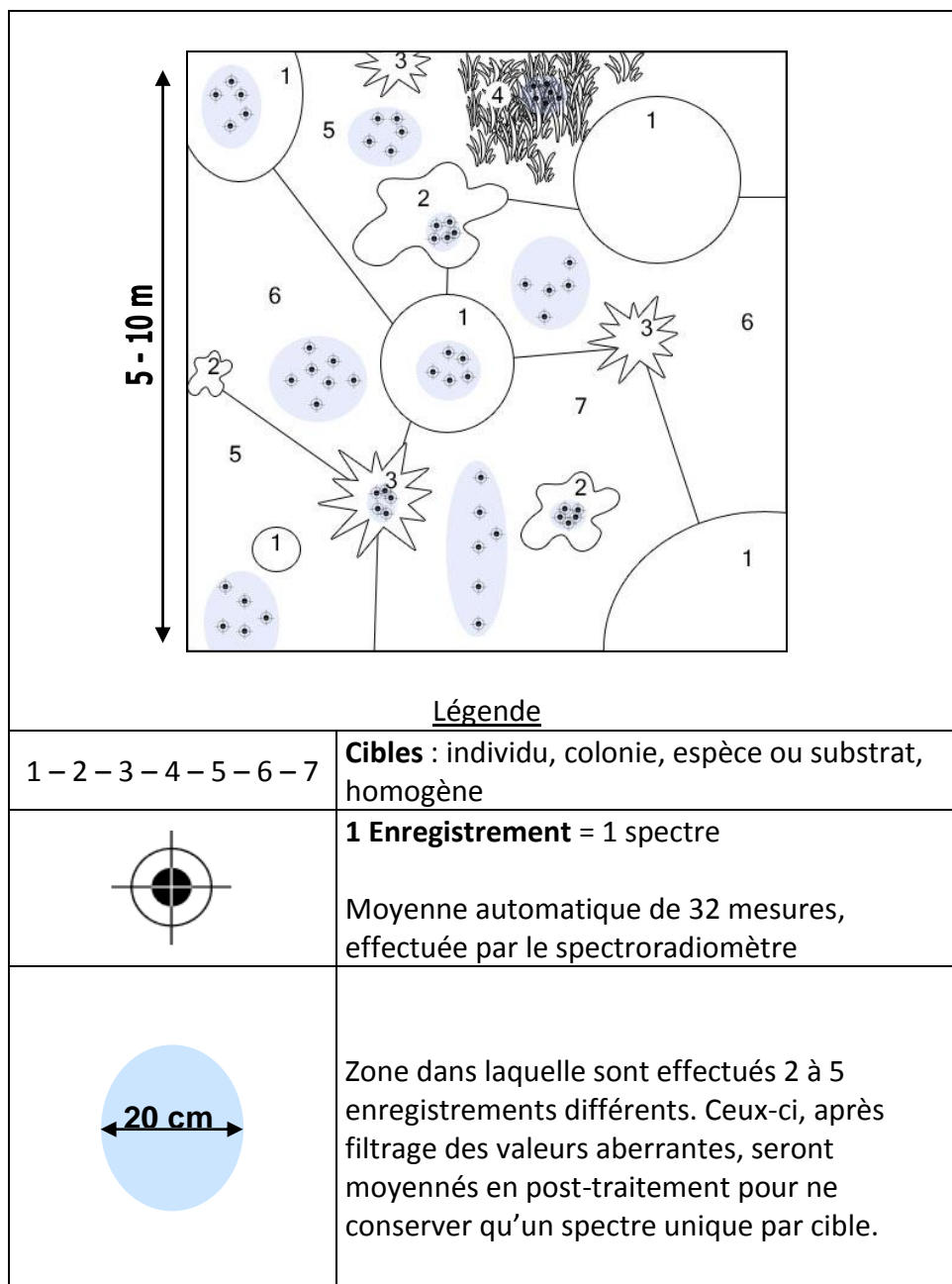


Figure 8. Protocole d'échantillonnage du fond sous-marin pour une localisation (= 1 point GPS). Des mesures (points noirs) sont réalisées sur chacune des principales cibles identifiées (numéros 1 à 7). La prise de plusieurs mesures successives sur une même cible (à l'intérieur des surfaces bleues) permet de réaliser une moyenne spatiale (hétérogénéité due à la structure tridimensionnelle des objets) et temporelle (variations de luminosité dans la masse d'eau dues principalement à l'état de surface de la mer).

La Figure 9 ci-dessous montre l'hétérogénéité des peuplements benthiques rencontrés sur différents sites des Glorieuses.

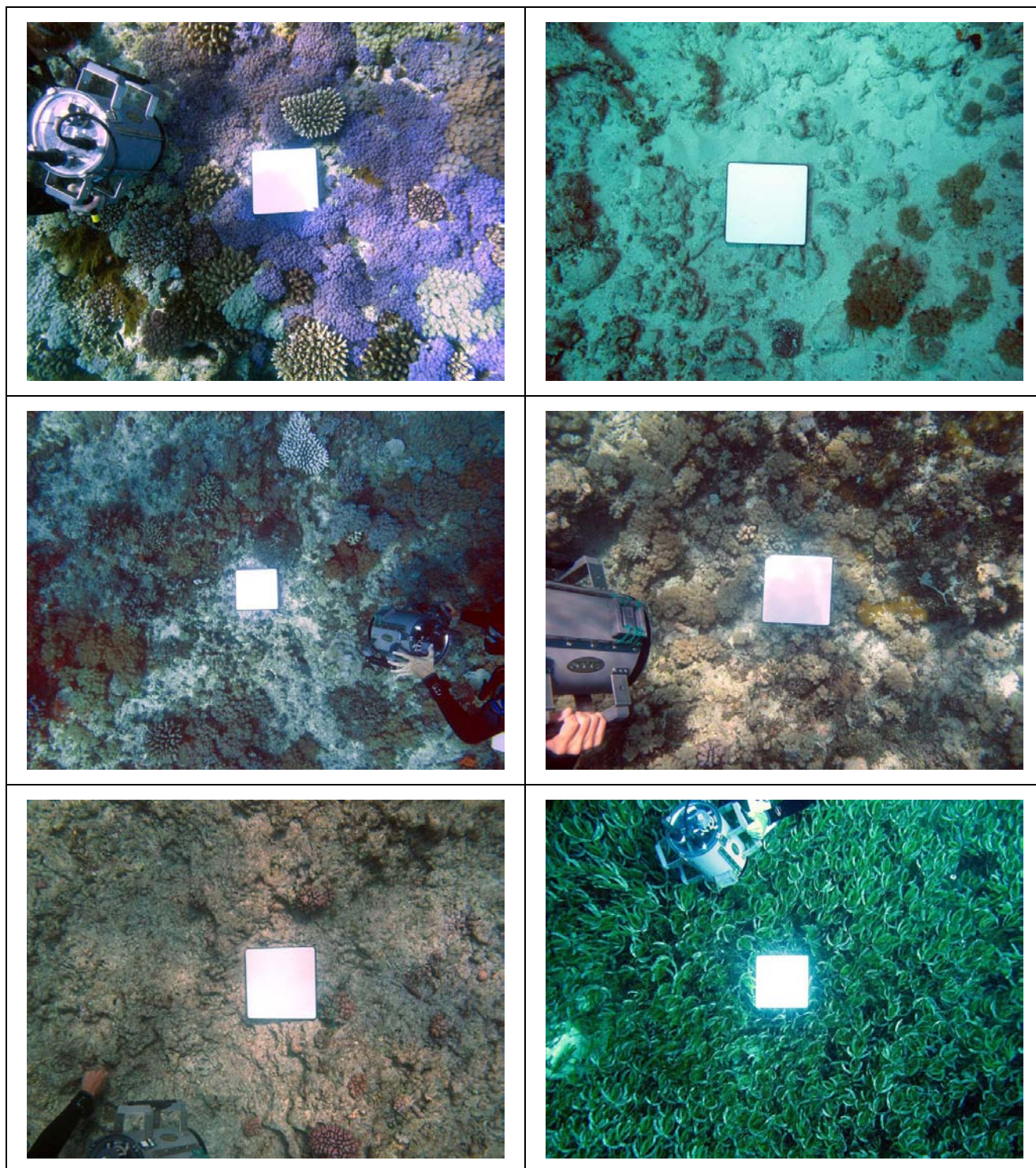


Figure 9. Photographies verticales de différents peuplements rencontrés aux Glorieuses et à Geyser. La plaque blanche de référence (Spectralon) posée sur le fond permet de donner l'échelle (25 cm x 25 cm).

2.1.2. Mesures de validation

Paramètres optiques de la colonne d'eau

Pour le traitement des images hyperspectrales (correction de l'absorption du signal lumineux dans la colonne d'eau notamment), différents paramètres devront être déterminés, à l'aide de mesures expérimentales acquises sur le terrain ou directement extraites des données images ou Lidar.

Aux Glorieuses, sur un fond sableux homogène et de profondeur croissante, des mesures de radiométrie ont été réalisées selon le protocole détaillé dans la Figure 10 ci-dessous. Elles seront utilisées pour la détermination des coefficients d'atténuation du signal lumineux dans la masse d'eau (§B.2.3.1 page 52).

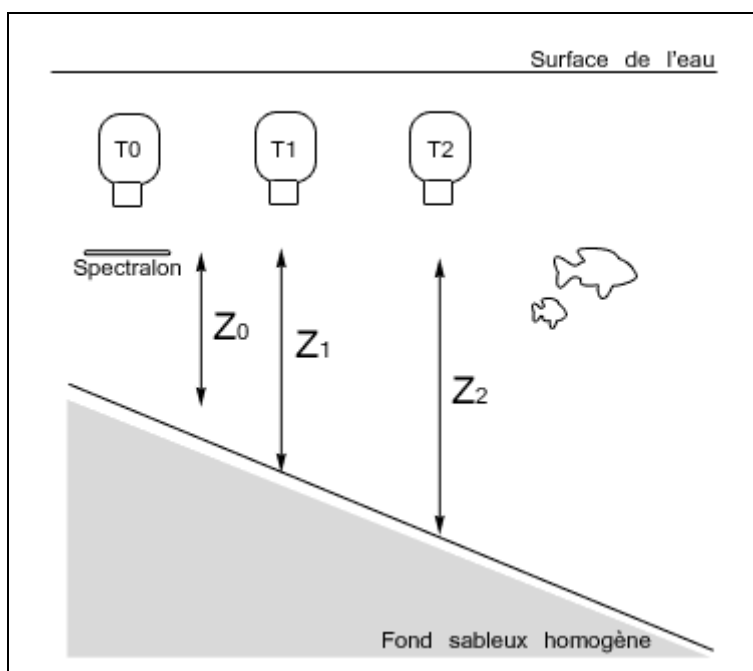


Figure 10. Protocole de mesure sur pente sableuse homogène. Depuis la surface des mesures immergées sont effectuées d'abord sur le Spectralon puis sur un fond sableux homogène de profondeur croissante.

Autres paramètres

En cours de campagne, l'analyse des premiers résultats a montré que des expérimentations complémentaires étaient nécessaires pour préciser l'impact de certains paramètres sur les mesures. Ces expérimentations ont été réalisées dans le lagon de la Réunion et en piscine :

- 1. Invariabilité des spectres dans un gradient de profondeur :
 - o Cible et Spectralon à 35 cm
 - o Cible identique
 - o Mesures à profondeurs croissantes
- 2. Absorption du signal lumineux par la colonne d'eau
 - o Cible spatialement homogène

- Spectralon à 35 cm
- Distance de mesure augmente progressivement
- 3. Influence du nombre de mesures moyennées sur la saturation des spectres :
 - Cible et Spectralon à 35 cm
 - Cible identique
 - Changement du nombre de mesures moyennées automatiquement lors de chaque enregistrement (variation entre 2 et 32)
- 4. Influence de l'ombrage dans la réduction du *wave focusing* :
 - Cible et Spectralon à 35 cm
 - Cible identique
 - Mesures au soleil et à l'ombre de l'opérateur

2.2. Collecte de la librairie spectrale - invariants de référence

En plus de la librairie spectrale sous-marine, une librairie spectrale émergée a été collectée sur diverses cibles de Glorieuses et Geysers. Ces mesures sur des cibles de référence, peu variantes dans le temps et l'espace, seront utilisées lors de la phase de calibration des images hyperspectrales brutes en réflectance.

Les mesures ont été acquises avec les paramètres suivants :

- Zones homogènes à l'échelle d'un pixel d'au moins 5 m de côté
- Suffisamment étendues pour être facilement repérables et positionnables sur les images aériennes
- Cibles claires et sombres (dans la limite des possibilités)
- Cibles minérales sèches en priorité, dont les réponses spectrales sont peu variantes dans le temps (meilleure corrélation avec les données images)
- Localisation GPS
- Photos terrain
- Horaires d'acquisition variables entre 9h et 16h
- Paramètres du spectroradiomètre :
 - Temps d'intégration automatique
 - Moyenne de 32 mesures par enregistrement
 - 5-10 enregistrements par cible
- Distance constante entre le spectroradiomètre et la cible et le Spectralon (environ 1,5 m pour une tache au sol de 10 cm de diamètre environ).

B. ANALYSE DES DONNEES SPECTRALES

1. Présentation de la Base de données

Après mise en forme (filtrage des valeurs aberrantes et calcul des moyennes des mesures pour chaque cible), les spectres de terrain ont été stockés dans une base de données OI, sous la forme d'une librairie spectrale au format du logiciel de traitement d'images ENVI, avec les métadonnées associées (fichiers Excel ; voir Figure 11 ci-dessous ; agrandissement des figures en Annexe 5, page 98).

Chaque mesure est identifiée par un numéro unique (première colonne) composé de 3 lettres (sites : GLO, GEY, RUN et MAY pour Glorieuses, Geysier, la Réunion et Mayotte respectivement) suivies de 3 chiffres (ordre chronologique des mesures). Cet index permet de faire le lien entre la librairie spectrale OI et le fichier de métadonnées Excel, pour retrouver rapidement l'ensemble des paramètres descriptifs de la cible (photos de terrain notamment).

Les colonnes suivantes regroupent les paramètres liés à la mesure (date, heure, localisation, profondeur), ainsi que les numéros des fichiers de radiométrie bruts (spectres de référence, de la cible, et à éliminer¹). Viennent ensuite trois colonnes qui décrivent précisément chaque cible : un « code substrat » caractéristique du type de cible (voir détail §B.3 page 60), une description plus précise de la cible, (nom de genre, espèce, etc.) et les observations particulières saisies sur le terrain par le plongeur (précisions sur la couleur, le taux de recouvrement du substrat, l'état physiologique, etc.), utiles pour l'interprétation des réponses spectrales en post-traitement.

Enfin, les dernières colonnes identifient les photos de terrain acquises sur chacune des cibles. Des liens hypertextes permettent de visualiser rapidement les photos associées pour chaque cible dans un logiciel externe.

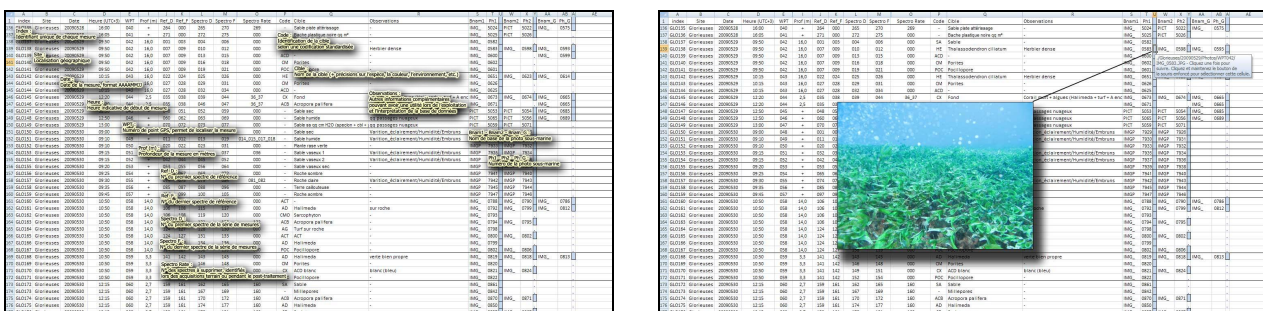


Figure 11. Ensemble des métadonnées de la librairie spectrale OI stocké dans un tableau Excel (à gauche). Un hyperlien permet l'affichage des photos de terrain correspondantes (à droite).

¹ Tous les spectres de la base de données sont contrôlés à plusieurs reprises pour vérifier la bonne correspondance avec la cible analysée et qu'il n'y a ni mauvaise visée ni saturation. L'identification des spectres discordants permet leur élimination automatique.

La dénomination des spectres dans les librairies spectrales reprend l'essentiel de ces informations (Index, Date, numéro de WPT, Profondeur, Code, Cible, Observations). Elle permet une première analyse des données (regroupements par types, profondeur, localisation, etc.), mais aussi de faire le lien avec les informations de la base de données (visualisation des photographies de terrain notamment). La Figure 12 ci-dessous montre un extrait de la librairie spectrale OI sur la Réunion pour la journée du 16 juin 2009. Un clic sur une ligne affiche graphiquement le spectre correspondant.

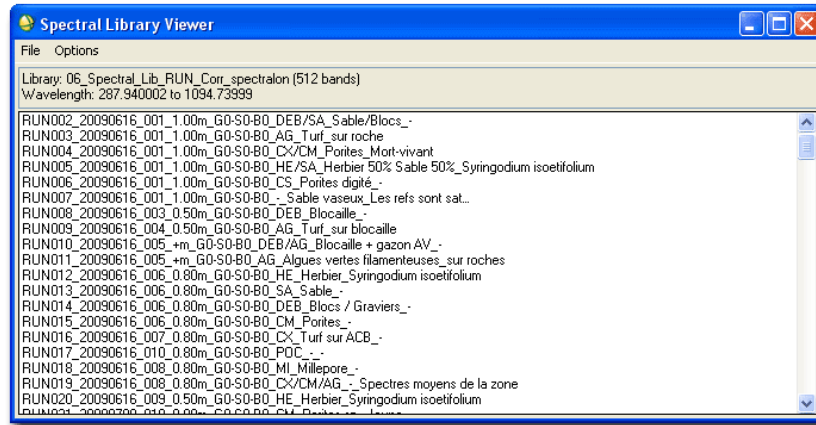


Figure 12. Les spectres de la librairie spectrale OI sont nommés d'après les informations contenues de la base de données Excel. Dans le tableau du *Spectral Library Viewer* ENVI ci-dessus, chaque ligne représente un spectre.

La base de données constituée permet ainsi d'associer dans un support unique l'essentiel des informations requises pour le traitement des signaux en lien avec l'approche « habitats » d'une part, et la validation des images aéroportées d'autre part.

L'analyse de cette base de données (croisements intra et inter spécifiques, influences de la localisation géographique et de la profondeur, etc.) va permettre de vérifier la cohérence avec la bibliographie et de préciser certains paramètres des algorithmes de traitement des images aériennes hyperspectrales.

2. Facteurs physiques

Suite aux premières expérimentations et analyses de spectres, il est apparu que de nombreux paramètres, indépendants des objets mesurés et de leur nature, avaient une influence sur les mesures sous-marines. Dans le but d'identifier et de préciser leurs rôles, des expérimentations complémentaires ont été réalisées. Différents paramètres ont été examinés au cours de plusieurs campagnes :

- L'éclairement :
 - o Importance du phénomène de *wave focusing*
 - o influence d'un ombrage artificiel de la cible
- La hauteur d'eau :
 - o Respect des distances Spectralon – Cible – Capteur
 - o Profondeur de mesure
- Le nombre de mesures moyennées

Lors de toutes les missions d'acquisition sous-marines (Glorieuses, Geysier, Mayotte et Réunion), de nombreux phénomènes de saturation ont été observés. L'Annexe 1 page 86 présente ce phénomène sur quelques exemples. L'impact sur la qualité des données étant très important, il est indispensable de le réduire au minimum : *a priori*, en évitant les fortes variations de luminosité (impact du *wave focusing*), *a posteriori*, par un filtrage systématique des données affectées.

2.1. Paramètres liés à l'environnement

2.1.1. Wave focusing

L'état de surface de la mer joue un rôle prépondérant dans le phénomène de *wave focusing* (amplification du signal lumineux par les vagues) en produisant de rapides fluctuations de la luminosité sous-marine. Les vagues et vaguelettes de surface, en faisant varier hauteur et orientation de l'interface air – eau, modifient les angles d'incidence du rayonnement solaire, produisant par réfraction une modification continue des chemins optiques et les angles d'éclairement sur le fond [2]. Certaines zones subissent ainsi une concentration des rayons lumineux (effet de loupe) pendant que d'autres sont moins éclairées.

Contrairement aux mesures terrestres émergées, et même lorsque les conditions extérieures sont excellentes et stables (plein soleil), l'état de surface de l'eau (vaguelettes soulevées par le vent notamment) complique les mesures sous-marines, en rendant difficile l'illumination uniforme du Spectralon et de la cible [1].

Pour préciser et quantifier le phénomène, une analyse de deux photographies sous-marines de fonds homogènes prises avec des hauteurs d'eau différentes est présentée dans les deux figures suivantes. L'étude a été réalisée sur le canal vert, où les longueurs d'ondes du signal lumineux sont les moins absorbées.

Figure 13 ci-dessous, photographie verticale par 1 mètre de hauteur d'eau, sur un fond sableux homogène (à gauche). Après filtrage des grains de sable par une transformée de Fourier (hautes fréquences), les variations de l'intensité lumineuse produites par l'état de surface de la mer sur le fond sont mises en évidence (au centre). Après calcul de l'intensité lumineuse moyenne de la scène, les différences locales à cette moyenne sont présentées sur l'image de droite.

Avec des valeurs en comptes numériques comprises entre 63 et > 255 (saturation), il y a au minimum un **facteur 4 entre les zones les plus sombres et les plus claires**. 58 % de la surface de l'image est inférieure et 42 % est supérieure à la moyenne : **les zones de forte intensité lumineuse sont peu étendues mais plus intenses**, elles forment des « flashes de lumière » expliquant les saturations du radiomètre observées².

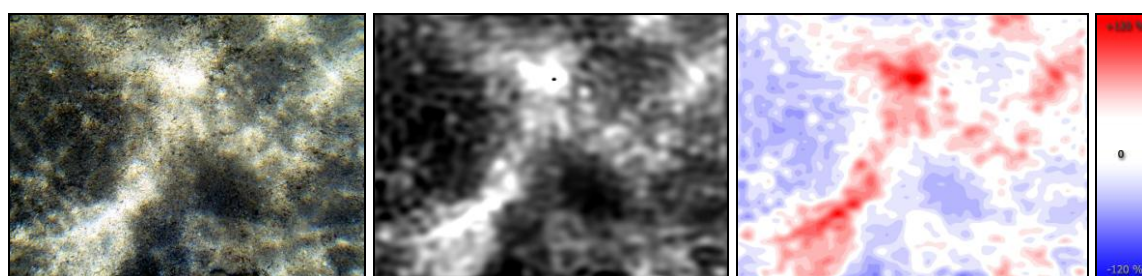


Figure 13. Illustration du phénomène de *wave focusing*. A gauche fond sableux homogène avec une hauteur d'eau d'environ 1 m. Au centre, la même image après filtrage des hautes fréquences par une transformée de Fourier. A droite, différence par rapport à la luminosité moyenne, en rouge les zones supérieures, en bleu les zones inférieures.

La Figure 14 ci-dessous présente la même expérimentation réalisée par 8 mètres de fond. La différence d'intensité lumineuse n'est ici plus que d'un facteur inférieur à 2 entre les zones sombre (CN=113) et claires (CN=195).

De plus, par rapport aux mesures avec un mètre de hauteur d'eau, on constate qu'une grande partie de l'image est « moyenne », c'est-à-dire avec peu de zones extrêmes, qui occupent par ailleurs des surfaces réduites et égales (50 % au dessus, 50 % en dessous). Le phénomène de « flashes de lumière » n'est plus aussi marqué.

² Dans le mode d'enregistrement « Auto-integration mode », où le temps d'intégration est déterminé automatiquement par l'appareil en fonction de la luminosité ambiante, le GER1500 effectue une série de mesures à temps d'intégration croissants. A la première mesure saturée, l'appareil revient sur la valeur précédente, non saturée, pour l'enregistrement. Par cette méthode, le facteur maximal de tolérance de variation d'intensité entre l'initialisation et la mesure réelle est un facteur 2. Si la détermination du temps d'intégration automatique s'est effectuée dans une zone sombre (cas le plus probable car occupant une surface plus grande), la mesure durant un flash lumineux, supérieure d'un facteur 4 sera forcément saturée.

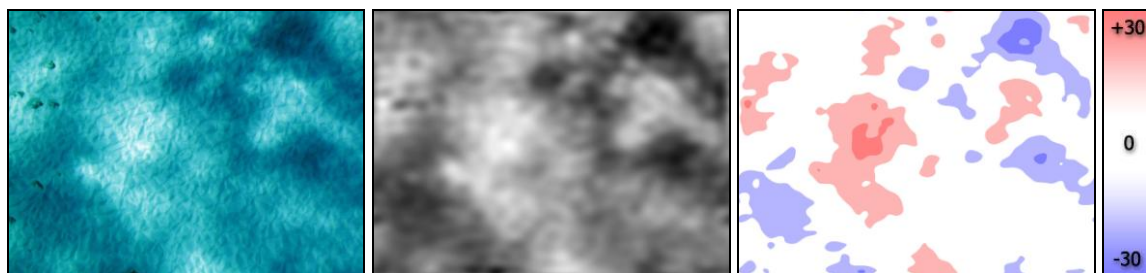


Figure 14. Illustration du phénomène de *wave focusing*. A gauche fond sableux homogène avec une hauteur d'eau d'environ 8 m. Au centre, la même image après filtrage des hautes fréquences par une transformée de Fourier. A droite, différence à la luminosité moyenne, en rouge les zones supérieures, en bleu les zones inférieures.

Dans les petites profondeurs, le *wave focusing* provoque des écarts de luminosité très importants entre les valeurs extrêmes, de facteurs supérieurs à 4, suffisants pour provoquer la plupart des saturations du capteur observées. Son impact décroît lorsque la hauteur d'eau augmente.

2.1.2. Ombre et soleil

2.1.2.1. Matériel et méthode

Dans les petits fonds, l'ombrage de la cible, en masquant le rayonnement solaire direct, permet de limiter l'influence du *wave focusing* [2][3]. Le but de cette expérimentation est de déterminer si, outre le fait de réduire les variations d'intensité lumineuse et les saturations, cet ombrage ne modifie pas les valeurs de réflectance mesurées.

Les expérimentations ont été réalisées le 13 août 2009 dans le lagon de l'Ermitage (Réunion) entre 50 cm et 1 mètre de hauteur d'eau. La Figure 15 ci-dessous présente la zone de travail ainsi que la localisation des 7 points de mesures. Sur l'ensemble de ces points, les réflectances à l'ombre et au soleil de 11 cibles différentes ont été acquises :

- Coraux
 - *Porites lobata*
 - *Porites rus*
 - *Pocillopora verrucosa*
 - Acropore digité
- Herbier
 - *Syringodium isoetifolium*
- Algues
 - Gazon algal (turf)

- Substrat
 - Fond détritique grossier
 - Fond détritique sableux
 - Fond détritique vaseux

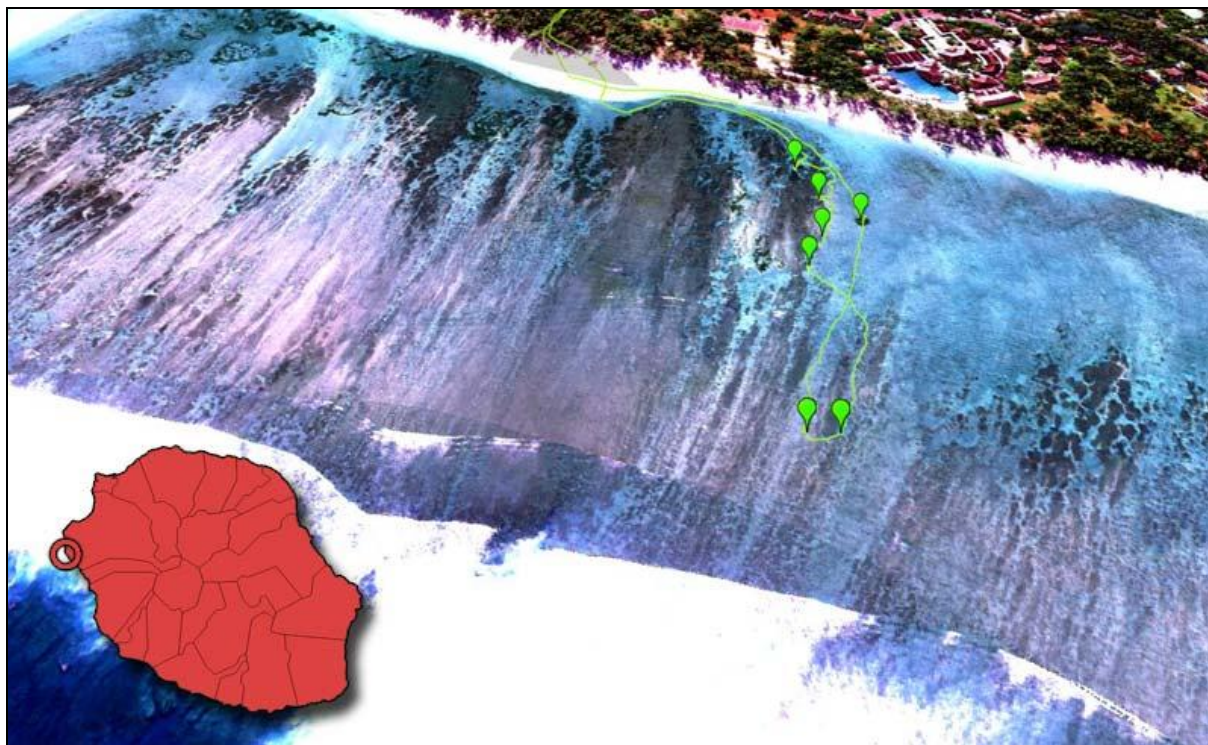


Figure 15. Carte de localisation des cibles échantillonnées dans le lagon de l'Ermitage (fond de carte : image hyperspectrale en couleurs visibles du 3 juin 2009).

2.1.2.2. Résultats

La Figure 16 ci-dessous présente 12 spectres de réflectance, correspondant à 6 cibles différentes, au soleil et à l'ombre.

Dans le visible (400 - 700 nm), pour toutes les longueurs d'onde et toutes les mesures, les cibles à l'ombre présentent des réflectances supérieures à celles des cibles au soleil. Pour certaines cibles, ces différences sont minimales (fonds détritiques, *Porites lobata*), alors que pour d'autres elles sont beaucoup plus importantes (*Porites rus*, herbier). Existe-il un lien entre réponse spectrale et la structure spatiale (et les ombres générées) ? Il semble que les différences entre ombre et soleil sont plus marquées sur les cibles à structures spatiales complexes (très découpées et rugueuses) que sur les cibles plus simples (plutôt planes et lisses).

Dans le proche infrarouge (à partir de 700 nm), les différences entre ombre et soleil semblent plus marquées, mais aussi plus aléatoires que dans le visible : dans 2 cas sur 6 la réflectance au soleil est supérieure à celle à l'ombre (fond détritique et *Porites lobata*). Connaissant la sensibilité du signal dans ces longueurs d'ondes, cette inversion

serait plutôt due à la méthode de mesure qu'à une réponse particulière de ces deux cibles (voir sensibilité dans le PIR, §A.2.2.2 page 46).

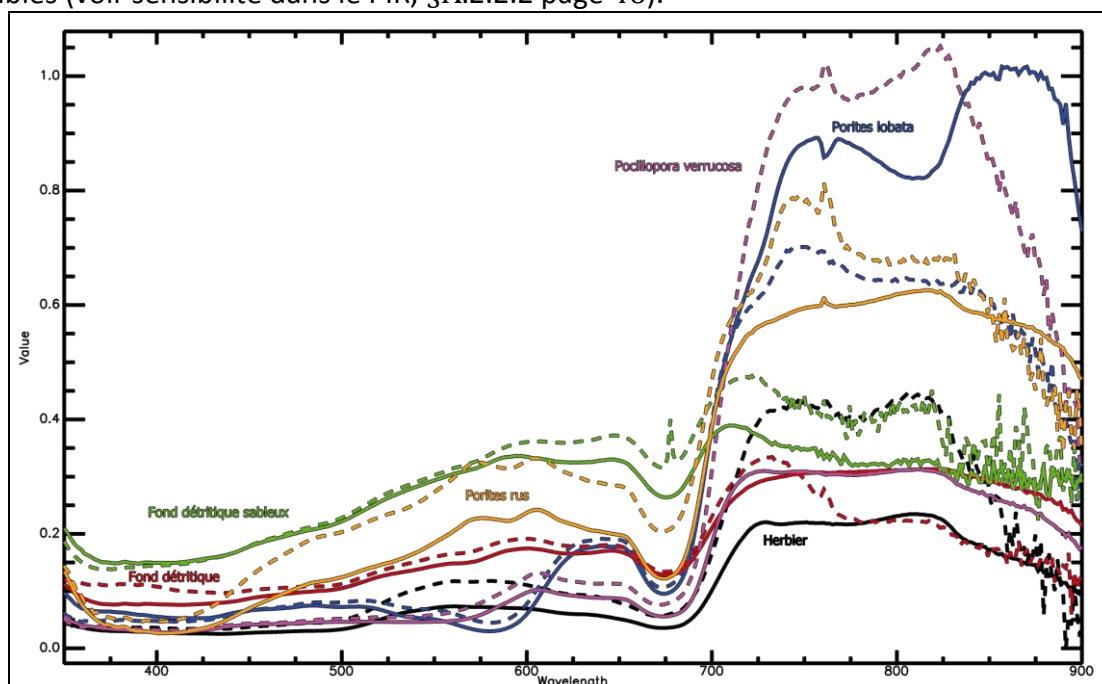


Figure 16. Comparaison entre mesures au soleil (trait continu) et mesures à l'ombre (trait en pointillés) pour quelques cibles benthiques (une couleur par cible).

Les moyennes des onze cibles à l'ombre et au soleil sont présentées sur la Figure 17 ci-dessous. Pour toutes les longueurs d'ondes, la courbe violette est toujours au dessus de la jaune, confirmant que la réflectance mesurée à l'ombre est supérieure à celle mesurée au soleil.

La surface grisée en arrière plan montre la différence relative entre les réflectances à l'ombre et au soleil. Cette différence croit avec la longueur d'onde : elle est pratiquement nulle aux environs de 350 nm et maximale aux alentours de 750 nm (près de 70 %). Dans le visible (400 – 700 nm) les mesures de réflectance à l'ombre sont supérieures en moyenne de 20 à 40 % à celles au soleil. Dans le proche infrarouge, cette différence moyenne est plutôt de l'ordre de 60 %.

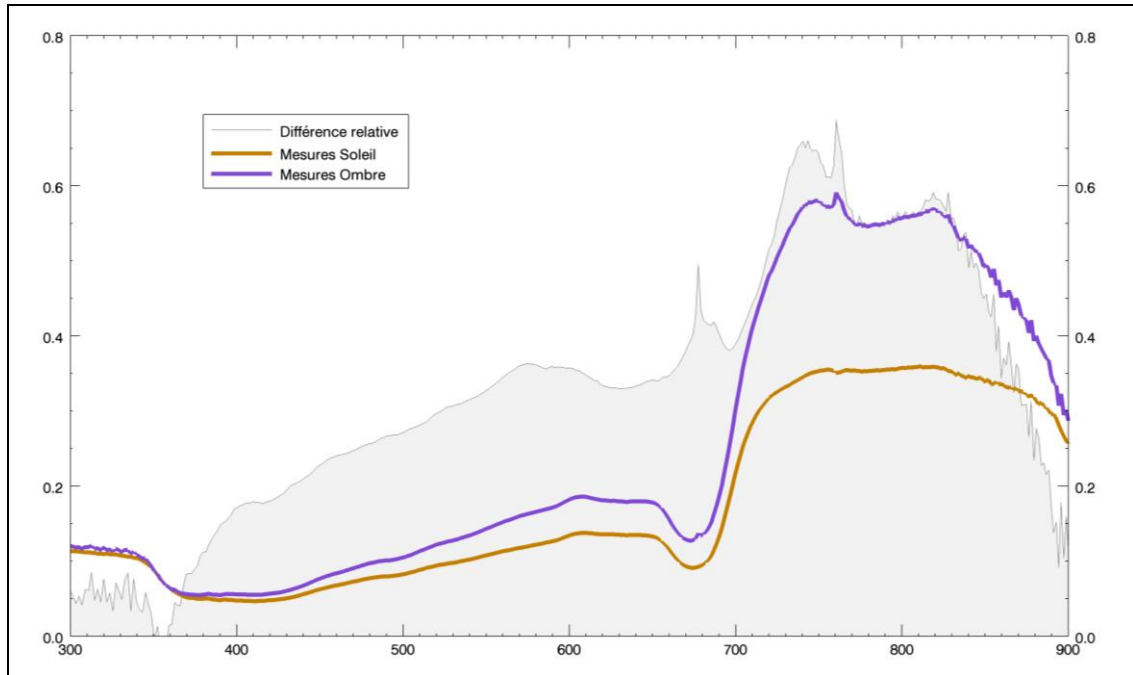


Figure 17. Comparaison entre les moyennes des valeurs à l'ombre (violet) et au soleil (orange). La surface représente la différence relative entre les mesures au soleil et les mesures à l'ombre.

La comparaison des écarts-types relatifs moyens (ETRM ; Figure 18 ci-dessous) ne montre pas de grandes différences entre les mesures à l'ombre et les mesures au soleil : contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'ombrage a peu d'influence sur les variations temporelles d'un enregistrement à l'autre. On observe cependant que dans les longueurs d'ondes visibles (400 – 700 nm), l'ETRM à l'ombre est légèrement inférieur (entre 3 et 5 %) à l'ETRM au soleil : les mesures au soleil sont légèrement plus dispersées autour de la moyenne que celles à l'ombre.

L'ombrage atténuant fortement les variations de luminosité observables sur le fond dues au soleil et à l'état de surface (*wave focusing*), il peut sembler étonnant que l'écart d'ETRM soit si faible. Ce phénomène peut s'expliquer par deux facteurs complémentaires agissant dans le même sens :

- Le nombre de mesures moyennées par enregistrement (32 dans les deux cas), et donc le temps d'intégration total pour chaque enregistrement au soleil (≈ 3 s) comme à l'ombre (≈ 5 s) est important par rapport au cycle des variations de luminosité sur le fond (de l'ordre de la seconde). Chaque enregistrement donne donc déjà une bonne approximation de la réflectance moyenne, à l'ombre comme au soleil.
- même si les déplacements du plongeur sont limités lors des mesures, l'ombre qu'il projette sur la cible est souvent peu homogène, mobile et du même ordre de grandeur que celle-ci, source de variabilité dans les mesures.
 - ⇒ L'atténuation des variations temporelles est sans doute contrebalancée en partie par une augmentation de l'hétérogénéité spatiale de l'éclaircissement.

Entre 700 et 850 nm, les ETRM sont très proches, de l'ordre de 17 %. Au-delà de 850 nm, la variabilité à l'ombre augmente de manière très importante. En raison de la très forte absorption du signal lumineux à ces longueurs d'onde, les écarts relatifs à l'ombre sont très importants, difficile donc d'établir une tendance moyenne. Pour une interprétation fiable du signal dans le proche infrarouge, il semble indispensable de travailler au soleil, avec une énergie lumineuse suffisamment forte.

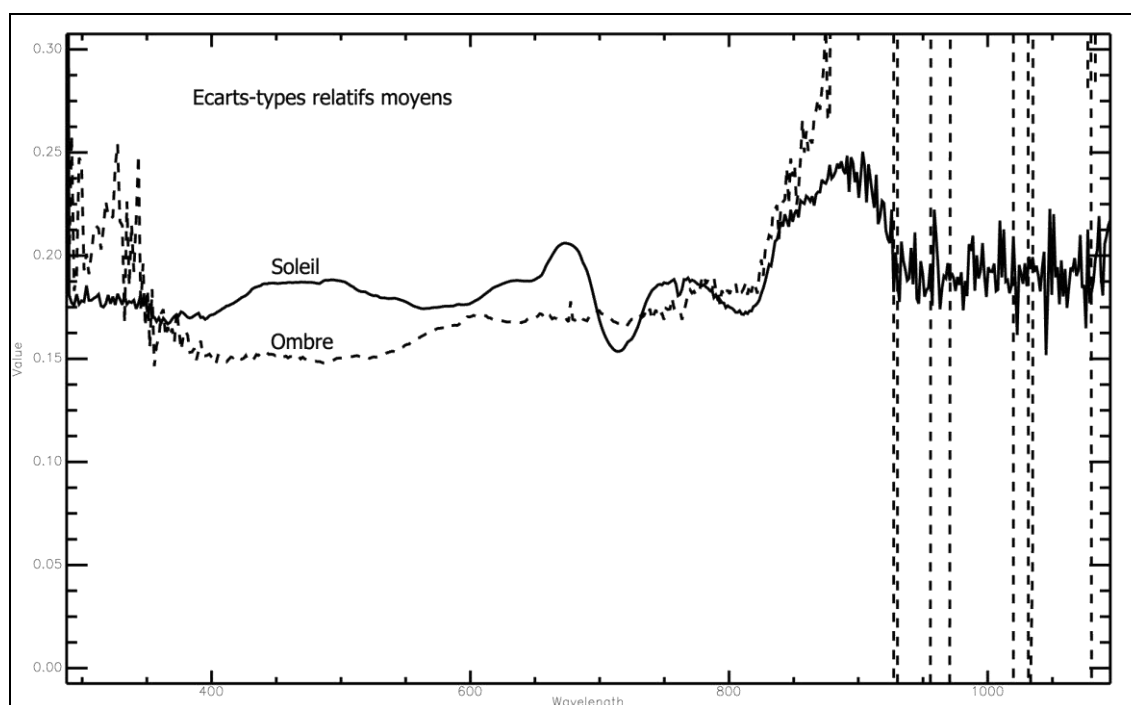


Figure 18. Comparaison des écarts-types relatifs moyens entre les cibles au soleil (trait continu) et les cibles ombrées (trait pointillés).

Concernant le phénomène de saturation, la Tableau 7 ci-dessous fait une synthèse du nombre de spectres saturés. Alors qu'au soleil 26 % des spectres enregistrés sont saturés, à l'ombre on ne note aucune saturation. Sur ces spectres saturés, plus des $\frac{2}{3}$ sont des mesures Spectralon (41 %) : la réflectance étant plus forte, la probabilité de saturation est supérieure.

Type	Spectralon Total	Spectralon Saturé	% Sat Spectralon	Cible Total	Cible Saturé	% Sat Cible	Total
Ombre	51	0	0 %	64	0	0 %	0 %
Soleil	64	26	41%	69	11	16%	26 %

Tableau 7. Saturation au soleil et à l'ombre.

L'ombrage de la cible à faible profondeur :

- Permet une **disparition totale de la saturation**, très importante au soleil avec près d'un spectre saturé sur deux.
- Provoque une **augmentation globale de la réflectance**, variable avec la longueur d'onde : entre 20 et 40 % dans le visible et près de 60 % dans le proche infrarouge.
- Produit une forte **augmentation du bruit à partir de 850 nm**.

2.2. Paramètres liés à la méthode de mesure

2.2.1. Moyenne des spectres, éclaircissement et saturation

2.2.1.1. Matériel et méthode

Le spectroradiomètre utilisé lors des campagnes terrain (Spectral Vista GER1500) est équipé d'une fonction permettant de moyenniser automatiquement entre 1 et 256 mesures par enregistrement. L'avantage de cette fonction est :

- de pouvoir intégrer automatiquement dans un seul enregistrement :
 - o la variabilité temporelle du signal (les n mesures sont effectuées successivement),
 - o la variabilité spatiale de la cible (les n mesures peuvent être effectuées sur une surface plus grande par un léger déplacement du radiomètre par le plongeur),
- de réduire le bruit (augmentation du rapport signal / bruit)
- de ne produire qu'un seul fichier en sortie et ainsi d'économiser l'espace mémoire de l'appareil (limité à moins de 500 enregistrements). Par exemple, sur la journée du 28 mai 2009 aux Glorieuses, les 276 enregistrements représentent près de 9000 mesures (qui auraient saturé la mémoire du spectroradiomètre 19 fois si chaque spectre avait été enregistré individuellement, incompatible avec les conditions de terrain).

L'inconvénient de cette moyenne est que le temps nécessaire à chaque enregistrement est multiplié par le nombre de mesures, avec apparition de nouvelles contraintes :

- nécessité pour le plongeur de se stabiliser sur le fond durant une plus longue période et donc augmentation du risque de mauvaise visée si les conditions sont défavorables (houle, courants, cible de petite taille, cible mobile).
- risque de variation de la luminosité (passages nuageux)
- risque de saturation (le temps d'intégration étant calculé automatiquement une seule fois avant la première mesure l'enregistrement).

Ces expérimentations ont été menées dans le but d'évaluer l'importance du nombre de mesures moyennées sur les valeurs de réflectance mesurées, et les effets de ce paramètre sur le phénomène de saturation.

Les mesures ont été réalisées la journée du 13 août 2009, entre 12h et 12h15 (soleil à l'altitude maximale, soit 54°) dans le lagon de l'Ermitage. La Figure 19 ci-dessous montre la localisation des expérimentations (carré vert).



Figure 19. Localisation des mesures radiométriques dans le lagon de l'Ermitage.

Sur la Figure 20 ci-dessous, on peut voir la structure de la colonie corallienne (*Porites* sp.) sur laquelle les mesures ont été réalisées, dans environ 1 mètre de hauteur d'eau.

Quatre séries de mesures successives ont été réalisées :

- A l'ombre, le plongeur, dos au soleil, projetant son ombre sur la cible. 32 mesures moyennées par enregistrement.
- Au soleil, le plongeur face au soleil tient le spectroradiomètre devant lui à bout de bras (pour perturber la mesure le moins possible). Toujours 32 mesures moyennées par enregistrement. C'est cette configuration qui a été retenue en début de campagne pour réaliser toutes les VT (Glorieuses, Geysier, Mayotte et la Réunion) et avec laquelle de nombreuses saturations ont été relevées par petits fonds.
- Au soleil, mais avec seulement 16 mesures par enregistrement (16 ou 32 mesures minimum avaient été conseillées pour effectuer les mesures sous-marines [1]).
- Au soleil, seulement 2 mesures moyennées par enregistrement.

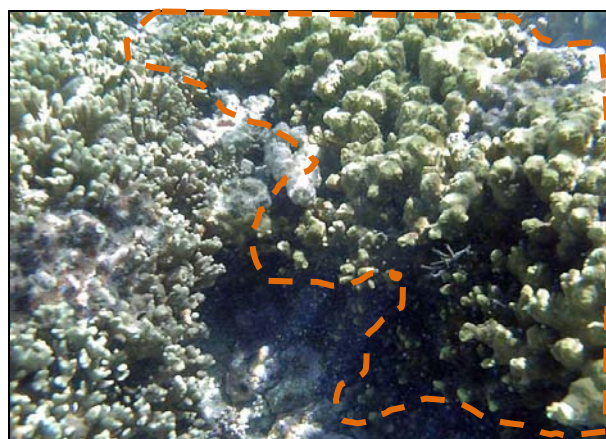


Figure 20. *Porites* sp. sur lequel ont été réalisées les mesures.

2.2.1.2. Résultats

Le Tableau 8 ci-dessous fait une synthèse des différents paramètres d'acquisition utilisés pour les 4 séries de mesures. Il présente aussi le nombre de mesures réalisées sur le Spectralon et sur les cibles, ainsi que le temps d'intégration total pour chaque type de mesure et la proportion de spectres saturés.

Pour un même nombre de mesures moyennées (32), le temps d'intégration total à l'ombre (36 secondes) est le double de celui au soleil (16 secondes). L'appareil compense la faible luminosité à l'ombre en adaptant automatiquement le temps d'intégration de chaque mesure.

Au soleil, malgré une augmentation considérable du nombre d'enregistrements réalisés entre le *type 2* et le *type 4* (6 contre 15), la réduction du nombre de mesures moyennées se traduit par une forte réduction du temps d'intégration total (18 secondes contre 3 secondes). Pour conserver un nombre de mesures équivalent en passant de 32 à 2 mesures par enregistrement il faudrait multiplier par 16 le nombre d'enregistrements. Dans le cas de nos expérimentations, il faut par exemple réaliser 96 enregistrements du *type 4* pour obtenir autant de mesures que les 6 enregistrements du *type 2*. Dans les conditions de terrain, l'augmentation du nombre d'enregistrements par cible semble difficile et conduirait à une saturation rapide de la mémoire de l'appareil.

Des saturations n'ont été constatées que pour les *type 2* et *type 3* : l'ombrage de la cible ou la réduction du nombre de mesures moyennées au minimum (2) permet d'éliminer totalement la saturation des spectres. Au soleil, que ce soit avec 16 ou 32 mesures, près du tiers des enregistrements est saturé (une saturation pour environ 3 secondes de temps d'intégration cumulé).

Type	Eclaircement	Nb Moy	Nb REF	Nb TAR	Tps intégration (automatique)	Tps int total TAR (s)	Nb Sat	% Sat
1	Ombre	32	3	7	160 ms	35,84	0	0
2	Soleil	32	10	6	80 – 160 ms	17,92	6	38
3	Soleil	16	6	10	40 – 160 ms	13,44	5	31
4	Soleil	2	12	15	40 – 160 ms	3,12	0	0

Tableau 8. Synthèse des paramètres d'acquisition.

Le graphique de la Figure 21 ci-dessous présente l'ensemble des spectres acquis lors de cette expérimentation. On note une très grande variabilité dans les valeurs. A 600 nm par exemple, la réflectance pour la même cible s'étale entre moins de 5 % et plus de 40 % (soit un facteur 8 !).

La courbe de droite Figure 21 présente les réflectances normalisées (spectres divisés par leur longueur vectorielle [4]). Les fortes différences de magnitude spectrale ne sont ici plus apparentes et les courbes se superposent parfaitement. La méthode de mesure, même si elle a un impact fort sur les niveaux de réflectance mesurés, ne modifie pas les profils spectraux, préservant ainsi les figures d'absorption caractéristiques des cibles.

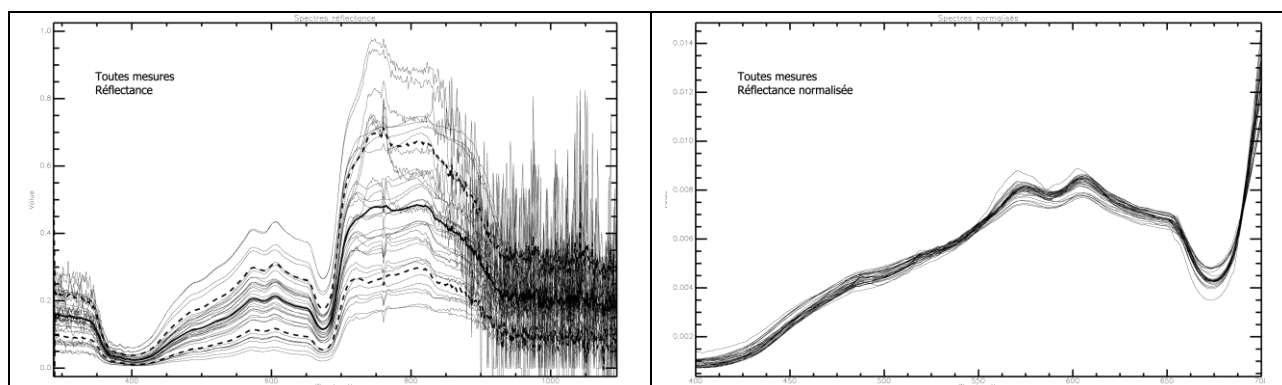


Figure 21. Synthèse des mesures effectuées sur une colonie corallienne (*Porites sp.*) avec plusieurs niveaux de moyennes. A gauche, courbes de réflectance. Les traits fins continus représentent les différentes mesures, la courbe épaisse la moyenne, et les deux courbes en pointillés la moyenne plus ou moins un écart type. A droite, les courbes de réflectance normalisée se superposent parfaitement.

La Figure 22 ci-dessous présente 4 graphiques pour les 4 expérimentations. La principale différence vient du bruit dans le proche infrarouge : sensible seulement à partir de 900 nm pour les mesures au soleil, il est présent dès 750 nm à l'ombre (et très important à partir de 900 nm). Sur les mesures au soleil, l'intensité du bruit est nettement liée au nombre de spectres moyennés : plus ils sont nombreux, plus elle est faible.

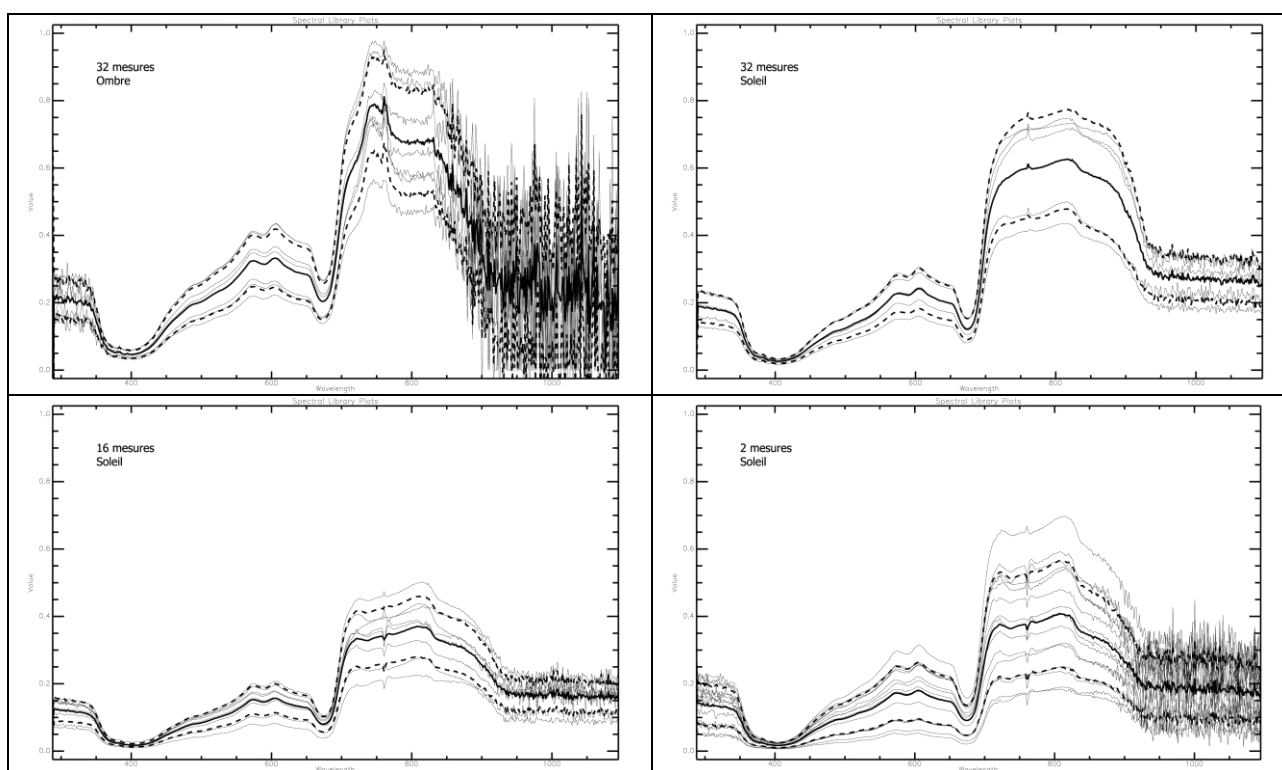


Figure 22. Détail des différentes mesures réalisées. Les traits fins continus représentent les différentes mesures, la courbe épaisse la moyenne, et les deux courbes en pointillés la moyenne plus ou moins un écart type. En haut à gauche mesures réalisées à l'ombre et à droite au soleil, avec une moyenne de 32 mesures par spectre. En bas, mesures réalisées au soleil, à gauche avec une moyenne de 16 mesures et à droite 2 mesures par spectre.

Figure 23 et Tableau 9 ci-dessous : comparaison des spectres et écarts types relatifs moyens. A 605 nm, la réflectance moyenne à l'ombre est de 33 % contre seulement 20 % pour les mesures au soleil : comme dans l'expérimentation précédente (§ 2.1.2), les valeurs à l'ombre sont nettement supérieures. Au soleil, le nombre de mesures moyennées par enregistrement ne semble pas jouer sur la réflectance (*type 4* intercalé entre *type 2* et *type 3*, tous par ailleurs très proches)

Le *type 4* (2 mesures au soleil par enregistrement) présente la plus grande amplitude entre les valeurs min et max avec 26 % de réflectance (entre 5 % et 31 %). C'est aussi ce type qui présente le plus grand écart-type relatif (47 %), nettement supérieur à celui des autres types de 16 mesures moyennées ou plus (soleil et ombre). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le temps d'intégration total de chaque enregistrement du *type 4* est faible par rapport au cycle des variations de luminosité au fond (cf. Tableau 8).

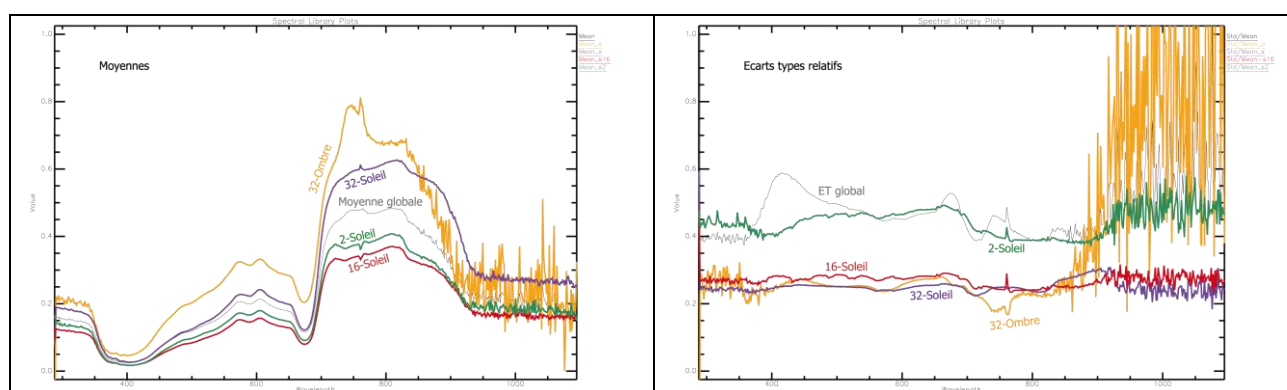


Figure 23. Comparaison des réflectances à l'ombre et au soleil avec 32, 16 et 2 mesures. En jaune, violet, rouge et vert les *types 1 à 4* respectivement. A gauche, les moyennes, à droite, les écarts types relatifs.

Type	Nom	Min _{605nm}	Moy _{605nm}	Max _{605nm}	ET _{605nm}	ET relatif _{605nm} (%)
1	Ombre – 32	0,22	0,33	0,43	0,087	26
2	Soleil – 32	0,16	0,24	0,31	0,059	25
3	Soleil – 16	0,08	0,16	0,21	0,043	27
4	Soleil – 2	0,05	0,18	0,31	0,084	47

Tableau 9. Comparaison des valeurs de réflectance et des écarts types relatifs à la longueur d'onde 605 nm.

Deux options permettent d'**éliminer** complètement la **saturation** des spectres de terrain due au phénomène de *wave focusing*. Elles pourraient être des solutions efficaces pour améliorer la qualité des mesures sous-marines : l'**ombrage** de la cible lors de la mesure et la **réduction du nombre de mesures moyennées** au minimum (toutes les valeurs intermédiaires entre 2 et 16 n'ont pas été testées). Ces options présentent cependant des différences notables par rapport à la mesure classique (32 mesures au soleil) qu'il convient de prendre en compte :

- A l'**ombre** la **réflectance** mesurée est très **supérieure** à la moyenne des **mesures au soleil** (+ 40 % à 605 nm).
- Avec le réglage de l'appareil sur **2 mesures** moyennées par enregistrement, l'**écart type relatif** à 605 nm est **supérieur de 80 %** à celui des 16 et 32 mesures.
- Une très **forte augmentation du bruit** à partir de 900 nm rendant l'interprétation dans le PIR plus difficile pour ces deux paramétrages.

La normalisation des spectres permet de s'affranchir de différences de magnitudes dues à l'éclairement et aux méthodes de mesure, pour ne laisser apparaître que les particularités spectrales réelles des différentes cibles.

2.2.2. Importance de la mesure Spectralon

2.2.2.1. Effets d'une variation de hauteur d'eau (1. Expérimentation)

L'expérimentation suivante permet de préciser les effets de la mesure Spectralon sur la qualité des spectres calculés, et notamment l'importance de respecter de la profondeur et la distance du spectroradiomètre par rapport à la référence et à la cible.

Mesures réalisées le 30 juillet 2009 dans le lagon de Mayotte au niveau de la passe de Longogori (Passe en S) avec une hauteur d'eau environ 2m. Des mesures de réflectance sur le fond ont été effectuées depuis la surface sur 6 types de nature de fond différents : sable, herbier, algues (*Dictyota sp.* et *Turbinaria sp.*) et deux cibles coralliennes (un corail massif et un acropore digité). Deux mesures Spectralon successives ont été réalisées (Figure 24 ci-dessous) :

- R1 : Spectralon au fond, distance spectroradiomètre – Spectralon : 50 cm
- R2 : Spectralon au fond, distance spectroradiomètre – Spectralon : 2 m

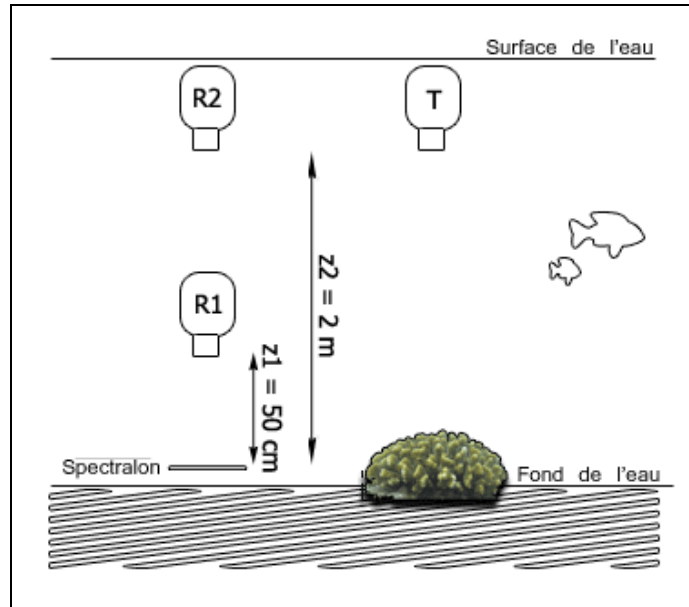


Figure 24. Illustration des deux hauteurs de mesures sur le Spectralon à 50 cm et 2 m. La distance cible-Spectralon reste constante.

La luminance du Spectralon est plus faible mesurée depuis la surface qu'à 50 cm du fond. Cette baisse de luminance provient de l'absorption du signal lumineux par l'épaisseur d'eau supplémentaire : dans le cas R2, la lumière, en effectuant un aller-retour complet surface-fond-surface, parcourt un trajet plus long que dans le cas R1. En effectuant le rapport de ces deux luminances, on met en évidence que les deux courbes ne dérivent pas l'une de l'autre par simple homothétie : la lumière n'est pas absorbée de manière uniforme sur toute la gamme spectrale. Après un plateau à 80 % entre 300 et 600 nm, l'absorption augmente fortement dans le proche infrarouge : à 725 nm, la luminance enregistrée en surface ne vaut plus que 40 % de ce qu'elle valait à 50 cm du fond (Figure 25 à droite).

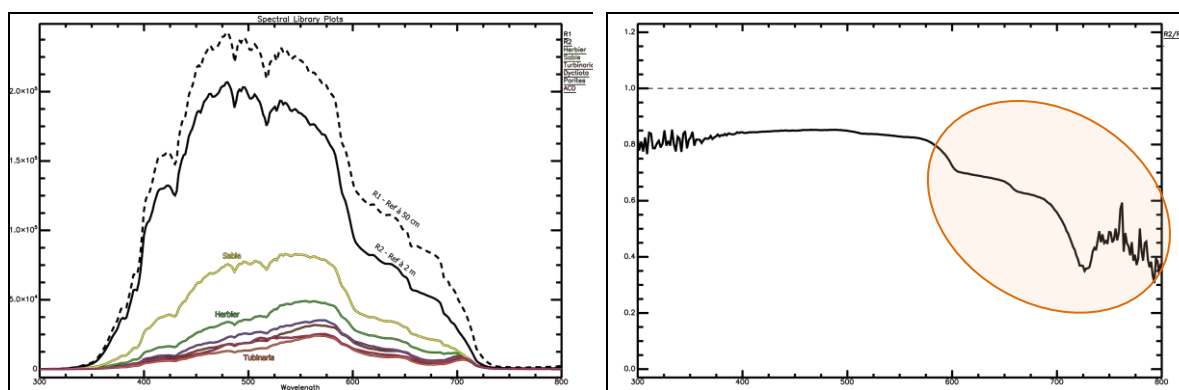


Figure 25. A gauche, spectres de luminance au capteur par 2 mètres de hauteur d'eau dans le lagon de Mayotte. Deux mesures successives ont été réalisées sur le Spectralon posé au le fond, avec le spectroradiomètre depuis la surface (2 m d'épaisseur d'eau, courbe continue), avec le spectroradiomètre au fond (50 cm d'épaisseur d'eau, courbe en pointillées). A droite, le rapport entre les mesures sur le Spectralon à 50 cm et à 2 m montre une atténuation plus forte entre 600 et 900 nm.

La réflectance se calculant par le rapport entre la luminance de la cible et celle du Spectralon, l'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux mesures Spectralon comme référence n'a pas pour seule conséquence une modification du niveau moyen de réflectance, mais aussi une déformation du profil de la courbe (la forme), illustré en détail par la Figure 26.

Dans le visible, de 300 à 575 nm, le profil des courbes n'est pas modifié, seule une baisse globale de réflectance de 20 % environ est sensible. Au-delà de 575 nm et jusque dans le proche infrarouge, la baisse relative de réflectance est plus importante. Ce comportement différentiel selon la longueur d'onde se traduit par une modification de la forme des courbes, caractérisée par une atténuation plus forte de la réflectance quand la longueur d'onde augmente. Cette modification des amplitudes provoque dans le rouge et le PIR surtout, l'atténuation, l'apparition (herbier, sable) ou le déplacement (coraux, algues) des minima locaux, variables selon les cibles.

Ce phénomène a un impact important et peut donc représenter un risque pour l'analyse des résultats (mauvaise identification des espèces, fausse variabilité, etc.).

Par contre, la prise comme référence de l'une ou l'autre des deux mesures Spectralon ne modifie pas la position relative des courbes de réflectance sur la série de mesures : le sable reste dans les deux cas la cible la plus réfléchante et l'algue rouge *Turbinaria sp.* toujours la plus faible, les autres cibles intermédiaires gardant le même ordre.

Lors du traitement des images hyperspectrales, si l'identification des différents types de nature de fond est basée sur les niveaux de réflectance relatifs, ce phénomène peut n'avoir qu'un impact limité sur les résultats.

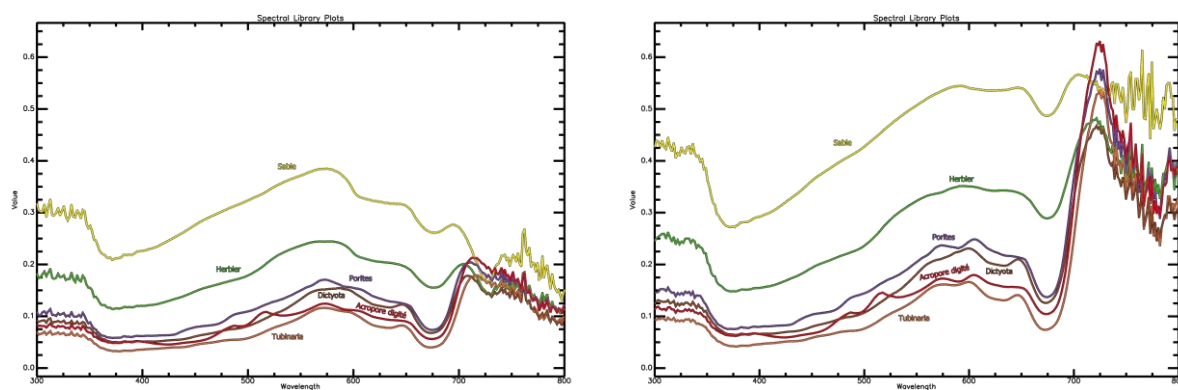


Figure 26. Comparaison des réflectances calculées avec deux mesures Spectralon différentes : à gauche Spectroradiomètre à 50 cm du Spectralon, à droite à 2 mètres. Les profils de courbes sont nettement modifiés par cette différence de hauteur d'eau.

Un déplacement vertical du spectroradiomètre entre la mesure de référence et la mesure sur la cible a un impact important sur la réflectance calculée. La modification de l'épaisseur de la colonne d'eau traversée par le signal lumineux produit des variations de la magnitude, mais aussi du profil spectral. Les effets sont beaucoup plus sensibles dans le rouge et le proche infrarouge où l'absorption par la colonne d'eau est la plus forte. Selon leur localisation les figures de réflectance peuvent ainsi être atténuées, amplifiées ou déplacées vers des longueurs d'ondes supérieures ou inférieures en fonction du signe et de l'importance de la variation de profondeur.

2.2.2.2. Effets d'une variation d'épaisseur d'eau (2. Modélisation)

Dans cette partie, on cherche à évaluer de manière théorique, à partir de données modélisées, les effets d'une variation en cours de mesure de l'épaisseur d'eau sur les spectres enregistrés. Les calculs ont été réalisés pour des variations de profondeur autour de la mesure réelle comprises entre moins un mètre et plus un mètre. L'équation d'atténuation du signal dans l'eau (§2.3.1 page 52) a été appliquée avec un coefficient d'atténuation du signal, K_λ calculé en piscine entre 0 et 1,85 m et une réflectance à profondeur infinie $R_{\infty,\lambda}$ considérée nulle.

La Figure 27 ci-dessous illustre deux exemples pour lesquels le chemin optique dans l'eau (entre la surface de la mer et l'objectif du spectroradiomètre) est différent entre les mesures sur le Spectralon et celles sur la cible. Deux cas de figure peuvent se présenter :

- Le Spectralon est placé à une profondeur supérieure ou inférieure par rapport à la cible mesurée (la distance Spectroradiomètre – Spectralon et Spectroradiomètre – cible restant constante), Figure 27 à gauche. Exemple : mesures sur des colonies coralliennes hétérogènes et/ou de petites tailles peu propices au positionnement du Spectralon au même niveau que la cible.
- Une différence entre les distances Spectroradiomètre – Spectralon et Spectroradiomètre – cible (Spectralon et cible étant positionnés à la même profondeur), Figure 27 à droite. Exemple : difficultés de positionnement du plongeur dans la masse d'eau (forts courants, houle) provoquant de légers déplacements de l'appareil lors des mesures.

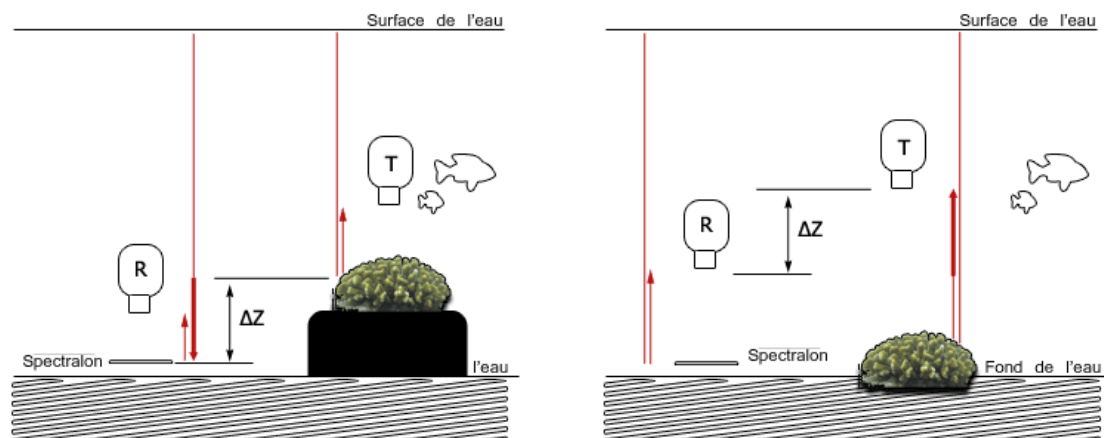


Figure 27. Illustration de possibles variations d'épaisseur de la colonne d'eau traversée par le signal lumineux entre le Spectralon et la cible. ΔZ = différence d'épaisseur d'eau entre la mesure Spectralon R et la mesure cible T, par exemple positive si le Spectralon est plus profond (à gauche), et négative si la mesure sur la cible est réalisée de plus loin (à droite).

La Figure 28 ci-dessous montre les résultats obtenus pour trois cibles vivantes présentant des spectres caractéristiques (Acropore digité, Herbière et Turf algal). Sur ce graphique, les cinq courbes par cible représentent chacune des différences de chemin optique entre la mesure Spectralon et la mesure cible (- 1 m, - 0,5 m, 0, + 0,5 m et + 1 m).

Comme pour l'expérimentation précédente (§2.2.2.1), on observe non seulement une variation du niveau global de réflectance, mais aussi une modification des profils spectraux, plus importante dans les grandes longueurs d'onde (rouge). Le coefficient d'atténuation K_λ étant croissant avec la longueur d'onde, la différence de réflectance, plutôt faible dans le bleu (entre 400 et 500 nm), est beaucoup plus importante dans le rouge (600 – 650 nm). En fonction des cibles et de leurs caractéristiques (position et importance relative des différentes figures spectrales), les effets sur les courbes de réflectance sont différents :

- Acropore digité : quelles que soient les profondeurs, les trois épaulements, caractéristiques d'un corail brun sont présents à 575, 600 et 650 nm. On note cependant une inversion de l'importance des deux premiers pics entre les deux distances extrêmes, l'optimum passant de 575 nm à - 1 m (chemin optique Spectralon plus court, Figure 27 à droite), à 600 nm à + 1 m (chemin optique Spectralon plus long, Figure 27 à gauche).
- Herbière : en raison de la faible pente de la réflectance entre 550 et 650 nm, le profil de la courbe est rapidement modifié par la modification de chemin optique de + 50 cm : en plus du pic de réflectance classique vers 550 nm (cf. fiche *Herbières* de l'analyse par type), il y a apparition d'un second pic artificiel vers 600 nm, qui se renforce à + 1 m. Les herbiers ayant une structure souple, la mise en place du Spectralon pour la mesure de référence provoque l'aplatissement

des feuilles, proportionnellement à leur taille et leur caractère érectophylle, reproduisant cette configuration (cas de gauche Figure 27).

- Turf algal : Pour cette cible, les deux pics de réflectance sont préservés, par contre, entre - 1 m et + 1 m, le premier pic se déplace de 580 nm à 602 nm entre (position réelle à 596 nm).

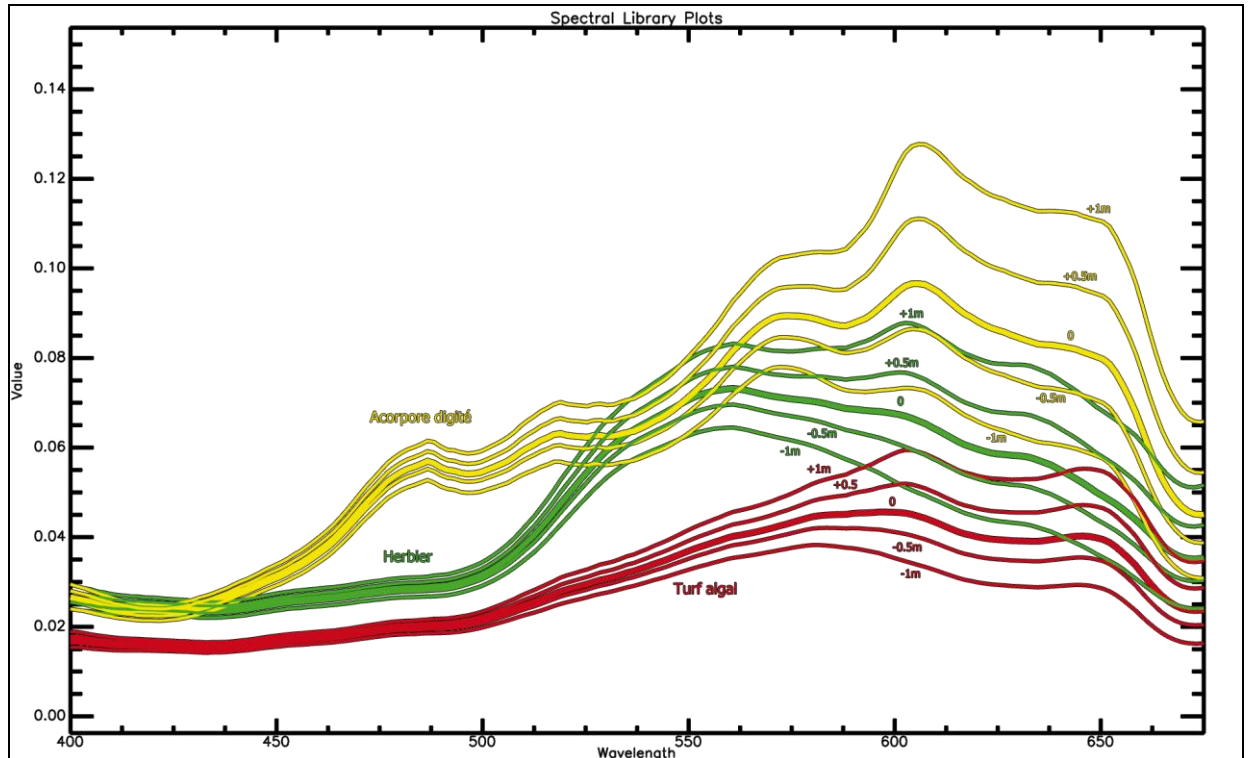


Figure 28. Illustration des effets théoriques d'un changement de profondeur (différence de longueur des chemins optiques dans l'eau entre les mesures Spectralon et cible) sur les spectres calculés à partir du modèle d'atténuation du signal lumineux dans l'eau sur trois cibles de terrain. En jaune un acropore digité, en vert un herbier de *Syringodium isoetifolium*, en rouge un gazon algal recouvrant un corail mort. En trait épais les spectres initiaux, en traits fins les différents spectres calculés.

Même si les différences de profondeurs simulées ici sont supérieures à celles qui se produisent réellement sur le terrain (plutôt de l'ordre d'une vingtaine de centimètres), elles permettent de montrer que leur impact sur les mesures n'est pas neutre, notamment par une variation des niveaux de réflectance mesurés et une modification des profils spectraux.

Le second intérêt de cette expérimentation est de mettre en évidence les effets négatifs que peut produire une mauvaise évaluation du chemin optique dans l'eau sur le passage en réflectance. Dans le cadre de la Phase 2 du projet Spectrhabet-OI, il est prévu de développer une méthodologie de correction de la partie immergée des images hyperspectrales à partir notamment de données bathymétriques issues du traitement

des données Lidar. Le but étant de soustraire l'atténuation du signal par la colonne d'eau pour produire des images en pseudo-réflectance au niveau du fond marin, indépendantes de la hauteur d'eau.

La résolution théorique des données Lidar est de 5 mètres en (X,Y), avec une précision en Z de 25 cm. Si le modèle d'atténuation du signal lumineux dans la colonne d'eau développé est du même type que celui utilisé pour cette expérimentation (cf. §2.3.1), cette incertitude sur la hauteur d'eau, même faible, aura des effets similaires : une modification des profils spectraux, comme illustré dans la figure précédente. A cause du trajet aller-retour du rayonnement lumineux dans la masse d'eau, cette imprécision en Z de 25 cm aurait les mêmes effets sur les spectres que les 50 cm de différence illustrés Figure 28. Ainsi, dans les exemples précédents les effets seraient notamment l'apparition d'un second pic de réflectance à 600 nm pour les herbiers et le déplacement du premier pic du turf algal, etc.

De plus, la taille importante des pixels bathymétriques Lidar (5 m) par rapport à ceux de l'hyperspectral (entre 40 cm et 2m), en fournissant une information moyennée sur une plus grande surface, pourrait entraîner de fortes imprécisions sur la hauteur d'eau évaluée dans chaque pixel image. Les effets seraient plus sensibles dans les zones hétérogènes présentant de brusques variations de bathymétrie.

2.3. Autres expérimentations

2.3.1. Atténuation de la luminance avec la profondeur

Des mesures de radiométrie ont été effectuées dans le but de préciser les paramètres physiques liés à la masse d'eau au moment des acquisitions. Ces données pourront notamment être utilisées pour la correction du signal lumineux dans la colonne d'eau (calcul des coefficients, données de validation).

Les expérimentations ont été menées aux Glorieuses la journée du 25 mai 2009 entre 12h23 et 12h34 (altitude solaire : 56°) sur une pente sableuse homogène et régulière, de profondeur comprise entre 3 et 40 m. La Figure 29 ci-dessous présente la localisation des mesures : au nord-ouest de l'île de Grande Glorieuse à une distance comprise entre 300 et 750 mètres du trait de côte, perpendiculairement à rivage. A droite, protocole de mesure : le spectroradiomètre est maintenu en surface depuis l'embarcation, en position verticale, orienté vers le bas. A chaque point de mesure, en même temps qu'un relevé de profondeur, entre 3 et 5 enregistrements successifs du fond ont été acquis.

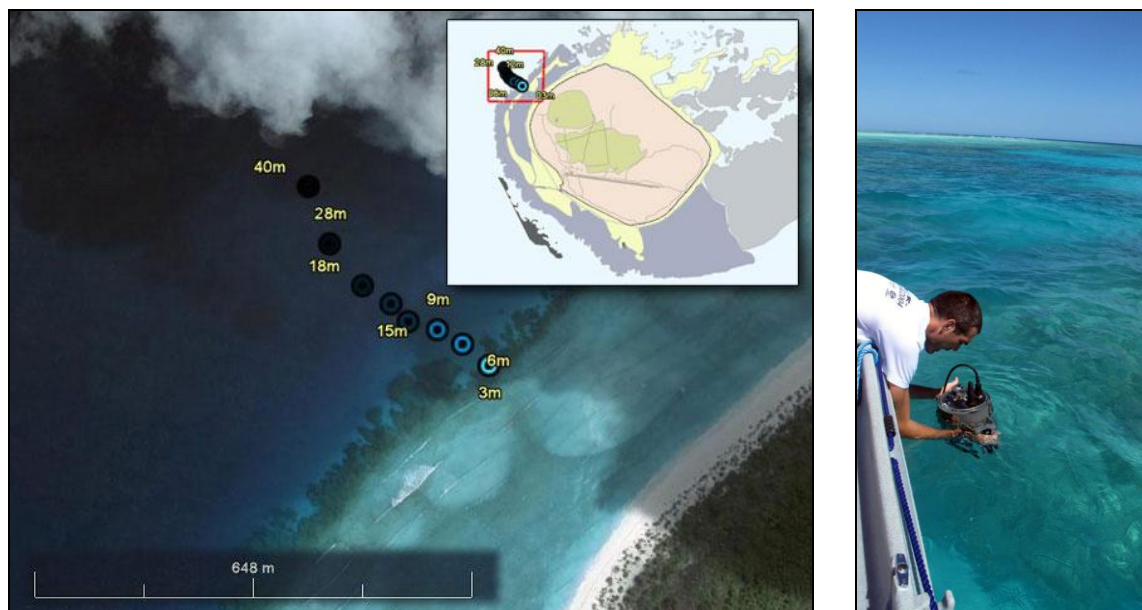


Figure 29. Mesures de luminance sur une pente sableuse au nord ouest de l'île de Grande Glorieuse. A gauche la carte de localisation, à droite mesures en cours par 3 mètres de profondeur.

La Figure 30 ci-dessous présente les mesures de luminance enregistrées pour les profondeurs de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 28 et 40 mètres (les valeurs de réflectance n'ont pas été calculées car les mesures de référence effectuées sur le Spectralon, présentant des figures de saturation, risquaient de fausser les données)

Pour les longueurs d'ondes inférieures à 350 nm et supérieures à 700 nm, la luminance est pratiquement nulle à toutes les profondeurs. Entre ces extrêmes, la luminance mesurée décroît progressivement entre 3 et 40 mètres, de manière différentielle selon la longueur d'onde. Très fortement atténuée dans le rouge et le PIR, entre 600 et 700 nm, la luminance est pratiquement nulle dès 9 m de profondeur. Dans le visible, entre 350 et 600 nm, cette décroissance est beaucoup plus progressive, avec un signal toujours perceptible à 40 mètres.

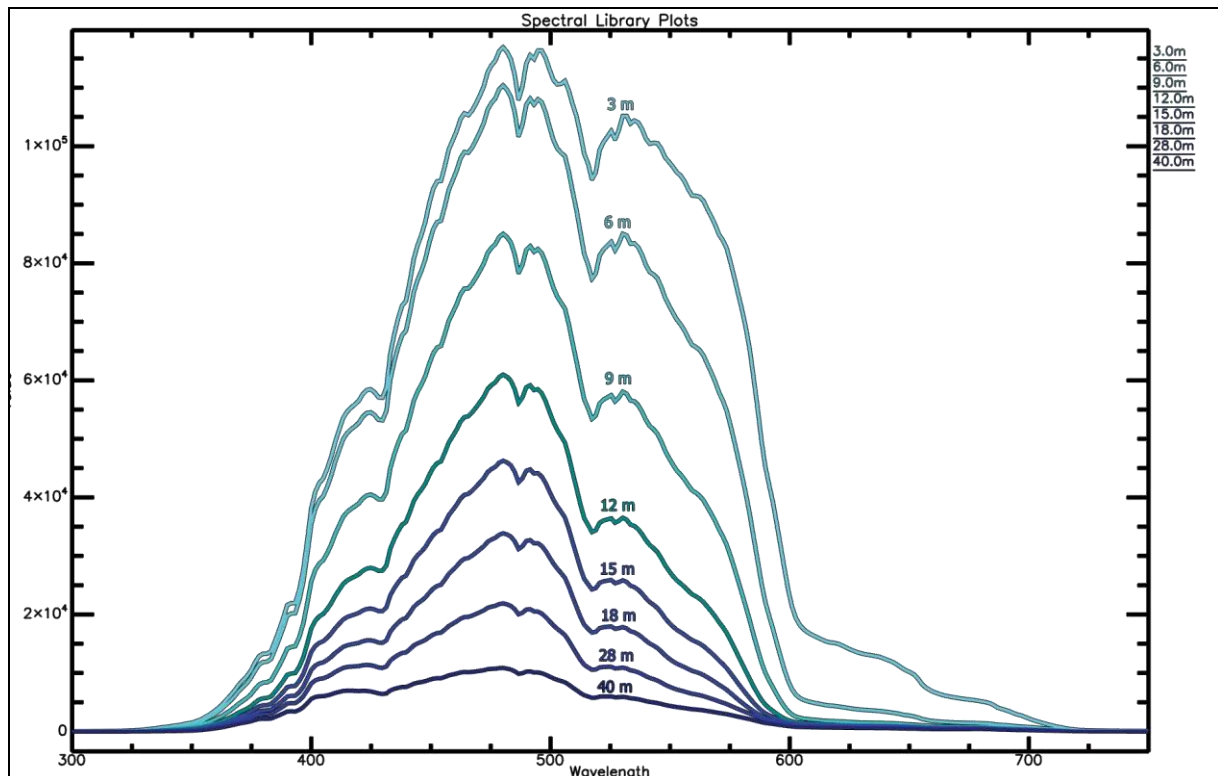


Figure 30. Evolution de la luminance mesurée sur un fond sableux en fonction de la profondeur.

A partir de ces données de terrain, des coefficients contrôlant l'absorption du signal lumineux dans la masse d'eau peuvent être calculés. L'équation d'atténuation du signal utilisée est la suivante [5], [6] :

$$R_{\lambda} = R_{\infty,\lambda} + (R_{0,\lambda} - R_{\infty,\lambda}) \cdot e^{-2K_{\lambda} \cdot P} \quad (1)$$

Avec R_{λ} : Réflectance (ou luminance) apparente en surface pour la longueur d'onde λ

$R_{\infty,\lambda}$: Réflectance (ou luminance) à la profondeur infinie pour la longueur d'onde λ

$R_{0,\lambda}$: Réflectance (ou luminance) à une profondeur nulle pour la longueur d'onde λ

K_{λ} : Coefficient d'atténuation du signal lumineux pour la longueur d'onde λ

P : Profondeur

En prenant le logarithme népérien, cette équation équivaut à :

$$\ln(R_{\lambda} - R_{\infty,\lambda}) = \ln(R_{0,\lambda} - R_{\infty,\lambda}) - 2K_{\lambda} \cdot P$$

Ce qui est l'équation d'une droite du type : $y = a + bx$

Avec $y = \ln(R_{\lambda} - R_{\infty,\lambda})$, $x = P$

$a = \ln(R_{0,\lambda} - R_{\infty,\lambda})$, $b = -2K_{\lambda}$

La pente de cette droite permet de calculer le coefficient K_λ .

La Figure 31 ci-dessous montre les résultats du calcul du coefficient d'atténuation K_λ en fonction de la longueur d'onde. Le paramètre $R_{\infty,\lambda}$ a été approximé par la luminance mesurée à 40 mètres de profondeur (des mesures plus profondes permettraient de valider que la luminance limite est atteinte ; expérimentations envisagées dans le cadre de la campagne de terrain complémentaire menée en 2010).

Entre 300 et 600 nm, les valeurs de K_λ calculées sur le site de Glorieuses par cette expérimentation sont du même ordre de grandeur que la littérature [5], [7]. A partir de 600 nm, les valeurs calculées de K_λ décroissent anormalement, ce qui n'est ni en accord avec la littérature ni avec les mesures de luminance (Figure 31 à droite, courbe rouge).

Pour les grandes longueurs d'onde, la courbe perd sa linéarité et prend rapidement une forme convexe (pente croissante \Leftrightarrow dérivée seconde positive) lorsque la profondeur augmente (à gauche Figure 31). Plus la longueur d'onde est forte, plus cette courbure intervient tôt avec la profondeur. Les coefficients ont donc été calculés sur les premières valeurs de profondeur, entre 3 et 12 mètres pour toutes les longueurs d'ondes, de manière à rester dans la partie linéaire des courbes.

Le graphique de droite montre qu'en réalité, pour les longueurs d'ondes supérieures à 600 nm, la linéarité de la courbe n'est jamais atteinte, même dans les petits fonds (entre 3 et 12 mètres) : on observe une forte augmentation du paramètre $KI-SQR$ à partir de 600 nm, qui traduit une non linéarité du paramètre I_λ avec la profondeur, même entre 3 et 12 mètres. Comme on le voit sur la Figure 30, la quantité d'énergie lumineuse pénétrant jusqu'à une profondeur de 12 mètres est presque nulle à 600 nm : les limites du modèle défini par l'équation (1) semblent atteintes, et celui-ci ne peut donc être utilisé.

Pour calculer le coefficient K_λ au-delà de 600 nm, il serait indispensable de travailler dans des profondeurs beaucoup plus faibles où l'énergie lumineuse est encore forte et avec un pas d'échantillonnage plus fin (entre 0 et 1 m tous les 10 cm par exemple).

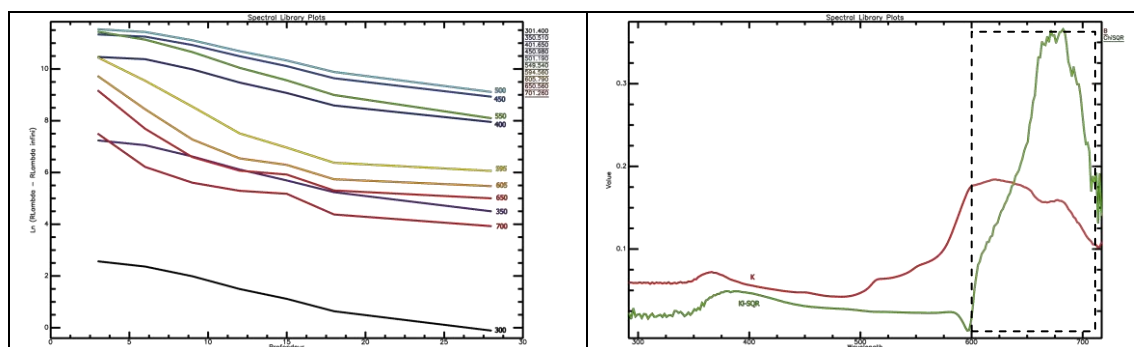


Figure 31. Calcul du coefficient d'absorption du signal lumineux dans l'eau en fonction de la longueur d'onde. A gauche, droites pour différentes longueurs d'ondes ayant pour coefficient directeur la valeur $-2K_{\lambda}$. A droite, coefficient K_{λ} calculé par régression linéaire sur les valeurs 3, 6, 9 et 12m (courbe rouge), et paramètre $KI-SQR$ donnant une statistique de qualité de la régression (courbe verte).

Dans le but de vérifier l'hypothèse ci-dessus, une nouvelle expérimentation a été effectuée en piscine avec des profondeurs comprises entre 0 et 1,85 mètre. La Figure 32 ci-dessous présente ces résultats. La luminance à la profondeur infinie, impossible à mesurer en piscine (profondeur limitée) a été estimée nulle.

Entre 0 et 1,85 mètres, la linéarité est conservée jusqu'à 700 nm, soit sur 100 nm de plus que les mesures Glorieuses. A partir de 725 nm le paramètre $KI-SQR$ augmente fortement : limites du modèle, profondeur trop importante et luminance trop faible.

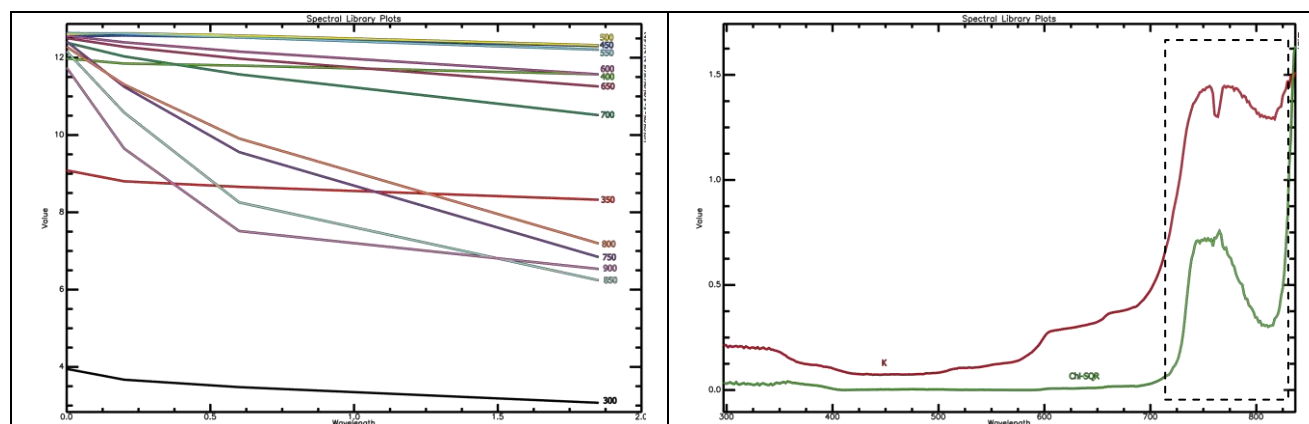


Figure 32. Calcul du coefficient d'absorption du signal lumineux dans l'eau en fonction de la longueur d'onde en piscine. A gauche, droites de pente $-2K_{\lambda}$. A droite, K_{λ} calculé entre 0 et 1,85 m (courbe rouge), et paramètre $KI-SQR$ donnant une statistique de qualité de la régression (courbe verte).

2.3.2. Effet de la profondeur sur les réflectances mesurées

Malgré la calibration des mesures par le Spectralon, la hauteur d'eau a une influence non négligeable sur la réflectance calculée.

Dans les faibles hauteurs d'eau (à une profondeur inférieure à 8 mètres), le minimum de réflectance vers 670 nm dû à la chlorophylle est retrouvé systématiquement sur toutes les cibles analysées, qu'elles soient coralliennes, algales ou minérales (voir par exemple

sur du sable Figure 36). Pour tous les types de nature de fond, plus la profondeur augmente, plus la position de ce pic d'absorption se décale vers le bleu. La Figure 33 ci-dessous illustre le phénomène sur différentes cibles sableuses de la base de données.

Partant d'une position à 674,4 nm à 80 cm sous la surface, le minimum de réflectance se déplace progressivement vers la gauche (vers les faibles longueurs d'ondes) lorsque la profondeur augmente, pour atteindre 666,4 nm à 8 mètres de profondeur. Ce déplacement s'accompagne d'une baisse de l'amplitude du pic.

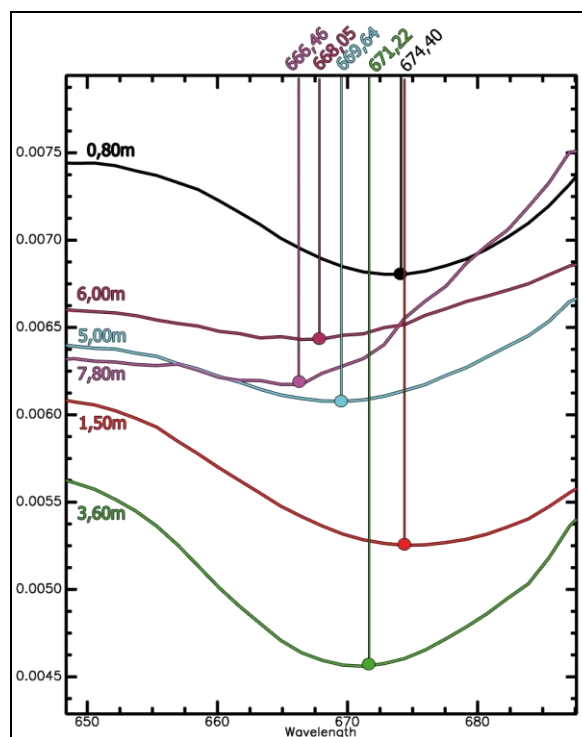


Figure 33. Evolution de la position du minimum de réflectance dans le rouge en fonction de la profondeur, sur des fonds sableux.

Le Tableau 10 ci-dessous montre l'évolution de la fréquence d'occurrence de minimums entre 650 et 680 nm en fonction de la profondeur³. Pour étudier statistiquement les données, le pic d'absorption de la chlorophylle autour de 675 nm étant omniprésent dans tous les types de nature de fond, toutes les mesures ont été regroupées par profondeur sans tenir compte du type de cible.

³ Minimums et maximums locaux déterminés par annulation de la dérivée première, le signe de la dérivée seconde (concavité) permet de préciser si le point est un minimum (dérivée 2nde positive) ou un maximum (dérivée 2nde négative). Le calcul de la dérivée est effectué sur la courbe de réflectance lissée (moyenne glissante sur 3 valeurs) de manière à limiter le bruit. La position exacte de l'extrémum local est déterminée sur la courbe de réflectance dans une fenêtre de 5 longueurs d'onde autour du point d'annulation de la dérivée. Les positions des extrémums locaux sont ensuite sommées (-1 pour une valeur minimum, +1 pour une valeur maximum) pour toutes les cibles du type. Des pics (positifs ou négatifs) apparaissent ainsi aux longueurs d'ondes où les occurrences sont les plus fréquentes. Les chiffres associés aux principaux pics expriment le pourcentage de cibles contributives par rapport au nombre total spectres de ce type.

On peut identifier 3 phases en fonction de la profondeur de mesure :

- Entre 0 et 5 mètres, les spectres présentent un minimum local de réflectance entre 665 et 675 nm. Plus la profondeur augmente, plus la position de ce pic se décale vers le bleu, passant de 674,40 nm à 669,64 nm entre 0 et 4 mètres. A toutes les profondeurs le pic d'occurrences est bien marqué : une majorité de mesures présente un minimum de réflectance.
- Entre 5 et 9 mètres de fond, il n'y a plus de pic de fréquences d'occurrences net, mais plutôt des minimums de réflectance épars dont la position est variable entre 660 et 675 nm. En raison de la faible intensité lumineuse dans le proche infrarouge à ces profondeurs (forte absorption par la colonne d'eau), une plus grande sensibilité de la mesure aux variations de hauteur d'eau produites par l'opérateur ou l'état de surface pourrait expliquer ce phénomène.
- A partir de 10 mètres, on n'observe plus de pic d'occurrences. Le très faible nombre de mesures présentant un minimum local entre 650 et 680 nm serait plutôt dû à un phénomène aléatoire (bruit de fond). Le profil des courbes spectrales à 9,9 m et 16 m de profondeur Figure 36, confirme la disparition de ce pic d'absorption dans les grandes profondeurs.

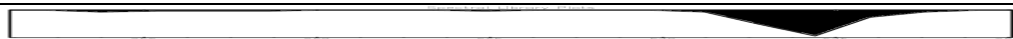








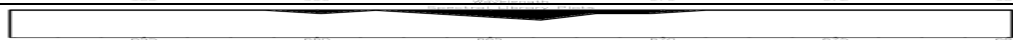






Prof (m)	Occurrences du minimum de réflectance à 675 nm (proportions relatives).	Nb mesures
0		81
1		163
2		51
3		30
4		17
5		42
6		18
7		23
8		36
10		34
11		22
12		9
13		4
14		14
16		8
		

Tableau 10. Déplacement et modification du pic d'absorption de la chlorophylle en fonction de la profondeur. Les valeurs de profondeur sont tronquées (la ligne 1m correspond ainsi aux profondeurs comprises entre 1 m et 1,9 m).

Les mesures de radiométrie sous-marines, quelle que soit la nature du substrat, sont très sensibles à la hauteur d'eau. Plus la profondeur augmente plus ses effets sont importants : pratiquement négligeable entre 0 et 5 mètres (léger décalage vers le bleu), un filtrage est indispensable à partir de 5 mètres pour éliminer les mesures aberrantes, et au-delà de 8 à 10 mètres les déformations des courbes spectrales dans le rouge et le proche infrarouge (< 600 nm) sont telles que la comparaison avec les mesures réalisées moins profond est quasiment impossible.

3. Facteurs biologiques

3.1. Paramètres de la base de données

La constitution et l'analyse de la base de données sont des étapes préalables à celle du traitement des images hyperspectrales dont le but est de produire des cartographies d'habitats précises. Dans le cadre de cette approche, l'identification des différentes cibles coralliennes jusqu'à l'espèce n'a pas été nécessaire (sauf genres ou cas évidents). Un regroupement relativement simple, privilégiant la structure spatiale (massive, branche, tabulaire, encroûtante, etc.) a été retenu.

A chaque enregistrement de la librairie spectrale a été attribué un code unique basé sur le type d'animal (coraux), de végétal (algues, herbiers) ou la nature du substrat (minéral). Cette codification a été établie sur la base de typologies « de références » développées par l'ARVAM dans le cadre d'IFRECOR (Initiative Française pour les Récifs Coralliens). Elle est présentée dans Figure 34.

Des codes complémentaires ont été créés pour la description de cibles originales, dont les signatures spectrales particulières nécessitent de les différencier en sous-catégories :

- les *Algues dressées (AD)* en trois sous-types :
 - o les *Algues rouges (RMA)*,
 - o les *Algues vertes (GMA)*
 - o les *Algues brunes (BMA)*
- Les *Coraux blanchis (CBL)*

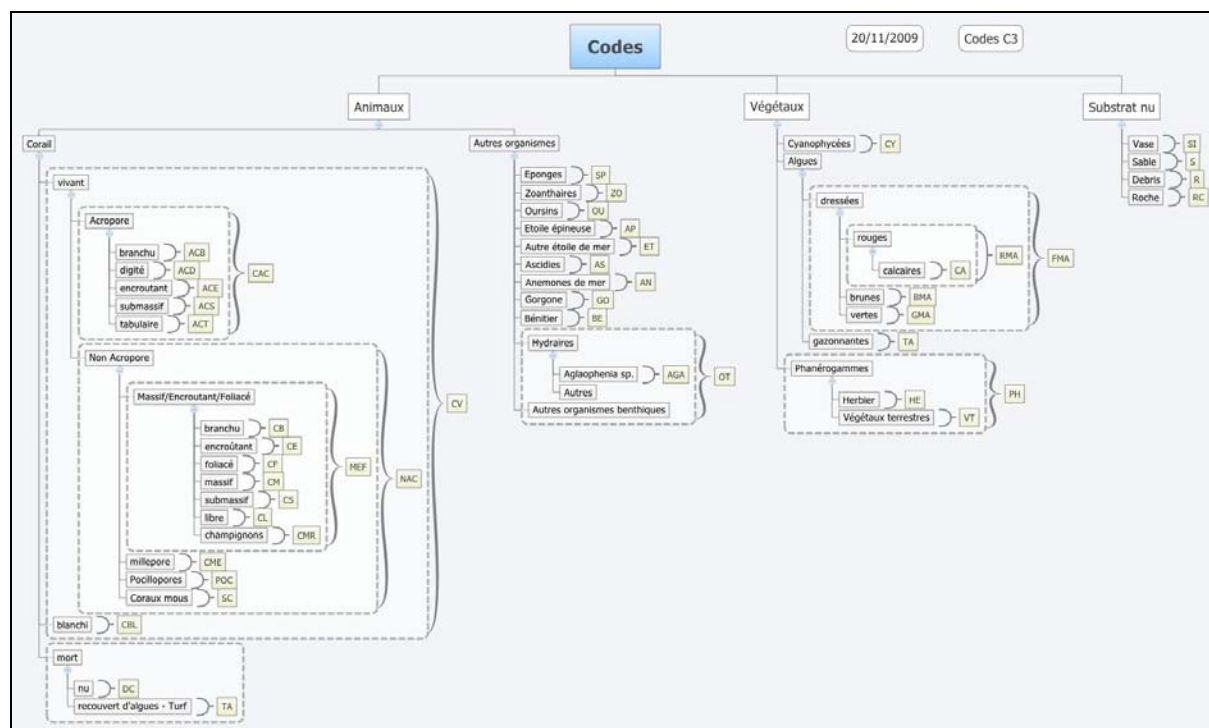


Figure 34. Codes substrats utilisés pour classer les différents types biologiques et de substrats analysés (d'après document ARVAM).

Ainsi, la librairie spectrale comporte 32 types de nature de fond différents détaillés ci-après sous forme de fiches :

- 4 minéraux : *SI, S, RC, R*
- 7 végétaux : *CY, BMA, RMA, GMA, TA, HE, VT*
- 21 animaux : *SP, OU, AN, BE, HYA, OT*
 - o dont 15 coraux : *ACB, ACD, ACS, ACT, CB, CE, CF, CM, CS, CL, CME, POC, SC, CBL, DC*

3.2. Remarque préalable

La profondeur des enregistrements a un impact non négligeable sur la réflectance mesurée : plus l'épaisseur de la colonne d'eau augmente, plus la réflectance mesurée (rapport entre la luminance de la cible et celle du Spectralon), quel que soit la nature des cibles (animaux, végétaux, minéraux), est élevée dans le proche infrarouge (longueurs d'ondes supérieures à 700 nm). Cette observation est à mettre en parallèle avec les faibles valeurs de luminance à ces longueurs d'ondes. Ainsi, il est commun aux grandes profondeurs (> 8 mètres) que la luminance mesurée sur la cible soit supérieure à celle du Spectralon (la réflectance calculée est alors supérieure à 100 %). La Figure 35 ci-dessous illustre ce phénomène : à 16m de profondeur, à partir de 675 nm, la luminance du sable devient subitement supérieure à celle du Spectralon.

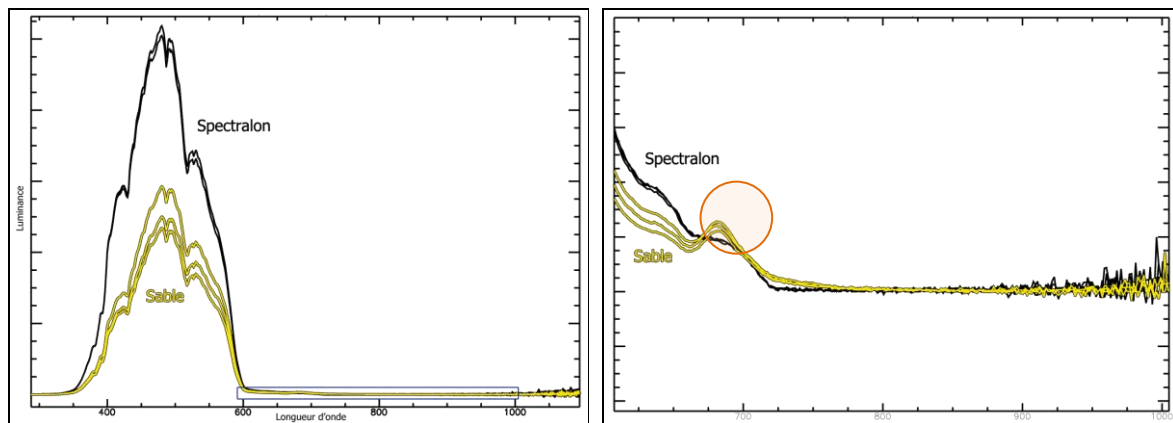


Figure 35. Evolution des luminances à 16 mètres de profondeur le 29 mai 2009 aux Glorieuses. Entre 400 et 600 nm les courbes de luminance ont une forme en cloche avec un maximum atteint dans le bleu, autour de 500 nm. La luminance du Spectralon est environ deux fois supérieure à celle du sable (graphique de gauche). A partir de 600 nm, la luminance du Spectralon comme celle du sable chutent fortement (très forte absorption du signal lumineux par la colonne d'eau). A 675 nm, la luminance mesurée sur le sable remonte brusquement pour passer au dessus de celle de Spectralon, à partir de cette longueur d'onde et jusqu'à 900 nm, luminances du sable et du Spectralon sont très proches.

Cette augmentation anormale de réflectance est commune à tous les types de cibles immergées au-delà de 8 à 10 mètres (y compris les cibles minérales, dont la contribution de l'activité biologique photosynthétique à la signature spectrale devrait être limitée, et donc la réflectance stable avec la profondeur). Cette caractéristique très particulière fait penser à un artéfact dû à la méthode de mesure plutôt qu'à une réelle augmentation de

réflectance dans cette partie du spectre. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ce phénomène, en lien avec la très faible énergie lumineuse atteignant le fond à ces longueurs d'ondes (à 16 m de profondeur, la quantité d'énergie lumineuse incidente à 650 nm ne représente que 0,75 % de celle à 478 nm) :

- Proche des limites d'utilisation du Spectroradiomètre (bruit de fond, sensibilité, etc.),
- De faibles variations absolues (hauteur d'eau, positionnement dans la colonne d'eau) lors des mesures provoquent de fortes variations relatives sur la réflectance. Ce phénomène devrait avoir un impact positif ou négatif sur la mesure selon la variation « aléatoire » positive ou négative de hauteur d'eau, hors, l'impact est toujours positif (augmentation de réflectance).
- La chlorophylle admet un pic de fluorescence vers 685 nm [8]. Cette fluorescence pourrait expliquer le pic de luminance mesuré vers 675-680 nm dans le sable [9]. Quand la lumière incidente est forte, cette fluorescence n'est pas sensible, masquée par la réflexion de la cible. Le phénomène devient proportionnellement beaucoup plus important lorsque la lumière incidente est presque nulle. Cette dernière hypothèse semble la plus plausible.

Concrètement, quasiment aucune mesure de radiométrie sous-marine n'a pu être exploitée au-delà de 8 mètres de hauteur d'eau. A partir de cette profondeur, parfois à des profondeurs moindres, les courbes spectrales présentent dans le rouge et le PIR des figures de réflectance aberrantes (cf. §2.3.2 page 56). La Figure 36 ci-dessous montre quelques exemples de mesures de réflectances acquises sur des zones sableuses homogènes aux Glorieuses.

Autour de 675 nm, contrairement aux mesures acquises à des profondeurs moindres, le minimum de réflectance caractéristique de l'absorption par la chlorophylle est très atténué sur la courbe de 8 mètres de profondeur. La forme de la courbe s'inverse à partir de 9 m, pour former un maximum de réflectance marqué sur la courbe de 16 mètres de profondeur (qui atteint 120 % de réflectance).

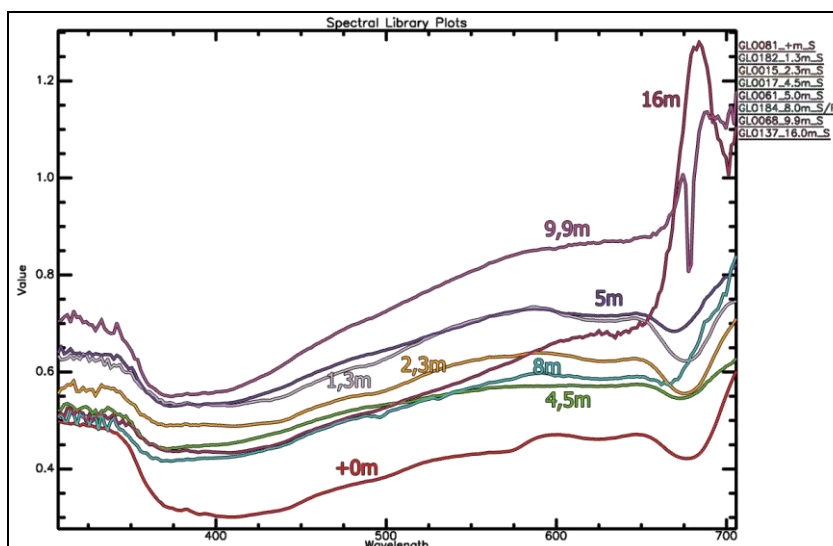


Figure 36. Evolution des réflectances mesurées sur les sables de Glorieuses en fonction de la longueur d'onde et la profondeur.

La Figure 37 ci-dessous fait une synthèse des données prises en compte par type corallien en fonction de la profondeur.

Aucune mesure n'a été conservée au-delà de 11 mètres de hauteur d'eau. Quatre types coralliens ont des mesures au-delà des 10 mètres de hauteur d'eau : *Pocillopores*, *Coraux massifs* et *submassifs* (11 mètres) et les *Coraux mous* (10 mètres). Les *Coraux blanchis* (CBL) sont le type le plus profond (4,75 m), alors que les *Coraux submassifs* et *foliacés* sont les plus près de la surface (1 m).

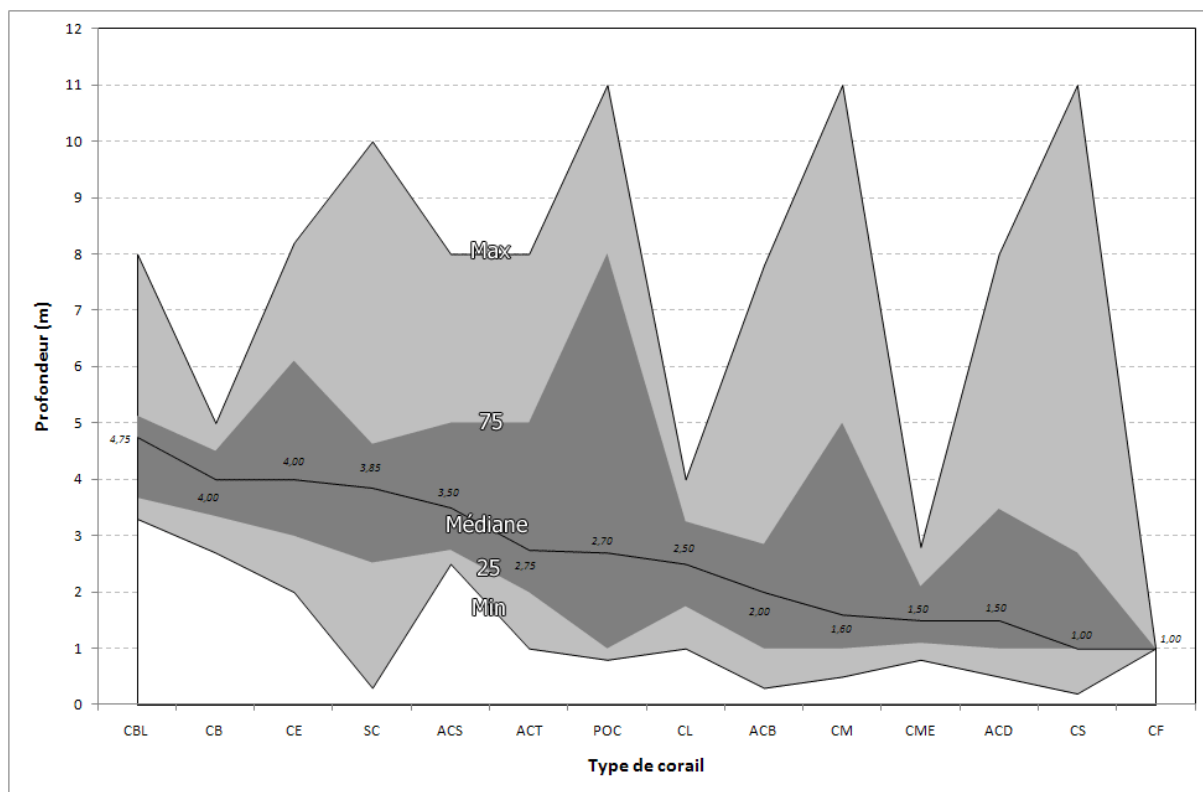


Figure 37. Profondeurs de mesure de chaque type corallien de la base de données triées par valeur de médiane décroissante. Les courbes représentent les hauteurs d'eau minimales, maximales, et les quartiles. La majorité des mesures a été réalisée entre 1 et 5 mètres de hauteur d'eau.

3.3. Analyses intra-types

3.3.1. Coraux - Généralités

La Figure 38 ci-dessous présente quelques spectres de réflectance de coraux issus de la base de données. La forme générale des courbes spectrales coralliennes est commune à toutes les cibles :

- Plateau de réflectance (R) avant 350 nm, inférieur à 5 % de réflectance.
- Baisse rapide de la R vers 350 nm, entre - 5 et - 10 %.
- Le niveau de R remonte légèrement mais reste faible entre 400 et 500 nm.
- Plus forte augmentation de R entre 500 et 650 nm, avec une succession de minimums et maximums locaux, caractéristiques de la *forme* corallienne (voir détail ci-après).
- Bande d'absorption étroite vers 675 nm (due à la chlorophylle).
- Augmentation rapide de R à partir de 680 nm et dans le proche infrarouge, niveau supérieur à 50 % (très variable à cause de la forte sensibilité aux variations de hauteur d'eau).

L'ensemble des coraux présente l'une ou l'autre de deux formes appelées *brune* ou *bleue* dans la littérature (courbes en orange et bleu respectivement sur la Figure 38).

La **forme brune**, plus fréquente, est caractérisée par une *R* faible entre 400 et 550 nm, suivie de **trois pics** (ou épaulements, maximums peu ou pas marqués) vers **575, 600 et 650 nm**. Cette forme de base s'explique par l'action de 5 pigments photosynthétiques principaux (chlorophylle a, chlorophylle c, β -carotène, diadinoxanthine et peridinine⁴) 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 du corail hôte, la pocilloporine (GFP (protéine fluorescente verte) non fluorescente) ou un pigment similaire, dont le pic d'absorption se situe autour de 560 nm [4].

En réalité, la forme *bleue* et la forme *brune* ne sont pas totalement exclusives : de nombreuses formes intermédiaires existent, produisant un véritable continuum entre ces deux formes pures (cf. analyses par types ci-après).

Certains spectres présentent des pics de *R* localisés entre 400 et 550 nm, attribués à des phénomènes de fluorescence par des GFP contenues dans le corail hôte (cf. §3.4.3 page 74). Cette fluorescence semble cantonnée aux longueurs d'ondes bleues et vertes, n'affectant ainsi pas les deux formes de base *brune* et *bleue* [4].

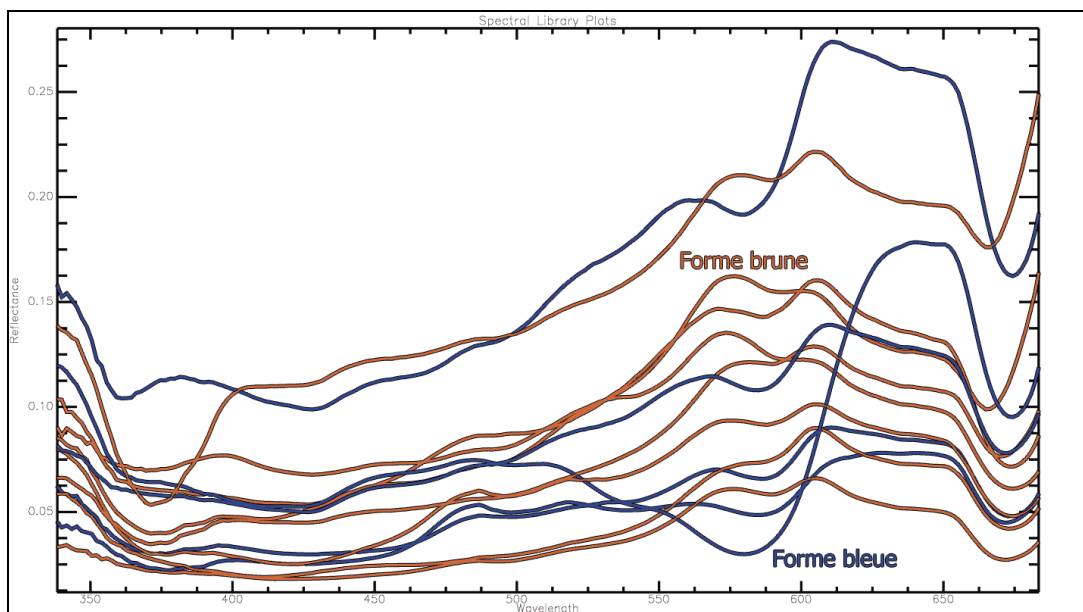


Figure 38. Exemples de spectres coralliens. Forme *bleue* ou *brune* selon la présence ou non d'un pic de réflectance à 575 nm.

⁴ La peridinine est un pigment orange rouge qui absorbe la lumière sur une gamme de longueurs d'ondes très étendue, avec un maximum autour de 480 nm (et un épaulement à 520 nm). La peridinine est avec la chlorophylle c2 unique aux Dinoflagellés.

3.3.2. Fiches types

Les fiches sont présentées dans le document annexe, elles décrivent les différentes cibles de la librairie spectrale regroupées par **type de nature de substrat**. Ces types, formant des ensembles homogènes au niveau de la structure spatiale, et constitués d'espèces coralliennes taxonomiquement proches, sont les premiers à présenter une potentielle unité dans les signatures spectrales.

3.3.3. Bilan

Les différentes cibles coralliennes de la librairie spectrale présentent l'une ou l'autre des deux formes *bleue* et *brune*. Le Tableau 11 ci-dessous fait une synthèse de la fréquence d'apparition ces deux formes spectrales pour chaque type corallien.

La forme *brune* est la forme de base : elle est présente quel que soit le type de corail. La forme *bleue* n'est retrouvée que dans un peu plus de la moitié des types considérés.

Dans les types coralliens présentant les deux formes, la forme *brune* est encore une fois majoritaire : le pourcentage de colonies de la forme *bleue* oscille entre 0 et 45 %⁵.

Quatre types coralliens se différencient des autres par l'absence totale de forme *bleue* (seuls les types coralliens avec un nombre suffisant d'individus pour être significatif ont été pris en compte : *CB*, *CE*, *CF* et *CL* sont ainsi mis de côté) :

- **ACS** : les *Acropores submassifs*. Ce type n'étant constitué que par l'espèce *Acropora palifera* dans la librairie spectrale.
- **CS** : les *Coraux submassifs*.
- **CME** : les *Millépores*.
- **SC** : les *Coraux mous*. Malgré des colorations bleues, roses et grises, attribuées à la forme *bleue* chez les coraux durs, les coraux mous présentent systématiquement les trois épaulements caractéristiques de la forme *brune*.

Deux types coralliens se détachent par leur fort taux de colonies de la forme *bleue* :

- **CM** : les *Coraux massifs* (majoritairement du genre *Porites*) avec 46 % de forme *bleue*.
- **POC** : les *Pocillopores* avec 40 % de forme *bleue*.

⁵ Il faut bien sûr garder en tête que l'échantillonnage sur le terrain n'a pas été réalisé de manière aléatoire, mais orienté en fonction de l'« originalité » des cibles et leur présence ou non dans la librairie spectrale au moment de l'acquisition : l'objectif premier de cette librairie spectrale étant d'acquérir un maximum de diversité corallienne, et non de réaliser un échantillonnage représentatif des différentes formes présentes sur le terrain (ce qui devrait par contre être accessible avec une couverture du terrain quasi exhaustive offerte par la télédétection). Les proportions de la forme corallienne bleue dans chaque type exprimées dans le tableau ci-dessous ne sont donc données qu'à titre informatif et ne représentent pas avec fidélité la réalité du terrain (surévaluation potentielle de la forme *bleue* moins courante ?).

Type corallien	Nb cibles	Forme <i>brune</i>	Forme <i>bleue</i>	% forme <i>bleue</i>
<i>ACB</i>	16	x	x	19
<i>ACD</i>	18	x	x	22
<i>ACS</i>	7	x		0
<i>ACT</i>	12	x	x	17
<i>CB*</i>	3	x		-
<i>CE*</i>	3	x	x	-
<i>CF*</i>	1	x		-
<i>CM</i>	50	x	x	46
<i>CS</i>	19	x		10
<i>CL*</i>	2	x		-
<i>CME</i>	7	x		0
<i>POC</i>	15	x	x	40
<i>SC</i>	24	x		0

Tableau 11. Forme en fonction du type corallien. * : Les types *Coraux branchus, encroûtants, foliacés* et *libres* comportant moins de 5 individus chacun sont peu significatifs, la fréquence de la forme *bleue* n'a pas été calculée.

Les occurrences de la forme *brune* étant les plus fréquentes, les spectres moyens de tous les types coralliens sont de la forme *brune*, voir Figure 39 ci-dessous.

Sur ce graphique (à gauche), seul le spectre moyen des coraux encroûtants (*CE*) se différencie des autres par une tendance plutôt *bleue* (premier épaulement peu marqué). Cependant, ce résultat n'est pas significatif car seules 3 mesures pu être réalisées sur ce type corallien (dont une se rapprochant fortement de celle d'un corail blanchi et 2 autres clairement de forme *brune*).

Les spectres de réflectance (graphique de droite) montrent une grande homogénéité dans les magnitudes spectrales : les niveaux de réflectance moyens sont très proches d'un type à l'autre. Seuls 3 types se différencient du lot : les coraux massifs (*CM*), les acropores tabulaires (*ACT*) et les coraux mous (*SC*). Alors que la réflectance moyenne à 600 nm est de l'ordre de 12 %, les *SC* ont une réflectance moyenne de 17 %, et les *ACT* et les *CM* une réflectance moyenne d'environ 23 %, pratiquement le double de celle des autres types coralliens.

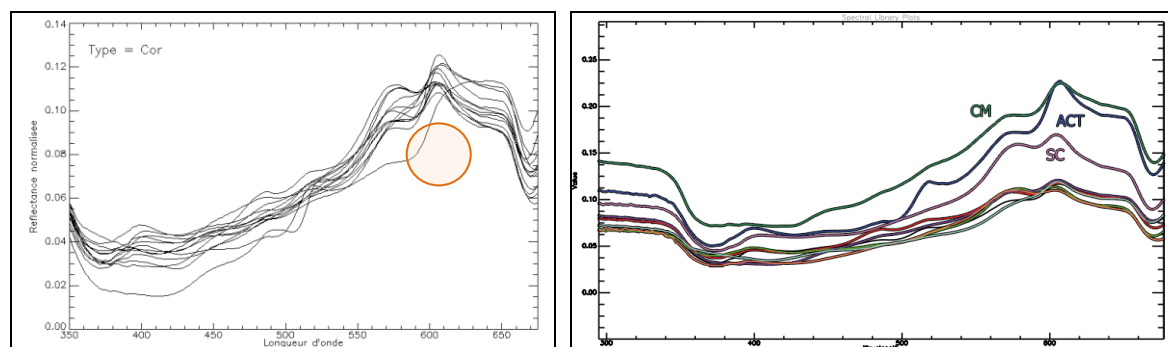


Figure 39. A gauche, comparaison des moyennes normalisées des différents types de coraux. Les coraux encroûtants *CE*, courbe cerclée en orange, sont les seuls à se différencier : non significatif à cause du nombre peu élevé de mesures (3). A droite, réflectances moyennes des différents types coralliens. Les spectres des 4 types comportant moins de 5 mesures (*CB*, *CE*, *CF*, *CL*), non significatifs, ne sont pas affichés.

Le Tableau 12 ci-dessous reprend les représentations graphiques des fréquences d'occurrence des pics de réflectance présentées dans les fiches de types. Ces graphiques montrent les fréquences d'apparition de minimums ou maximums locaux de réflectance en fonction de la longueur d'onde et par type de nature de fond. Des regroupements peuvent être effectués sur la base de critères communs :

- **Coraux :**

- Pic d'absorption à 370 nm : présent dans plus de 90 % des mesures des 4 types d'acropores. Les *CM*, *CS*, *CME* et *SC* présentent aussi ce pic d'absorption, mais avec un pic de fréquence plus diffus, couvrant des gammes de longueurs d'ondes plus larges, et légèrement supérieures. On note la quasi absence de cette figure chez les autres types coralliens et notamment les *POC*. Les *CBL* (coraux blanchis) ont la particularité comme les acropores, de présenter cette figure d'absorption marquée et très fréquente (à relativiser car 90 % des *CBL* échantillonnés sont des acropores).

Le blanchissement corallien peut être provoqué par une élévation de la température de l'eau couplée à une augmentation de l'exposition au rayonnement lumineux. Des *MAAs* (*Mycosporine-like Amino Acids*), molécules absorbant fortement l'énergie lumineuse dans l'ultraviolet (dans la gamme 280-400 nm) et la dissipant sous forme de chaleur, jouent un rôle photo-protecteur chez les coraux [10]. Il a été montré que la concentration intra-corallienne de ce composé était variable, et souvent corrélée à la profondeur et l'exposition au rayonnement UV [11]. Bien que les maximums d'absorption des *MAAs* semblent se situer entre 320 et 340 nm, une molécule du même type pourrait être responsable du pic d'absorption à 370 nm observé sur les courbes spectrales.

- Minimum de réflectance vers 425 nm. Ce minimum, qui se présente souvent sous la forme d'une cuvette peu marquée serait causé par le maximum d'absorption de la chlorophylle a. Il est présent chez tous les types coralliens, mais souvent masqué par le phénomène de fluorescence. Il apparait à plus de 80 % chez les *Acropores* et millépores, beaucoup moins fréquent chez les coraux massifs et submassifs (64 % et

- 42 % respectivement). Ce minimum n'apparaît pratiquement jamais chez les pocillopores, où il semble décalé vers 410 nm (87 % d'occurrences). Chez les coraux mous, ce minimum semble être souvent masqué ou déplacé par des figures de fluorescence.
- **Fluorescence** : nombreuses figures entre 450 et 550 nm. Les colonies des deux types coralliens ACS (acropores submassifs de la seule espèce *Acropora palifera*) et surtout CME (millépores) ont la particularité de ne présenter aucune figure de fluorescence. Deux pics de fluorescence sortent du lot par leur intensité et surtout leur fréquence d'occurrence élevée chez les acropores ACB, ACD, et ACT : à 487 et 517 nm. En effet, chacun de ces deux pics est présent dans les deux tiers des colonies de ces types coralliens.
 - **Figure triple due aux zooxanthelles à 575 (max), 605 nm (max), 650 nm (épaulement)** : cette figure se retrouve chez tous les types coralliens, même si le premier pic est moins fréquent (60 % en moyenne) que le second (90 % en moyenne) à cause de la forme *bleue*. La troisième figure de réflectance autour de 650 nm, est peu fréquente sous forme de maximum (en moyenne dans 30 % des colonies de chaque type), mais apparaît systématiquement sous la forme d'un épaulement plus ou moins marqué.
- **Algues Rouges – Brunnes – Turf algaux :**
- Double figure de réflectance à 599 et 645 nm, présentée par 100 % des individus des types BMA et RMA, et près de 90 % des TA (mélanges plurispécifiques tirant vers le rouge).

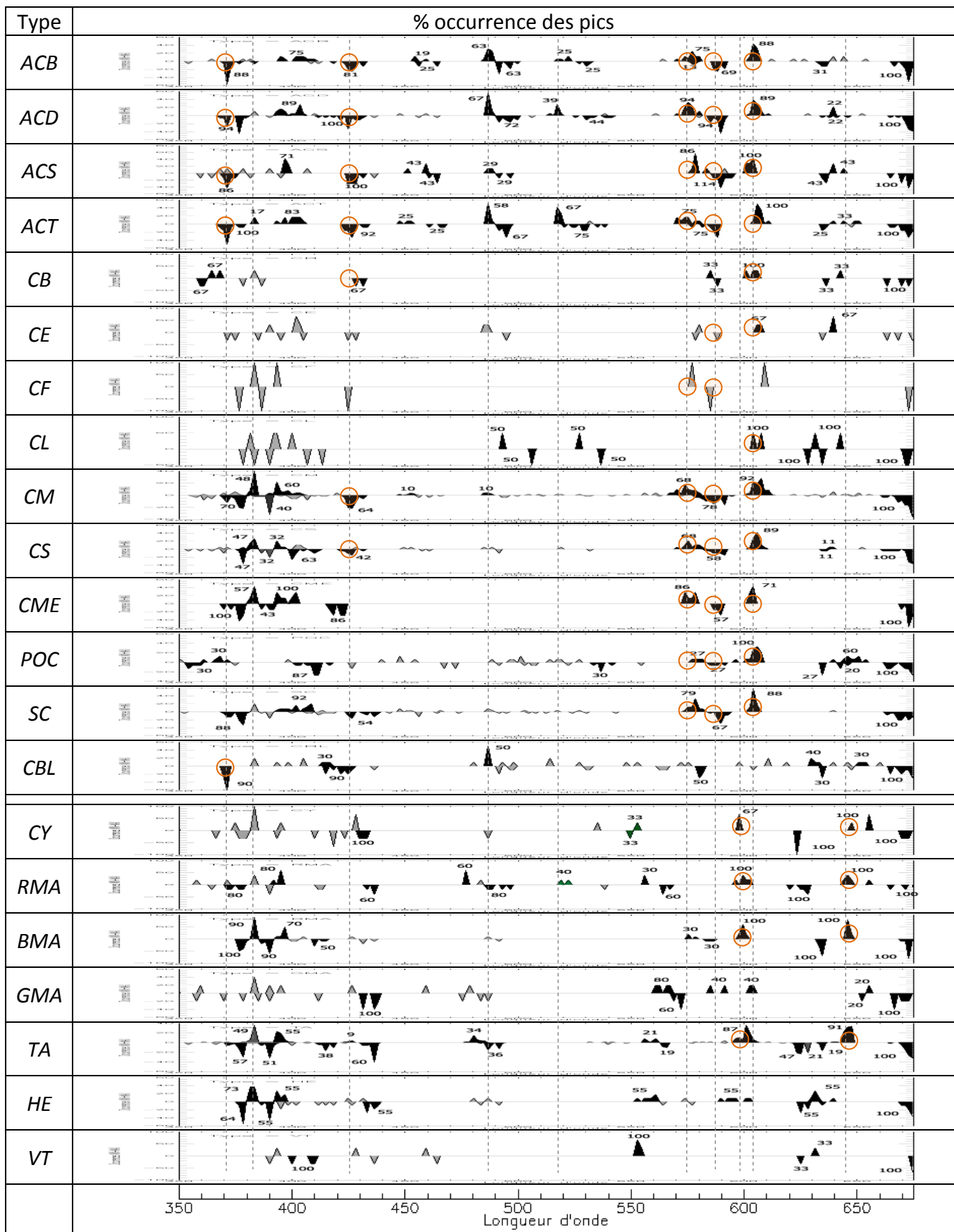


Tableau 12. Fréquences d'occurrence des pics de réflectance en fonction du type de nature de fond.

3.4. *Analyses inter-types*

3.4.1. Coraux / Macroalgues

Le tableau des fréquences d'occurrence des pics de réflectance en fonction du type de nature de fond (Tableau 12 page 70), met en évidence des différences significatives entre les coraux et les algues :

- Position du second pic de réflectance dans le rouge :
 - ≈ 599 nm pour les algues (*RMA*, *BMA*, *TA* et *CY*)
 - ≈ 604 nm pour les coraux

- Position de la troisième figure de réflectance dans le rouge :
 - ≈ 645 nm pour les algues (*RMA*, *BMA* et *TA*)
 - ≈ 652 nm pour les coraux

- Fréquence d'occurrence du troisième pic de réflectance :
 - Peu présent chez les coraux, avec seulement environ 30 % des mesures de chaque type corallien présentant un maximum local. Il se présente la plupart du temps comme un simple épaulement.
 - Très marqué chez les algues avec une fréquence de 100 % (*RMA* et *BMA*) et 90 % (pour les *TA*).

La Figure 40 ci-dessous présente les courbes de réflectance superposées des deux formes coralliennes *bleue* et *brune*, et des deux types algaux les plus proches, les *Algues brunes* et *rouges*. Les principales différences et particularités de chaque courbe sont cerclées en noir.

Sur la forme globale de la courbe, les *algues rouges* sont proches de la forme corallienne *bleue*, avec deux pics de réflectance marqués dans le rouge vers 600 et 650 nm. Les algues brunes sont elles plus proches des coraux bruns, avec un pic de réflectance supplémentaire vers 575 nm.

La position des maximums locaux des algues (*RMA* et *BMA*) est toujours située à des longueurs d'ondes légèrement inférieures d'environ 5 nm à celle des coraux (forme *brune* et forme *bleue*). Entre 600 et 650 nm, l'absorption de l'énergie lumineuse par des pigments algaux spécifiques, phycocyanine chez les algues rouges et chlorophylle c chez les algues brunes, est responsable du troisième pic de réflectance marqué.

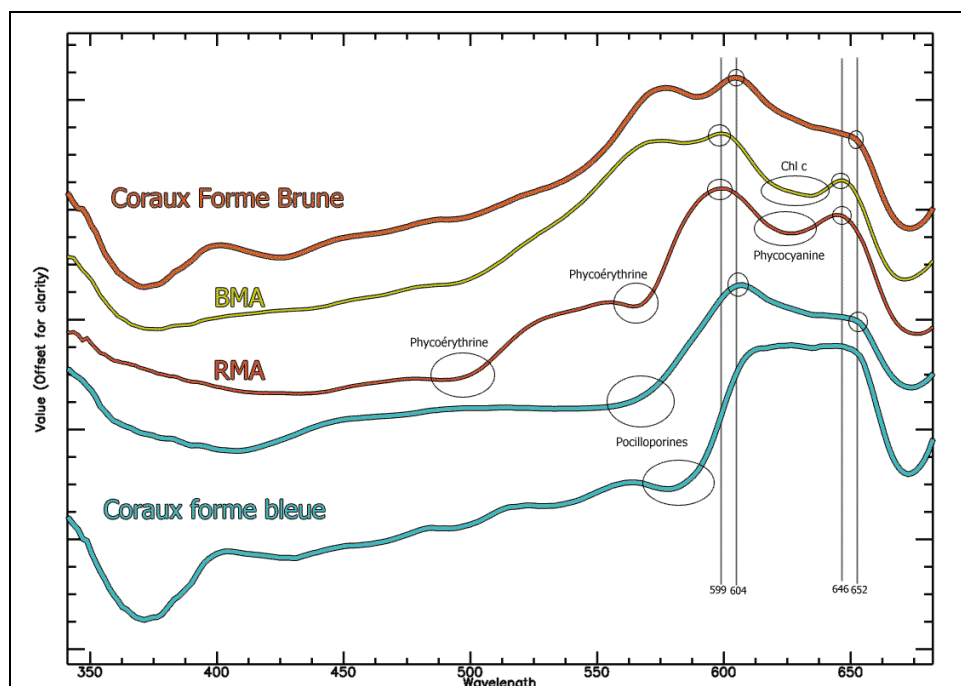


Figure 40. Comparaison des spectres de réflectance des deux formes coralliennes *bleue* et *brune* avec les spectres algaux les plus proches *RMA* et *BMA*.

3.4.2. Tendance rouge

La plupart des substrats minéraux de la base de données (*S*, *R* et *RC*) présentent des figures d'absorption dues à une activité photosynthétique (cf. analyses par types). La Figure 41 ci-dessous montre l'importance de ces absorptions en fonction des types de substrat, par comparaison avec les deux types algaux *TA* et *RMA* dont ils se rapprochent le plus.

Dans la gamme spectrale étudiée, les valeurs de réflectance sont nettement plus élevées pour les substrats minéraux que pour les algues pures : environ 35 % pour le sable, 25 % pour les roches et les débris, contre moins de 10 % pour les deux types algaux.

Les courbes de réflectance après retrait du continuum⁶ (graphique de droite) montrent de grandes similarités dans les localisations des différents pics d'absorption entre les substrats minéraux et les algues rouges, confirmant ainsi l'action de pigments à « tendance rouge » dans les signatures spectrales des types minéraux. Ces pigments sont contenus dans les organismes photosynthétiques colonisant la surface du substrat (gazons algaux, algues calcaires encroûtantes, cyanobactéries, etc.).

L'intensité de l'absorption suit un gradient croissant entre le sable et les algues rouges :

- très faible pour le sable,
- légèrement plus forte pour les débris et les roches,

⁶ Le retrait du continuum (*continuum removal* en anglais) est une méthode d'analyse qui permet de s'affranchir des magnitudes spectrales. La courbe de réflectance est divisée par une courbe convexe formée de portions de droites adjacentes passant par les maximums locaux. Les valeurs sont comprises entre 0 et 1 pour chaque longueur d'onde. Cette méthode permet de mettre en évidence les positions et intensités relatives des différents pics d'absorption.

- forte pour le gazon algal,
- maximale pour les macroalgues rouges

Ce gradient d'absorption suit le taux de recouvrement du substrat (et donc la contribution dans la signature spectrale) par les organismes photosynthétiques :

- Taux de couverture très important pour les macroalgues rouges (proche de 100 %),
- légèrement plus faible pour les turfs, gazons algaux plus ou moins clairsemés, laissant apparaître le substrat sous-jacent,
- faible pour les débris et les roches (choisis pour leur « absence de végétalisation »)
- pratiquement nuls pour les sables, où les microorganismes photosynthétiques ne sont même pas visibles.

Le profil spectral du *Sable* est légèrement différent de celui des autres types : vers 350 nm, sa courbe de réflectance intersecte celle des débris et des roches. Cette absorption plus forte dans cette région du spectre est le signe de pigments photosynthétiques différents. Alors que sur les débris et les roches les figures d'absorption sont principalement produites par les algues rouges, dans le sable l'absorption est réalisée par des microorganismes de type microphytobenthos, groupe varié comportant une grande variété de pigments photosynthétiques différents. La tendance du sable reste tout de même globalement « rouge ».

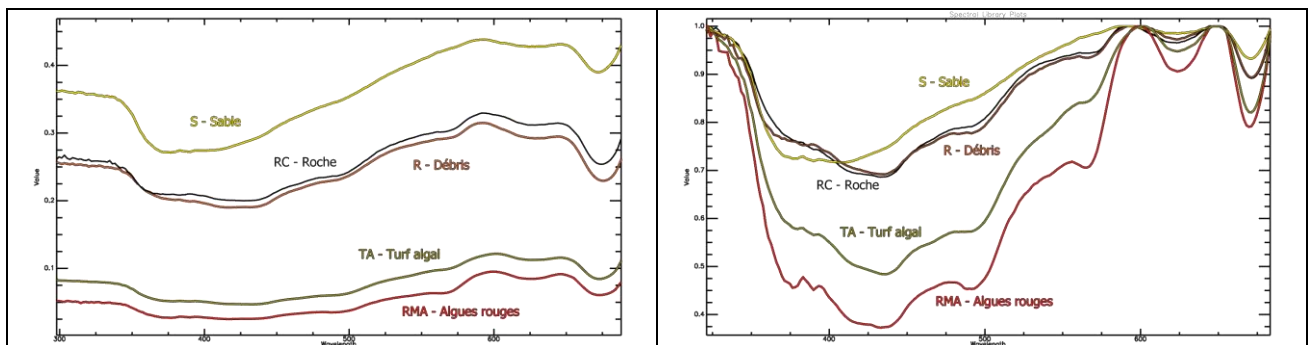


Figure 41. A gauche, spectres de réflectance moyens des types de substrats minéraux sable, débris et roches, et des deux types algaux turf algal et algues rouges. A droite, spectres de réflectance après retrait du continuum entre 320 et 685 nm.

La plupart des substrats minéraux sous-marins (*S*, *R*, *RC*) présentent les figures caractéristiques d'une activité photosynthétique. Alors que les substrats durs sont la plupart du temps colonisés par des algues à tendance rouge (algues encroûtantes, gazons algaux), les substrats meubles peuvent contenir du microphytobenthos ayant des effets sur la réflectance, mais non sensibles à l'œil.

Cette activité photosynthétique des substrats minéraux doit être prise en compte lors de la définition des algorithmes de traitement des images hyperspectrales pour minimiser les erreurs de classification.

La magnitude spectrale comme la profondeur des pics d'absorption semblent être de bons révélateurs des taux de recouvrement des substrats minéraux par les algues.

3.4.3. Fluorescence

De nombreux coraux de la librairie spectrale présentent des figures de fluorescence dans le visible, dans une gamme de longueurs d'ondes comprise entre 350 et 550 nm. Différents types coralliens sont concernés, principalement les acropores (*ACB*, *ACD* et *ACT*), les coraux massifs (*CM*) et submassifs (*CS*), les pocillopores (*POC*) et les coraux mous (*SC*).

La Figure 42 ci-dessous présente quelques unes des plus fortes figures de fluorescence de la base de données.

Il ne semble pas y avoir de différence de fréquence ni d'intensité entre les 4 secteurs géographiques. Parmi les spectres présentés ci-dessous, on compte 6 mesures à GLO, 2 à GEY, 6 à MAY et 5 à RUN.

La profondeur ne semble pas non plus avoir d'impact sur le phénomène : ces figures sont observées à toutes les hauteurs d'eau, entre 50 cm (pour un *ACD* de Mayotte) et 8 m (pour un *POC* de Glorieuses).

Dans la littérature, le phénomène de fluorescence semble la plupart du temps n'avoir « qu'une influence subtile et modérée sur la forme de la courbe de réflectance. Seules des colonies d'acropores sous lumière artificielle en aquarium ou dans les lagons peu profonds (10 cm) de Mayotte présentent des figures de fluorescence très marquées » [4].

Les données de notre librairie spectrale sont en accord avec ses conclusions : les spectres de la librairie spectrale sont en grande majorité faiblement impactés. Cependant, d'autres groupes peuvent présenter des figures marquées de fluorescence, et pas uniquement des colonies du genre *Acropora* se développant dans les petits fonds et subissant un éclairage solaire intense.

Si la majorité des pics de fluorescence marqués sont localisés entre 487 et 517 nm (longueurs d'ondes vertes et bleues), la plage de longueurs d'ondes comprises entre 368 et 445 nm (violet et ultraviolet) admet souvent des pics de réflectance modérés, autour de 400 nm notamment (398 - 403 nm).

Pour certaines colonies, l'intensité de ce phénomène est telle que la réflectance dans le visible est maximale au niveau du pic de fluorescence, supérieure à celle de la figure triple des zooxanthelles dans le rouge. Dans la librairie spectrale, deux colonies présentent cette particularité :

- Un acropore digité (ACD) du site de Glorieuses, à une profondeur de 4,5 m. Le pic dans le violet (400 nm) atteint 30 % de réflectance.
- Un corail mou (SC) de couleur bleu violet du site de Glorieuses, à une profondeur de 7,8 m. Le pic dans le bleu (486 nm) atteint 20 % de réflectance.

Parmi les spectres présentés, les formes coralliennes *brune* et *bleue* semblent atteintes de manière indifférente.

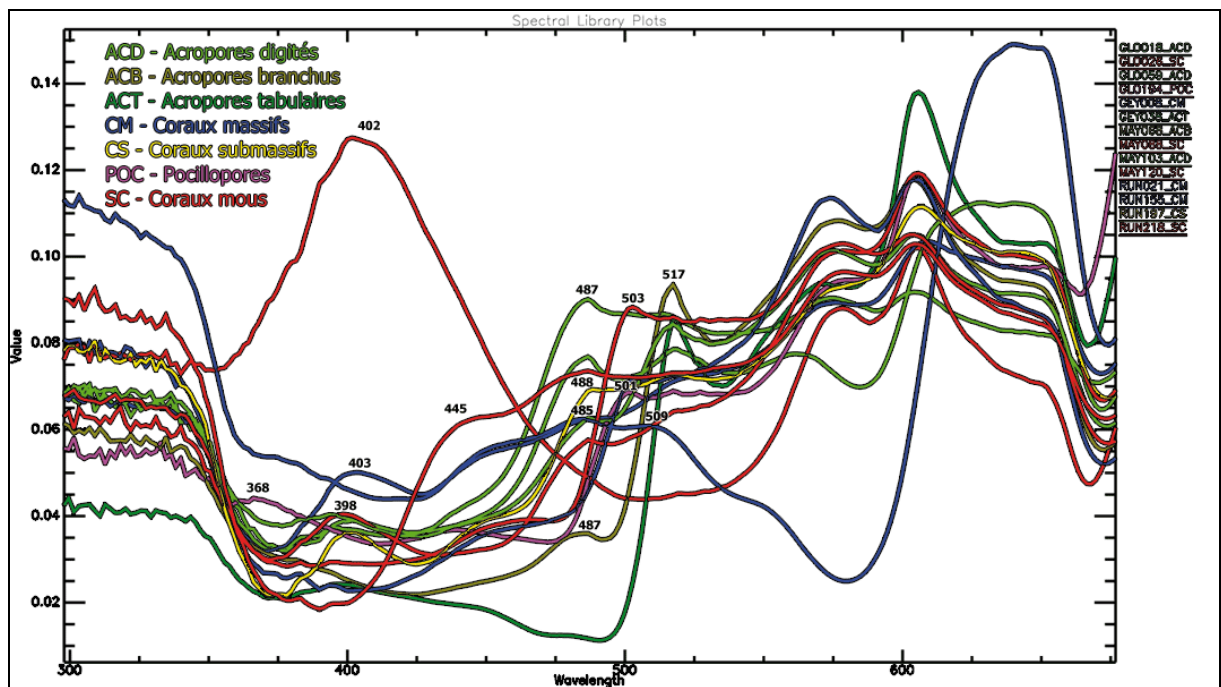


Figure 42. Réflectance normalisée de différentes colonies coralliennes présentant des pics de fluorescence.

3.4.4. Variabilité géographique

Les mesures radiométriques sous-marines de la librairie spectrale ont été réalisées dans 4 secteurs géographiques distincts : l'archipel des Glorieuses, le banc de Geysier, Mayotte et la Réunion. Y a-t-il un impact de la localisation géographique sur les spectres coralliens ?

La Figure 43 ci-dessous présente les spectres de réflectance des *coraux massifs*. L'analyse de ce type corallien, comportant de nombreuses mesures réparties dans les 4

localisations géographiques (Tableau 13), permet une bonne évaluation de ce paramètre.

Toutes les mesures de réflectance sont enchevêtrées (graphique de gauche), aucun groupe ne se détache des autres par ses valeurs fortes ou faibles. Les moyennes sont très proches, avec une variabilité inter-site inférieure à la variabilité intra-site (moyenne \pm 1 écart-type), quelle que soit la longueur d'onde (graphique de droite). Ce graphique montre aussi une grande similarité des profils spectraux quelle que soit la localisation géographique.

Un test statistique de Kruskal-Wallis⁷ effectué sur les 4 sites ne permet pas de rejeter au seuil des 5 % de probabilité l'hypothèse H0 selon laquelle les 4 échantillons GLO, GEY, MAY et RUN ont les mêmes distributions moyennes, et ceci pour chacune des longueurs d'ondes de la gamme spectrale analysée, entre 350 et 700 nm (Figure 44)

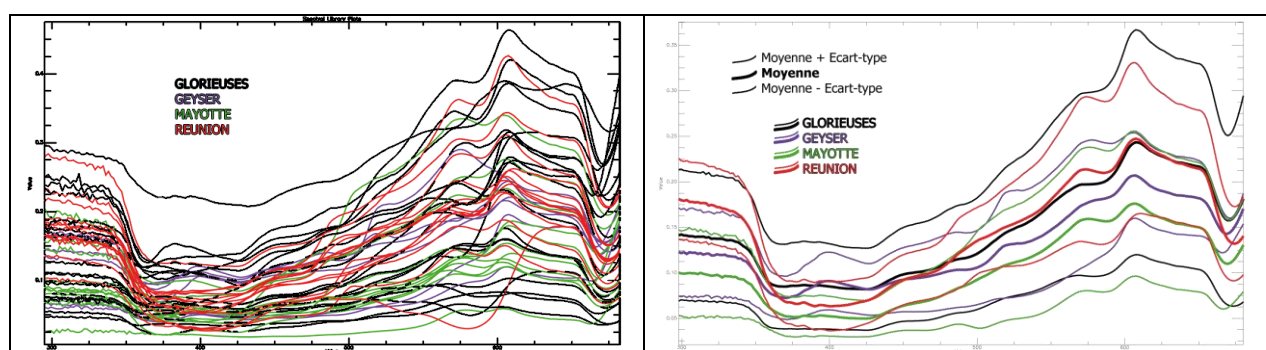


Figure 43. A gauche, ensemble des spectres de réflectance des coraux massifs de la librairie spectrale, une couleur par localisation géographique. A droite,

Localisation	Nombre de mesures	Profondeur moyenne (m)
Glorieuses	20	3,6
Geyser	6	4,7
Mayotte	11	3,5
Réunion	13	0,9

Tableau 13. Nombre de mesures et profondeur moyenne du type corallien CM en fonction de la localisation géographique.

⁷ Le test de Kruskal-Wallis est une méthode statistique non-paramétrique qui permet de vérifier l'hypothèse d'égalité (de médiane) d'échantillons indépendants issus d'une même population. [13]

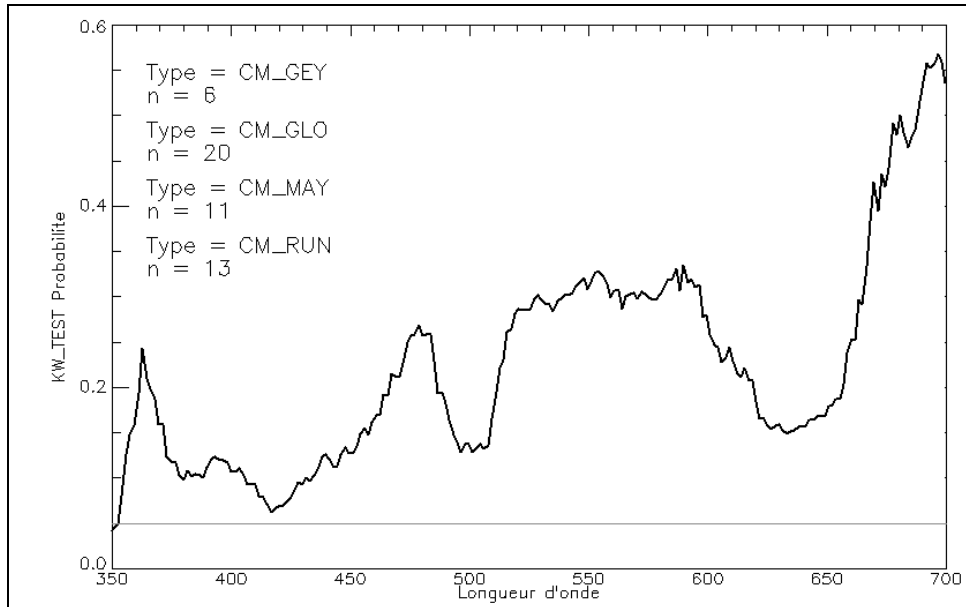


Figure 44. Test Kruskal-Wallis réalisé sur le type CM pour les 4 localisations géographiques. Pour toutes les longueurs d'ondes, la probabilité (courbe en trait épais) est toujours supérieure au seuil des 5 %.

Ces résultats montrent une faible sensibilité de la réflectance à la localisation géographique pour le type *corail massif*. Une analyse rapide des spectres de la librairie spectrale montre une tendance identique pour les autres types coralliens.

D'après [4] pour une espèce corallienne donnée, les variabilités de réflectance à l'échelle locale (de la colonie) ou régionale sont du même ordre de grandeur que les variabilités à l'échelle du globe.

Pour les types de nature de fond « vivants » (coraux, algues, etc.), présentant une relative constance dans leur composition spécifique à l'échelle de la zone d'étude, cette stabilité spectrale spatiale peut paraître logique. Pour les substrats minéraux par contre, les conditions biogéochimiques spécifiques, propres à chaque île ou secteur géographique (sables fins d'origine algale de Glorieuses, sables volcaniques de la Réunion, fonds vaseux des mangroves de Mayotte par exemple), on voit apparaître des différences plus nettes selon les zones.

3.4.5. Profondeur

La Figure 43 et le Tableau 13 ci-dessus ne montrent pas de corrélation entre la profondeur et la réflectance mesurée des coraux massifs : il n'y a pas de gradient de réflectance avec le gradient de profondeur. La réflectance moyenne sur la Réunion, où la profondeur moyenne est inférieure au mètre n'est pas très différente de celle de Glorieuses, où la profondeur est beaucoup plus importante (3,6 m). La réflectance de Geyser, site où la profondeur de mesure moyenne est la plus importante (4,7 m), n'est pourtant pas la plus faible (Mayotte).

Aucun lien n'a été trouvé entre la concentration en GFP (protéines responsable du passage de la forme *brune* à la forme *bleue*, et du phénomène de fluorescence) et des facteurs environnementaux (notamment la profondeur ou l'exposition à la lumière) : les pigments du corail hôte n'auraient pas de fonction écologique [4], [12].

La profondeur n'a pas d'impact évident sur la réflectance des CM (gradient de réflectance, apparition de pics d'émission ou d'absorption particuliers, etc.). L'analyse d'autres données de la base de données ne montre pas non plus d'effet sur les autres types de nature de fond.

Les seuls effets sensibles de la profondeur sur la réflectance mesurée sont détaillés aux paragraphes §B 2.3.2 page 56 et §B 3.2 page 61. Ils sont principalement liés à des phénomènes physiques extérieurs aux cibles analysées, comme l'atténuation du signal lumineux par la colonne d'eau de manière différentielle selon les longueurs d'ondes. Ces effets ne sont pas liés aux propriétés intrinsèques des cibles analysées.

3.4.6. Evolution radiométrique d'une nécrose corallienne

L'analyse des différentes cibles sous-marines regroupées par *type de nature de fond* a permis de mettre en évidence des différences spectrales entre le corail vivant en bonne santé, le corail blanchi et le corail mort.

L'exemple suivant est intéressant car illustre les modifications de réflectances subies par une même cible corallienne à paramètres biologiques (espèce, individu, structure spatiale) et environnementaux (profondeur, turbidité, hauteur et direction du soleil, orientation, etc.) constants, suite à un phénomène de blanchissement puis nécrose. Les mesures ont été réalisées le 30 juillet 2009 sur une colonie d'acropores tabulaires du lagon de Mayotte par environ 3 mètres de profondeur, au niveau de la pente interne dans une zone d'alternance de coraux et de bancs de sable. La Figure 45 ci-dessous présente la colonie d'étude dans son environnement.

Les mesures de radiométrie ont été réalisées sur deux stades marqués spatialement distincts :

- Le *corail vivant*. Une moitié du corail présente un aspect et une coloration normaux (partie de droite sur les photos).
- Le *corail nécrosé*. La seconde moitié du corail est morte, colonisée par de petites algues filamenteuses. A ce stade, le squelette calcaire du corail mort sert de support au développement d'un gazon algal (turf), dont la composition spécifique et la densité sont variables dans le temps (partie gauche sur les photos).

Entre les deux stades précédents, le corail vivant blanchi, ayant expulsé ses zooxanthelles symbiotiques, a la coloration blanche très claire de son squelette calcaire. Sur la colonie étudiée, ce stade est matérialisé par une étroite bande claire de quelques centimètres de largeur séparant le corail vivant du corail nécrosé. Des mesures n'ont pas pu être réalisées en raison des dimensions réduites de la zone.

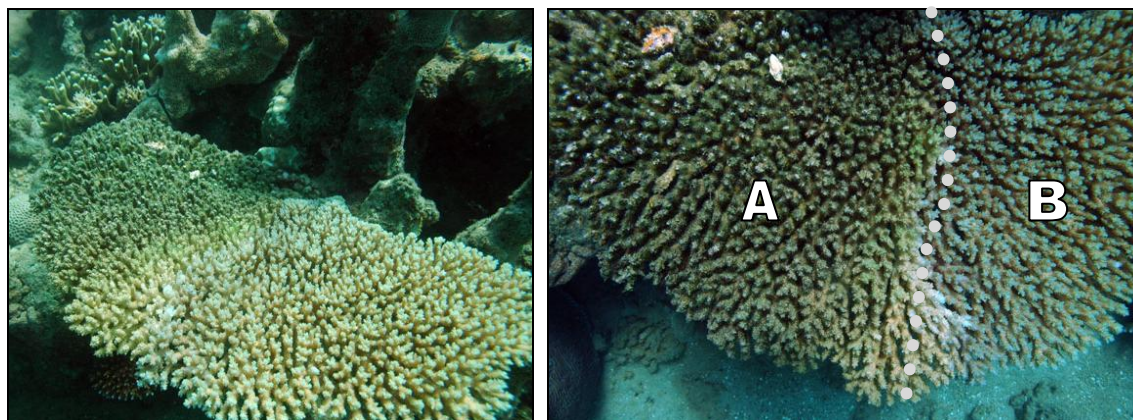


Figure 45. Le 30 juillet 2009 par 3 m de profondeur dans le lagon de Mayotte, colonie d'acropores tabulaires partiellement nécrosée (à gauche). Image de droite, agrandissement de la limite entre le corail vivant (B) et le corail mort recouvert d'un gazon algal (A).

La réflectance des deux stades d'évolution est présentée sur le graphique Figure 46 ci-dessous.

- Le spectre de la **partie vivante** du corail (courbe du haut) présente les mêmes caractéristiques que celui d'un **corail de forme brune classique** : trois pics ou épaulements de réflectance à 575, 600 et 650 nm. Deux pics de fluorescence sont visibles autour de 485 et 515 nm.
- Le spectre de la **partie morte** (courbe du bas) présente les mêmes caractéristiques que celui d'un **turf algal** (sous-type *RMA*) : deux pics de réflectance vers 600 et 650 à des longueurs légèrement plus faibles que le corail, un premier pic autour de 600 nm très large, une absorption vers 625 nm marqué provoquant un maximum local franc à 650 nm.

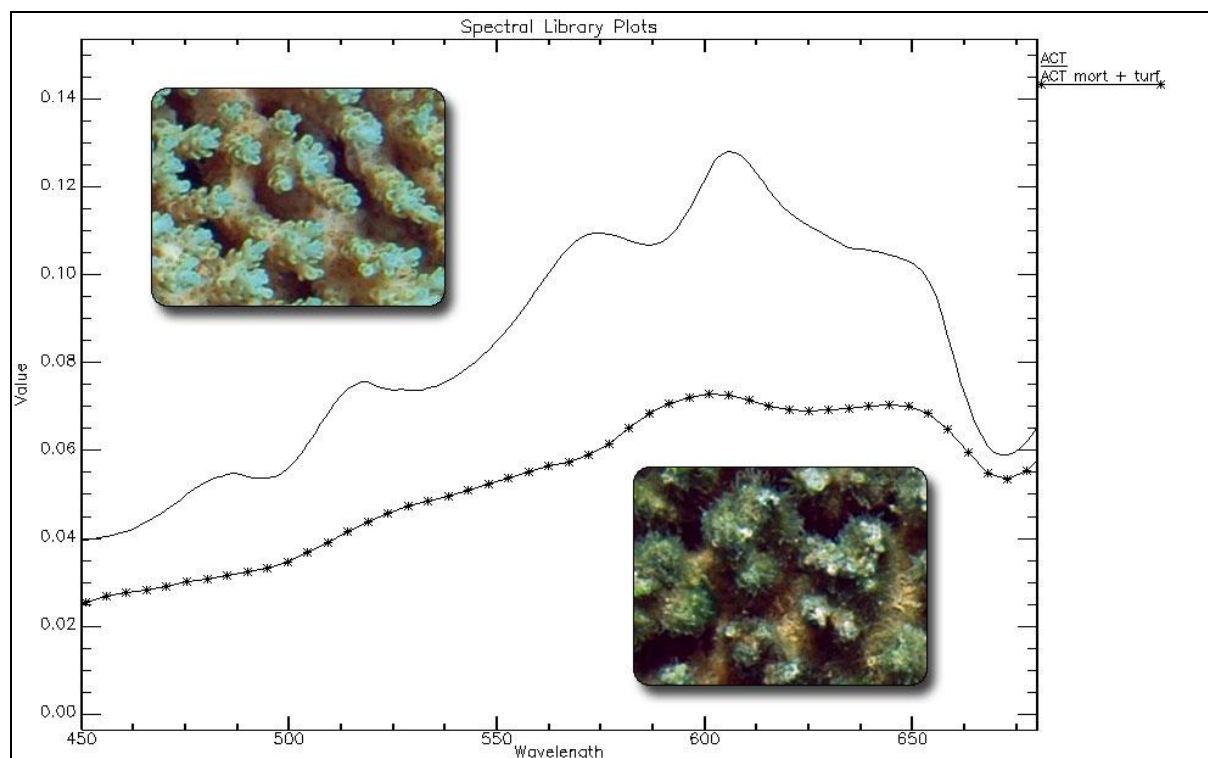


Figure 46. Spectres de réflectance mesurés sur les deux parties de la colonie. Photo en haut à gauche sur le corail vivant, courbe du haut continue. Photo en bas à droite sur le corail nécrosé colonisé par un gazon algal, courbe du bas avec les astérisques.

En mourant puis se nécrosant les colonies coralliennes subissent une évolution de leur signature spectrale : le spectre de réflectance passe de celui d'une *forme corallienne*, à celui de *gazon algal*. Dans cet exemple, il n'y a pas de phase intermédiaire entre les deux types de signature : la colonisation par les algues est très rapide par rapport à la mort de la colonie (limite entre les deux stades vivant/nécrosé, correspondant à la zone de blanchissement, réduite).

CONCLUSIONS

Données

Les campagnes de vérités-terrains associées à de la radiométrie sous-marine ont permis d'acquérir des spectres de réflectance de plus 600 cibles benthiques de 4 zones géographiques du sud-ouest de L'océan Indien : Glorieuses, Geysier, Mayotte et la Réunion. Toutes ces mesures ont été archivées et géoréférencées dans des bases de données (bibliothèques spectrales au format ENVI et tableur Excel).

Des algorithmes de post-traitement ont été développés pour automatiser la compilation et le formatage des données brutes, les différentes étapes de filtrage, les traitements et analyses des spectres.

Après identification des cibles, la codification des différents types de nature fond a été réalisée selon une typologie de référence développée par l'ARVAM dans le cadre d'IFRECOR. Certains codes substrats ont été adaptés de manière à prendre en compte les particularités spectrales des différents types de nature de fond (création de sous-groupes spectralement homogènes).

Techniques d'échantillonnage

Le protocole d'échantillonnage a été optimisé de manière maximiser le nombre de mesures tout en tenant compte des nombreuses contraintes imposées par les missions (connaissance du terrain non exhaustive, durée de mission réduite, météo), et par le terrain (profondeur, éclaircissement) et la nature et la diversité des cibles.

Quelques remarques importantes :

- La qualité des mesures se dégrade fortement au-delà de 5 mètres de hauteur d'eau. A partir de 8 m les mesures sont pour la plupart inexploitable. Un éclairage artificiel permettrait sans doute d'améliorer la qualité des mesures en profondeur (à tester).
 - o Avantage : meilleure qualité des spectres dans le rouge et le PIR notamment, longueurs d'ondes où la quantité d'énergie lumineuse décroît très vite avec la profondeur.
 - o Inconvénient : pas dans les conditions d'éclaircissement des survols aériens.
- Dans les petits fonds, les très fortes variations temporelles de luminosité (*wave focusing*) sont responsables de nombreuses saturations (entre 25 et 40 % des mesures) rendant les spectres inexploitable. Deux solutions ont été testées pour les limiter :
 - o Ombrage de la cible
 - Avantages : élimination totale des saturations
 - Inconvénients :
 - surévaluation des valeurs de réflectance (entre 20 et 40 % dans le visible, 60 % dans le proche infrarouge),
 - difficulté à mettre en place (nécessité d'un ombrage constant et homogène du Spectralon comme de la cible)

- Diminution du nombre de mesures automatiquement moyennées lors de l'enregistrement
 - Avantages :
 - élimination totale des saturations si le nombre de mesures moyennées est 2 (tester pour des valeurs comprises entre 2 et 16),
 - identification rapide et fiable des enregistrements saturés (contribution plus forte des mesures saturées dans la moyenne).
 - Inconvénients :
 - augmentation de la variabilité temporelle et donc nécessité d'augmenter le nombre de mesures pour obtenir une moyenne fiable,
 - remplissage de la mémoire de l'appareil beaucoup plus rapide.

Analyses

Les réponses spectrales coralliennes sont relativement homogènes à travers les différents types définis. Les coraux se classent tous dans l'une ou l'autre des deux grandes formes spectrales *brune* et *bleue*, différenciées respectivement par une figure de réflectance triple ou double dans le rouge (entre 575 – 650 nm).

La forme *brune* est la plus fréquente, représentée en moyenne par plus de 80 % des colonies de chaque type. Même si la *brune* est majoritaire partout, des différences de fréquence sont sensibles entre les types : jusqu'à 40 % de forme *bleue* chez les *Coraux massifs* et les *Pocillopores* contre une absence totale de cette même forme chez les *Acropores submassifs*, les *Millépores* et les *Coraux mous*.

L'occurrence de l'une ou l'autre de ces deux formes ne semble influencée par aucun paramètre du milieu (éclairage, profondeur).

Des figures de fluorescence peu marquées sont souvent visibles sur les spectres, principalement entre 450 et 550 nm. Leur présence est très variable au sein des coraux, avec des types comme les *Acropores branchus*, *digités* et *tabulaires* présentant une fluorescence chez près de 70 % des colonies, et des types où elle est totalement absente (*Millepores*). Dans certaines colonies, la fluorescence peut être très intense, sans lien apparent avec la profondeur ou le type corallien.

Les substrats minéraux nus présentent de manière quasi systématique les figures d'absorption dues à une faible activité photosynthétique, qu'il faudra prendre en compte lors de la définition des algorithmes de traitement des images hyperspectrales.

Grâce à leurs compositions pigmentaires spécifiques, les algues et les coraux peuvent toujours être discriminés par les caractéristiques des figures d'absorption et notamment par les positions et largeurs des pics de réflectance.

La localisation géographique ne semble pas avoir d'influence sur la signature spectrale des types de nature de fond vivants rencontrés à l'échelle des 4 secteurs du sud-ouest de l'océan Indien étudiés. Elle joue par contre un rôle dans la nature et la composition spécifique des types de fond (algueries à *Halimeda*, hydriques *Aglaophenia* de Glorieuses par exemple) et des habitats rencontrés localement (herbiers et mangroves de Mayotte, etc.), et qui peuvent avoir des étendues géographiques limitées.

Perspectives pour le traitement d'images

Toutes les mesures ont été réalisées sur des cibles pures, c'est-à-dire constituées d'un seul type de nature de fond (surface de la tâche analysée par le spectroradiomètre au sol d'environ 2 cm de diamètre). En fonction de la résolution spatiale des données aériennes hyperspectrales (taille des pixels comprise entre 20 cm et 1 m), des dimensions des objets à discriminer au sol (colonies coralliennes centimétriques à décimétriques) et de leur imbrication spatiale (hétérogénéité), la pureté des pixels de l'image, composés d'un mélange plusieurs types de nature de fond, sera très variable. L'interprétation des données pixellaires devra prendre en compte cette variabilité spatiale et les spectres de mélange qui en résultent pour produire des résultats fiables. L'atténuation du signal lumineux par la colonne d'eau devra être corrigée avec la meilleure précision pour éviter les effets mis en évidence dans les mesures sous-marines (atténuation et déplacement de certaines figures de réflectance discriminantes, notamment dans le rouge et le proche infrarouge), risquant de fausser les interprétations.

Les mesures de radiométrie sous-marine ayant été réalisées sur des cibles ponctuelles (moyennées dans l'espace et le temps), la variabilité liée à la structure et l'agencement des différentes cibles dans l'espace n'est pas prise en compte dans cette analyse de la librairie spectrale. Les données de télédétection (images hyperspectrales, Lidar) vont apporter des critères supplémentaires de discrimination des types de fond et des « habitats » : forme et étendue de certains types (forme circulaire des acropores tabulaires ou des herbiers de *Syringodium*), textures intra-type (homogénéité des herbiers ou des massifs d'acropores branchus) et inter-type (agencement spatial et taux de recouvrement entre les différents types de nature de fond constitutifs d'un « habitat »).

Aussi, il est indispensable de définir avec précision ces « habitats », zones homogènes caractéristiques, et de retenir des paramètres les définissant (agencement spatial des différentes cibles, profondeur, exposition, etc.). Cette étape doit être réalisée avec de très bonnes connaissances :

- du terrain pour la définition d'entités surfaciques homogènes ayant un sens au niveau de la bio-géo-morphologie (« habitats »).
- du traitement d'images pour la caractérisation de ces habitats par différents paramètres issus de la télédétection (données hyperspectrales et Lidar).

C'est par cette phase essentielle de « définition des habitats » que débutera la phase II du projet Spectrhabent-OI

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Taylor, *Field Guide for the GER1500 with underwater housing*, Field Spectroscopy Facility - Natural Environment Research Council, 2006.
- [2] J.A. Goodman and S.L. Ustin, "Acquisition of underwater reflectance measurements as ground truth," *Water Resources*, 2001.
- [3] L. Bertels, E. Knaeps, S. Sterckx, and B. Deronde, "Monitoring of coral reefs using hyperspectral data; a case study: Fordata, Tanimbar, Indonesia," 2006.
- [4] E.J. Hochberg, M.J. Atkinson, A. Apprill, and S. Andrefouet, "Spectral reflectance of coral," *Coral Reefs*, vol. 23, 2004, pp. 84-95.
- [5] D.T. Pulliza, *A Multi-Sensor Comparison For Coral Reef Habitat Mapping : A Case Study Using A Tropical Patch Reef Environment In Biscayne National Park, Florida*, 2004.
- [6] C. Puech, M. Deshayes, Y. Navarro, and L. Puente, "Images, modèles et biomasse immergée Cartographie des herbiers de zostères en Camargue à partir d'images SPOT-5," 2004.
- [7] S. Maritorena and N. Guillocheau, "Optical properties of water and spectral light absorption by living and non-living particles and by yellow substances in coral reef waters of French Polynesia," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 131, 1996, pp. 245-255.
- [8] E.J. Hochberg, A.M. Apprill, M.J. Atkinson, and R.R. Bidigare, "Bio-optical modeling of photosynthetic pigments in corals," *Coral Reefs*, vol. 25, 2006, pp. 99-109.
- [9] C.H. Mazel and E. Fuchs, "Contribution of fluorescence to the spectral signature and perceived color of corals," *Limnology & Oceanography*, vol. 48, 2003, pp. 390-401.
- [10] A.T. Banaszak, M.G. Barba Santos, T.C. Lajeunesse, and M.P. Lesser, "The distribution of mycosporine-like amino acids (MAAs) and the phylogenetic identity of symbiotic dinoflagellates in cnidarian hosts from the Mexican Caribbean," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 337, 2006, pp. 131-146.
- [11] J.E. Corredor, A.W. Bruckner, F.Z. Muszynski, R.A. Armstrong, R. Garcia, and J.M. Morell, "UV-absorbing compounds in three species of caribbean zooxanthellate corals: depth distribution and spectral response," *Bulletin of Marine Science*, vol. 67, 2000, pp. 821-830.

- [12] C.H. Mazel, M.P. Lesser, M.Y. Gorbunov, T.M. Barry, J.H. Farrell, K.D. Wyman, and P.G. Falkowski, "Green-fluorescent proteins in Caribbean corals," *Limnology & Oceanography*, vol. 48, 2003, pp. 402-411.
- [13] "Kruskal–Wallis one-way analysis of variance - Wikipedia, the free encyclopedia."

ANNEXE 1. SATURATION DES SPECTRES

De nombreux spectres de terrain ne sont pas exploitables à cause d'une saturation du capteur, non décelable au moment lors de l'enregistrement. Les 5 figures ci-dessous présentent des illustrations de ce phénomène.

Le spectroradiomètre est réglé pour effectuer à chaque enregistrement la moyenne de 32 mesures successives (cf. protocole terrain). L'écran LCD situé à l'arrière de l'appareil permet de contrôler le bon déroulement de l'enregistrement et affiche un message (**SAT**) en cas de saturation de la mesure. Ce message n'apparaît que si le spectre final est saturé, mais pas si un ou plusieurs spectres saturés entrent dans la moyenne sans entraîner de saturation du spectre final (*information du service technique SVC*).

Les 4 figures suivantes présentent les résultats d'expérimentation réalisées dans le lagon de la Réunion la journée du 16 juin 2009 dans quelques dizaines de centimètres d'eau.

Figure 47 ci-dessous, 4 mesures successives réalisées sur le Spectralon à quelques secondes d'intervalle. Le spectre de luminance #52 présente une figure de saturation sinusoïdale caractéristique (annoncée cette fois-ci par le message (**SAT**) sur l'écran LCD lors de l'enregistrement). L'amplitude, la fréquence et la phase de cette courbe de saturation sont variables d'un instrument à l'autre, mais constantes pour un même couple instrument / calibration (*information du service technique SVC*).

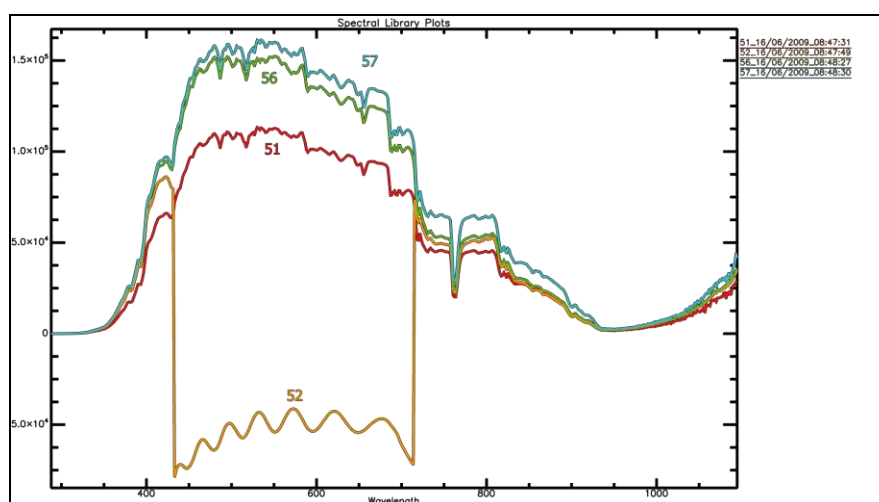


Figure 47. Spectres de luminance enregistrés le 16 juin 2009 dans le lagon de la Réunion. Le spectre 52 (orange) présente un profil de saturation sinusoïdale caractéristique.

Figure 48 ci-dessous, la différence relative entre les différentes mesures montre qu'en plus du spectre #52, le spectre #56 (courbe verte) présente deux légers pics d'absorption à 525 et 575 nm. Les positions de ces pics correspondent exactement à celles observées sur spectre saturé (lignes pointillées verticales) : il est fort probable que quelques-unes des 32 mesures du spectre #56 aient été saturées et impactent le spectre final.

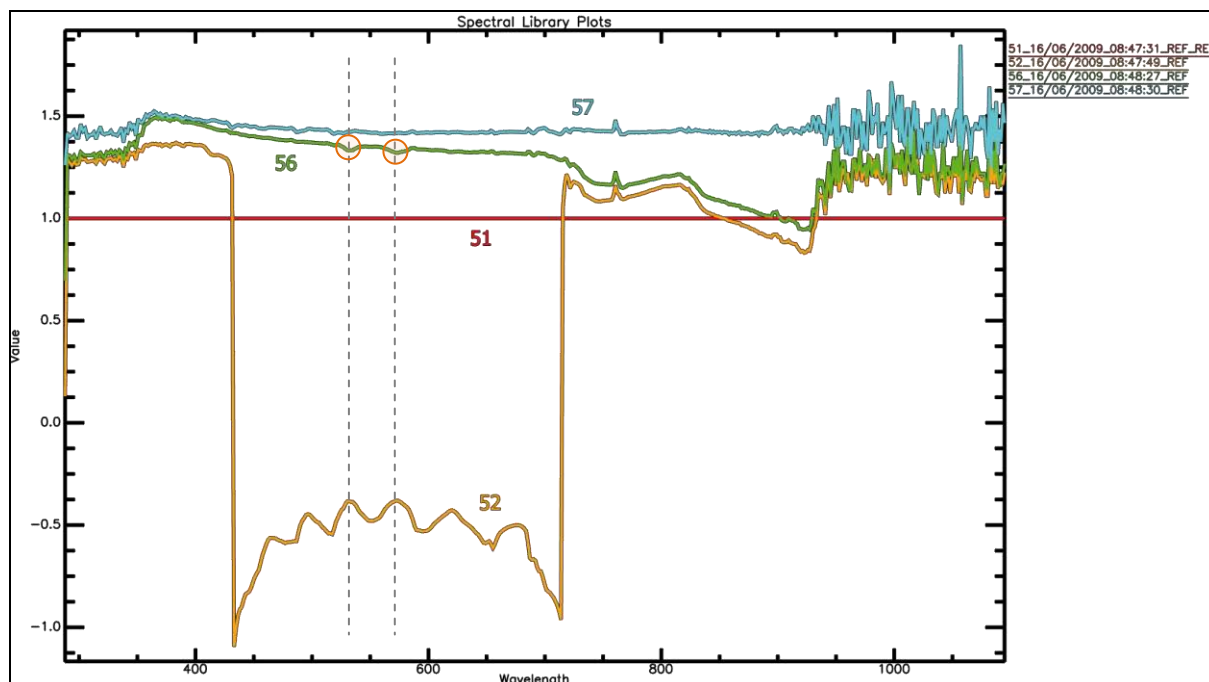


Figure 48. La division des 3 dernières mesures par la première permet de mettre en évidence des différences relatives.

Figure 49 ci-dessous, 4 autres mesures successives réalisées sur le Spectralon à quelques secondes d'intervalle. Contrairement à l'expérimentation précédente, les 4 courbes de luminance paraissent correctes. En raison de la forme très anguleuse des courbes, il semble très difficile de pouvoir déceler avec certitude une saturation directement sur les spectres de luminance.

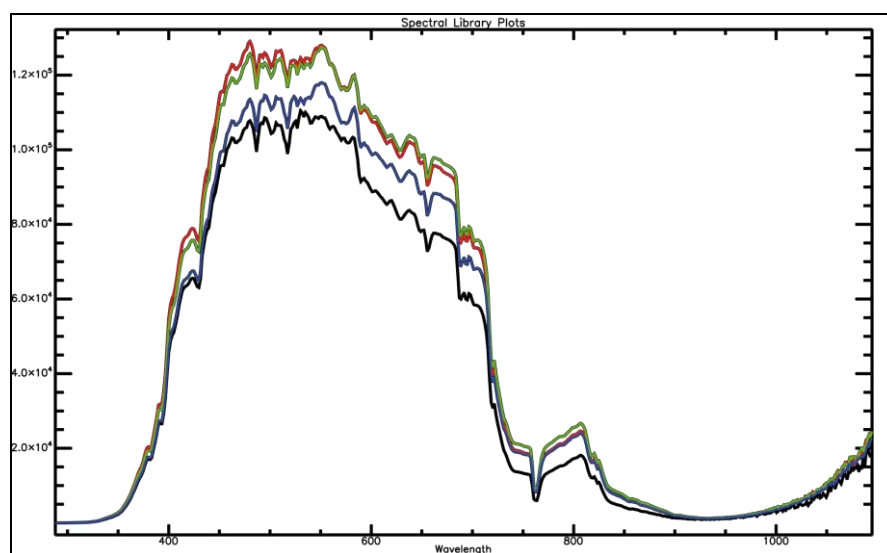


Figure 49. Spectres de luminance du Spectralon dans le lagon de la Réunion.

Figure 50 ci-dessous, les différences relatives mettent clairement en évidence que sur les 4 mesures, les 3 dernières sont saturées (forme sinusoïdale caractéristique correspondant exactement avec celle d'un spectre saturé « pur »). L'enregistrement de plusieurs mesures successives a permis d'identifier les spectres saturés, pratiquement indétectables sur une seule mesure en luminance. Ces spectres doivent être éliminés pour ne pas fausser les mesures.

Le phasage est important pour l'identification des spectres saturés : si ces trois mesures avaient été en opposition de phase avec le spectre saturé pur, on aurait pu conclure à la saturation du premier spectre, celui ayant servi de référence.

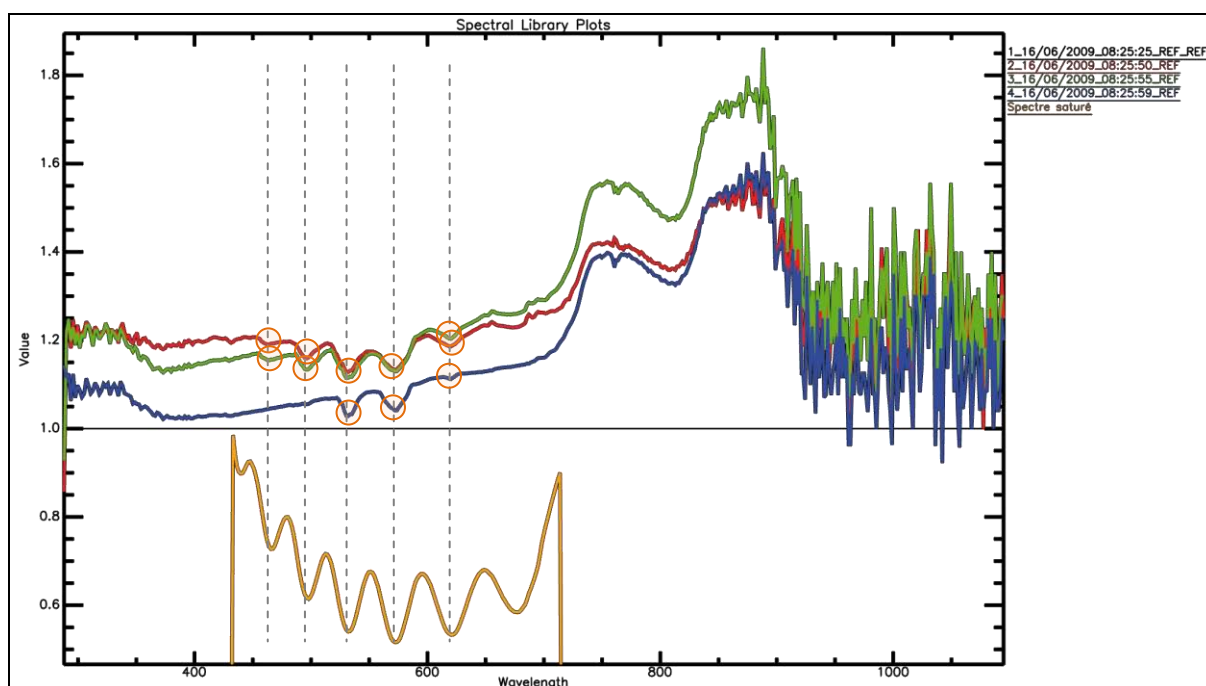


Figure 50. Différences relatives entre les différentes mesures. Pour comparaison, le spectre saturé de l'expérience précédente a été représenté (courbe orange).

La Figure 51 ci-dessous montre quelques mesures cibles présentant, comme pour les mesures Spectralon, de nombreuses saturations. La superposition d'un spectre saturé pur sur le graphique permet de différencier les pics de réflectance *apparents* dus à la saturation, des pics *normaux* dus à l'activité des pigments photosynthétiques.

En raison de la faible atténuation du signal lumineux à ces longueurs d'ondes et donc de la forte luminance atteignant le capteur, les pics de saturations sont les plus fréquents à 495, 533 et 574 nm (voir les spectres de luminance Figure 25, Figure 30, Figure 47, Figure 49 et Figure 53). Pour la même raison, les cibles les plus réfléchantes sont plus fréquemment saturées que les cibles sombres.

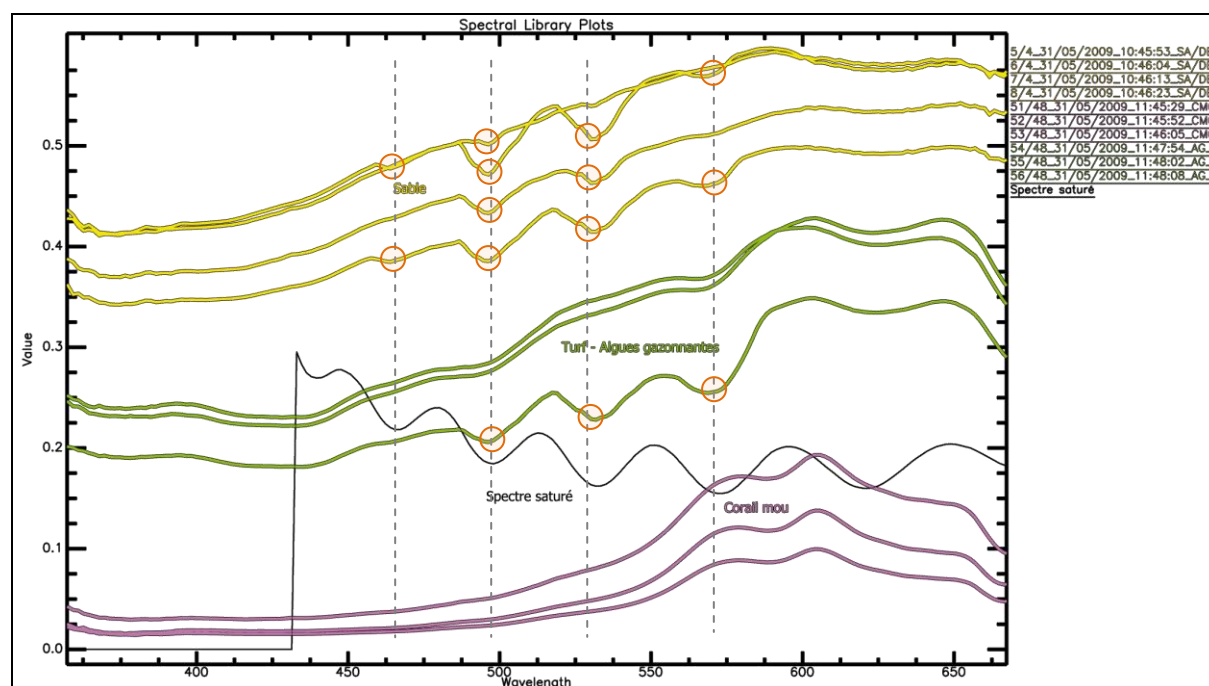


Figure 51. Saturation sur différentes cibles. Plus les valeurs de réflectance sont fortes, plus le risque de saturation est élevé.

A cause des fortes variations de luminosité dans la masse d'eau dans les petits fonds, la saturation des spectres est très fréquente et doit être prise en compte lors des mesures terrain.

Les mesures saturées peuvent être facilement filtrées en post-traitement si plusieurs mesures successives de la même cible sont réalisées (idéalement au moins 3 ou 4) avec au moins une valeur correcte non saturée.

Des méthodes permettent de limiter ce phénomène de saturation lors de l'enregistrement (cf. §2.2.1 page 41)

ANNEXE 2. PROFONDEUR DE MESURE

Les figures ci-dessous présentent les résultats d'expérimentations réalisées en piscine. Le but de ces mesures était d'évaluer l'impact d'un changement de profondeur sur les spectres enregistrés, tous les autres paramètres restants invariants.

Les mesures ont été réalisées sur 5 carreaux de céramique colorés, dont les spectres de réflectance émergés sont présentés Figure 52 ci-dessous.

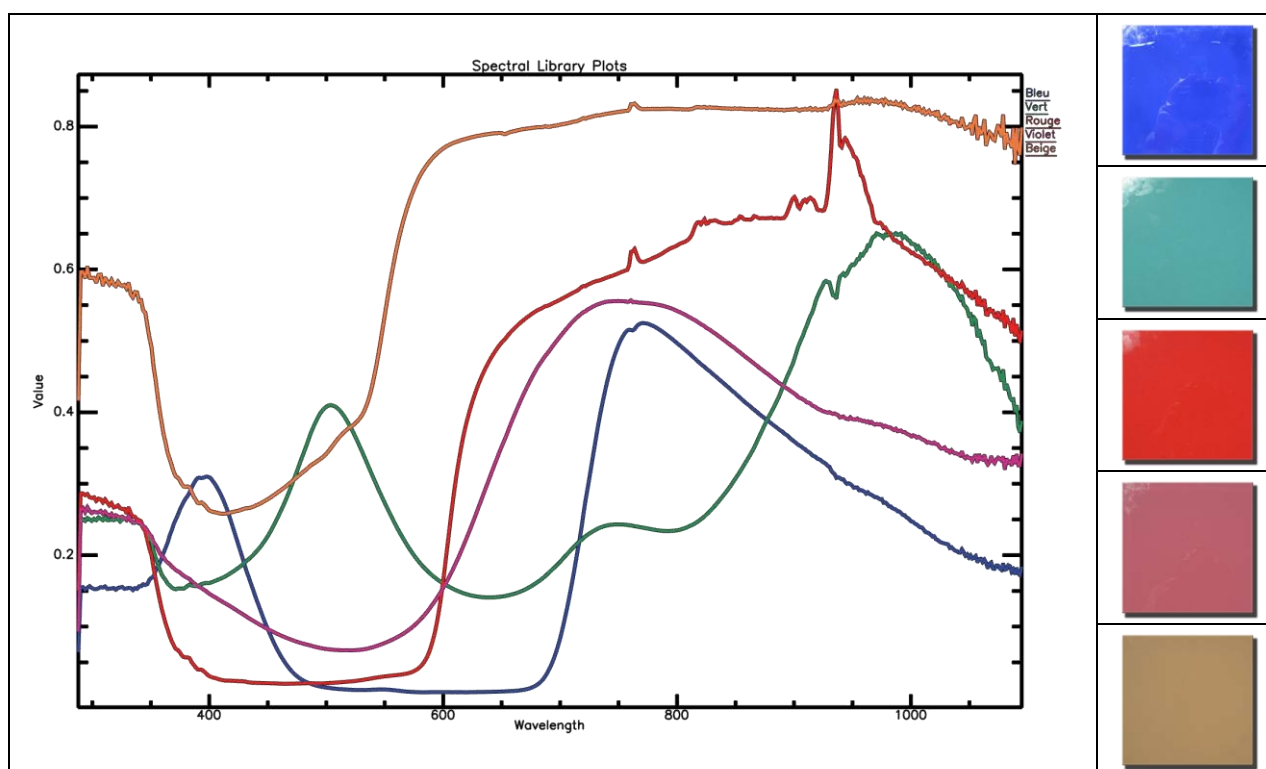


Figure 52. Spectres émergés des différents carreaux de couleur. De haut en bas : bleu, vert, rouge, violet et beige.

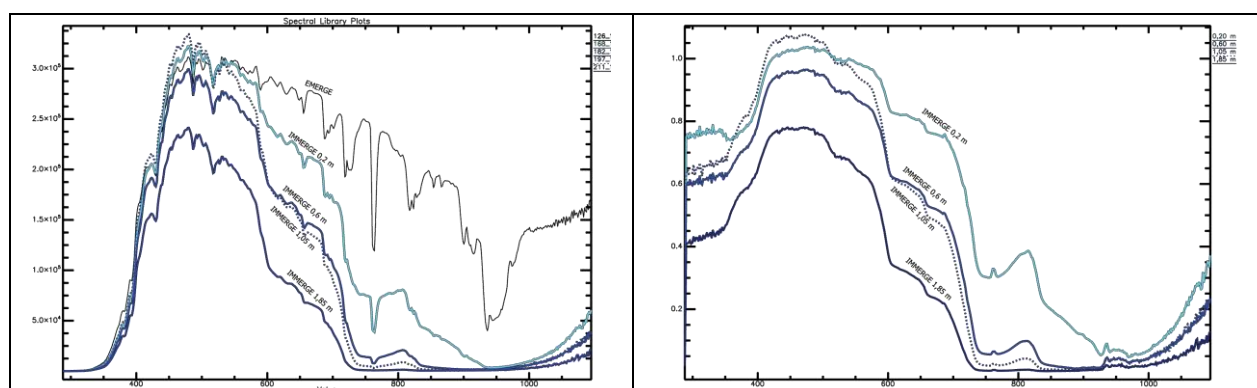


Figure 53. A gauche, évolution des luminances du Spectralon en fonction de la profondeur. A droite, réflectance relative entre la mesure émergée et les différentes profondeurs d'immersion. La mesure à 1,05 m de profondeur, qui semble peu en accord avec les mesures encadrantes (0,6 m et 1,85 m) a été figurée en pointillés.

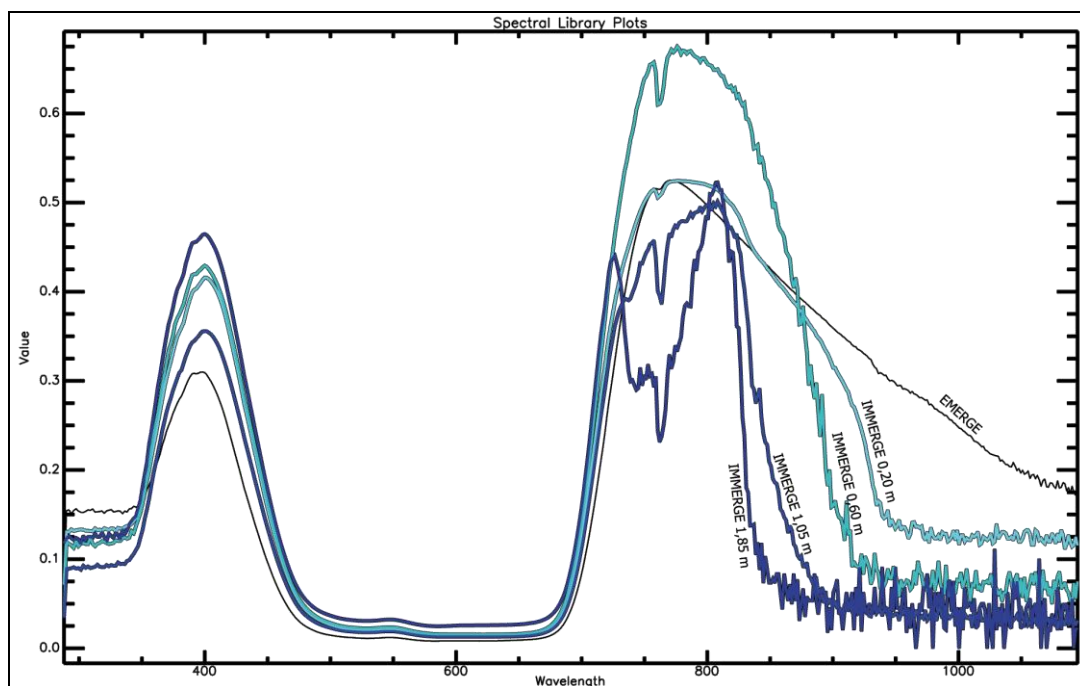


Figure 54. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface bleue. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.

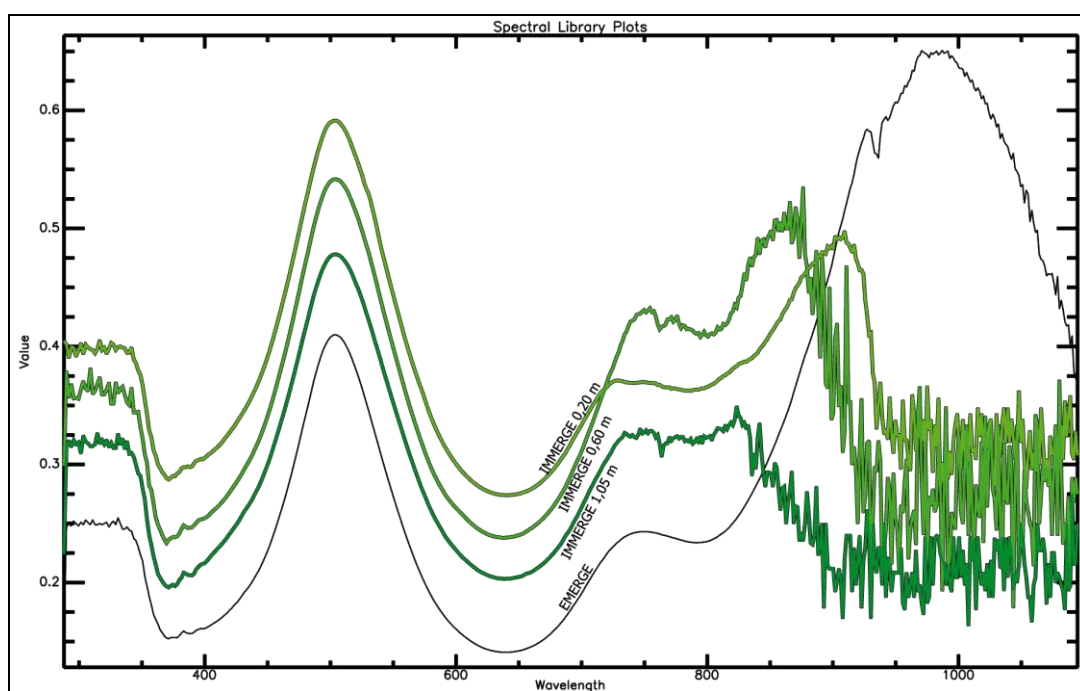


Figure 55. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface verte. 4 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm et 105 cm (résultats de la série de mesures à 185 cm, saturés, non montrés).

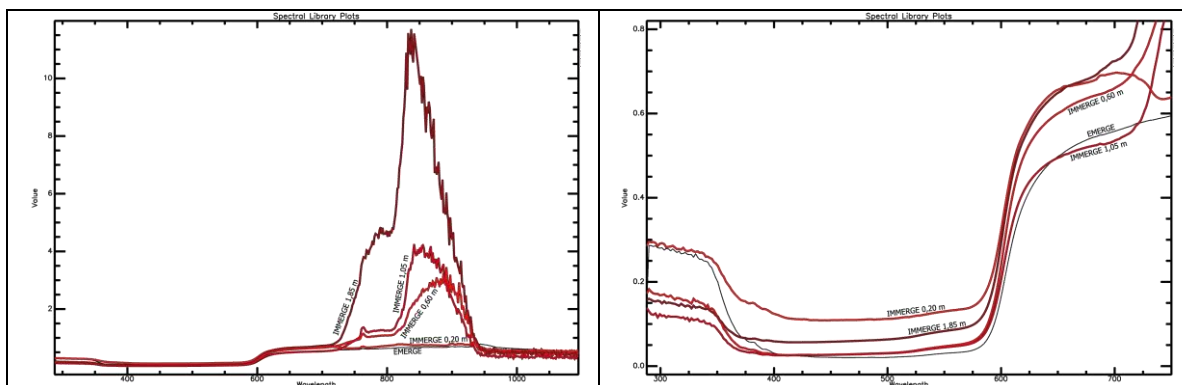


Figure 56. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface rouge. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm. En raison des fortes variations de réflectance dans le PIR, un zoom de la partie visible est présenté à droite.

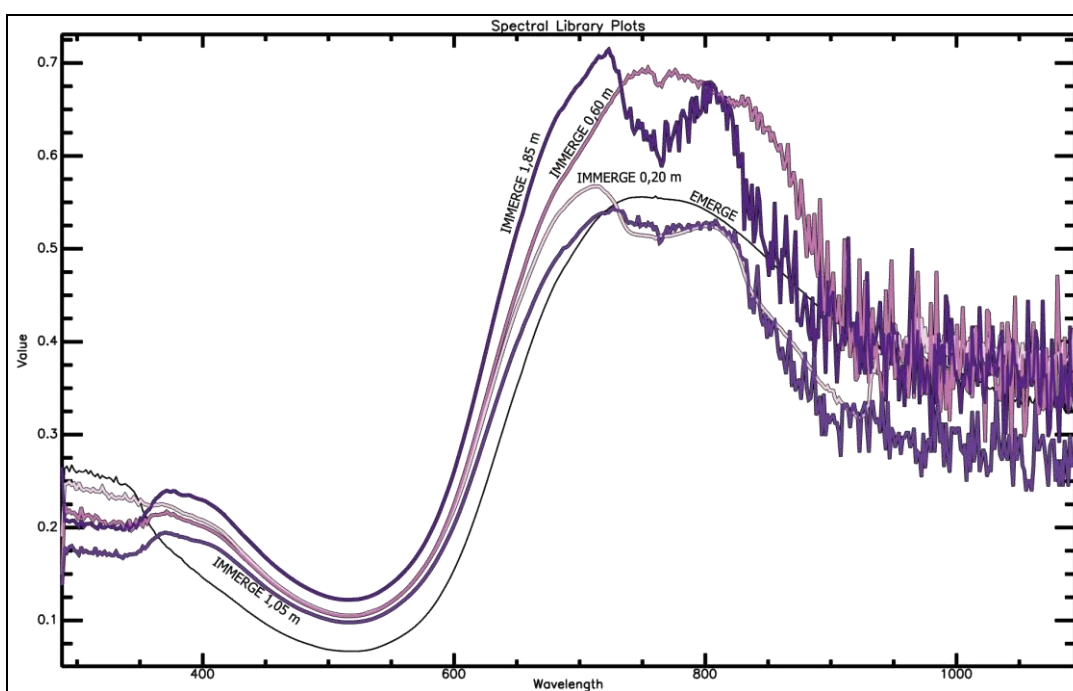


Figure 57. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface violette. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.

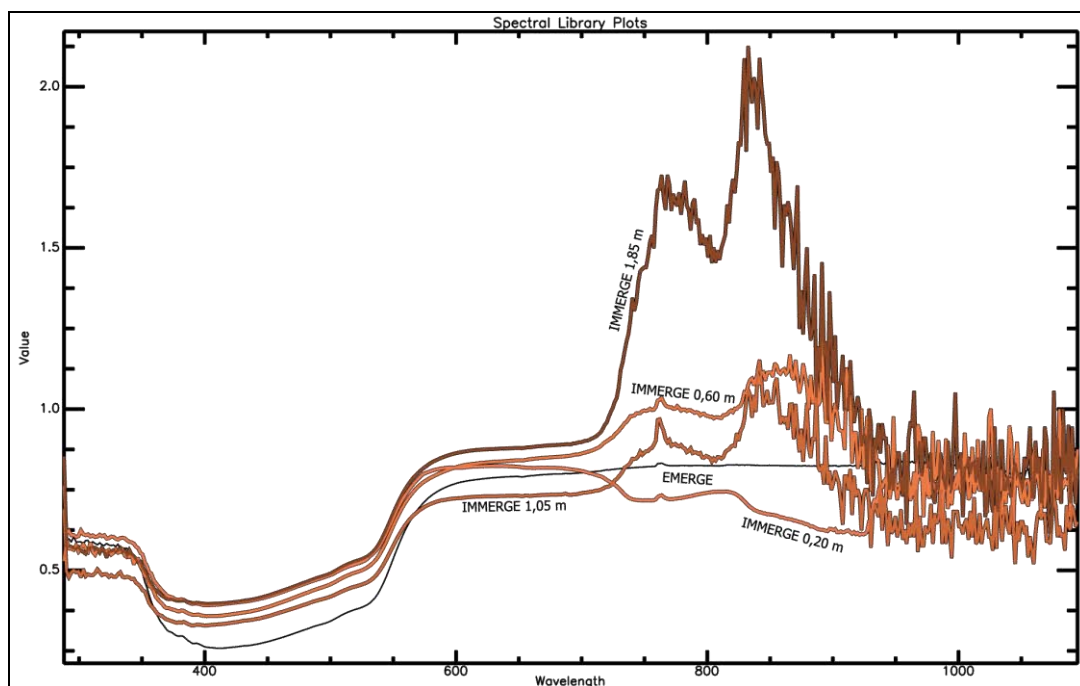


Figure 58. Effet de la profondeur de mesure sur la réflectance pour la surface beige. 5 séries de mesures : émergé, immergé à 20 cm, 60 cm, 105 cm et 185 cm.

En raison de la forte variabilité constatée d'une mesure à l'autre, il est difficile de conclure, mais il semble ne pas y avoir d'impact de la profondeur sur la réflectance mesurée entre 0 et 1,85 m.

- Dans le visible les profils de spectres sont conservés entre 0 et 2 m. Les petites variations du niveau de réflectance observées ne suivent pas de loi avec la profondeur et sont probablement dues à de faibles variations de luminosité ou dans l'angle de la mesure (carreaux colorés tests de céramique brillants sans doute peu lambertiens).
- Dans le proche infrarouge, à partir de 700 nm, on observe beaucoup plus de variabilité, sans lien apparent avec la profondeur : dans ces longueurs d'ondes, la lumière parvenant au capteur étant très faible, des petites variations absolues de hauteur d'eau, dues à la méthode de mesure (distance Spectralon – capteur et cible – capteur non identique, petites variations dans la profondeur de mesure) produisent ces fortes variations relatives, non significatives.

ANNEXE 3. REFLECTANCE DES SABLES

Des mesures de réflectance ont été réalisées le 18 juillet 2009 sur différents sables secs de la collection personnelle de M. Quod. Les niveaux de réflectance moyens mesurés s'échelonnent de moins 10 % sur les sables noirs volcaniques de Hawaï et la Baie de Handré à plus de 60 % sur les sables calcaires de Tromelin, l'île des Pins et Glorieuses.

Tous les spectres présentent un profil semblable sans pic d'absorption ni de réflectance particuliers. Deux «décrochements» nets sont visibles autour de 350 et 600 nm. Entre 400 et 600 nm, il semble que la pente de la courbe soit variable d'un sable à l'autre.

Toutes les courbes spectrales présentent de petits artéfacts, souvent à des longueurs d'ondes identiques (760 et 930 nm) : les conditions atmosphériques n'étaient sans doute pas optimales lors des enregistrements. On peut supposer que des passages de voiles nuageux en altitude ont fait varier la lumière incidente (absorption par la vapeur d'eau). Les différences de réflectances entre les types de sables étant très faibles, sans figures spectrales particulières, de nouvelles mesures en conditions de luminosité parfaitement stables (laboratoire avec éclairage artificiel) seraient à effectuer pour caractériser avec précision les différentes réponses spectrales (magnitude et profils spectraux).

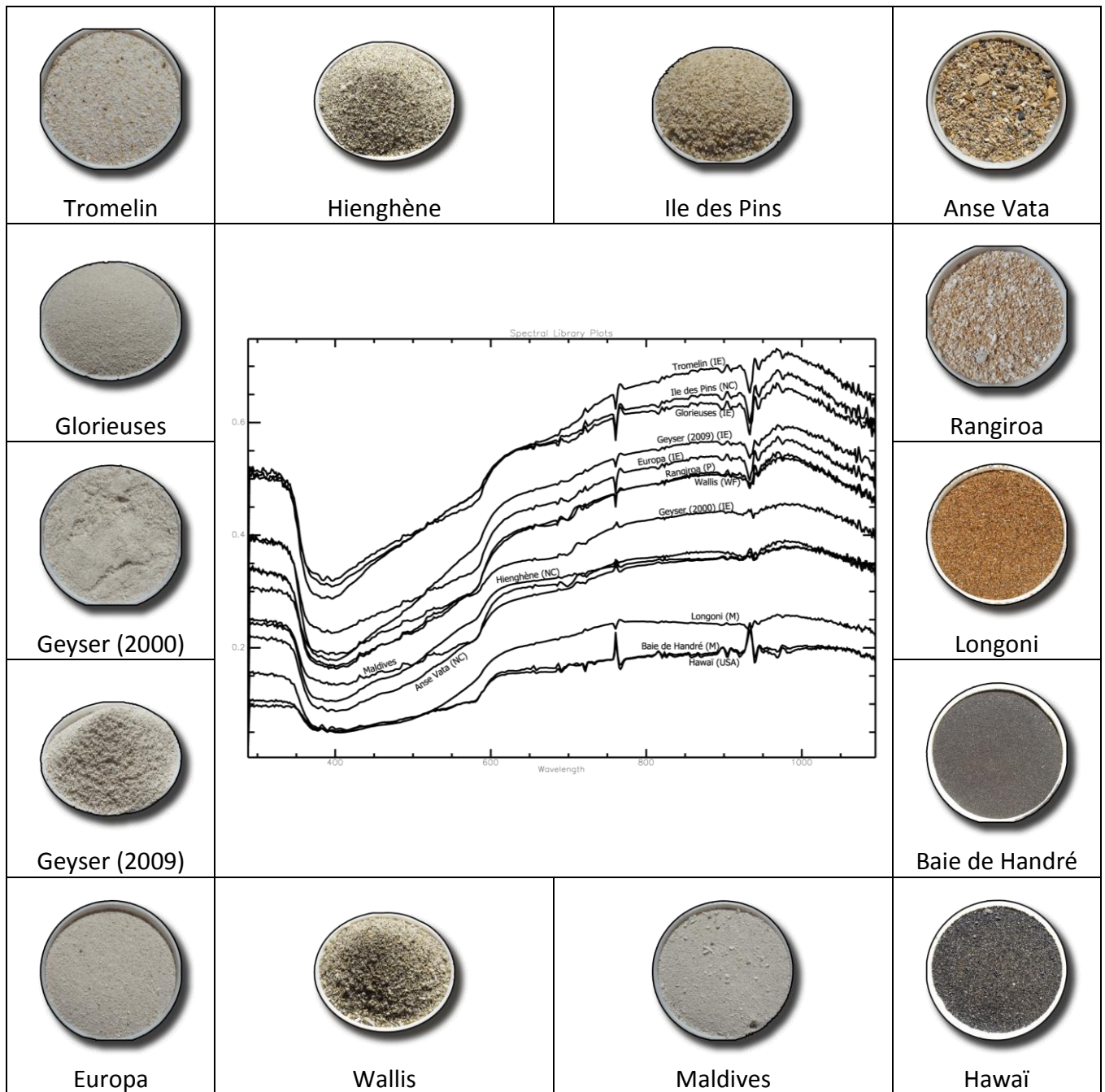


Figure 59. Différents sables et leurs réponses spectrales.

ANNEXE 4. FEUILLES DE VT

Index	Localisation		Date		Operateur		Commentaires		
	WPT	Photo	Spectres	01-Cible	01-%TC	02-Cible		02-%TC	03-Cible
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									

Figure 60. Exemple de feuille de terrain utilisée pour la radiométrie émergée.

Index	Profondeur	Cible	N° Spectre début	N° Spectre fin	N° Spectres manqués	Commentaires
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						

Figure 61. Exemple de feuille de terrain pour la radiométrie sous-marine.

