



Ifremer – Délégation de La Réunion

Agence des aires marines protégées

Rapport Ifremer n°: RST-Délégation Réunion/2010-02-2

Pascal MOUQUET – AAMP  
Jean-Pascal QUOD – ARVAM

# Spectrhabet-OI

## Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine



### 2/2. Document annexe – Fiches par type

AVRIL 2010

Partenaire scientifique et technique :



Partenaires financiers :





**Spectrhabet-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**

**2/2. Document annexe – Fiches par type**



## FICHE DOCUMENTAIRE

<b>Numéro d'identification du rapport :</b> <b>Diffusion :</b> libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>  <b>Validé par :</b> R. LEGOFF (IFREMER) – P. WATREMEZ (AAMP) <b>Adresses électroniques :</b> <a href="mailto:ronan.legoff@ifremer.fr">ronan.legoff@ifremer.fr</a> <a href="mailto:pierre.watremez@aires-marines.fr">pierre.watremez@aires-marines.fr</a>	<b>date de publication :</b> Avril 2010 <b>nombre de pages :</b> 97 <b>bibliographie :</b> Oui <b>illustration(s) :</b> Oui <b>langue du rapport :</b> Français
<b>Titre et sous-titre du Rapport :</b> Spectrhabent-OI : Cartographie des habitats benthiques littoraux et subtidiaux des îles françaises de l'océan Indien à partir de données hyperspectrales Phases 1 & 2 : Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine 2/2. Document annexe – Fiches par type	
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Auteurs principaux :</b> Pascal MOUQUET Jean-Pascal QUOD	<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> <i>Agence des aires marines protégées</i> <i>ARVAM</i>
<b>Autres collaborateurs :</b> Hugues Evano Stéphanie Bollard	<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> <i>Ifremer</i> <i>Université de la Réunion</i>
<b>Cadre de la recherche :</b> Convention cadre entre la Préfecture de la Réunion, les TAAF, l'Agence des AMP et l'Ifremer. Référence : 09-1217795	
<b>Résumé :</b> 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, Geyser, 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).	
<b>Abstract :</b> An underwater spectral library has been acquired at four different study sites in the Southwest Indian Ocean (Glorioso Islands, Banc du Geyser, 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.	
<b>Mots-clés :</b> radiométrie sous-marine, coraux, récifs coralliens, spectres, réflectance, pigments photosynthétiques, librairie spectrale, télédétection hyperspectrale	
<b>Keywords :</b> reflectance, coral, coral reefs, spectra, hyperspectral remote sensing, photosynthetic pigments, spectral library, underwater housing, spectroradiometer	



## SOMMAIRE

<b>FICHE DOCUMENTAIRE</b>	<b>5</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>7</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b>	<b>7</b>
<b>PARAMETRES DES LA BASE DE DONNEES</b>	<b>9</b>
<b>FICHES TYPES</b>	<b>10</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>96</b>

## TABLE DES FIGURES

<i>Figure 1. Codes substrats utilisés pour classer les différents types biologiques et de substrats analysés (d'après document ARVAM).</i>	<b>9</b>
<i>Figure 2. Détail des données présentées dans chaque fiche type.</i>	<b>11</b>
<i>Figure 3. Trois mesures réalisées à la même profondeur à quelques mètres d'intervalle (réflectances normalisées).</i>	<b>36</b>
<i>Figure 4. A gauche, fluorescence des coraux mous. Spectre moyen (courbe noire) et spectres particuliers (courbes violette, rose, jaune, orange) avec les photographies de terrain correspondantes. A droite, deux réponses spectrales différentes pour deux CMO présentant la même coloration.</i>	<b>40</b>
<i>Figure 5. Les coraux blanchis peuvent conserver une coloration « normale » dans leur partie basale (à gauche). En visée verticale, les parties en bonne santé, non masquées par les branches blanchies (parties contournées de rouge), peuvent influencer la réponse spectrale.</i>	<b>43</b>
<i>Figure 6. Bien que de colorations identiques, on distingue deux types de coraux blanchis selon la présence ou non d'un pic de réflectance autour de 500 nm.</i>	<b>45</b>
<i>Figure 7. Comparaison des spectres de corail mort (DC), roche (RC) et du corail blanchi sous-type 2 (CBL), réflectances normalisées.</i>	<b>48</b>
<i>Figure 8. Spectres moyens des principales éponges rencontrées avec la photo de terrain correspondante.</i>	<b>52</b>
<i>Figure 9. Comparaison des différents types de gazons algaux (TA). Selon l'assemblage d'espèces qui le composent, la signature spectrale se rapproche, de haut en bas, des macroalgues brunes, vertes et rouges. Dans les deux derniers sous-types, en bas, aucun groupe algal ne prédomine dans le mélange algal et la réponse spectrale globale est une moyenne pondérée de chacune des réponses pures, avec une contribution potentielle du substrat sous jacent.</i>	<b>78</b>
<i>Figure 10. Comparaison des réponses spectrales sableuses en fonction de l'état hydrique.</i>	<b>90</b>





## PARAMETRES DES LA BASE DE DONNEES

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, branchue, 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 1.

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 :
  - les *Algues rouges* (RMA),
  - les *Algues vertes* (GMA)
  - les *Algues brunes* (BMA)
- Les *Coraux blanchis* (CBL)

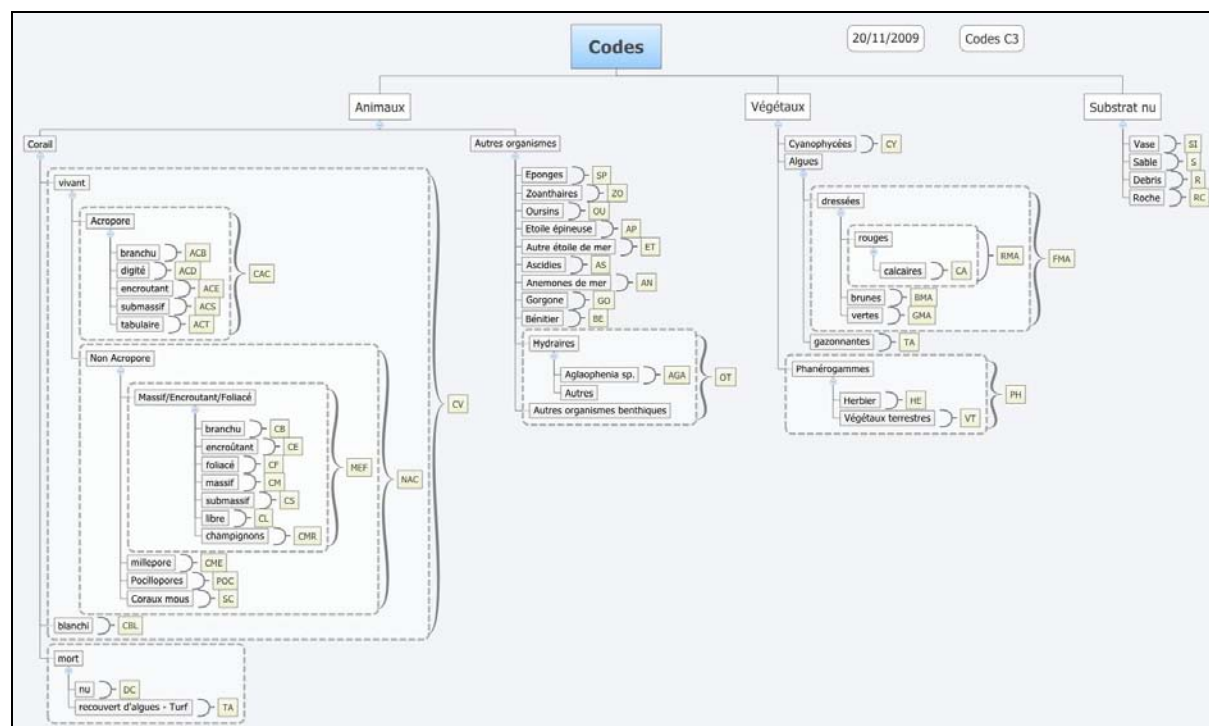


Figure 1. Codes substrats utilisés pour classer les différents types biologiques et de substrats analysés (d'après document ARVAM).

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*

## FICHES TYPES

Les fiches suivantes 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.

Les fiches présentent les principales caractéristiques spectrales de chaque type sous forme de graphiques suivis d'analyses plus détaillées. La Figure 2 ci-dessous détaille ces informations : dénomination, photos de terrain, et diverses statistiques spectrales.

	<p>1. Code et dénomination du <i>type</i> de nature de fond. Principaux genres ou espèces rencontrés sur le terrain lorsqu'ils ont été identifiés.</p>
	<p>2. Photographies sous-marines de terrain représentatives du <i>type</i>.</p>
	<p>3. Principales statistiques : moyenne, min et max, et quantiles placés à 2.5, 12.5, 25, 37.5, 67.5, 75, 87.5, et 97.5 % [1]. Le type ainsi que le nombre de cibles <i>n</i> analysés sont notés en haut à gauche du graph.</p>
	<p>4. Réflectances normalisées entre 400 et 675 nm<sup>1</sup>.</p>
	<p>5. Occurrences des minimums et maximums locaux exprimées en pourcentage du nombre total de mesures<sup>2</sup>.</p>

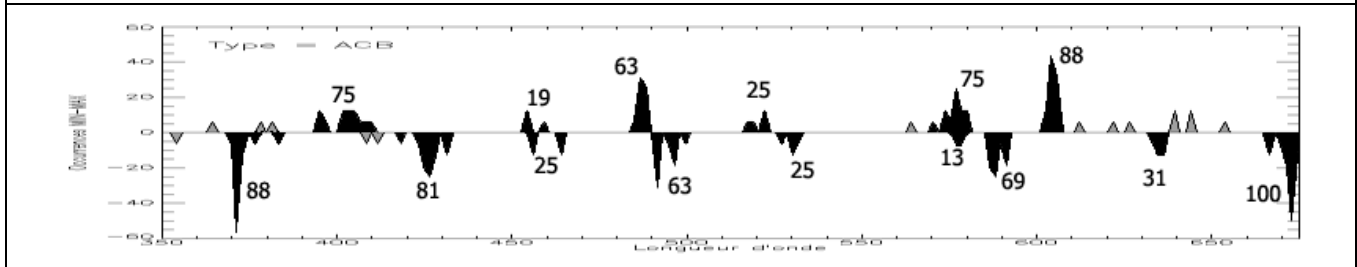
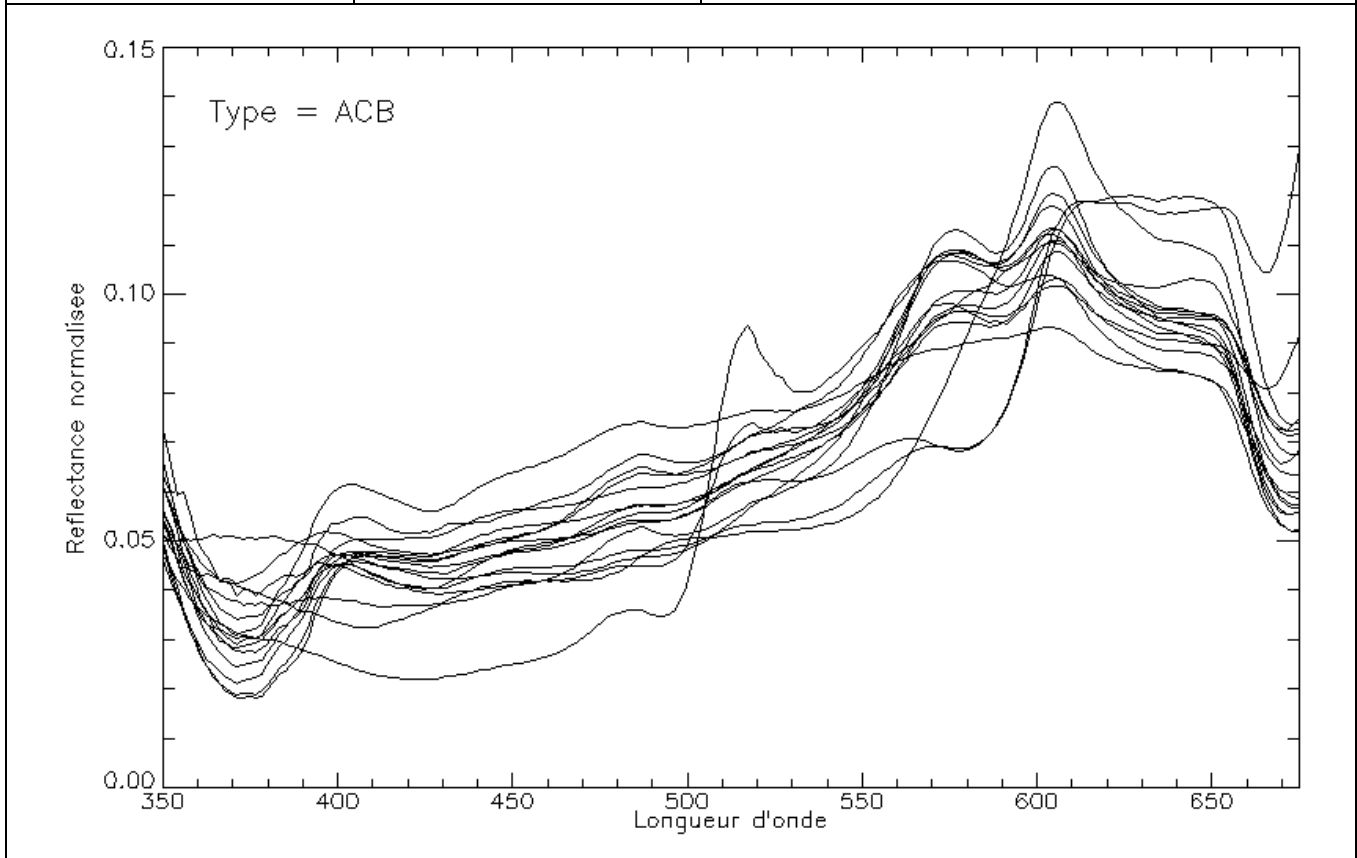
Figure 2. Détail des données présentées dans chaque fiche type.

<sup>1</sup> Pour faciliter la comparaison de la forme des spectres et limiter l'influence de la magnitude spectrale, la réflectance normalisée a été calculée par division de chaque spectre de réflectance par sa norme, calculée sur une plage de longueur d'onde d'intérêt (400 – 675 nm) [2].

<sup>2</sup> 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 2<sup>nd</sup>e positive) ou un maximum (dérivée 2<sup>nd</sup>e 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*.

Animaux	Coraux	Vivants	Acropores
---------	--------	---------	-----------

**ACB - Acropores branchus**

Après filtrage, la librairie spectrale comporte **16 mesures** exploitables d'ACB (4 GLO, 2 GEY, 5 MAY et 5 RUN).

Les ACB présentent une **grande variabilité de magnitude** spectrale : 95 % des mesures sont entre 5 % et 20 % à 600 nm. La structure spatiale très découpée, avec de nombreuses ombres projetées par les branches coralliennes est sans doute responsable de cette variabilité.

La **forme brune** est la forme **majoritairement** rencontrée (81 % de spectres). Le troisième épaulement à 650 nm est peu marqué.

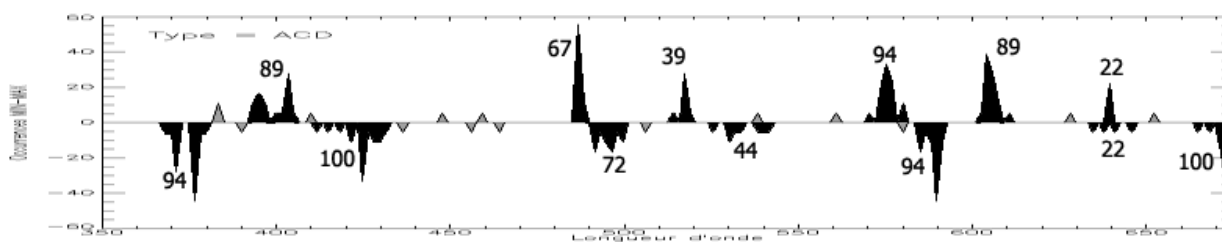
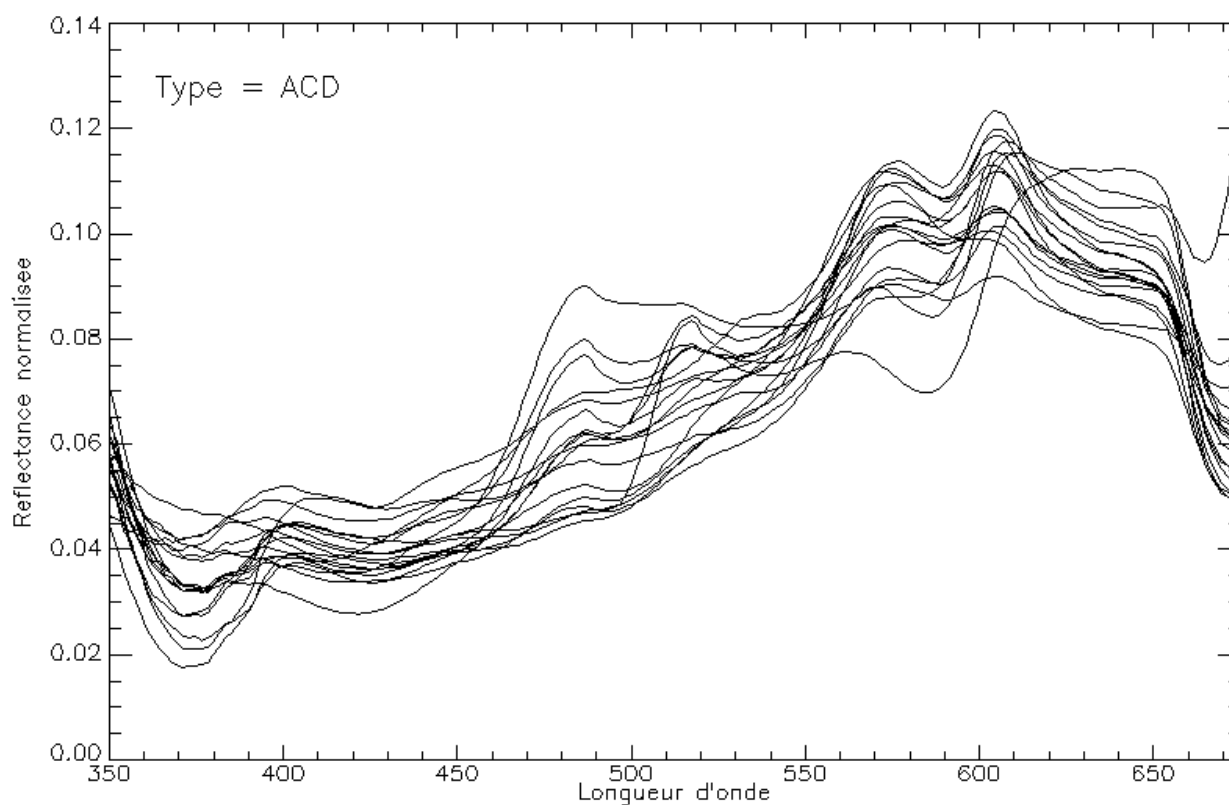
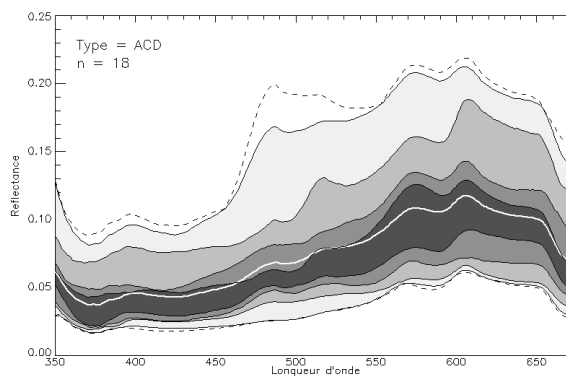
Le phénomène de **fluorescence** semble assez **fréquent** avec une succession de nombreux pics d'absorption et de réflectance entre 400 et 550 nm :

- Près des  $\frac{2}{3}$  des spectres présentent un pic à 487 nm.
- $\frac{1}{4}$  des spectres montrent un pic autour de 520 nm.

Ces différences dans les magnitudes et les formes des courbes spectrales expliquent la diversité de coloration observée sur le terrain.

Animaux	Coraux	Vivants	Acropores
---------	--------	---------	-----------

**ACD - Acropores digités**



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **18 mesures** exploitables d'ACD (7 GLO, 2 GEY, 4 MAY et 5 RUN).

Les ACD présentent une **grande variabilité de magnitude** spectrale : 95 % des mesures sont entre 5 % et 20 % à 600 nm. Comme pour les ACB, la structure spatiale très découpée, avec de nombreuses ombres projetées par les digitations est sans doute responsable de cette variabilité.

La **forme brune** est la forme **majoritairement** rencontrée (78 % de spectres). Le troisième pic à 650 nm semble un peu plus marqué que pour les ACB (présent sur plus de 1/5 des spectres).

Le phénomène de **fluorescence** est **fréquent** avec notamment deux pics de réflectance :

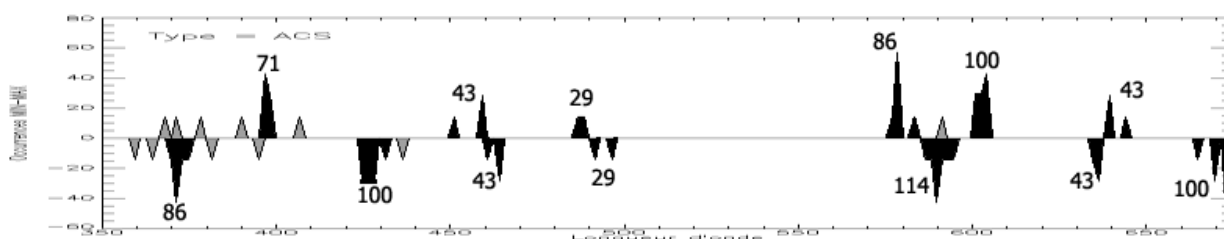
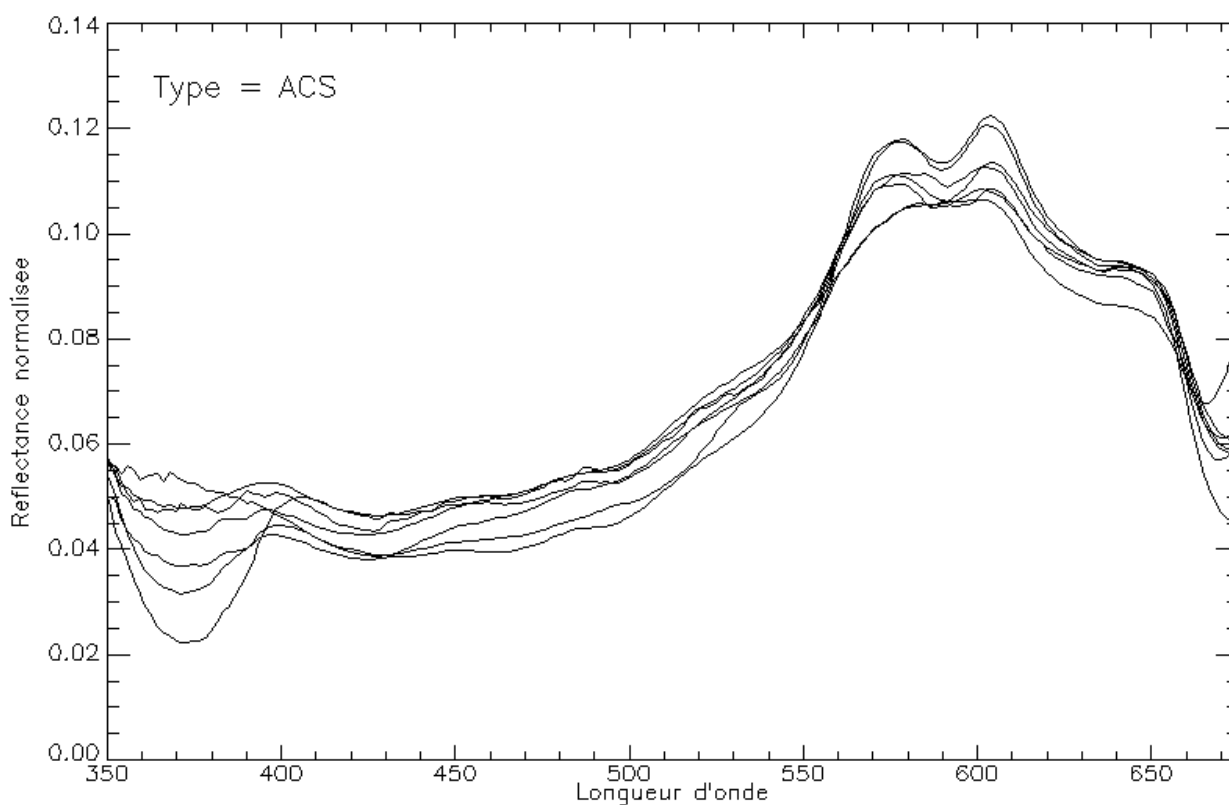
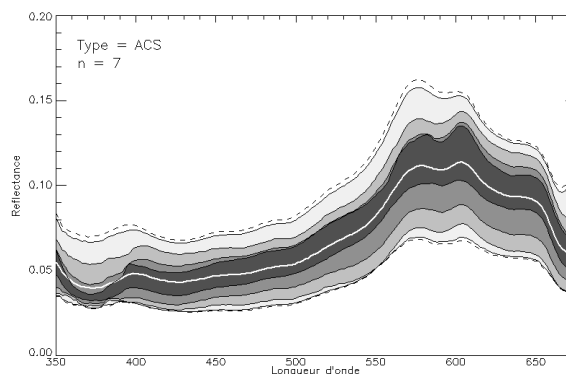
- 2/3 des spectres présentent un pic à 487 nm.
- Plus de 1/3 des spectres montrent un pic à 517 nm.

Ces différences dans les magnitudes et les types et la fluorescence expliquent la diversité de coloration observée sur le terrain.

<b>Animaux</b>	<b>Coraux</b>	<b>Vivants</b>	<b>Acropores</b>
----------------	---------------	----------------	------------------

**ACS - Acropores submassifs**

Espèce rencontrée : *Acropora palifera*





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **7 mesures** exploitables d'ACS (3 GLO, 1 GEY et 3 MAY). Ce type est en réalité constitué par la seule espèce *Acropora palifera* rencontrée sur le terrain, ce qui explique le relativement faible nombre de mesures.

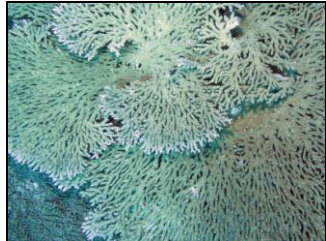

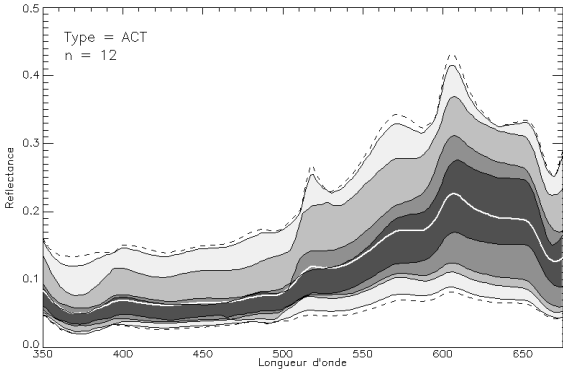
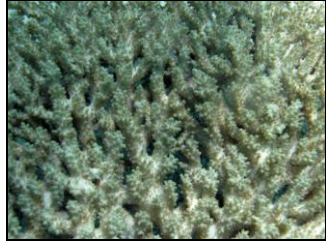

Les ACS présentent une **plus faible variabilité de magnitude** que les deux types précédents : entre 6 % et 16 % à 600 nm, et ce malgré une structure spatiale assez découpée, favorisant les ombres.

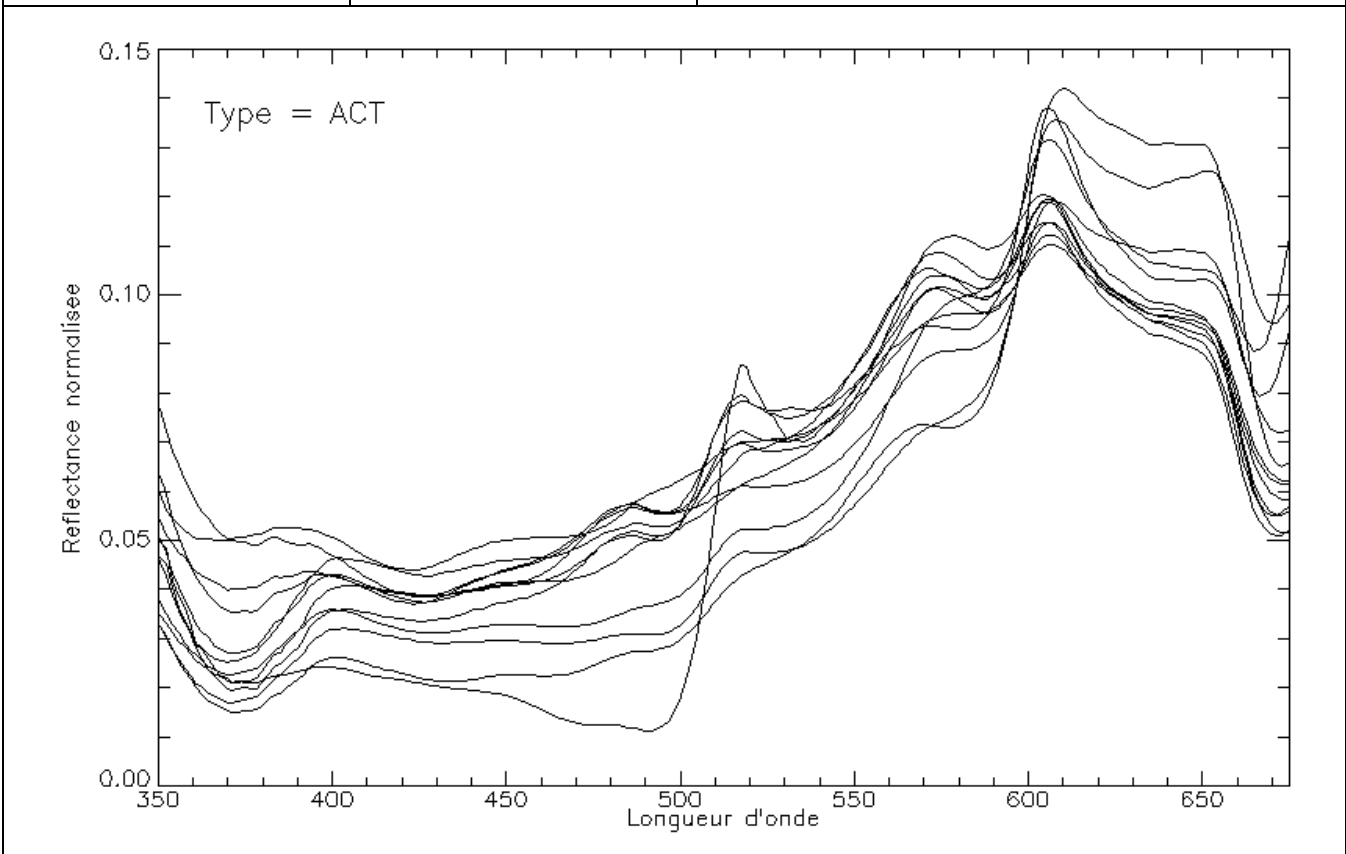
La **forme brune** est la **seule** forme rencontrée. La réflectance normalisée et les fréquences d'occurrences montrent une grande homogénéité dans les réponses spectrales. Le troisième pic à 650 nm est plus marqué que pour les ACB et ACD (présent sur plus de 2/5 des spectres).

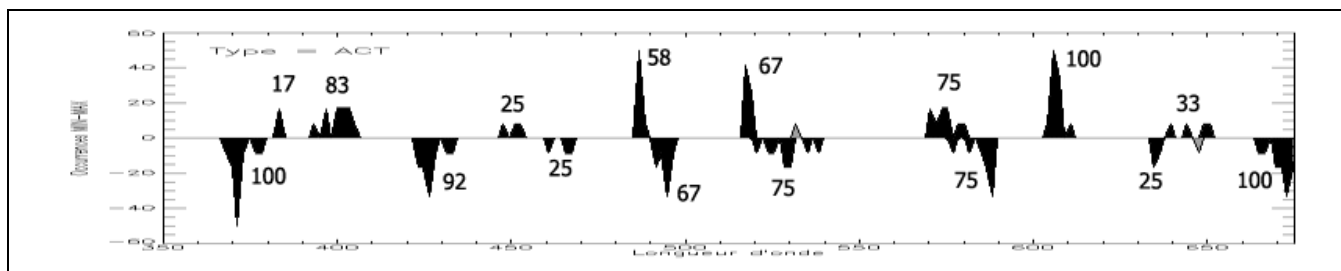
Le phénomène de **fluorescence** est pratiquement absent : aucun pic marqué n'est visible entre 400 et 550 nm.

Animaux	Coraux	Vivants	Acropores
---------	--------	---------	-----------

**ACT - Acropores tabulaires**





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **12 mesures** exploitables d'ACT (4 GLO, 3 GEY, 3 MAY et 2 RUN).

Les ACT présentent une **très grande amplitude de magnitudes** spectrales : 95 % des mesures sont entre 10 % et 40 % de réflectance à 600 nm, malgré une structure spatiale relativement plane ne favorisant pas le phénomène d'ombrage. La réflectance moyenne à 600 nm est proche de 20 %, l'une des plus fortes parmi les types coralliens étudiés.

La réflectance normalisée montre une grande homogénéité dans les mesures, qui tendent vers une **forme intermédiaire entre brune et bleue**. Le premier pic de réflectance à 575 nm (présent chez seulement 3/4 des spectres) est peu marqué par rapport au second (présent dans 100 % des mesures).

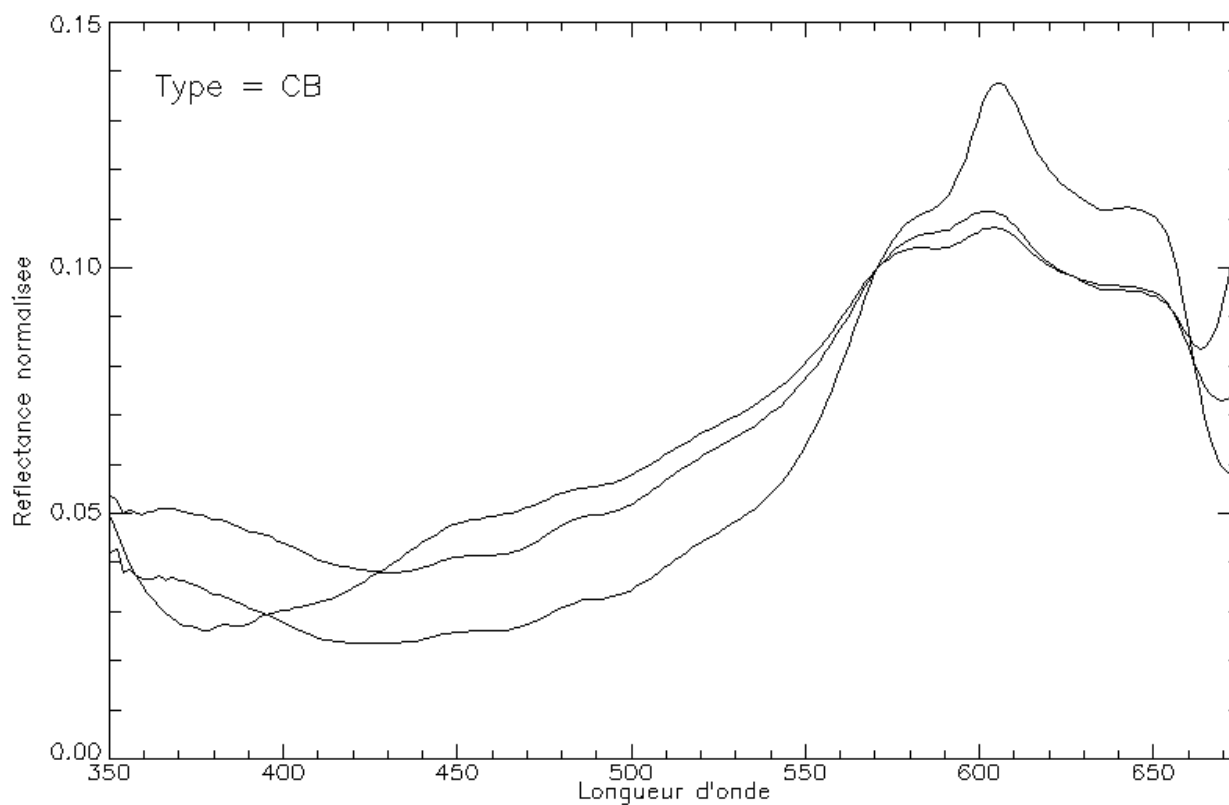
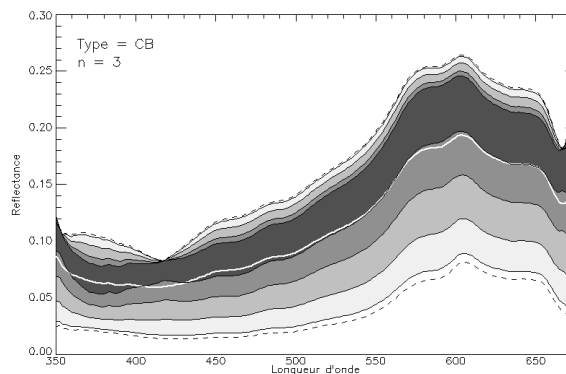
On note la présence **fréquente de deux pics de fluorescence marqués** :

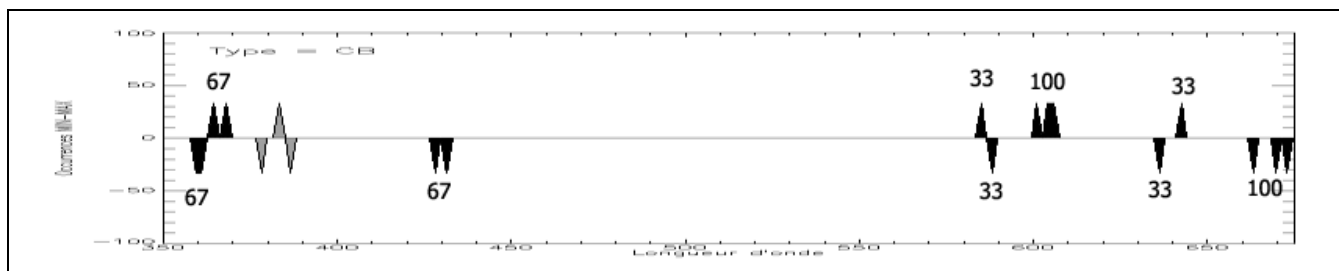
- 3/5 des spectres présentent un pic à 487 nm.
- 2/3 des spectres montrent un pic à 517 nm.

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CB - Coraux branchus**

Principales espèces rencontrées : *Seriatopora spp.*





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **3 mesures** exploitables de *CB* (1 GLO, 1 GEY, 1 MAY).

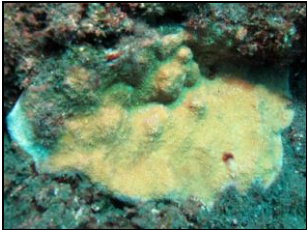

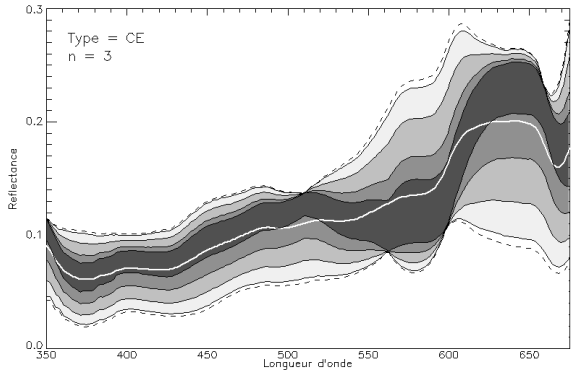


Les *CB* présentent une **grande amplitude de magnitudes** spectrales : une mesure présente une réflectance de l'ordre de 8 % de réflectance à 600 nm, alors que les deux autres sont de l'ordre de 20 %. La structure spatiale est très découpée, avec des branches fines et resserrées, semble favoriser les ombres.

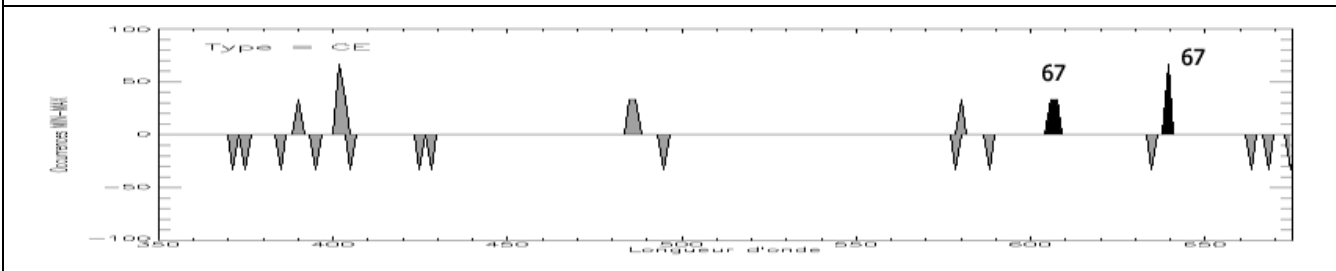
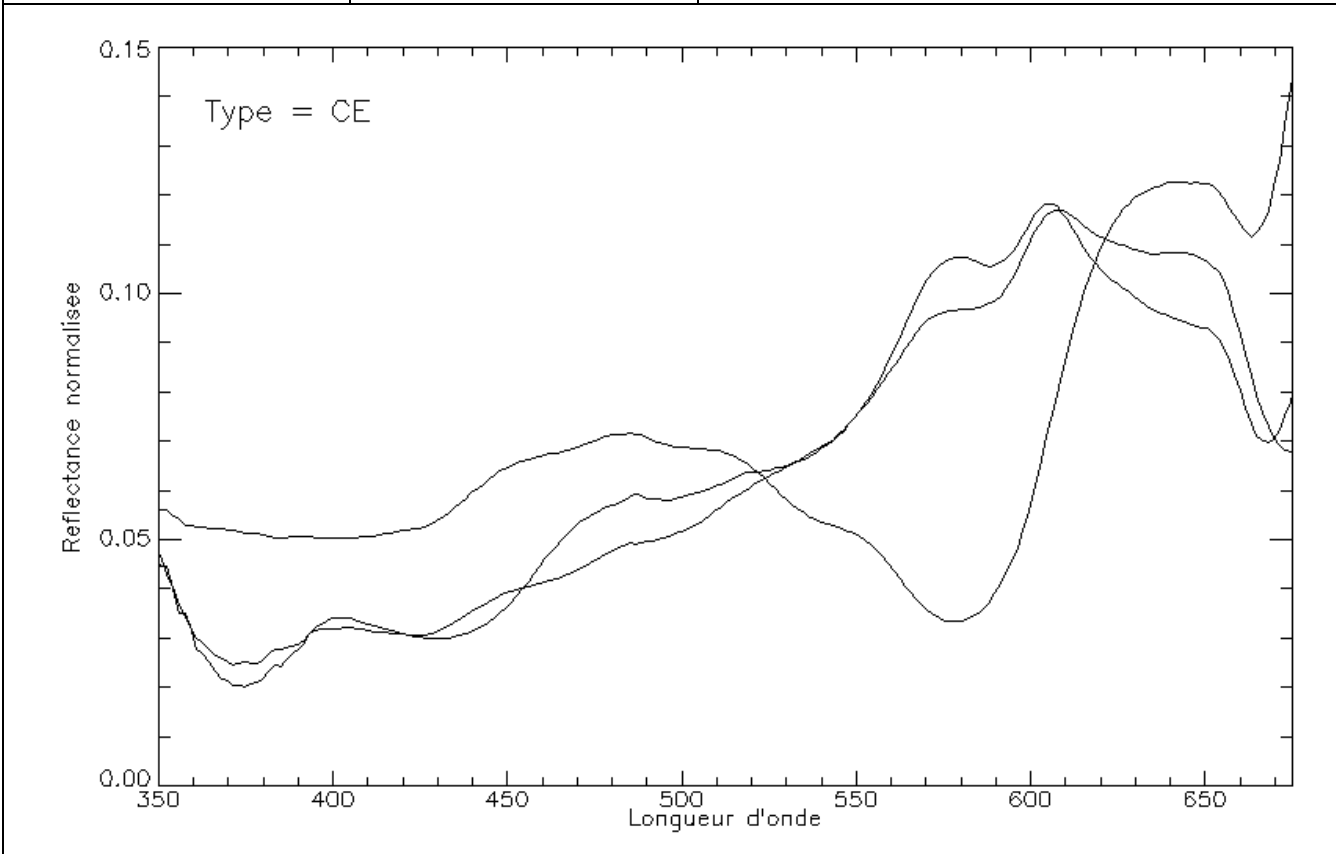
Les trois colonies échantillonnées sont de la **forme brune**, avec un premier pic à 575 très peu marqué (« épaules »), et un second présent dans 100 % des mesures.

Comme pour les *ACS*, le phénomène de **fluorescence** est absent, sans pic de réflectance entre 400 et 550 nm.

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CE - Coraux encroûtants**



Après filtrage, la librairie spectrale ne comporte que **3 mesures** exploitables de *CE* (1 GLO, 1 MAY et 1 RUN). Ce type corallien a souvent été rencontré en profondeur, 4 mesures situées au-delà de 8 m ont du être éliminées.

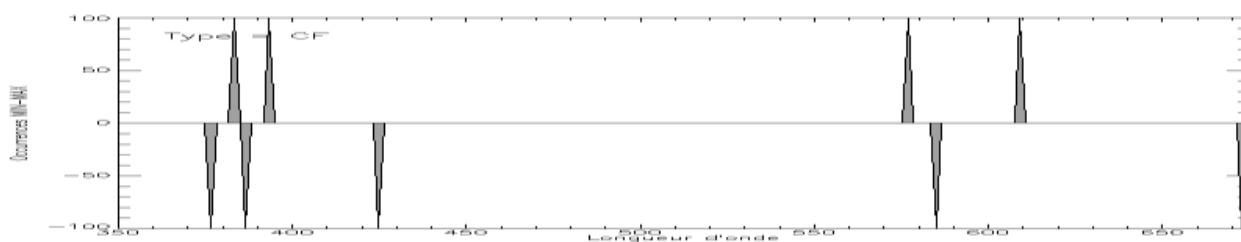
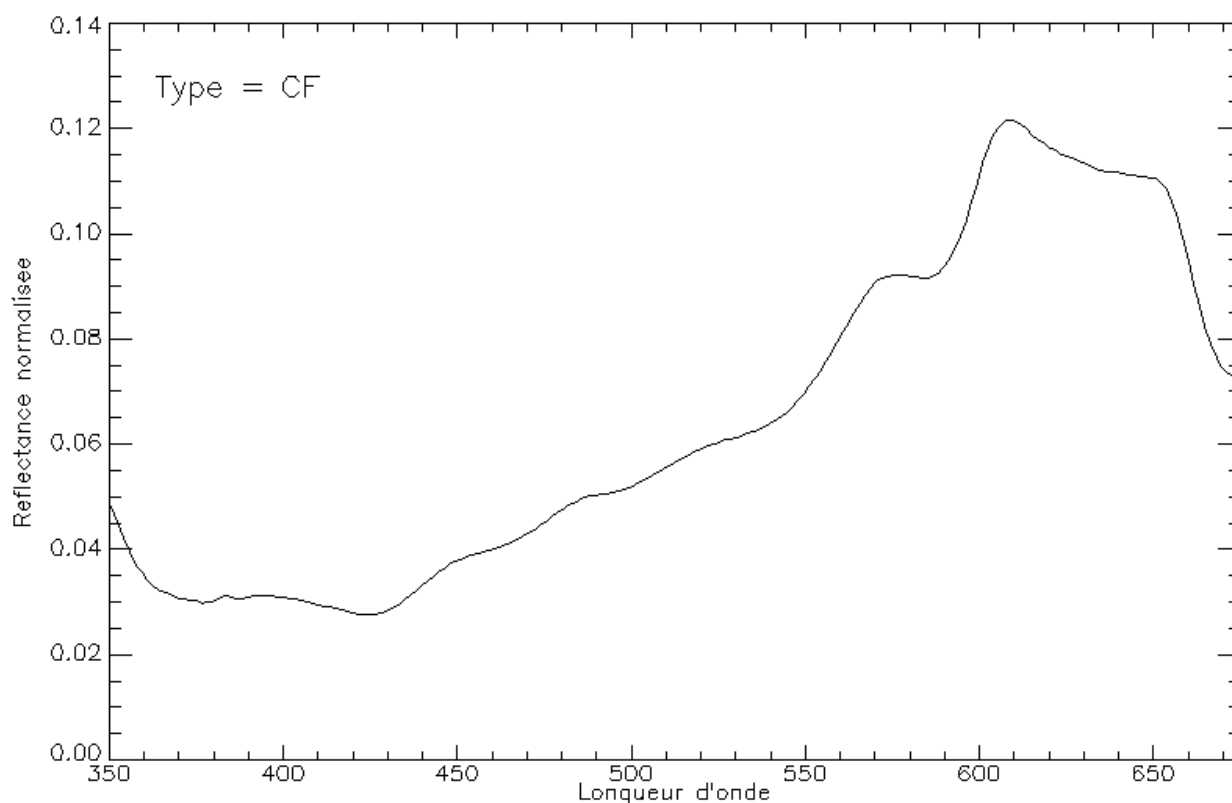
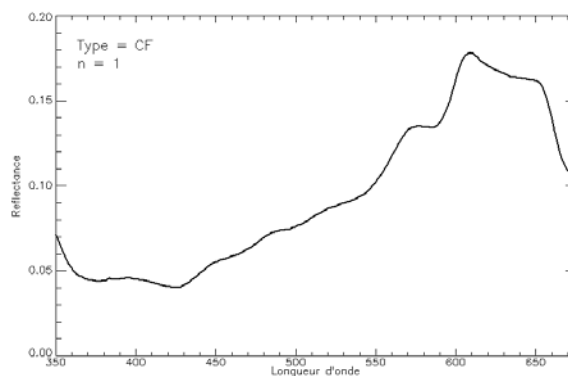
Sur les 3 mesures, **2** sont de la **forme brune**, **1** de la **forme bleue**.

La colonie de *CE* présentant la forme *bleue* est caractérisée par un pic de réflectance très large (150 nm) centré sur 485 nm. Cette caractéristique (largeur de bande) semble peu compatible avec de la fluorescence, et pourrait être due à un début de blanchissement (voir détails de ce type).

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CF - Coraux foliacés**

Espèce rencontrée : *Montipora sp.*





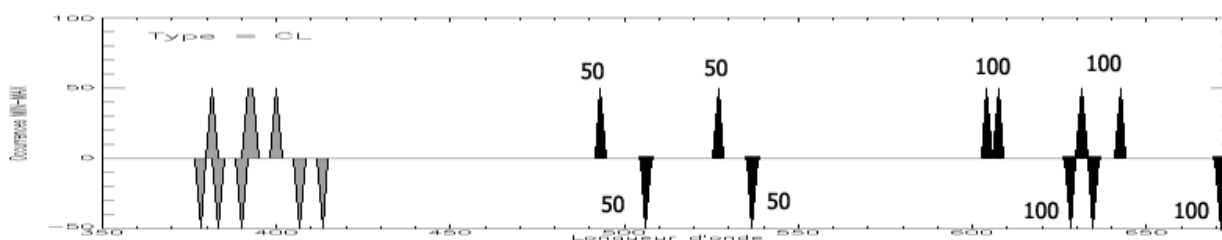
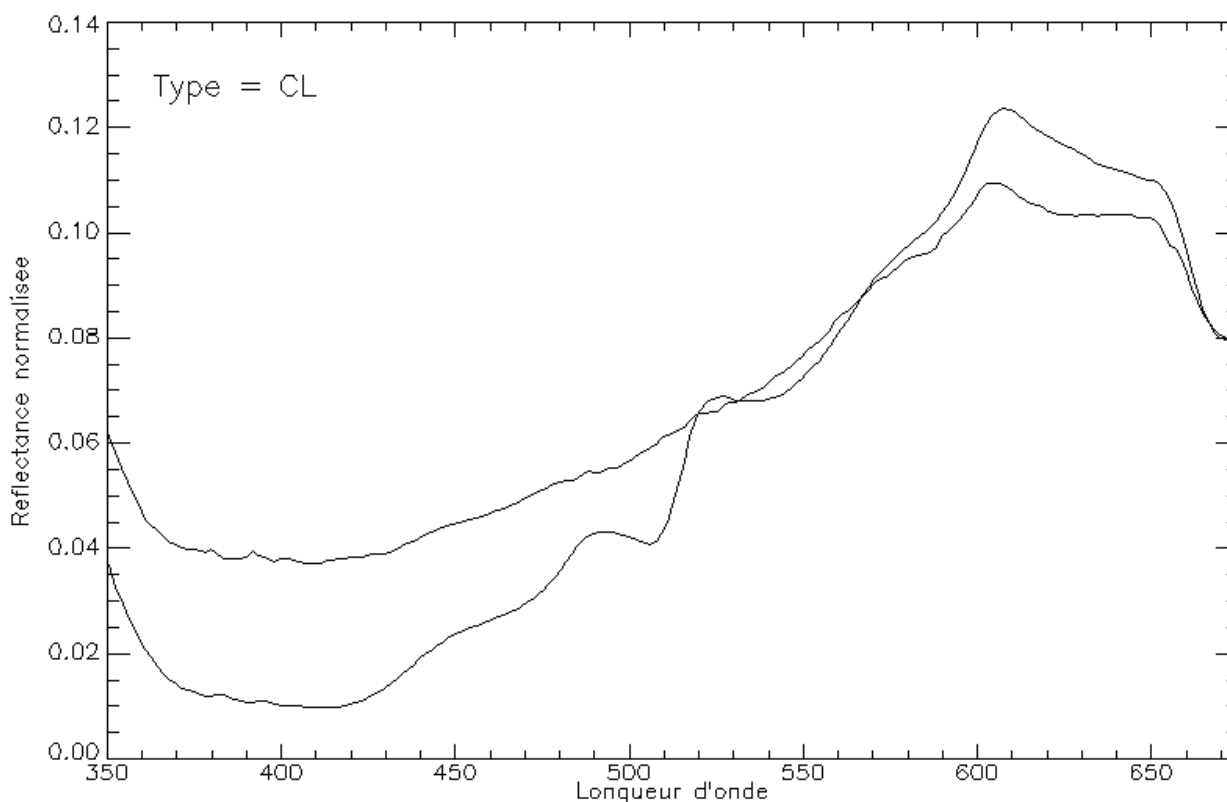
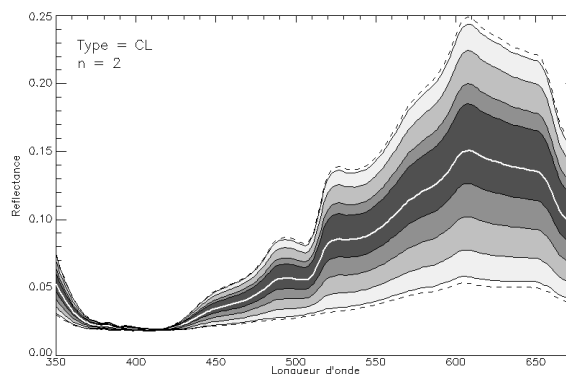
La librairie spectrale ne comporte qu'**une mesure** de *CF* (1 MAY) du genre *Montipora*.

Cette colonie est de la **forme brune**, avec une courbe semblable à celle des *ACT* : un premier pic de réflectance à 575 nm relativement peu marqué par rapport au second à 600 nm.

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CL - Coraux libres**

Principales espèces rencontrées : *Fungia* spp.



La librairie spectrale ne comporte que **2 mesures** de *CL* (1 MAY et 1 RUN) du genre *Fungia*. Ce type corallien n'a pas souvent été rencontré.

Les magnitudes spectrales des deux mesures sont très différentes : 5 % et 25 % de réflectance à 600 nm. Les profils spectraux, révélés par les réflectances normalisées sont cependant très proches entre 550 et 650 nm.

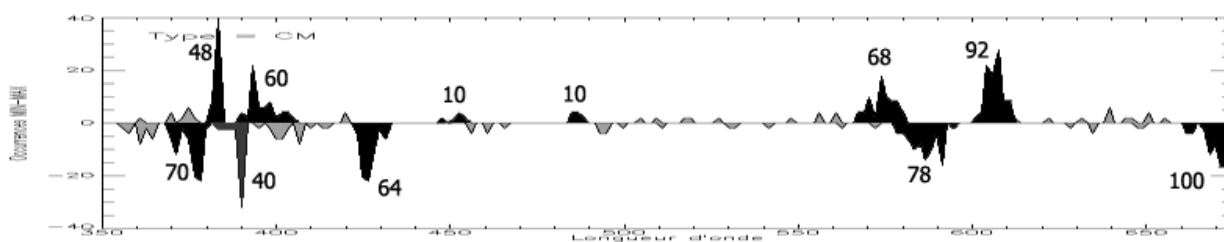
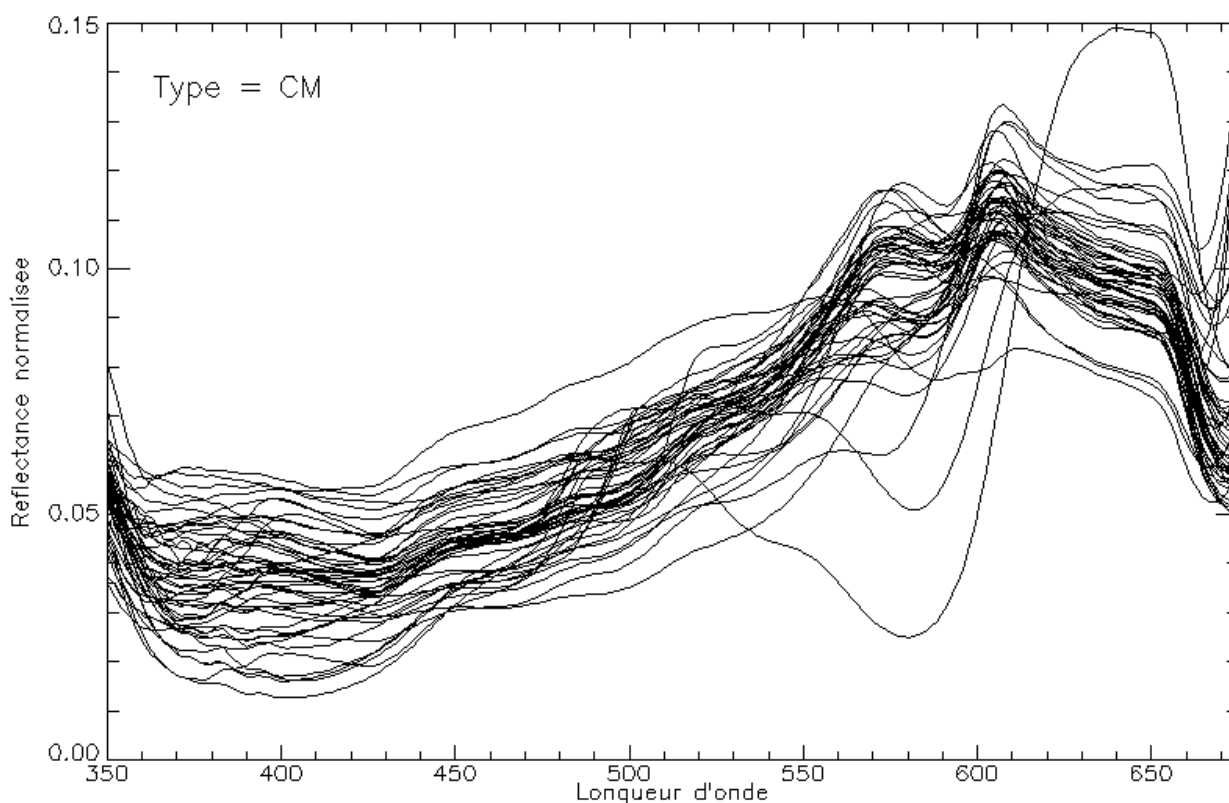
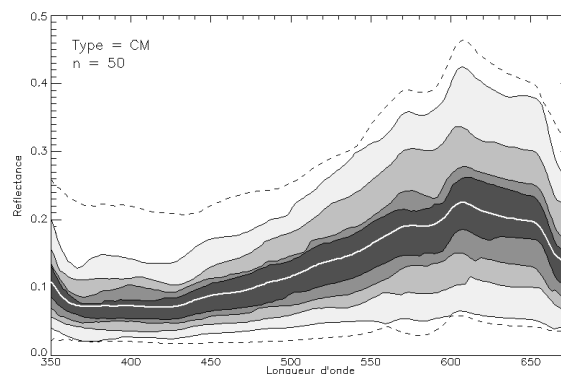
Les **2** mesures sont de la **forme brune**, avec un épaulement à 575 nm très peu marqué.

Une des cibles présente une figure particulière sous forme d'un double pic à **493** et **527** nm, séparés par un minimum de réflectance à 506 nm. Les deux enregistrements bruts composant ce spectre moyenné présentant tous les deux cette figure originale, les mesures Spectralon étant fiables (utilisées pour d'autres cibles adjacentes qui ne présentent pas cette figure), et les positions de ces pics ne correspondant pas à celles du « spectre saturé » (cf. annexes du rapport de synthèse), on peut exclure qu'il s'agisse d'une erreur de mesure. Ce corail présenterait alors une **double fluorescence** marquée dans le bleu-vert.

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CM - Coraux massifs**

Principales espèces rencontrées : *Porites spp.*



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **50 mesures** exploitables de **CM** (20 GLO, 6 GEY, 11 MAY et 13 RUN).

Les **CM** présentent une **grande variabilité de magnitude** spectrale, avec notamment quelques valeurs de réflectance très fortes : 95 % des mesures sont entre 5 % et 40 % à 600 nm. Contrairement aux autres types de coraux rencontrés jusqu'à présent, la structure spatiale compacte et massive de ces coraux ne favorise pas la formation d'ombres projetées assombrissantes. La réflectance moyenne à 600 nm est proche de 20 %, l'une des plus fortes parmi les types coralliens étudiés.

Avec **54 %** des mesures, la **forme brune** est la forme **majoritairement** rencontrée. Cependant, les formes **bleue** et **intermédiaire** (entre *bleue* et *brune*) représentent 46 % des mesures, avec  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{1}{5}$  respectivement. C'est le type corallien où la forme *brune* est la moins dominante.

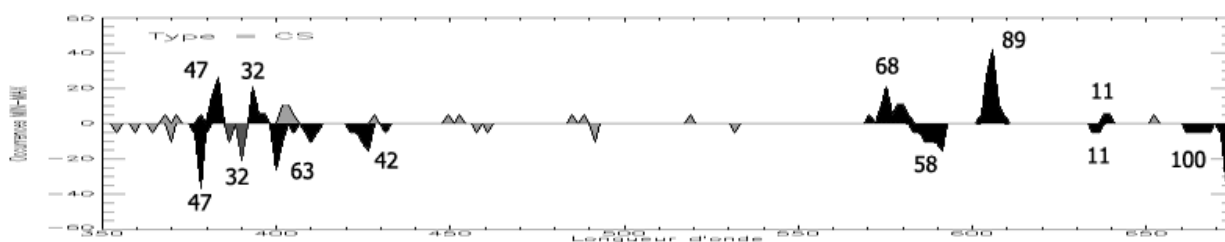
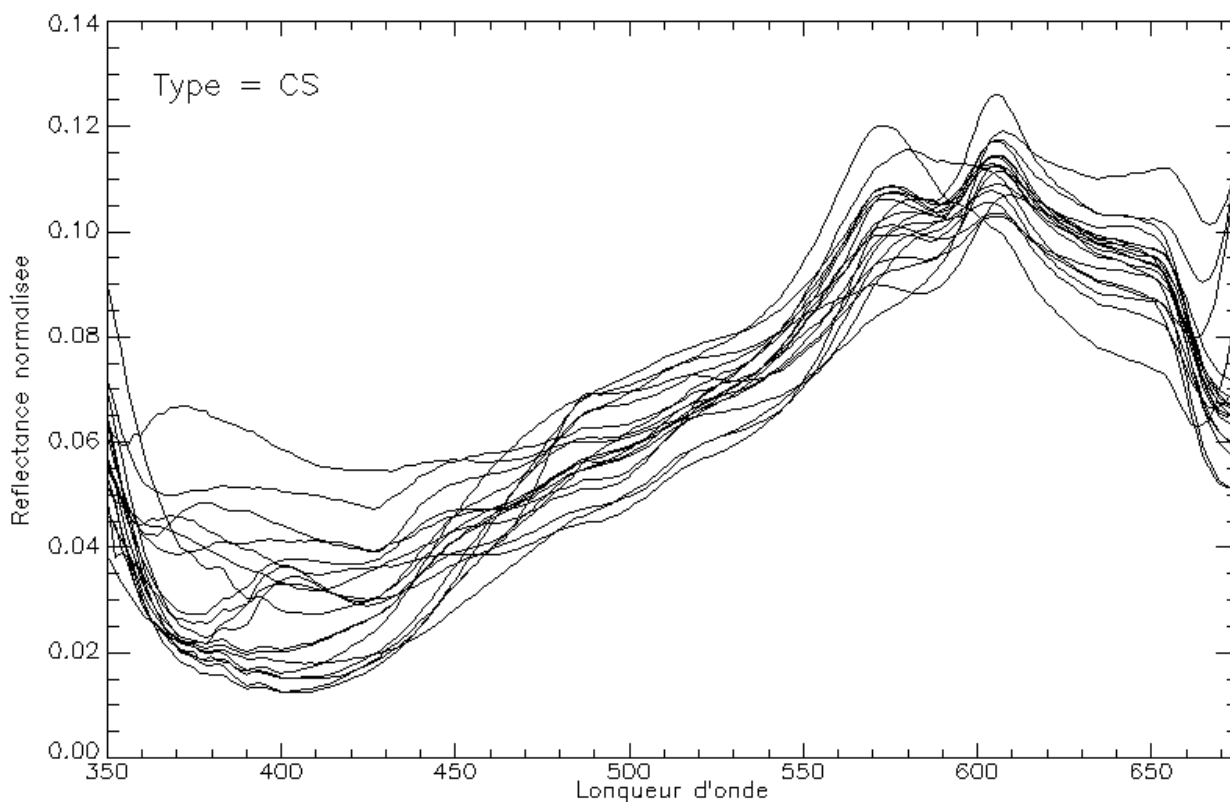
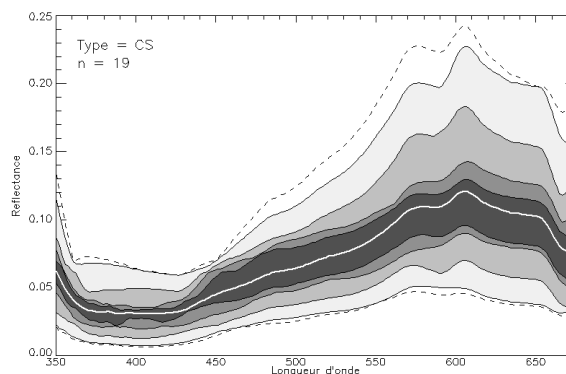
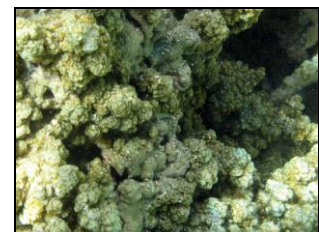
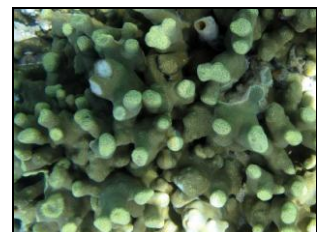
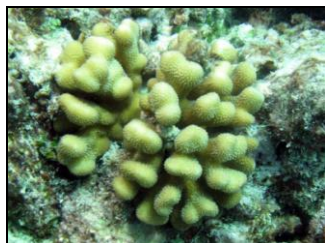
Le premier des trois pics d'occurrence autour de 575 nm est large et présent dans 68 % des mesures : en plus des spectres de la forme *brune*, de nombreux spectres de la forme *bleue* ou *intermédiaire* présentent un premier pic de réflectance, qui peut être légèrement décalé par rapport à la forme de base (entre 560 et 585 nm).

Le phénomène de **fluorescence** est **fréquent** mais relativement peu marqué en intensité entre 400 et 550 nm, avec des courbes présentant souvent des épaulements localisés (383, 403, 485, 488, 502, 504 nm, etc.).

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CS - Coraux submassifs**

Principales espèces rencontrées : *Porites rus*, *Porites nigrescens*, *Pavona sp.*, *Stylophora sp.*



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **19 mesures** exploitables de CS (5 GLO, 2 GEY, 1 MAY et 11 RUN).

Les CS présentent une **variabilité de magnitude** spectrale comprise entre 5 % et 24 % à 600 nm. La structure tridimensionnelle est découpée favorisant les ombres. La réflectance normalisée montre une bonne homogénéité dans les réponses spectrales.

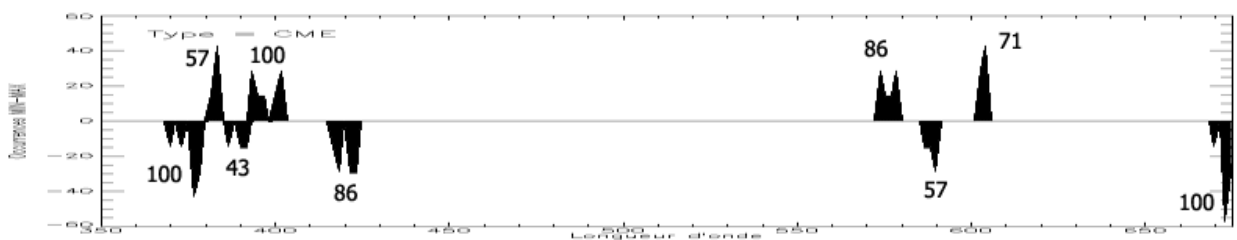
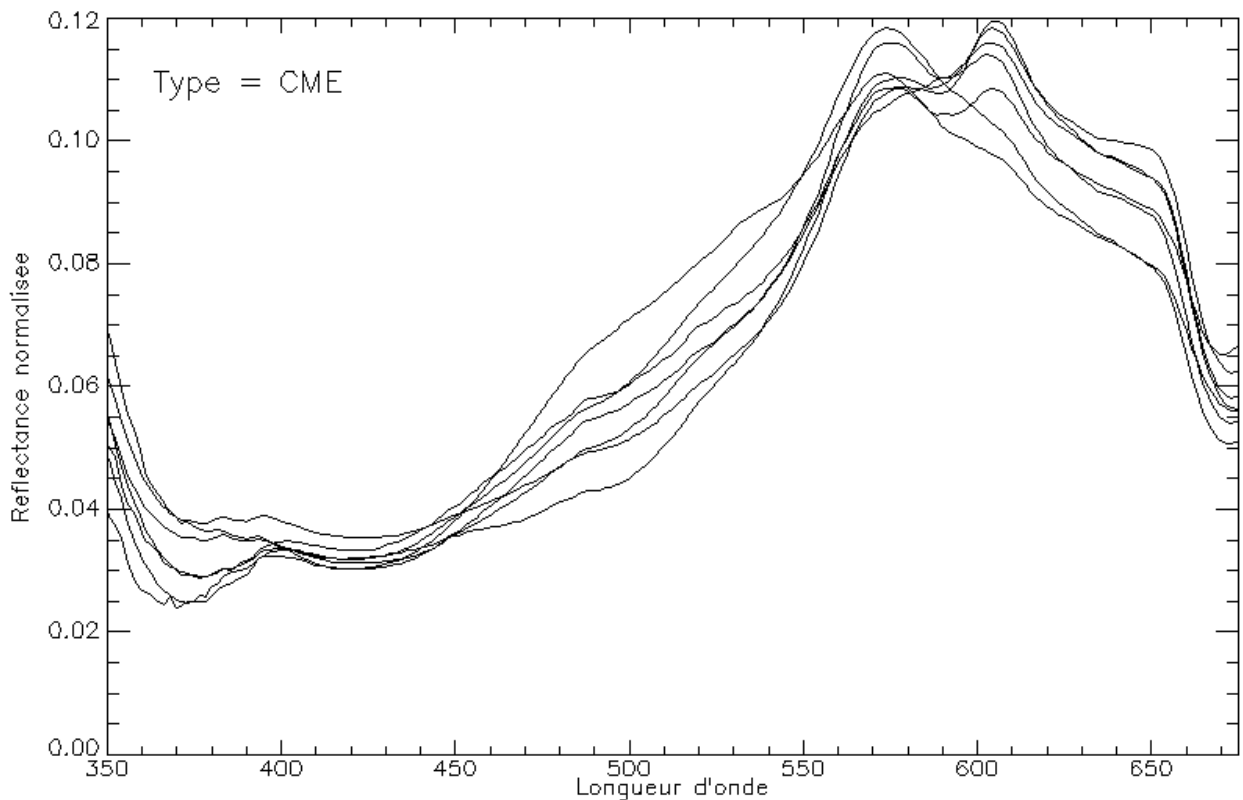
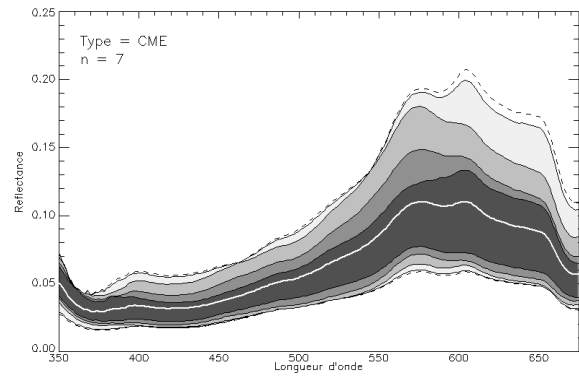
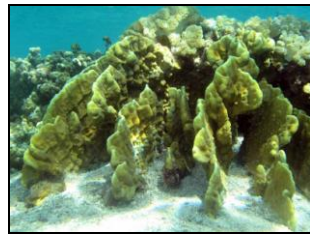
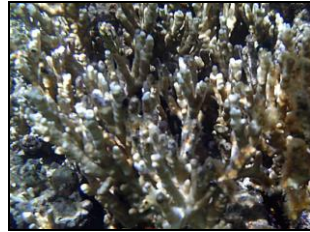
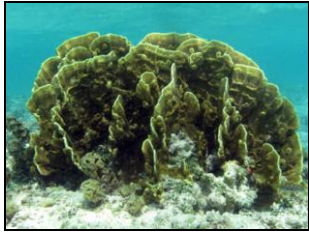
La **forme brune** est la forme largement majoritaire (90 % des spectres). Deux mesures présentent une forme *intermédiaire* avec un pic à 575 nm peu marqué. D'une manière générale, la première figure à 575 nm est peu marquée, avec seulement 68 % des spectres présentant un pic, elle est plutôt matérialisée par un épaulement.

**Fluorescence peu marquée** avec seulement deux mesures présentant un léger pic à 488 nm. Des épaulements sont visibles sur d'autres spectres à cette longueur d'onde, de même qu'autour de 518 nm, signe que des GFP sont présentes dans ce type corallien même si leur action est peu sensible sur les mesures.

Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

**CME - Millepores**

Principales espèces rencontrées : *Millepora spp.*





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **7 mesures** exploitables de *CME* (4 GLO, 1 GEY, et 2 RUN).

La magnitude spectrale varie entre 5 et 20 % de réflectance à 600 nm, comme la majorité des autres types coralliens.

Les millépores présentent une structure spatiale très particulière : la colonie est formée de feuillet plans verticaux générant de nombreuses ombres projetées. Une différence de coloration est souvent très nette entre l'arrête sommitale claire et ensoleillée et les faces verticales plus sombres et à l'ombre. Les mesures radiométriques, réalisées par dessus à la verticale (angle d'inclinaison du spectroradiomètre à respecter, constant par rapport au soleil), sont donc principalement réalisées sur les arrêtes claires. La contribution des faces verticales sombres dans la réflectance moyenne de chaque cible est ainsi sans doute légèrement sous-évaluée, mais avec cependant des conséquences assez limitées pour les traitements ultérieurs : l'image aérienne hyperspectrale est réalisée dans les mêmes conditions de que la radiométrie, à la verticale.

Tous les *CME* sont de la **forme brune** (100 % de spectres), avec un premier pic de réflectance à 575 nm bien marqué. Deux mesures présentent une forme assez originale avec une réflectance très forte sur le premier pic et un second à 600 nm quasi-inexistant, produisant une courbe de réflectance régulièrement décroissante entre 575 et 650 nm.

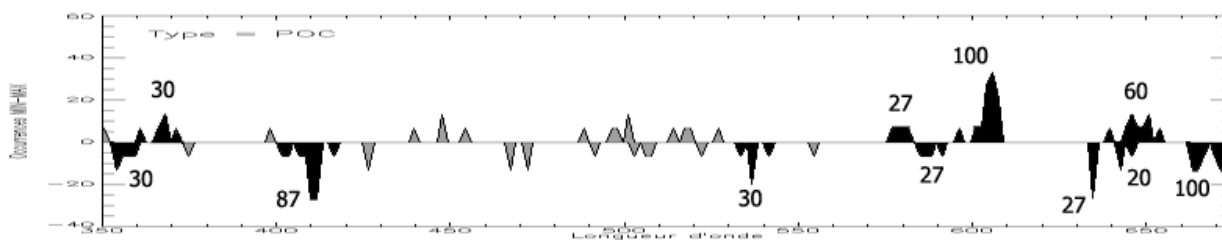
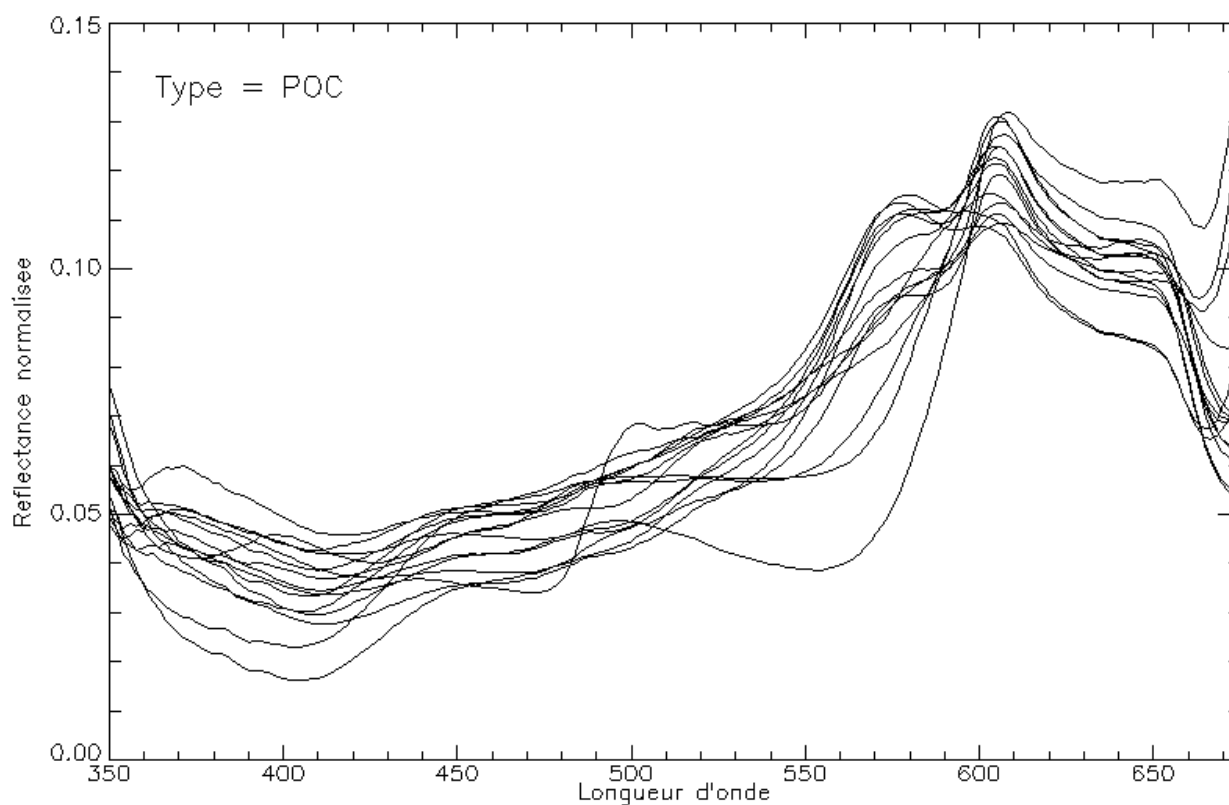
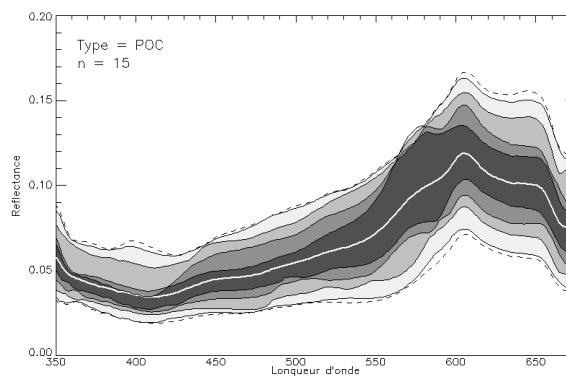
Sur toutes les mesures le troisième épaulement à 650 nm est très peu marqué et n'apparaît jamais comme un maximum local.

Entre 400 et 550 nm les courbes de réflectance sont très régulières, **sans** phénomène de **fluorescence** apparent.

<b>Animaux</b>	<b>Coraux</b>	<b>Vivants</b>	<b>Non Acropores</b>
----------------	---------------	----------------	----------------------

**POC - Pocillopores**

Principales espèces rencontrées : *Pocillopora* spp.



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **15 mesures** exploitables de **POC** (7 GLO, 3 GEY, 1 MAY et 4 RUN).

La **magnitude spectrale** varie entre 5 et 15 % de réflectance à 600 nm pour 95 % des mesures : peu d'individus clairs comme dans les autres types coralliens. La texture de surface très rugueuse, avec de nombreuses petites digitations pourrait favoriser la formation d'ombres et donc l'assombrissement des cibles.

Sur le spectre moyen, le premier pic de réflectance est peu marqué : la **forme brune**, bien que **majoritaire** (60 %) est atténuée par de **nombreuses formes bleues** (33 %) et **intermédiaires** (7 %).

Remarque : chez les pocillopores, le second pic à 600 nm est très marqué, il apparaît dans 100 % des mesures dans une très étroite bande de longueurs d'ondes de 10 nm de largeur, entre 599 et 609 nm. Même sur les coraux de forme *bleue*, chez qui cet épaulement est habituellement très atténué par un arrondi progressif, ce pic de réflectance est ici bien marqué.

La **Fluorescence** est visible sur de nombreux spectres, plus fréquente entre 485 et 525 nm, mais sans longueur d'onde prépondérante.

La Figure 3 ci-dessous montre des résultats intéressants obtenus sur le site des Glorieuses. Les mesures ont été réalisées le même jour, à la même heure, à la même profondeur et à quelques mètres de distance sur trois colonies de *POC* de coloration différentes.

- Deux cibles sont de forme *brune*, l'autre est de forme *bleue* (pas d'épaulement à 575 nm). Sur le terrain, la forme *bleue* apparaît nettement de couleur « violet/rose » alors que les deux autres sont notées « jaune » et « marron » (voir les photos de terrain correspondantes, dont la coloration exacte est difficile à déterminer à posteriori (balance des blancs)).
- Entre les deux formes *brunes*, dont les niveaux de réflectance sont très proches (9 et 10 % de réflectance à 600 nm), l'une apparaît nettement de couleur jaune, alors que l'autre est de couleur marron plus typique. La colonie jaune présente une figure de fluorescence très marquée avec un pic de réflectance dans le bleu-vert (maximum de réflectance à 501 nm), qui s'étend de 480 à 550 nm. C'est cette fluorescence qui est responsable de la différence de coloration entre les deux colonies.

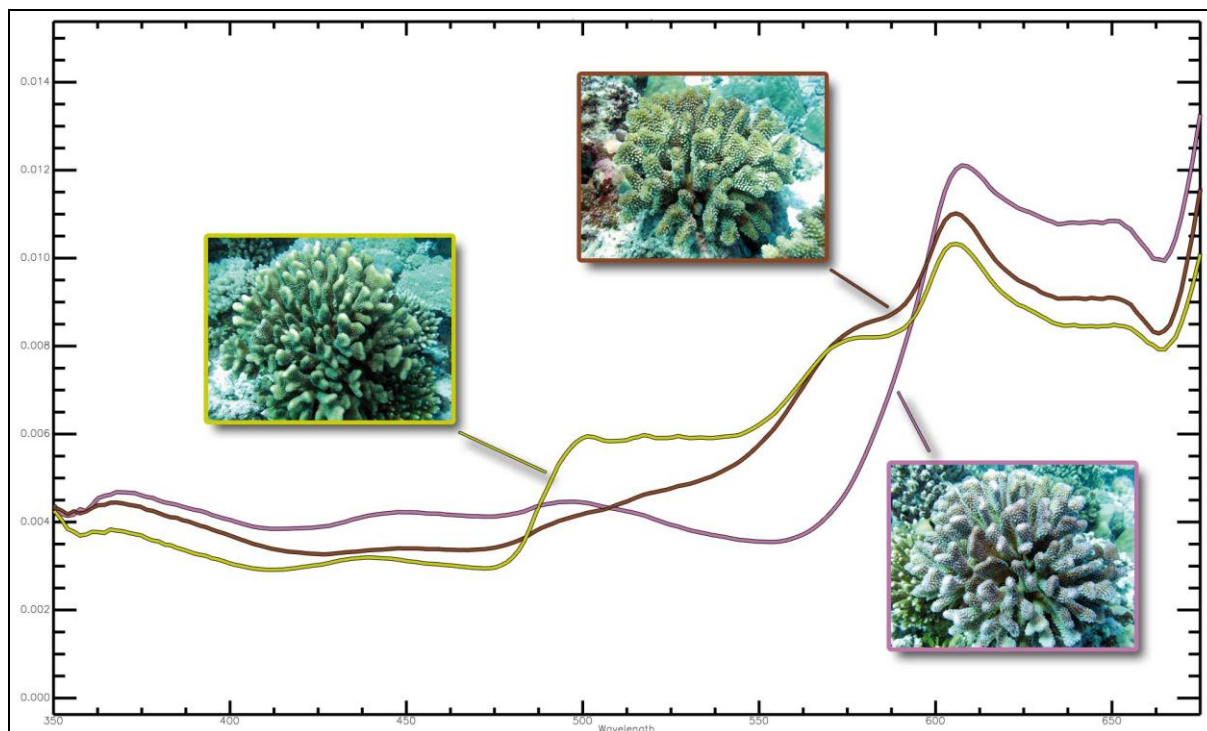


Figure 3. Trois mesures réalisées à la même profondeur à quelques mètres d'intervalle (réflectances normalisées).

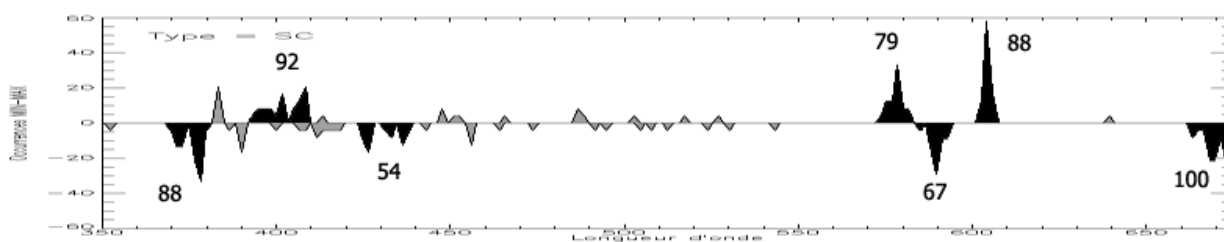
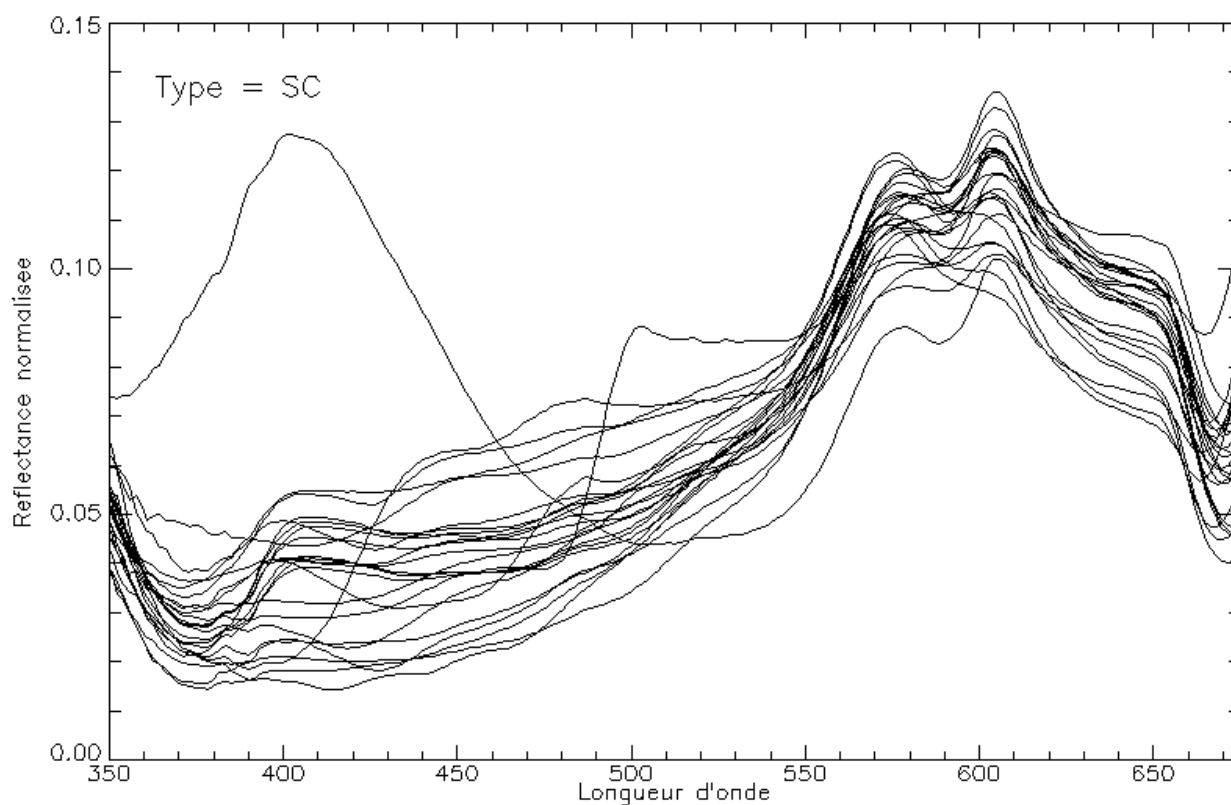
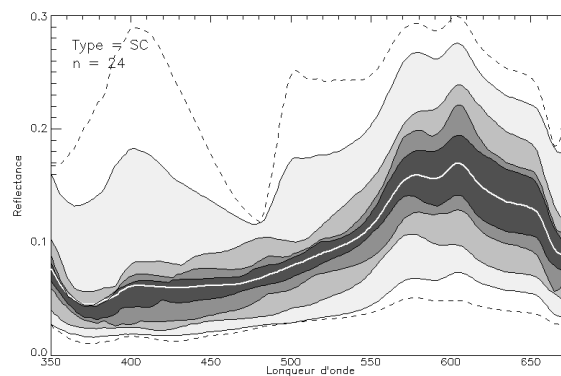
Cet exemple montre clairement que pour un type corallien donné et malgré une constance des paramètres écologiques, il y a multiplicité de la réponse spectrale.

Comme elles sont communes à tous les types de coraux, les zooxanthelles par l'action de leurs pigments photosynthétiques sont responsables de la forme de base *brune* de la réflectance corallienne. Cependant, la pigmentation du corail hôte, par l'action de GFP fluorescentes (pics de réflectance) ou non (pics d'absorption responsables des formes *brune* ou *bleue*), produit des modifications dans le profil spectral difficilement prévisibles, et qui ne seraient pas liées à des facteurs environnementaux (illumination, profondeur) [2].



Animaux	Coraux	Vivants	Non Acropores
---------	--------	---------	---------------

SC - Coraux mous



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **24 mesures** exploitables de coraux mous, **SC** (10 GLO, 11 MAY et 3 RUN).

La **magnitude spectrale** varie entre 7 et 27 % de réflectance à 600 nm pour 95 % des mesures : du même ordre de grandeur que les coraux durs. La conformation spatiale des colonies est souvent assez régulière (la structure molle ne favorise pas le développement de grandes ramifications), mais la texture est souvent granuleuse du fait des nombreux polypes et tentacules apparents. Les zones d'ombre sont ainsi en général relativement réduites, n'influençant que peu les mesures. Ce type de corail ne possède pas de squelette calcaire pouvant « éclaircir » la réponse spectrale par transparence. Il n'a pas été observé de coraux nous « blanchis », phénomène semble-t-il moins fréquent et visible que sur les coraux durs à cause de l'absence de squelette calcaire blanc sous-jacent.

Les **coraux mous** sont **tous** sans exception de la **forme brune**. La première figure à 575 nm, est matérialisée sur 79 % des spectres par un pic, le reste des mesures présente seulement un épaulement marqué. Le corail hôte ne semble donc pas posséder de GFP semblable à la *pocilloporine* absorbant vers 560 nm et responsable de la forme *bleue*. Le troisième épaulement à 650 nm, bien que toujours très marqué, n'apparaît pas sous forme de maximum local de réflectance.

Comme pour les coraux durs, de nombreux coraux mous présentent des figures de **fluorescence**, de position et d'intensité variables.

La Figure 4 ci-dessous détaille 4 spectres originaux ayant une fluorescence marquée : un SC de couleur violette, un jaune, un beige et un blanc cassé. Comme le spectre moyen, les 4 spectres sont logiquement de la forme *brune*, avec trois épaulements marqués à 575, 600 et 650 nm. C'est dans les longueurs d'ondes comprises entre 350 et 550 nm (violet – bleu – vert) que les différences de réflectance sont les plus notables.

- Le SC violet (courbe violette) présente notamment un très **fort pic de réflectance** centré sur le violet à **402 nm**. La réflectance au niveau du pic est proche de 30 %, alors qu'elle n'atteint que 23 % à 606 nm, longueur d'onde habituellement optimum de réflectance. Cette fluorescence est non seulement intense, mais aussi très large en s'étendant sur une gamme de longueur d'ondes allant de l'ultraviolet au vert (350 à 525 nm).
- Le SC jaune (courbe jaune) présente une très forte augmentation de réflectance entre 475 et 500 nm, qui passe alors de 10 % à plus de 25 %. La réflectance se stabilise ensuite jusqu'à 550 nm où elle retrouve le profil classique. Le graphique de droite Figure 4 montre deux cibles identiques analysées au même endroit (Chissioua Mbouzi – Mayotte), au même moment (30 juillet 2009 à 13h45) et présentant la même coloration apparente, mais dont la signature spectrale est très différente. L'une des mesures a été réalisée à 3,5 mètres de profondeur (pas de fluorescence), l'autre à seulement 1 mètre sous la surface (fluorescence).

- Le SC beige (courbe rose pale) montre le même type de fluorescence (augmentation rapide puis plateau) que le SC jaune, mais se produisant plus tôt, dans les longueurs d'ondes violettes (entre 400 et 440 nm).
- Le dernier SC blanc cassé (courbe orange) ne présente pas de fluorescence aussi marquée que les trois autres, mais plusieurs petits pics successifs à 398, 487 et 519 nm.

Il est intéressant de remarquer que la fluorescence très vive entre 350 et 550 nm, peut atteindre voire dépasser le niveau de réflectance de la figure triple à 575-600-650 nm.

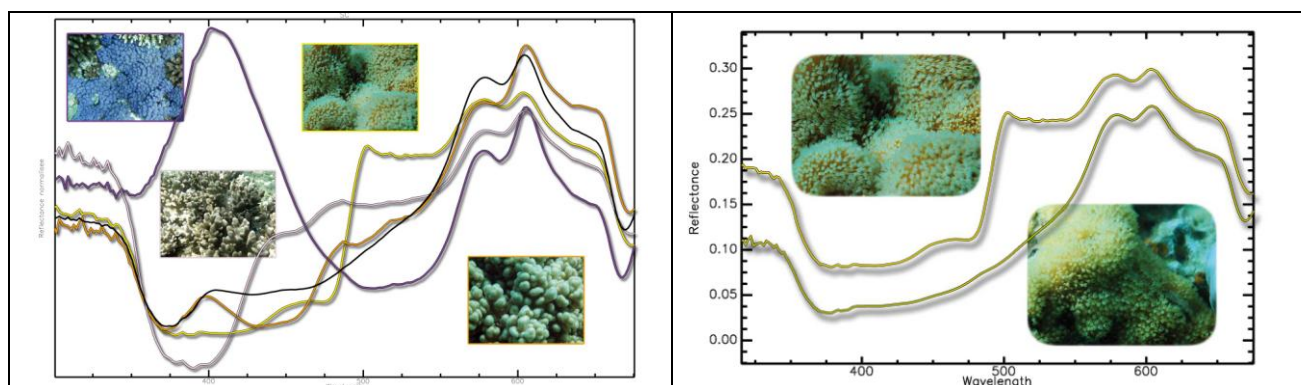


Figure 4. A gauche, fluorescence des coraux mous. Spectre moyen (courbe noire) et spectres particuliers (courbes violette, rose, jaune, orange) avec les photographies de terrain correspondantes. A droite, deux réponses spectrales différentes pour deux CMO présentant la même coloration.

Remarque : [2] constate pour les coraux durs une forte corrélation entre forme et coloration. Ainsi, les coraux de la forme *brune* n'ont pour couleur apparente que des variations de cette coloration : marron, rouge, orange, jaune, beige et vert, alors que les coraux de la forme *bleue* présentent des couleurs comme le violet, bleu rose ou gris. Il n'y a jamais été observé de coloration allant contre la forme de réflectance. Le corail bleu présenté ici (bien que mou) est le parfait contre exemple : forme *brune* associé à une forte coloration violette.



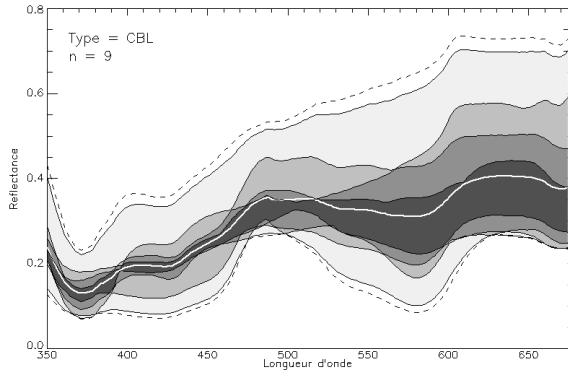




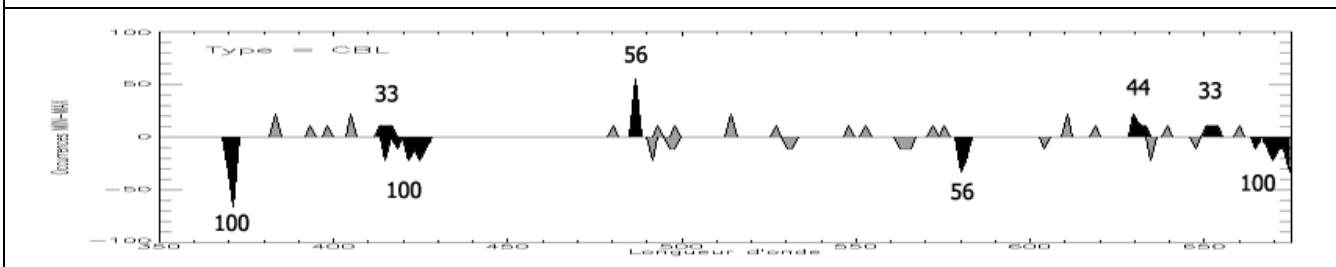
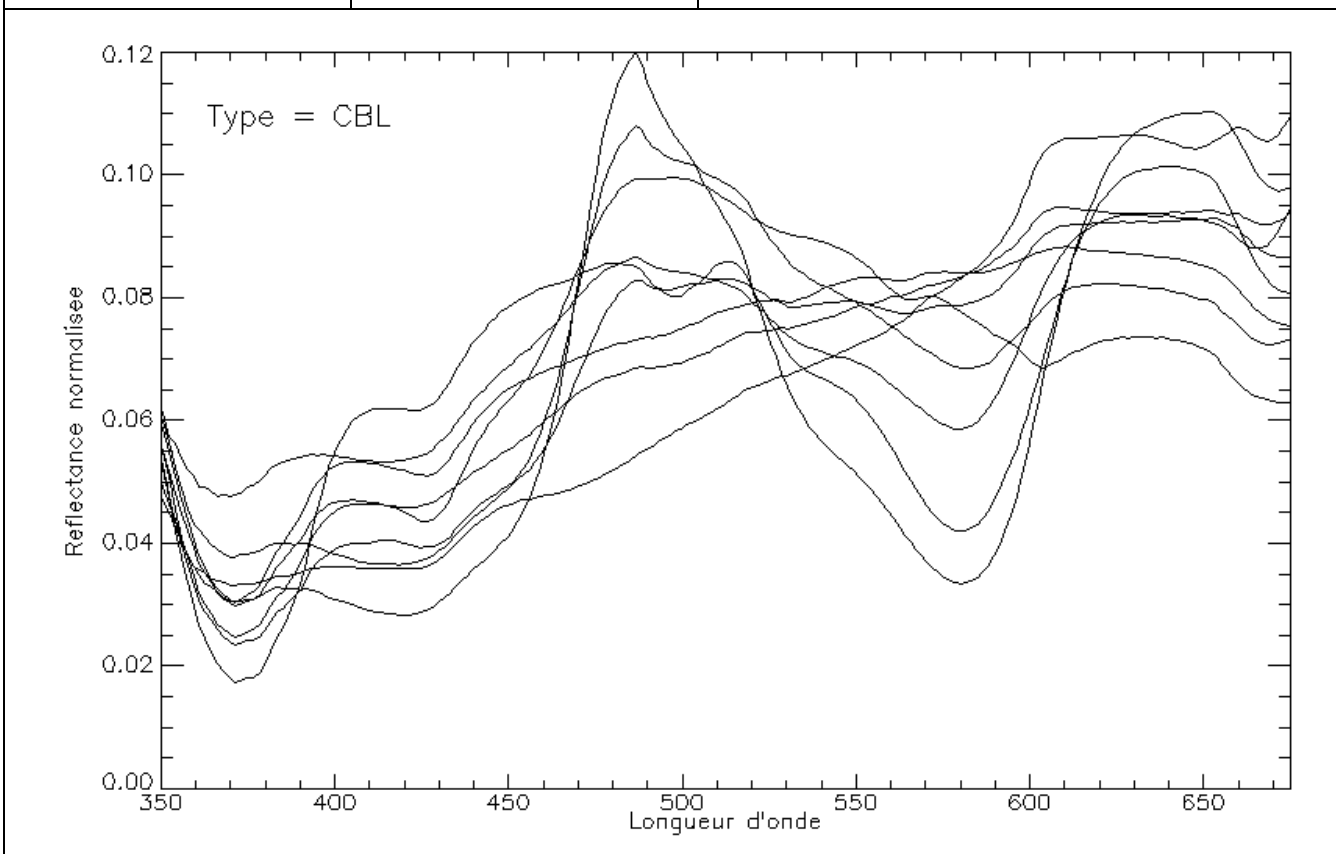


<b>Animaux</b>	<b>Coraux</b>	<b>Vivants</b>	<i>Blanchis</i>
----------------	---------------	----------------	-----------------

**CBL - Coraux blanchis**

Principales espèces rencontrées : Tous types coralliens



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **9 mesures** exploitables de coraux blanchis (7 GLO et 2 GEY).

Les *CBL* ont une **réflectance** globalement beaucoup **plus forte** celle des coraux en bonne santé. Dans le visible la réflectance moyenne évolue à toutes les longueurs d'ondes entre 15 et 40 % (contre entre 2 et 20 – 25 % pour les coraux « normaux »). La variabilité de la magnitude spectrale est élevée, avec des réflectances à 600 nm s'étalant de 15 à plus de 70 %. Ces fortes différences de niveaux peuvent s'expliquer par le blanchissement plus ou moins important des cibles analysées et une contribution éventuelle de parties basales de la colonie non blanchies chez les types à structures spatiales très découpées par exemple (Figure 5 ci-dessous).

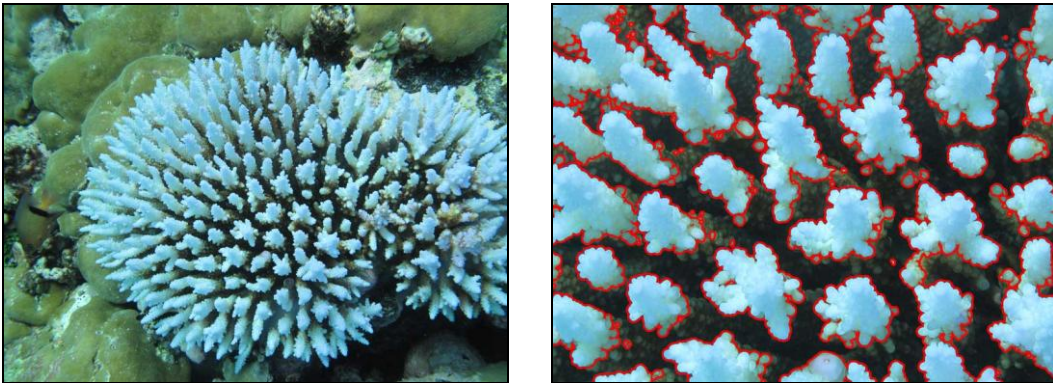


Figure 5. Les coraux blanchis peuvent conserver une coloration « normale » dans leur partie basale (à gauche). En visée verticale, les parties en bonne santé, non masquées par les branches blanchies (parties contourées de rouge), peuvent influencer la réponse spectrale.

Les profils spectraux sont très différents de ceux observés sur les autres types coralliens en bonne santé :

- Forte réflectance en plateau avant 350 nm (non représenté sur les figures)
- La réflectance entre 400 et 550 nm, habituellement faible par rapport à celle des longueurs d'ondes adjacentes, est ici beaucoup plus élevée (pic vers 500 nm), ce qui produit des minimums locaux marqués en périphérie à 370, 420 et 580 nm (sur 100 %, 100 % et 58 % des mesures respectivement).
- Aucun pic n'est visible à 575 nm : tous les spectres sont de la forme *bleue*, avec un plateau de réflectance entre 600 et 650 nm. Cependant, pour certaines cibles ce plateau n'a pas une forme habituelle : il est très horizontal et rectiligne, sans réel pic à 600 ni à 650 nm.
- Le pic d'absorption à 675 nm, caractéristique de la chlorophylle est présent sur toutes les cibles, mais très peu marqué.

Sur les cibles coralliennes blanchies, dont la coloration est très claire presque blanche, la réflectance globale est plus forte que celle des coraux en bonne santé. Cette différence, d'autant plus marquée dans les zones d'absorption des pigments photosynthétiques des zooxanthelles (400 – 600 nm), est synonyme d'une réduction de l'absorption de

l'énergie lumineuse et donc de l'activité photosynthétique corallienne. Elle peut avoir plusieurs origines [3], [4] :

- Une réduction par expulsion du nombre de cellules algales contenues dans le corail hôte
- Une baisse de concentration par dégradation des pigments photosynthétiques contenus dans les cellules algales (notamment la peridinine et la chlorophylle a).

Les coraux blanchis peuvent être regroupés en deux sous types selon leurs profils spectraux (Figure 6 ci-dessous) :

- Sous-type 1 (2/3 des mesures) : « forme *bleue* » très réfléchante (réflectance sur le plateau 600 – 650 nm comprise entre 20 et 50 %) et présentant un fort pic de réflectance (entre 25 et 45 %) entre 450 et 550 nm, centré sur 487 nm. Ce pic est suivi d'une baisse de réflectance, absorption plus ou moins marquée centrée sur 580 nm.
- Sous-type 2 (1/3 des mesures) : « forme ni *bleue* – ni *brune* » très réfléchante présentant un plateau horizontal très rectiligne entre 605 et 650 nm, et une réflectance croissante et continue, pratiquement régulière entre 370 et 605 nm. Niveau de réflectance globalement plus élevé que le sous-type 1 à partir de 487 nm. Pic d'absorption de la *chlorophylle a* à 680 nm pratiquement absent.

Le *type* corallien d'origine ne semble pas avoir d'influence sur le sous-type de *CBL* :

- Sous-type T1 : *ACD, ACB, ACD, ACD, ACT, ACD*
- Sous-type T2 : *ACD, CM, ACB*

Si on se cantonne à la première partie du spectre, avant 487 nm, les réponses spectrales des deux sous-types de *CBL* sont très proches, au niveau du profil comme en valeur de réflectance. C'est à partir de 487 nm que les deux sous-types diffèrent, notamment par une figure d'absorption à 580 nm présente dans le sous-type 1 et absente du sous-type 2, et une réflectance globalement plus forte pour ce dernier.

Cette forte réflectance autour de 487 nm (entre 20 et 50 % de réflectance chez les deux sous-types) laisse penser que l'action du complexe PCP (Peridinine-Chlorophylle-Peridinine) des zooxanthelles, dont le spectre d'absorption très large (400 – 550 nm) admet un maximum d'absorption vers 480 nm [5], est fortement diminuée chez les *CBL*, en accord avec les conclusions de [4].

Sachant que les pigments photosynthétiques contenus dans les zooxanthelles absorbent peu, d'une manière générale, entre 550 et 650 nm [4] [1], la figure d'absorption à 580 nm du sous-type 1 pourrait être due à un pigment du corail hôte, la pocilloporine responsable de la forme corallienne *bleue* possédant un pic d'absorption à 560 nm par exemple, ou une GFP non fluorescente de même type. Chez le sous-type 2, une absence de GFP pourrait expliquer cette forme de spectre plus rectiligne.

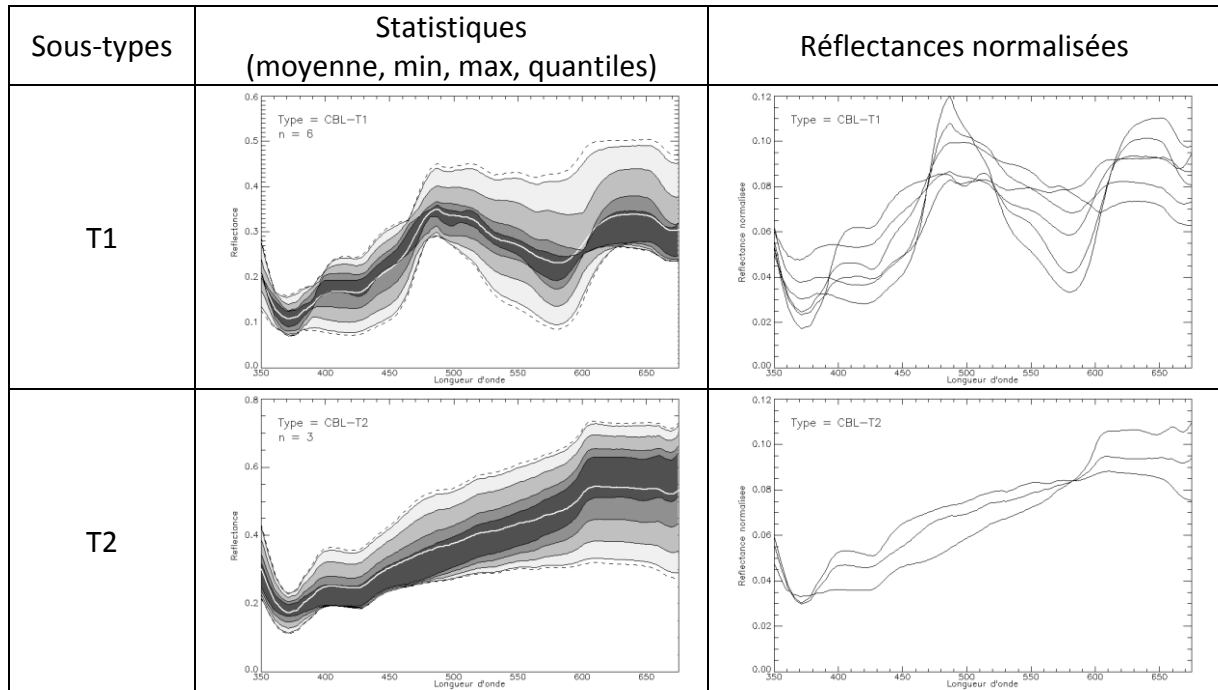

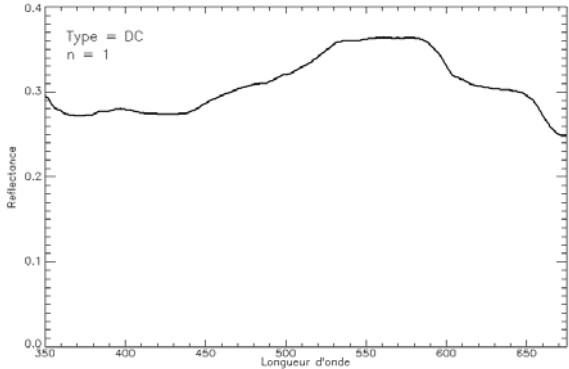
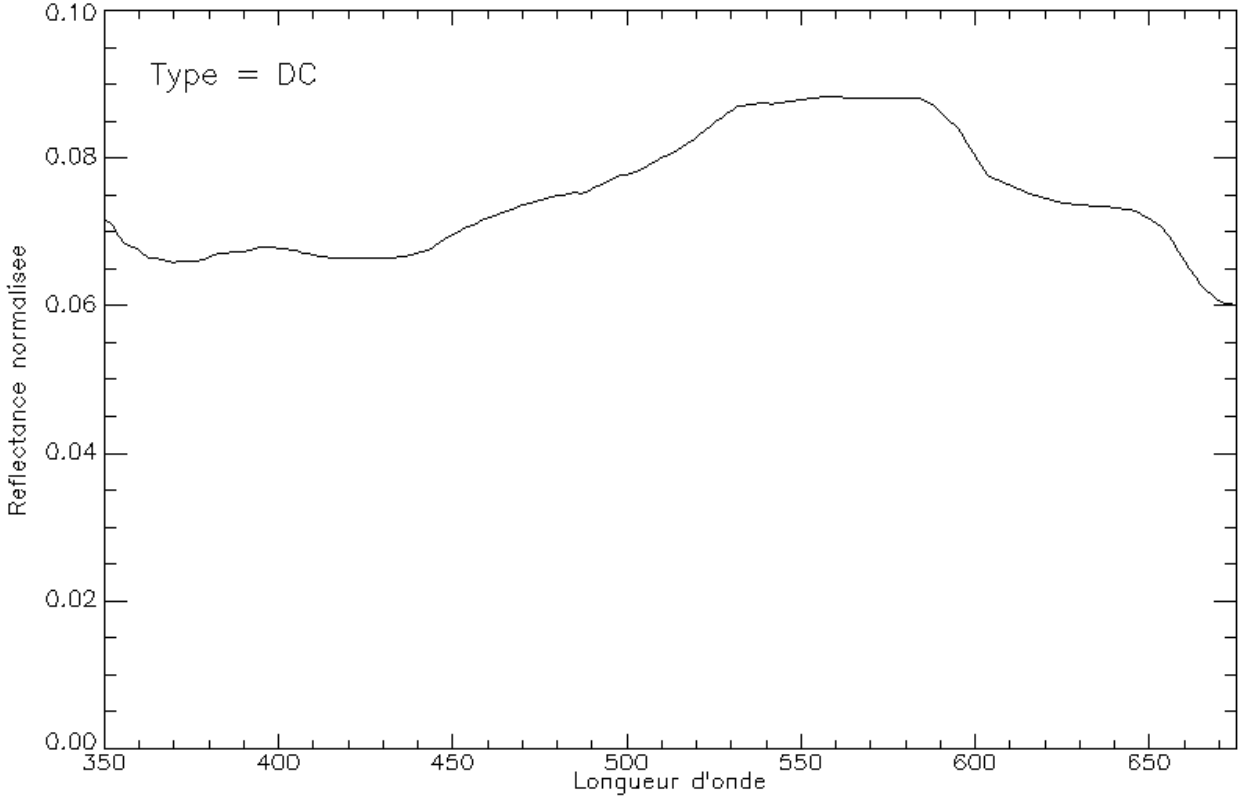
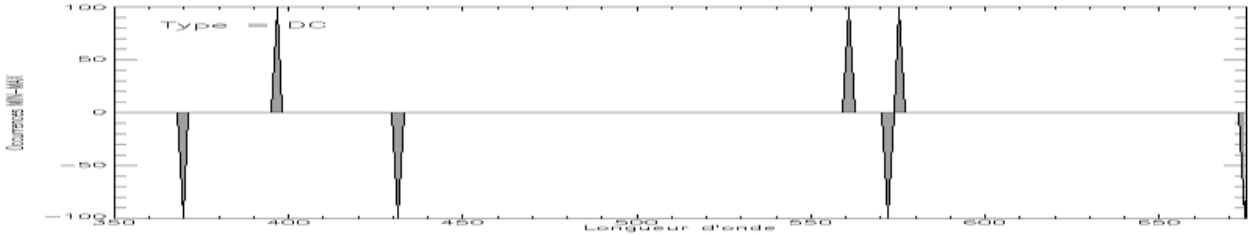


Figure 6. Bien que de colorations identiques, on distingue deux types de coraux blanchis selon la présence ou non d'un pic de réflectance autour de 500 nm.

Animaux	Coraux	Morts	
<b>DC - Coraux morts</b>			
			
			
			

Ce **type** de nature de fond est complètement **minéral** : c'est le squelette calcaire support des polypes, devenu apparent après la mort de la colonie corallienne.

La librairie spectrale ne comporte qu'**une seule mesure** de **DC** (1 GLO). Ce type de substrat est en effet peu fréquent : les coraux morts ne restent que très peu de temps « nus », ils sont très rapidement colonisés par des gazons algaux (des filaments algaux sont d'ailleurs déjà présents sur le squelette corallien échantillonné, voir photo).

La réflectance est forte et relativement stable entre 350 et 700 nm (elle oscille entre 25 et 35 % de réflectance). La courbe ne présente pas de figures d'absorption ni de pics de fluorescence marqués. On note tout de même une baisse de réflectance assez forte entre 580 et 670 nm, sans doute causée par l'action d'un pigment photosynthétique (chlorophylle), confirmant le début de colonisation algale.

Le graphique de la Figure 7 ci-dessous présente les spectres moyens de trois types de nature de fond différents dont les colorations perçues visuellement sont proches : coraux morts (**DC**), coraux blanchis de sous-type 2 (**CBL**) et dalle rocheuse compacte claire (**RC**).

- Les courbes de **DC** et **RC** se superposent sur pratiquement toute la gamme spectrale, confirmant le comportement « minéral » du squelette calcaire des coraux morts nus. Elles présentent toutes les deux une absorption chlorophyllienne vers 670 nm, signe d'une légère végétalisation.
- Entre 450 et 600 nm, ces deux types de substrats sont très proches des **CBL** de sous-type 2 (confirmant ainsi une absence d'activité pigmentaire des **CBL** dans cette gamme de longueurs d'ondes).
- Par contre, entre 350 et 450 nm les **CBL**, encore vivants, montrent une figure d'absorption (minimum vers 371 nm), non visible chez **DC** et **RC**. Cette absorption met en évidence l'action de molécules photo actives encore présentes dans les coraux blanchis, dont le mode de fonctionnement est probablement proche de celui des MAAs (*mycosporine-like amino acids*). Ces molécules, en 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 de nombreuses espèces de corail [6].
- Au-delà de 600 nm c'est l'inverse : la réflectance baisse chez **DC** et **RC** alors qu'elle reste stable ou continue à augmenter chez **CBL**. Ce phénomène met en évidence la faible activité photosynthétique des algues présentes en surface du substrat minéral, et montre aussi la quasi-absence d'absorption chez les coraux blanchis dans cette partie du spectre.

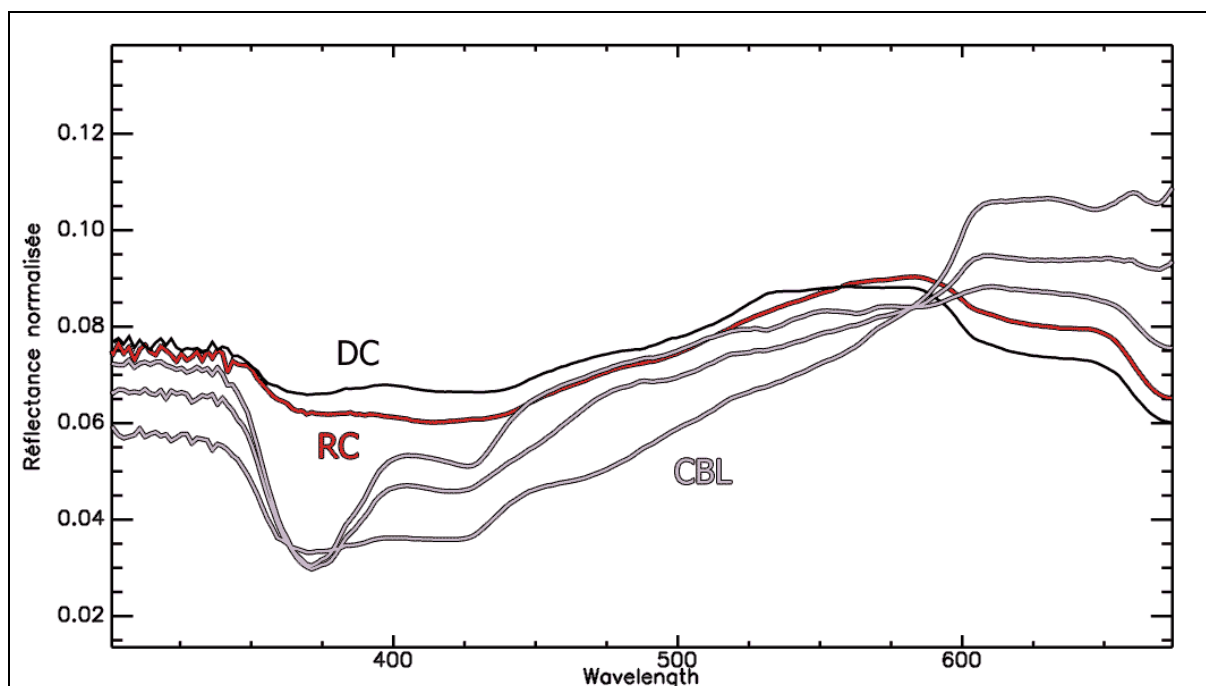


Figure 7. Comparaison des spectres de corail mort (DC), roche (RC) et du corail blanchi sous-type 2 (CBL), réflectances normalisées.

De nouvelles mesures sur des coraux récemment morts et des roches propres (non végétalisées) permettraient de préciser les hypothèses au-delà de 600 nm sur :

- les effets de la colonisation algale dans la réponse spectrale des substrats minéraux
- l'activité photosynthétique des coraux blanchis dans cette partie du spectre

Les différents types animaux décrits et analysés ci-après ne représentent en proportion que des surfaces limitées des récifs coralliens : la probabilité qu'ils aient un impact sur les valeurs des pixels des images hyperspectrales est donc négligeable. Cependant l'analyse de leurs réponses spectrales garde un intérêt pour la validation des différentes hypothèses émises précédemment (mode d'action des différents pigments photosynthétiques), et pour la mise en évidence éventuelle de signatures spectrales spécifiques.

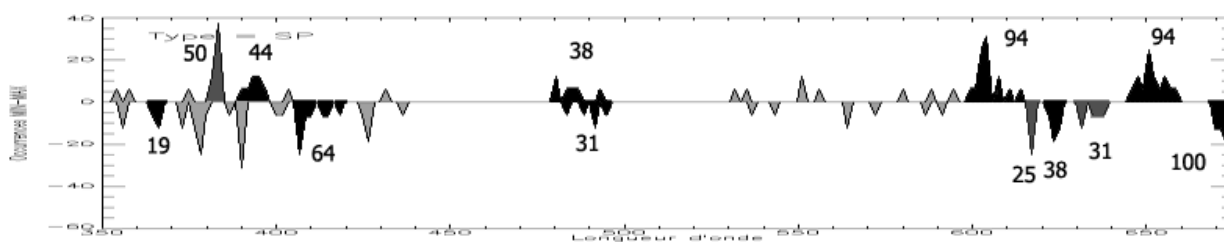
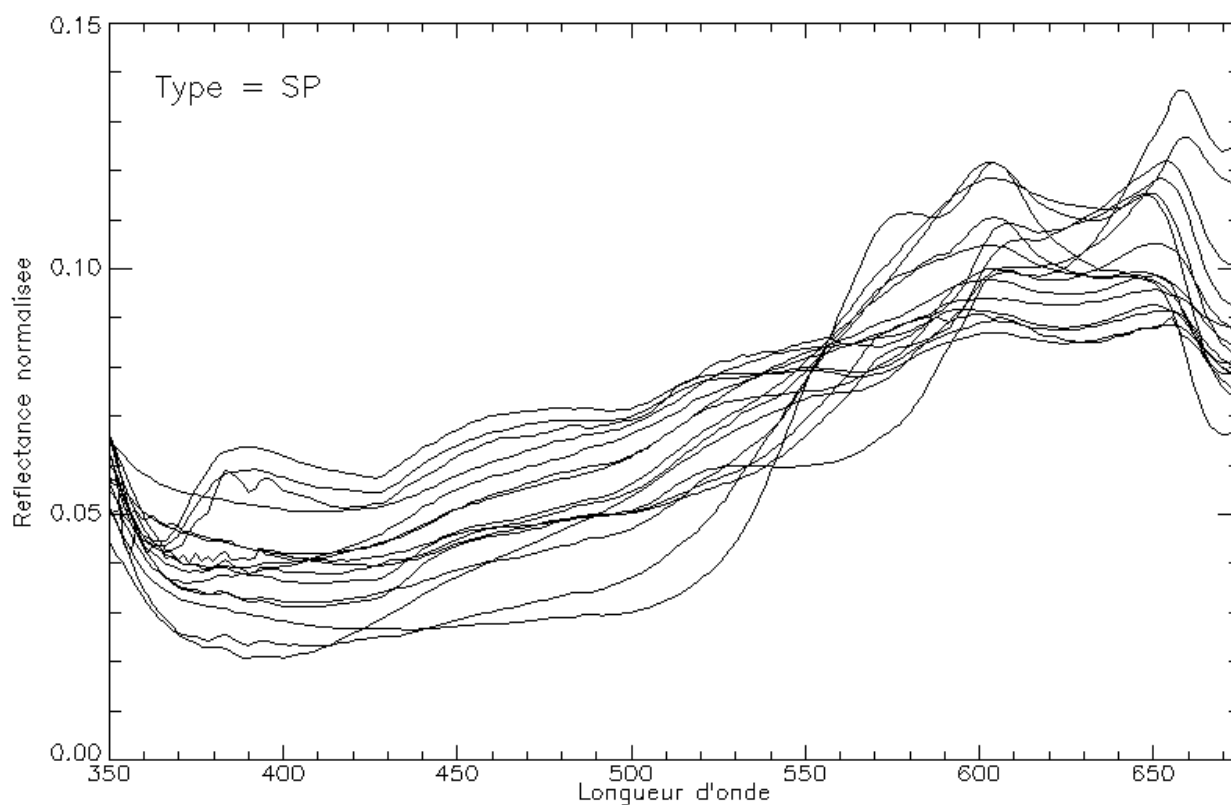
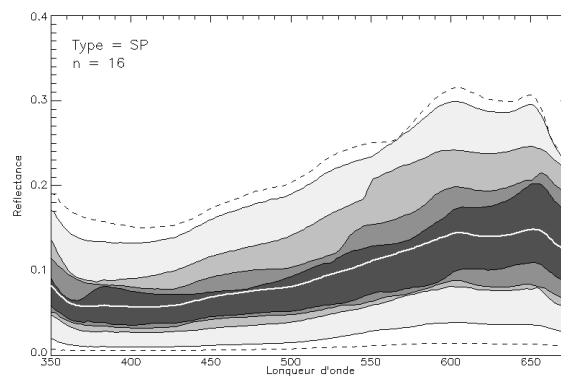




<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>		
----------------	--------------------------	--	--

**SP - Eponges**

Principales espèces rencontrées : *Phyllospongia* spp.



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **16 mesures** exploitables d'éponges (2 GLO, 2 GEY, 5 MAY et 7 RUN).

Les **magnitudes spectrales** sont très **variables** d'une espèce à l'autre : de moins de 2 % de réflectance sur tout le spectre pour une éponge noire de Mayotte à plus de 30 % de réflectance à 600 nm pour une éponge orangée à Glorieuses (photo en haut à droite).

Les courbes de réflectance normalisée montrent que ce groupe n'est pas très homogène au niveau de la signature spectrale. Cette hétérogénéité peut s'expliquer par la grande diversité d'espèces, structures et colorations regroupées dans ce type.

Cependant de grandes tendances sont communes à toutes les cibles : après une large zone de minimums entre 350 et 450 nm, les courbes sont globalement croissantes jusqu'à 650 nm, avec plusieurs pics de réflectance marqués dans la même région que les coraux (575 – 650 nm). Ainsi, comme les coraux de la forme *bleue*, **toutes** les mesures présentent un **double épaulement à 600 et 650 nm** (94 % présentent un pic, notamment le second à 650 nm, jamais aussi marqué chez les coraux). Le premier épaulement à 575 nm (caractéristique que la forme corallienne *brune*) n'est présent que sur deux mesures (de la même espèce). 100 % des mesures admettent un pic d'absorption caractéristique de la chlorophylle vers 680 nm.

Deux hypothèses pourraient expliquer ces figures spectrales semblables à de la photosynthèse :

- Par la contribution dans la réponse spectrale de microorganismes photosynthétiques en surface des éponges. Contrairement aux colonies coralliennes, les éponges sont souvent recouvertes d'une pellicule de débris divers pouvant contenir du microphytobenthos ayant une activité photosynthétique, comme sur certains substrats minéraux (voir fiches spécifiques). L'impact sur la réflectance, même faible, peut être mesuré par la radiométrie.
- Les éponges sont théoriquement des organismes hétérotrophes ne pratiquant pas la photosynthèse, cependant, certaines espèces à l'instar des coraux peuvent héberger des zooxanthelles symbiotiques [7]. Ces algues, par leur action photosynthétique améliorent alors le développement des spongiaires [8]. La signature spectrale de ces espèces de spongiaires doit donc, comme pour les coraux être très dépendante de celle des zooxanthelles, expliquant les figures caractéristiques observées.

La Figure 8 ci-dessous présente les réflectances moyennes de plusieurs espèces de Porifera et les photos de terrain correspondantes. Ces spectres montrent des profils variés :

- des courbes plutôt planes sans réels pics de réflectance marqués (éponges grises),
- des courbes beaucoup moins rectilignes comme les éponges colorées (brunes, oranges ou violettes). Il est intéressant de noter que l'éponge violette, qui

n'admet qu'un léger saut de réflectance vers 450 nm et garde une réflectance assez élevée à 650 nm prend une couleur violette très caractéristique.

Tous les spectres admettent deux pics à 600 et 650 nm, cependant il est difficile de conclure sur l'origine de ces pics (pigments ou microphytobenthos ?).

Le spectre de l'éponge brune est très caractéristique de l'activité photosynthétique des zooxanthelles avec trois épaulements marqués à 575, 600 et 675 nm (cf. § sur les coraux de forme *brune* dans le rapport de synthèse). Cette éponge, rencontrée dans le lagon de la Réunion le 14 août 2009 par 1 mètre de hauteur d'eau contient sans doute des algues symbiotiques.

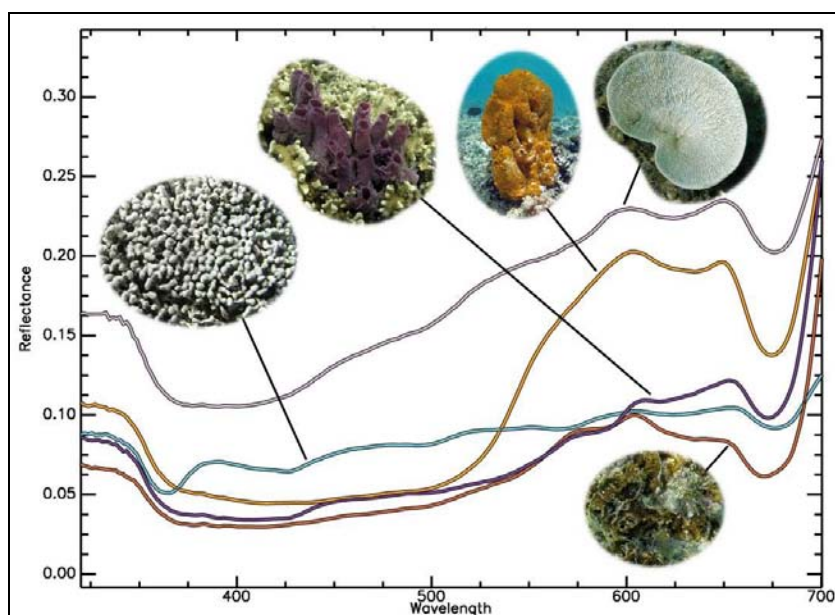


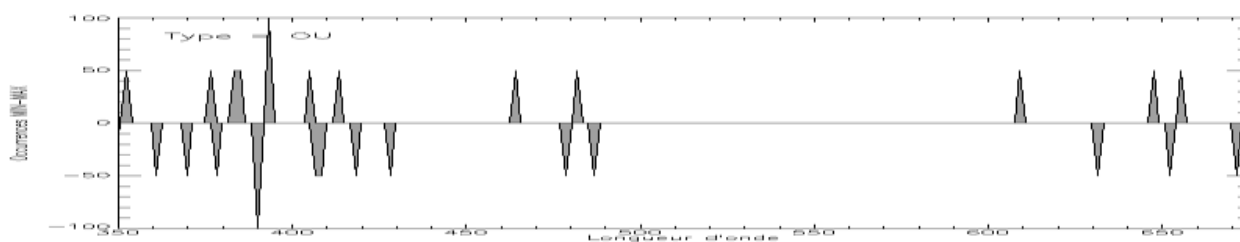
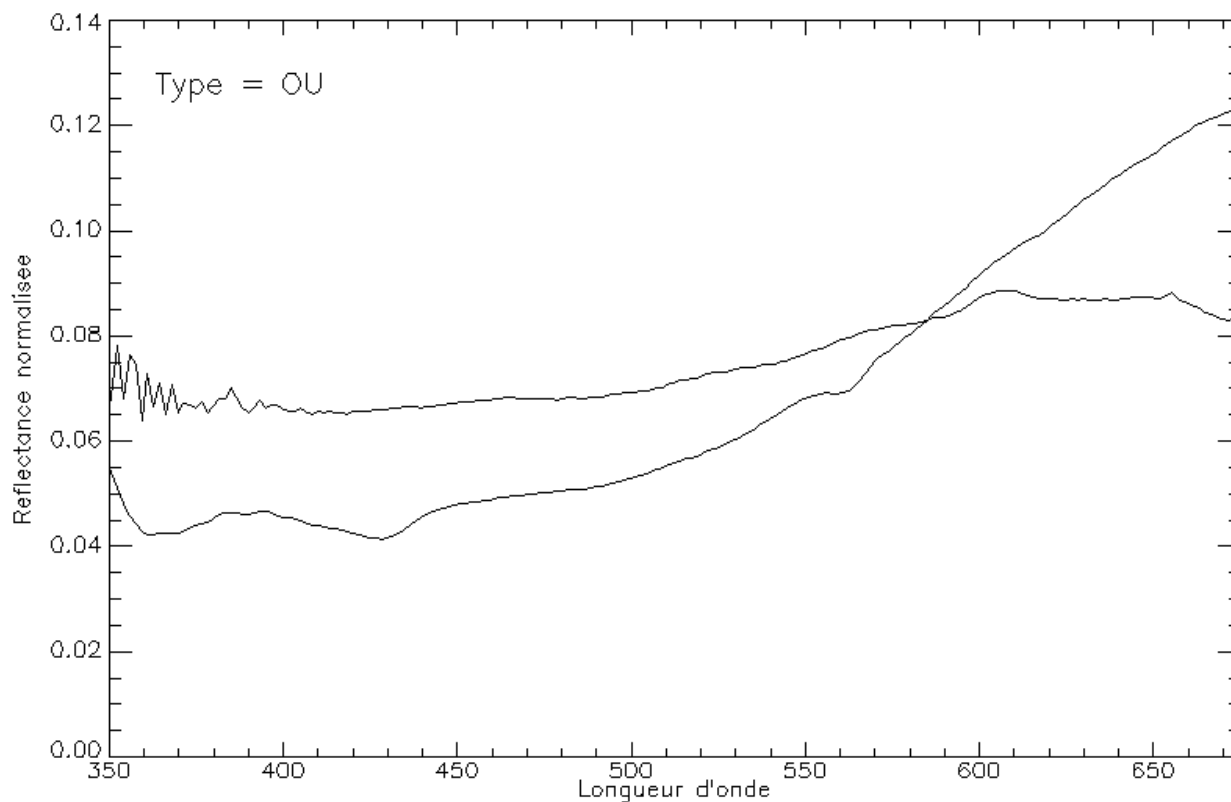
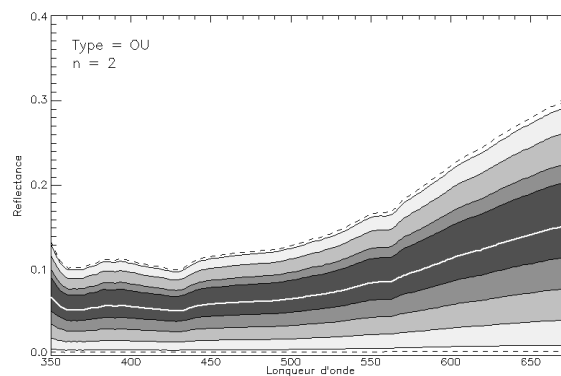
Figure 8. Spectres moyens des principales éponges rencontrées avec la photo de terrain correspondante.



<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>		
----------------	--------------------------	--	--

**OU - Oursins**

Principales espèces rencontrées : *Diadema setosum*, *Toxopneustes pileolus*

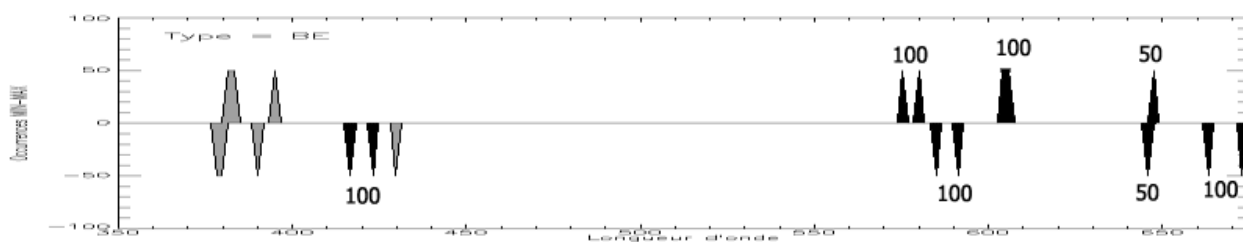
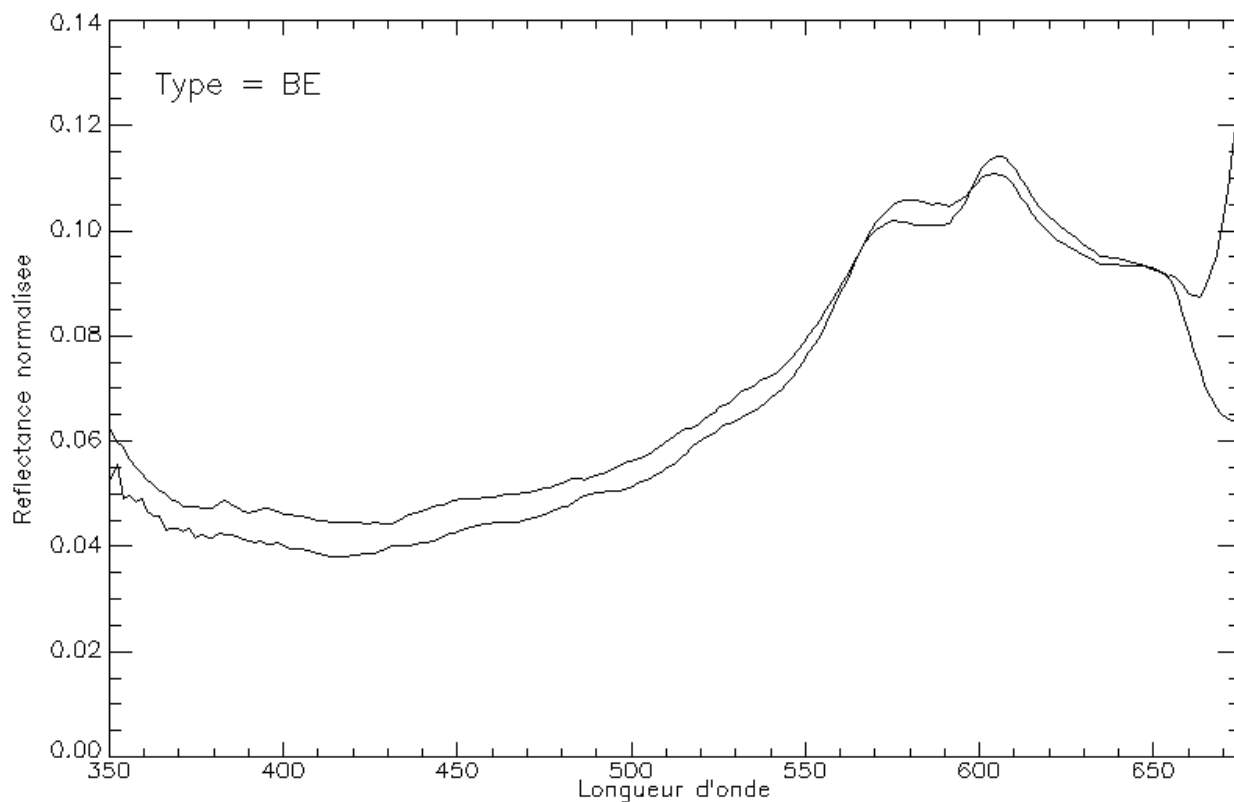
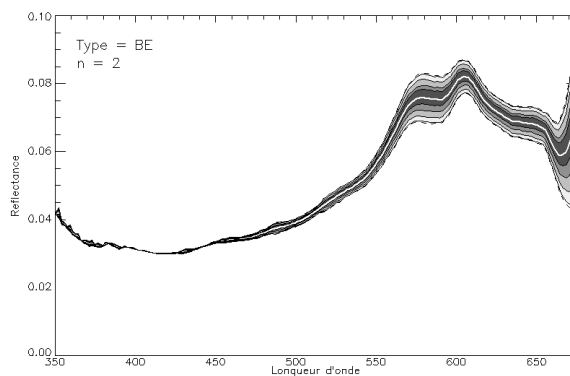


**Deux mesures** de radiométrie ont été réalisées sur des oursins (2 RUN).

Ces mesures, très différentes en magnitude sont assez semblables dans leur forme. L'oursin noir (*Diadema setosum*) a une réflectance très faible, moins de 1 % sur toute la gamme spectrale. L'oursin rose (*Toxopneustes pileolus*) a lui une réflectance croissant régulièrement entre 10 % à 350 nm et 30 % à 650 nm. Les deux individus n'admettent pas de figures d'absorption ni de pic de réflectance marqués (légères absorptions à 428 et 560 nm pour l'oursin rose).

<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>		
----------------	--------------------------	--	--

**BE - Bénitiers**





Comme pour les oursins, seulement **2 mesures** de radiométrie ont été réalisées sur des bénitiers (1 MAY, 1 RUN).


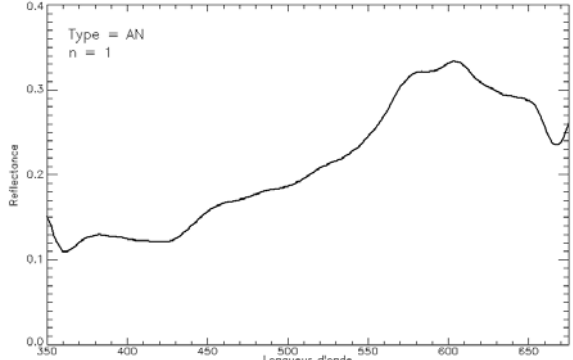
Les réflectances sont faibles, moins de 10 % sur toute la gamme spectrale. Les deux mesures sont très proches tant en magnitude qu'en forme de courbe. Les effets de la profondeur sont ici bien visibles pour la mesure MAY réalisée à 6,3 m (contre 1,2 m à la RUN) : à partir de 650 nm, la réflectance remonte beaucoup plus rapidement qu'à faible profondeur (cf § rapport de synthèse pour plus de détails).

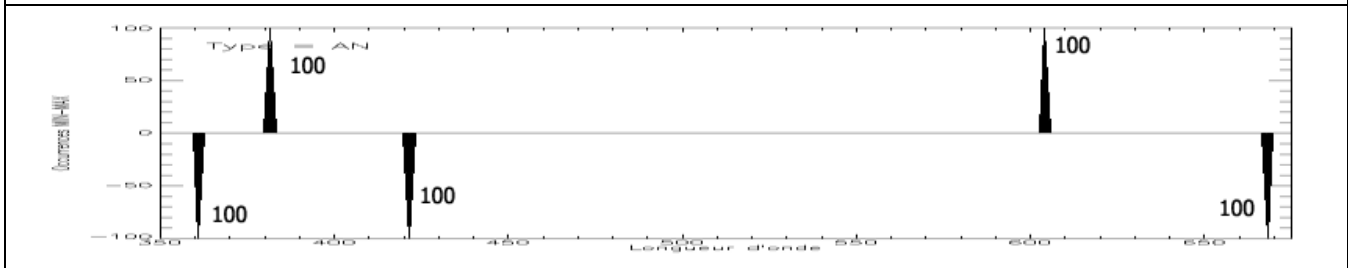
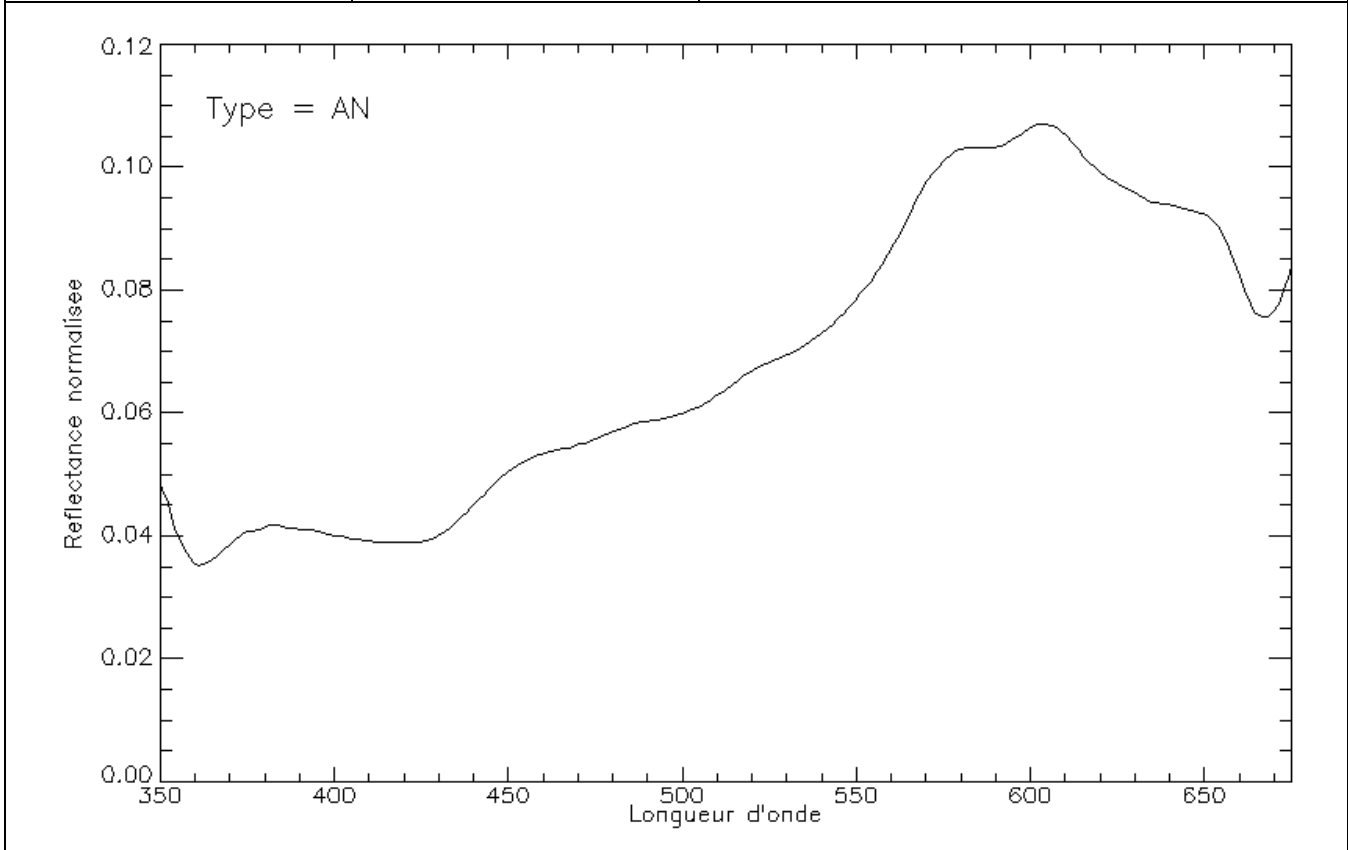
Comme pour l'éponge brune, les bénitiers présentent un spectre typique de la forme corallienne *brune* avec trois épaulements marqués à 575, 600 et 650 nm Cette figure est caractéristique d'une activité photosynthétique produite par des zooxanthelles symbiotiques, décrite chez ce genre animal [7].

Mis à part le triple épaulement des zooxanthelles, on ne note aucune autre figure spectrale marquée : contrairement aux coraux, la pigmentation de l'organisme hôte ne semble pas avoir d'influence sur la réponse spectrale (absorption ou fluorescence).

<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>		
----------------	--------------------------	--	--

**AN - Anémones**

		 <p>Type = AN n = 1</p>
---	--	---



Seulement **1 mesure** de radiométrie a été réalisée sur anémone (1 GEY).

La réflectance est comprise entre 10 % et 30 % sur la gamme spectrale étudiée. Ces valeurs relativement fortes sont responsables de la coloration très claire de cette colonie.

Comme pour l'éponge brune et les bénitiers, l'anémone échantillonnée présente un spectre typique de la forme corallienne *brune* avec trois épaulements marqués à 575, 600 et 650 nm. Cette figure est caractéristique d'une activité photosynthétique produite par des zooxanthelles symbiotiques, décrite chez ce genre animal [7].

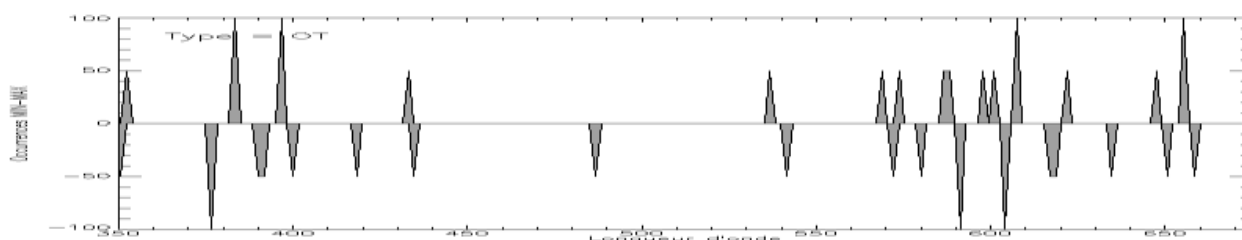
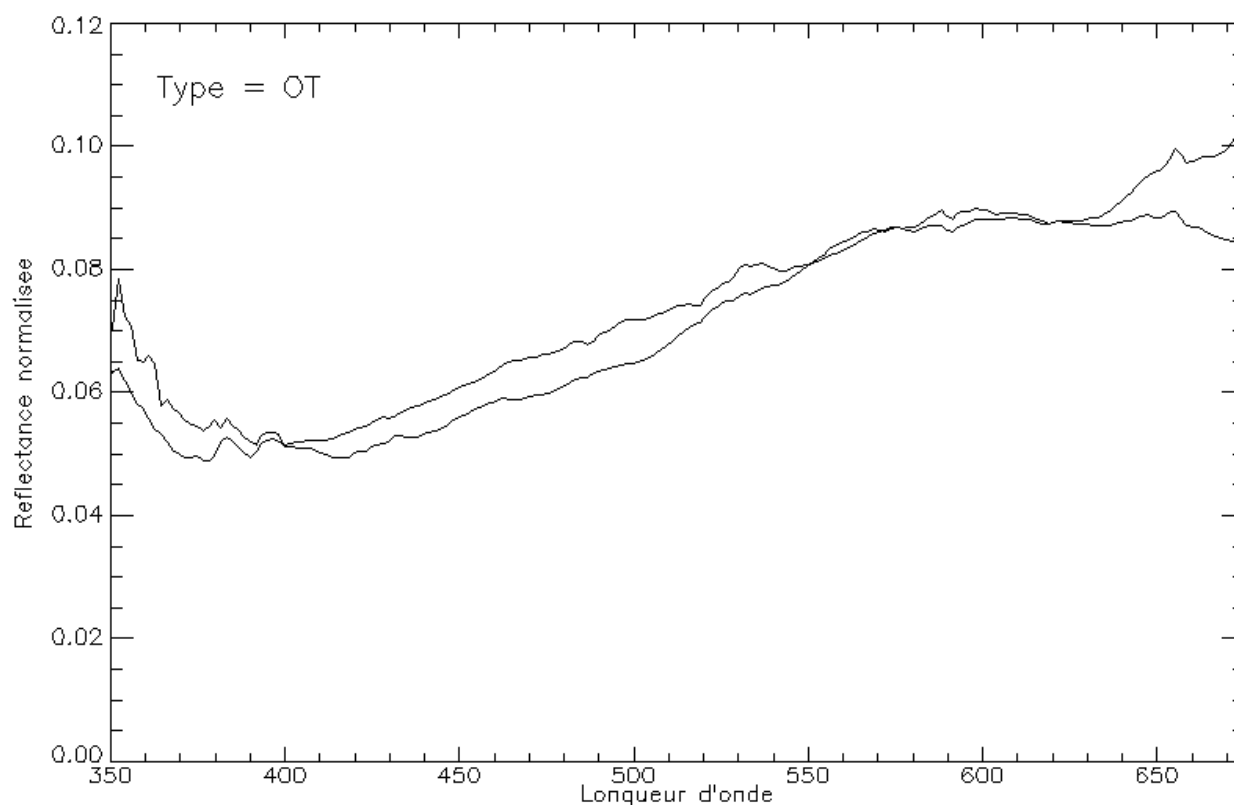
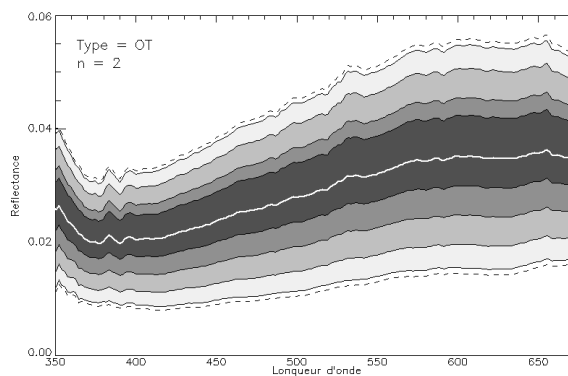
Malgré la blancheur de l'organisme, le profil spectral est « normal » et ne se rapproche pas de celui des coraux blanchis (cf. fiche sur les CBL page 42).

Contrairement à l'éponge brune et aux bénitiers, la courbe spectrale comporte quelques ondulations entre 350 et 550 nm : la pigmentation de l'organisme hôte semble avoir une légère influence sur la réponse spectrale (absorption ou fluorescence).

<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>		
----------------	--------------------------	--	--

**OT - Holothuries**

Principale espèce rencontrée : *Holothuria leucospilota*, *Stichopus chloronotus*



Deux **mesures** de radiométrie ont été réalisées sur holothuries (2 RUN).

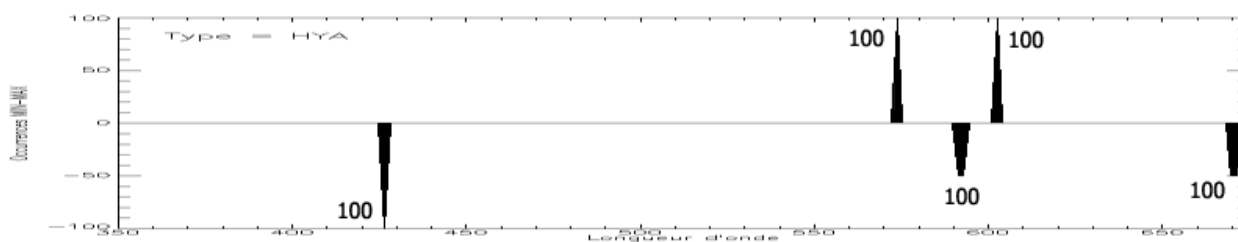
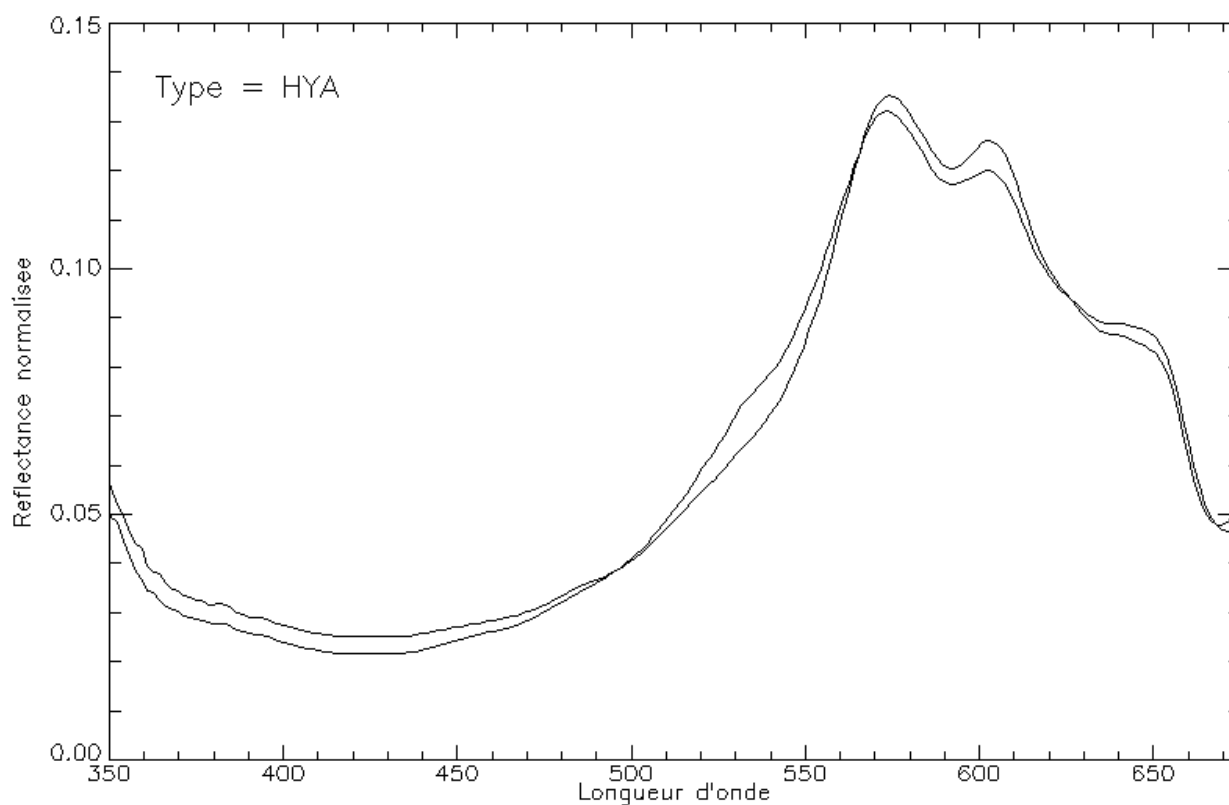
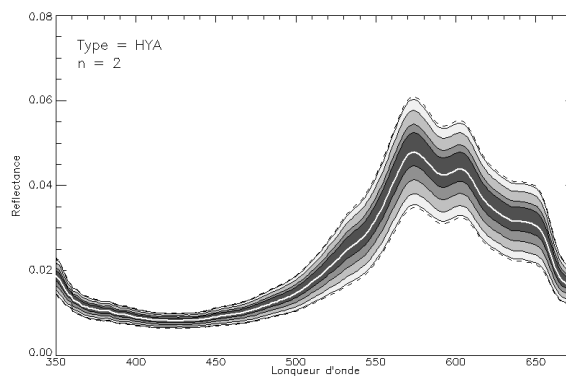
Les deux individus échantillonnés, très sombres, ont une réflectance comprise entre 1 % et 6 %, croissant très légèrement et régulièrement sur la toute la gamme spectrale étudiée.

L'une des deux courbes admet un léger épaulement centré sur 533 nm, sans doute responsable de la coloration vert-sombre de cette espèce (*Stichopus chloronotus*).

<b>Animaux</b>	<b>Autres organismes</b>	<b>Hydraires</b>	
----------------	--------------------------	------------------	--

**HYA - *Aglaophenia***

Espèces rencontrées : *Aglaophenia* spp.



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **2 mesures** exploitables d'hydrides du genre *Aglaophenia* (2 GLO). C'est le seul genre parmi les hydrides rencontrés à couvrir des surfaces suffisamment importantes pour permettre, premièrement une mesure de radiométrie in-situ, deuxièmement leur localisation potentielle sur les images hyperspectrales. Ces hydrides n'ont été rencontrés que sur les sites de Glorieuses et Geysier.

Les réflectances mesurées sont relativement faibles, avec un minimum d'environ 1 % à 425 nm et un maximum de 5 % à 575 nm. Les deux mesures ont des courbes spectrales sont très proches tant en magnitude qu'en forme.

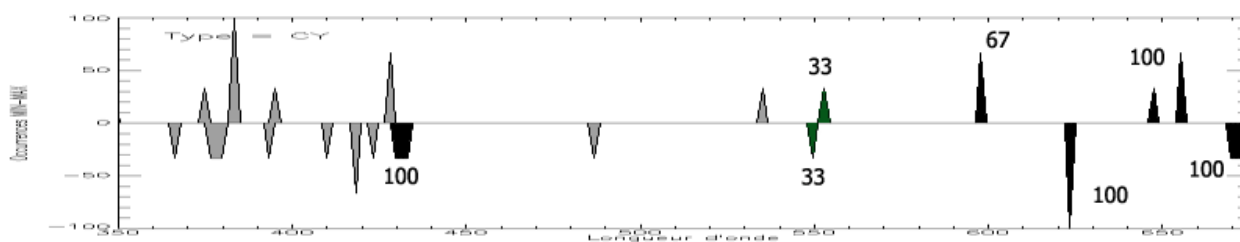
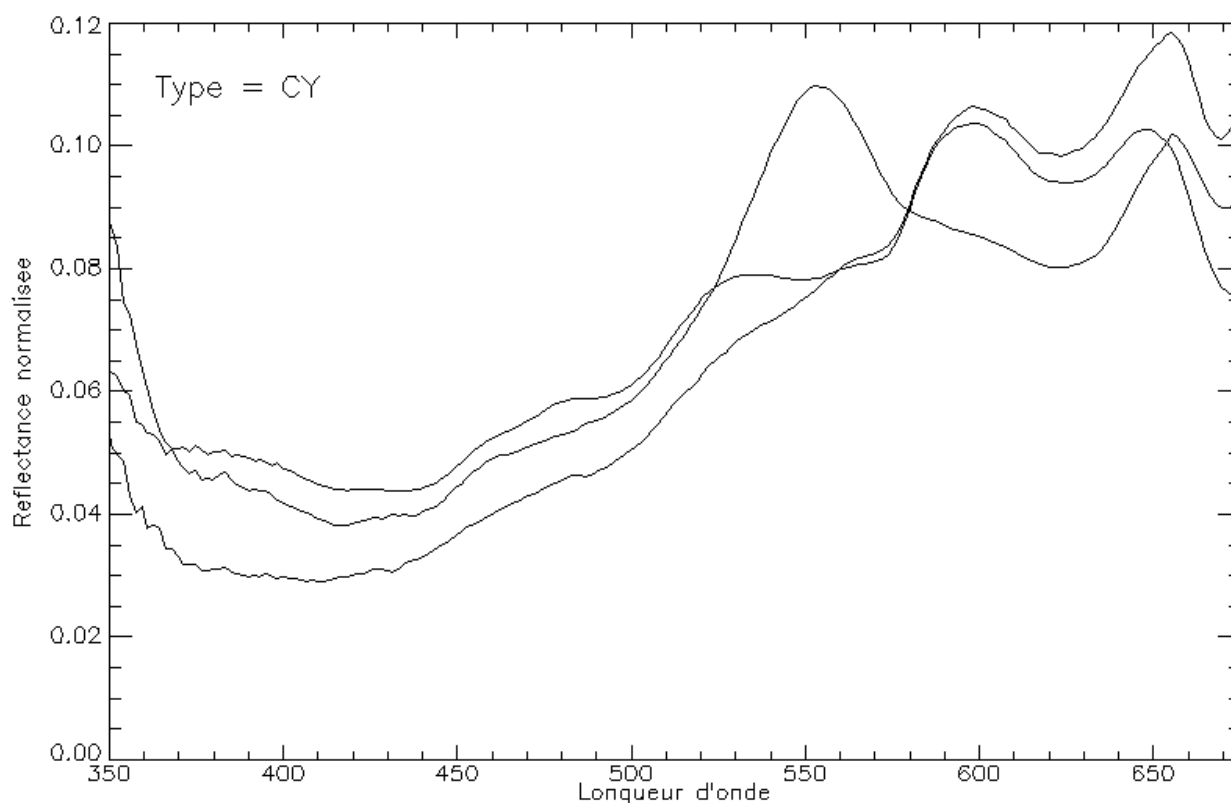
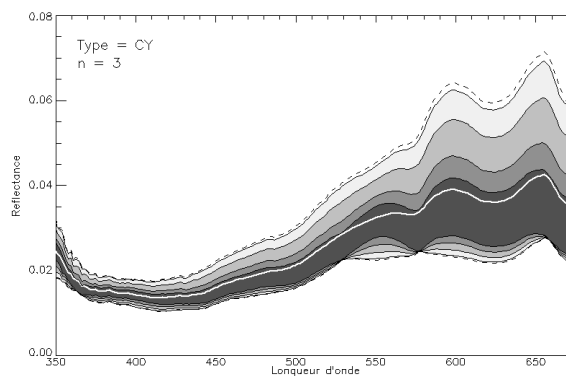
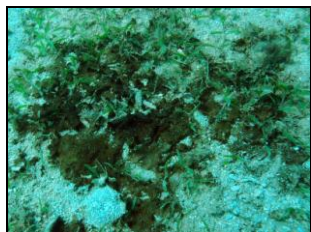
Comme pour l'éponge brune, les bénitiers et l'anémone, ils présentent un spectre typique de la forme corallienne *brune* avec trois épaulements marqués à 575, 600 et 650 nm. Cette figure triple est caractéristique de l'activité photosynthétique de zooxanthelles symbiotiques.

Mis à part le triple épaulement des zooxanthelles, on ne note aucune autre figure spectrale marquée : contrairement aux coraux, la pigmentation de l'organisme hôte ne semble pas avoir d'influence sur la réponse spectrale (absorption ou fluorescence).

Ce type d'hydrides peut localement couvrir des surfaces importantes (quelques m<sup>2</sup>), détectables sur les images de télédétection. Cette analyse spectrale est donc importante car leur signature est très proche de celles des coraux de forme *brune* et des coraux mous.

<b>Végétaux</b>	<b>Cyanophycées</b>		
-----------------	---------------------	--	--

**CY - Cyanophycées**





Les cyanobactéries ont été régulièrement rencontrées sur le terrain, mais en raison de leur configuration spatiale (petite taille, filaments fins et diffus, mobilité dans les courants) et de paramètres environnementaux défavorables (profondeur de mesure), elles ont été difficilement et relativement peu échantillonnées. Sur les 12 mesures de terrain, **seulement 3** ont été jugées suffisamment fiables et conservées pour cette analyse (1 MAY, 2 RUN).

Pour toutes les mesures, la **magnitude moyenne est faible** (entre 1 et 7 % de réflectance dans le visible), traduisant les colorations sombres du terrain. Comme pour les autres types, la réflectance est globalement croissante entre 350 et 700 nm. La courbe est dans un premier temps rectiligne entre 350 et 525 nm, puis l'expression de pigments photosynthétiques laisse apparaître une forme moins régulière avec plusieurs pics de réflectance marqués entre 550 et 650 nm.

Un regroupement peut être constitué selon la forme des courbes spectrales :

- Un premier groupe de deux mesures (cyanophycées de couleur noire ou gris sombre) présente **deux pics de réflectance marqués vers 600 et 650 nm**. L'une des deux mesures comporte en plus un troisième épaulement vers 535 nm, qui se traduit sur le terrain par une coloration grise tirant sur le vert.
- Un second groupe (constitué d'une seule mesure) avec **deux pics marqués à 550 et 650 nm**. Le pic à 600 nm, pourtant le plus fréquent chez tous les types analysés jusqu'à présent, est absent. Cette cyanobactérie rencontrée dans le lagon de la Réunion par 1 mètre de hauteur d'eau est de couleur vert-sombre (photo en bas à gauche). Ce pic de réflectance marqué dans le vert (550 nm) est original car il n'a encore été rencontré chez aucun des autres types étudiés.

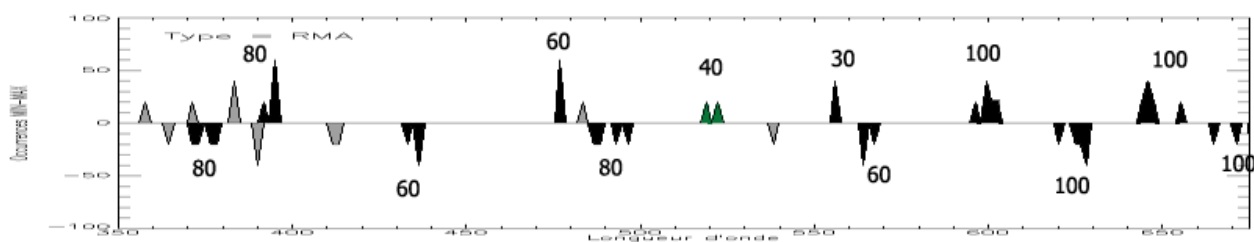
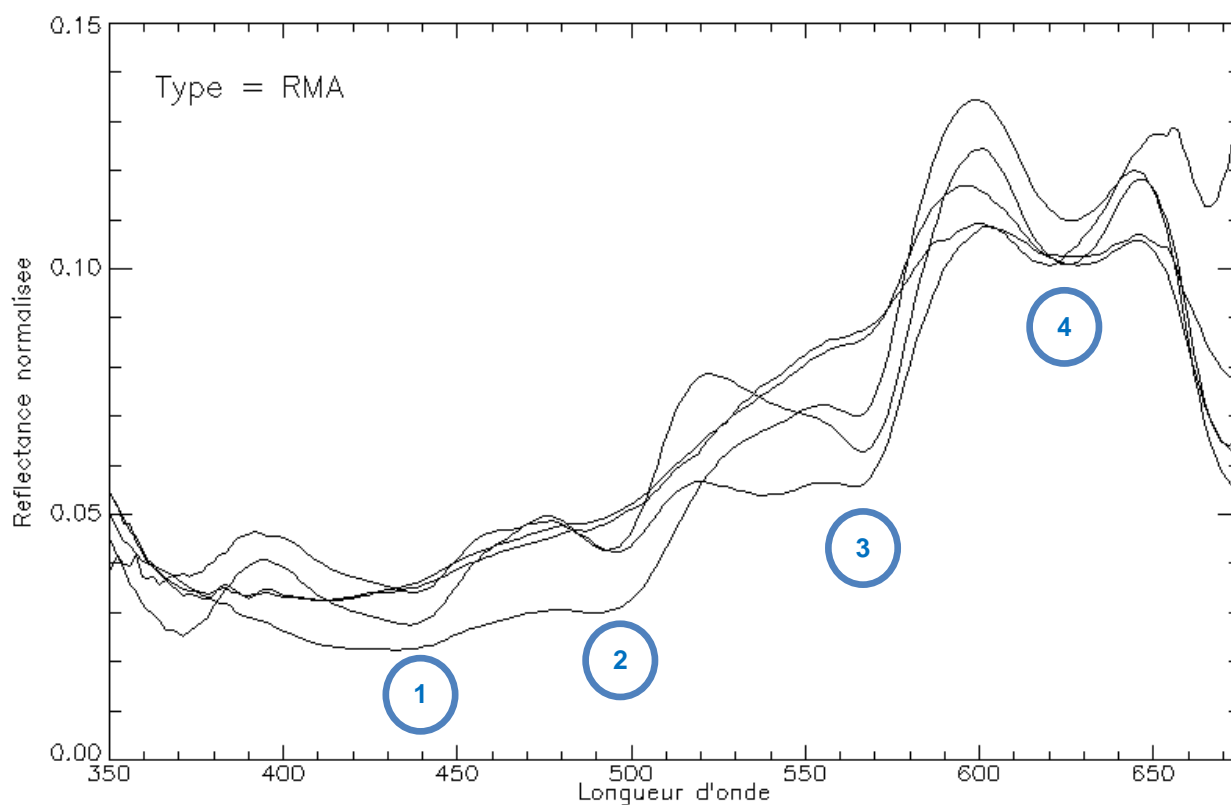
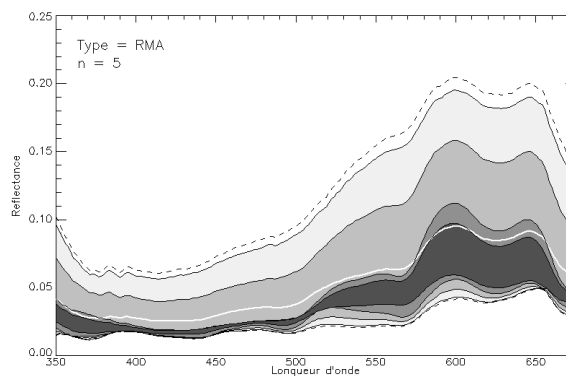
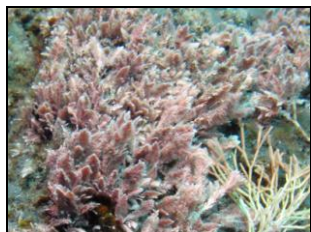
Par rapport à la forme corallienne *bleue*, dont les deux épaulements centrés sur les mêmes longueurs d'ondes rapprochent les deux profils spectraux :

- Première figure à 575 nm. La forme corallienne *bleue* admet soit un fort pic d'absorption, soit un déplacement de l'épaulement de la forme *brune* vers les longueurs d'ondes légèrement inférieures (autour de 565 nm). Dans le cas de CY, la courbe reste rectiligne entre 525 et 575 nm.
- La seconde figure vers 600 nm n'a pas exactement les mêmes caractéristiques que celle des coraux : elle est beaucoup **plus large**, 45 nm entre 575 et 620 nm et un peu **plus tôt** dans le spectre avec un maximum à 598 nm, contre une largeur de 30 nm entre 590 et 620 nm et un maximum à 605 nm pour les coraux.
- La troisième figure à 650 nm des CY est beaucoup **plus marquée** : elle apparaît comme un maximum dans les trois mesures (100 %), alors qu'elle a tendance à n'apparaître que comme un épaulement chez les coraux (seulement 30 % de maximums locaux).

<b>Végétaux</b>	<b>Algues</b>	<b>Dressées</b>	
-----------------	---------------	-----------------	--

**RMA - Algues rouges**

Principales espèces rencontrées : *Asparagopsis sp.*, *Jania sp.*, *Galaxaura sp.*



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **5 mesures** exploitables de macroalgues rouges (3 MAY, 2 RUN).

Les *RMA* présentent une **grande variabilité de magnitude** spectrale (mais qui reste du même ordre que celle des coraux) : 95 % des mesures sont entre 5 % et 20 % à 600 nm. La diversité des espèces rencontrées et des structures est sans doute responsable de cette variabilité.

La principale caractéristique des algues rouges est, comme une partie des cyanophycées, le **double pic de réflectance vers 600 et 650 nm**, présent dans 100 % des mesures. Comme pour les *CY* le second pic vers 650 nm est bien marqué, apparaissant dans toutes les mesures, contrairement aux coraux.

Le **pic à 600 nm**, avec une **position** décalée vers le bleu et une **largeur** plus importante, pourrait être comme pour les *CY*, un **bon critère de différenciation** par rapport aux coraux.

Certains spectres présentent une succession d'ondulations due à l'expression de pigments photosynthétiques originaux dans une zone comprise entre 370 et 570 nm. Trois pics d'absorption sont localisés autour de 436, 493 et 565 nm. La *RMA Asparagopsis sp.* rencontrée à Mayotte par 3 m de profondeur présente ainsi un pic de réflectance marqué à 522 nm, qui est sans doute responsable de sa coloration rouge tirant sur le vert (photo en haut à droite).

La **phycoérythrine** est un pigment photosynthétique rouge de la famille des phycobiliprotéines présent chez certaines Cyanobacteria, la plupart des Rhodophyta et certaines Cryptophyta [9]. Ce pigment, qui admet plusieurs maximums d'absorption à 495, 540 et 565 nm, est responsable des 2 figures d'absorption numérotées 2 et 3 sur le graphique des réflectances normalisées ci-dessus (la figure d'absorption à 540 nm n'est que très peu visible) [10]. L'expression de la phycoérythrine n'est pas visible sur toutes les cibles de *RMA* échantillonnées et pourrait traduire des variations dans les concentrations de ce pigment.

- Présence/expression de la phycoérythrine :
  - *Asparagopsis sp.* Profondeur : 3 m Localisation : Mayotte
  - *Halipliton sp.* Profondeur : 8 m Localisation : Réunion
  - *RMA sp.* Profondeur : 5 m Localisation : Mayotte
- Absence/non expression de la phycoérythrine :
  - *Jania sp.* Profondeur : 1 m Localisation : Mayotte
  - *Galaxaura sp.* Profondeur : 1 m Localisation : Réunion

Il est intéressant de noter que les algues rouges présentant les pics d'absorption caractéristiques de la phycoérythrine ont été échantillonnées en profondeur (> 3 m) où l'essentiel de l'énergie lumineuse est apporté par les longueurs d'ondes bleues et vertes. C'est dans ces longueurs d'onde que ce pigment absorbe majoritairement. La présence de phycoérythrine en profondeur permet ainsi aux algues rouges d'être plus efficaces dans les longueurs d'onde où l'énergie lumineuse est la plus forte.

La figure d'absorption numérotée 1 et centrée sur 440 nm est due à la chlorophylle a [10].

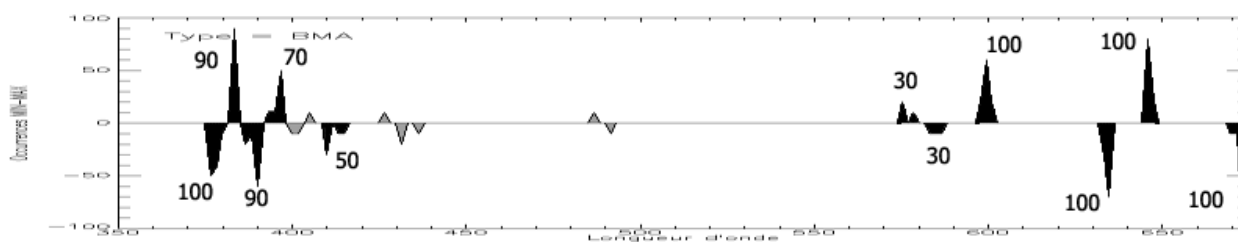
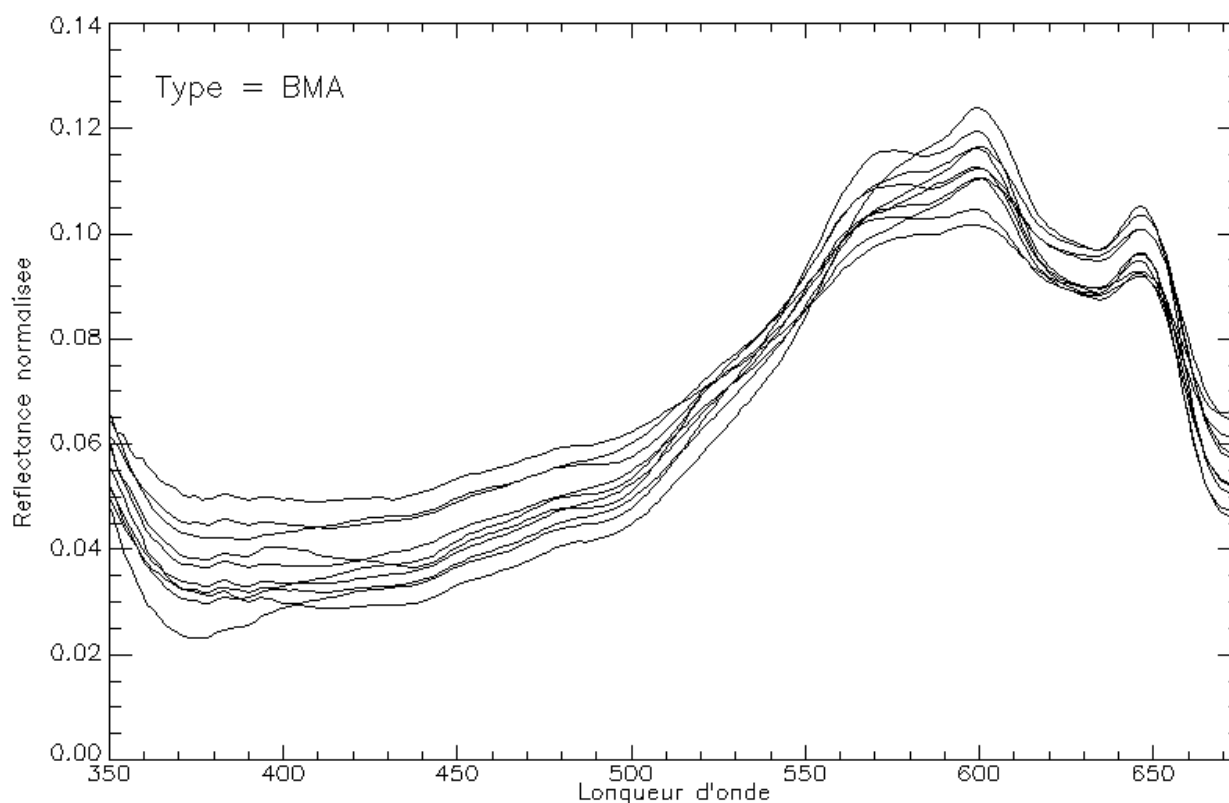
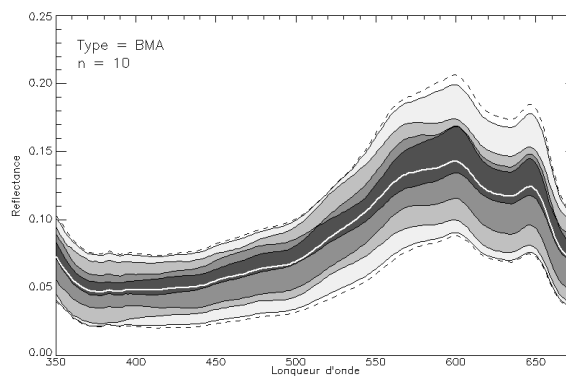
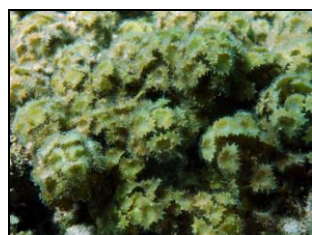
La **phycocyanine** est un pigment photosynthétique bleu-vert de la famille des phycobiliprotéines présent chez certaines Cyanobacteria et Rhodophyta. Ce pigment absorbe la lumière orange-rouge dans les longueurs d'ondes proches de 620 nm [11]. Il est responsable du pic d'absorption centré sur 625 nm [10] et numéroté 4 sur le graphique de réflectance normalisée. Ce pic d'absorption est nettement visible sur tous les *RMA* de la librairie spectrale : contrairement à la phycoérythrine, la phycocyanine semble présente et s'exprimer systématiquement sur toutes les cibles analysées.



<b>Végétaux</b>	<b>Algues</b>	<b>Dressées</b>	
-----------------	---------------	-----------------	--

**BMA - Algues brunes**

Principales espèces rencontrées : *Turbinaria sp.*, *Dictyota sp.*, *Padina sp.*



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **10 mesures** exploitables de macroalgues brunes (2 GLO et 8 MAY). Cinq autres mesures aberrantes ne sont pas présentées (1 GLO et 4 MAY) : taux de recouvrement du substrat trop faible (réponse du substrat sous jacent très forte), profondeur de mesure trop importante (>10m, avec disparition du pic d'absorption de la chlorophylle a à 670 nm, cf. rapport de synthèse) et une dernière pour mauvaise visée ou contribution d'une autre cible (film de microphytobenthos ?). Trois genres d'algues brunes ont été analysés : *Turbinaria*, *Padina* et *Dictyota*.

La **variabilité de magnitude** spectrale des *BMA* est dans la moyenne des mesures réalisées pour les coraux et les autres types d'algues : entre 9 % et 20 % de réflectance à 600 nm.

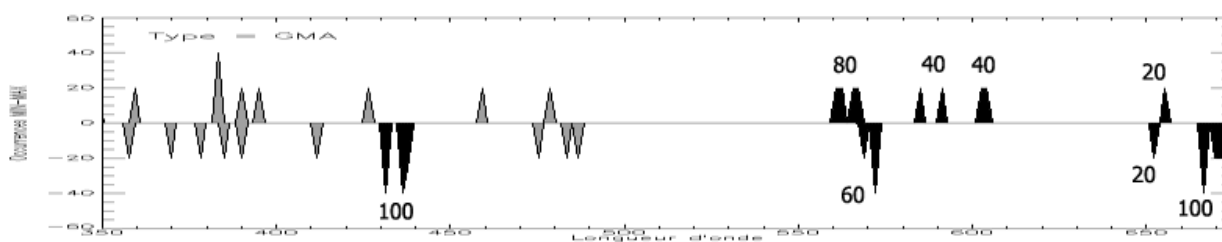
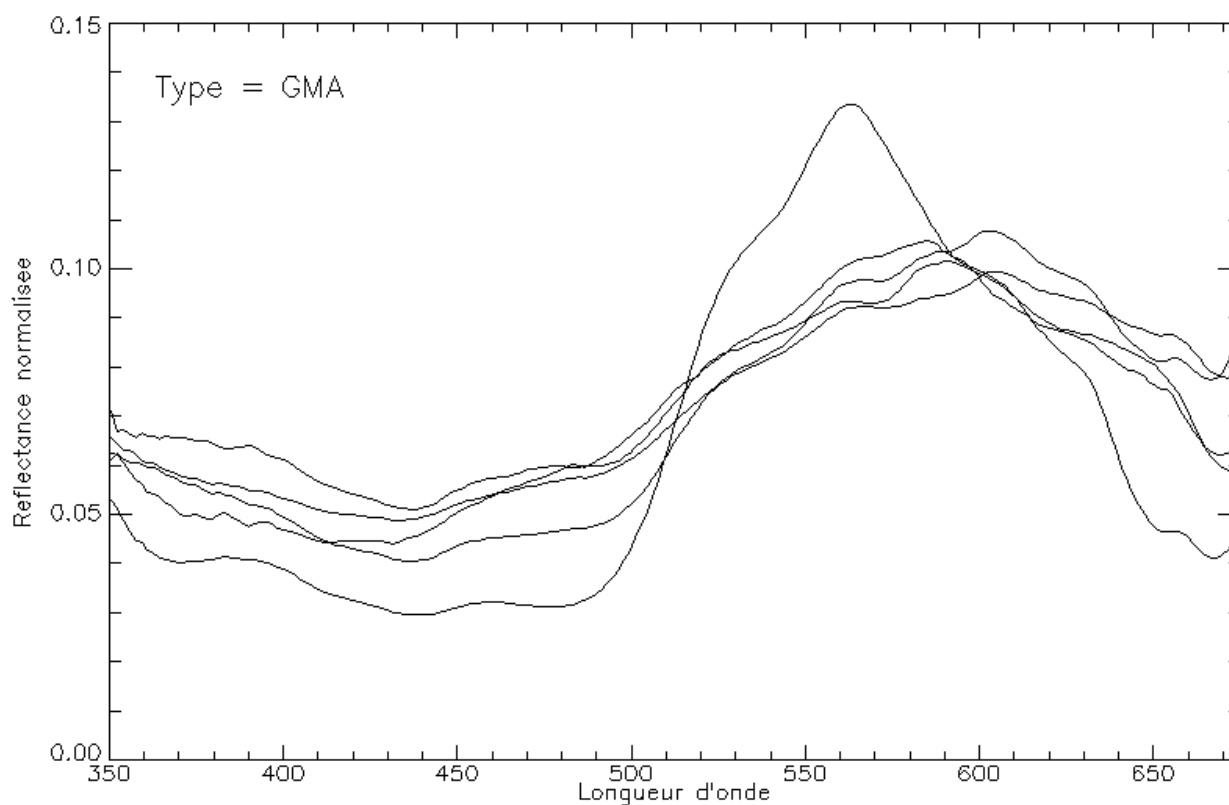
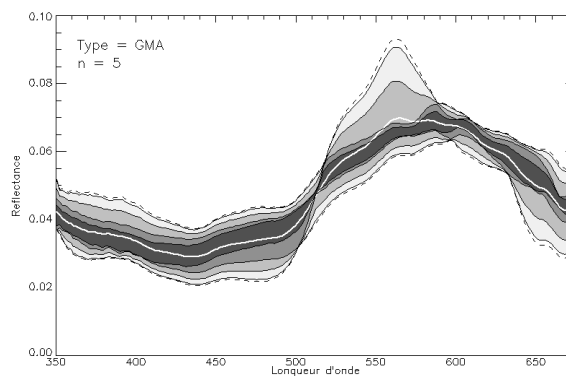
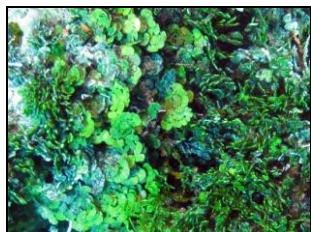
La réflectance normalisée montre une grande homogénéité dans les mesures (les courbes peuvent pratiquement se superposer). Après des valeurs faibles et légèrement croissantes entre 370 et 500 nm, la réflectance croît plus fortement jusqu'à un maximum vers 599 nm (présent chez 100 % des mesures), après avoir passé un premier épaulement à 575 nm (1/3 seulement des mesures admettent un maximum local ici). La réflectance décroît ensuite légèrement jusqu'à un minimum local à 635 nm (100 % d'occurrence) avant de remonter pour un dernier maximum local vers 645 nm (100 % des mesures).

Contrairement aux *RMA*, dont le pic d'absorption vers 620 nm est dû à la phycocyanine, un pigment bleu présent uniquement chez les algues rouges, le pic d'absorption marqué, centré sur 634 nm serait ici dû à la chlorophylle c, pigment présent en abondance chez les algues brunes [12] [13] [14]. La légère figure d'absorption à 585 nm (présente sous forme de pic dans 30 % des mesures) pourrait aussi être dû à la chlorophylle c [14].

<b>Végétaux</b>	<b>Algues</b>	<b>Dressées</b>	
-----------------	---------------	-----------------	--

**GMA - Algues vertes**

Principales espèces rencontrées : *Halimeda spp.*, *Codium sp.*





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **5 mesures** exploitables de macroalgues vertes (4 GLO et 1 GEY). Neuf autres mesures aberrantes ne sont pas présentées (5 GLO, 2 GEY, 1 MAY et 2 RUN) : taux de recouvrement du substrat trop faible (réponse essentiellement du substrat), profondeur de mesure trop importante (>10m, déformation de la courbe avec disparition du pic d'absorption de la chlorophylle a à 670 nm, cf. rapport de synthèse) et mauvaise visée (contribution d'autres cibles dans la signature).

La diversité des espèces rencontrées sur le terrain étant faible, seules des mesures du genre **Halimeda**, rencontré à Glorieuses et Geysier, ont pu être analysées.

Les **magnitudes spectrales** sont très **proches** dans la gamme de longueurs d'ondes étudiée : entre 6 et 8 % de réflectance à 600 nm. Cette faible variabilité peut s'expliquer de deux manières : premièrement par le faible nombre de mesures, dans des environnements similaires et des localisations proches, et deuxièmement par le fait qu'elles ont été réalisées sur le seul genre algal *Halimeda*.

Si les réflectances sont proches en valeur (faible entre 350 et 500 nm, accroissement rapide jusqu'à un maximum et décroissance jusqu'à 675 nm), les profils diffèrent fortement d'une mesure à l'autre, et notamment par la position du maximum de réflectance dans le visible ; résultat étonnant pour ce seul genre algal considéré. En effet, les 5 mesures admettent 5 optimums différents dans le visible : 562 (vert), 585 (jaune), 591 (jaune), 603 (orange) et 604 nm (orange).

Sur toutes les mesures, la forme des courbes est très peu régulière entre 500 et 675 nm, avec une succession d'épaulements et changements de concavité. Même si ce n'est pas leur maximum de réflectance dans le visible, 80 % des mesures présentent un maximum local de réflectance autour de 565 nm (100 % y ont un épaulement).

Hypothèse : Ces caractéristiques particulières (différences d'optimums, formes des courbes de réflectance peu régulières) pourraient s'expliquer par la présence d'autres pigments photosynthétiques modifiant les profils spectraux.

En effet, au fond de l'eau les algues sont souvent recouvertes d'une fine pellicule de particules adhérant plus ou moins fortement à la surface des thalles (sable, débris organiques, etc.). Des microorganismes photosynthétiques, type microphytobenthos, présents dans ces films pourraient modifier la réponse spectrale du substrat sous-jacent (algues) en absorbant une partie du rayonnement lumineux. Dans le cas des algues vertes par exemple cette action pourrait atténuer, masquer ou décaler le maximum de réflectance vers de plus grandes longueurs d'ondes.

La contribution du substrat sous-jacent pourrait aussi affecter de la même manière la réponse spectrale, proportionnellement au taux de recouvrement (cf. fiche *HE* ci-après).

Une seule cible présente un **maximum de réflectance** marqué à **562 nm**, cohérent avec une algue de couleur verte. Cette cible, sans particules visibles à la surface des thalles et qualifiée de « bien propre » sur le terrain, serait la seule **signature pure** d'une algue verte (du genre *Halimeda*).

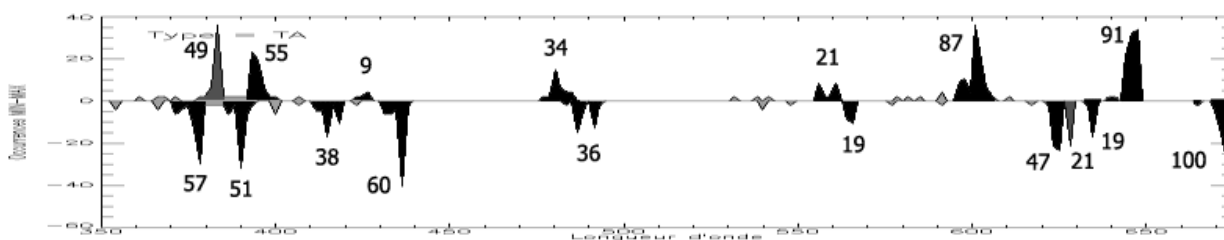
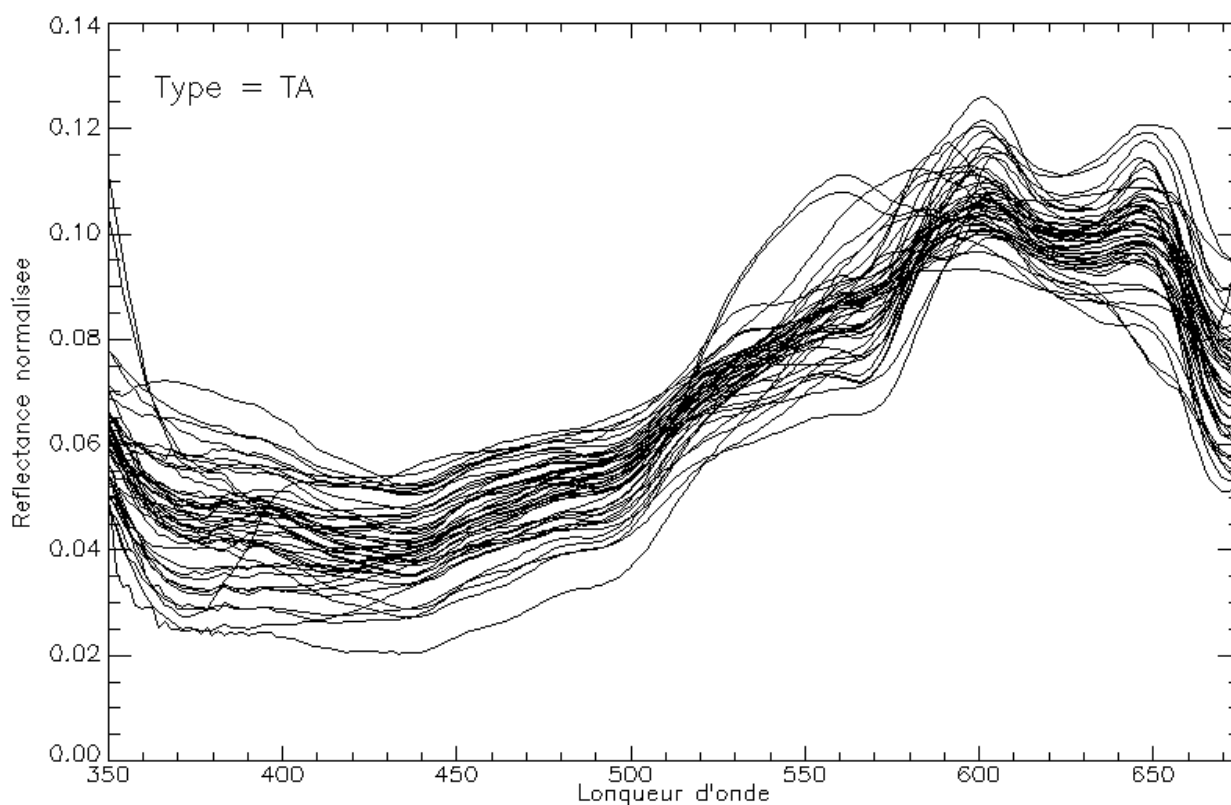
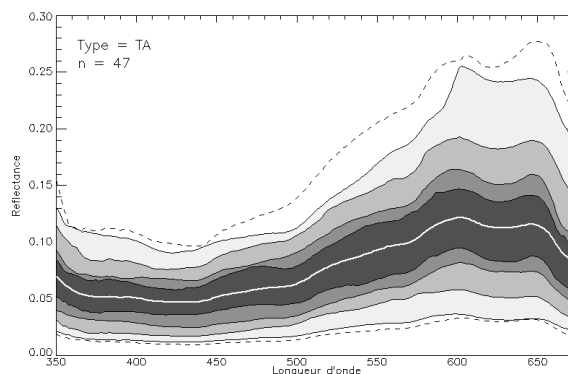
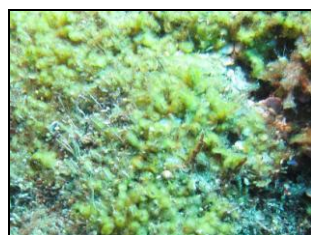
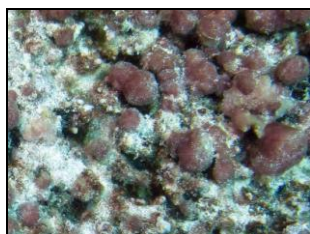
La signature spectrale algue verte pure (avec un pic de réflectance marqué dans le vert) n'a été mesurée que sur une seule cible (20 % des cas).

Dans la majorité des cas, la réflectance de l'algue semble polluée par la contribution d'une autre cible (substrat, microphytobenthos). Le maximum de réflectance se déplace alors vers les longueurs d'ondes rouges.



Végétaux	Algues	Gazonnantes	
----------	--------	-------------	--

**TA – Algues gazonnantes – Assemblage algal – Turf**



Après filtrage, la librairie spectrale comporte **47 mesures** exploitables de turf algal (12 GLO, 4 GEY, 8 MAY et 23 RUN). Ce type est l'un des plus abondamment rencontré sur les récifs mais aussi l'un des plus diversifié.

Le type *TA* est très hétérogène car composé d'un grand nombre d'espèces algales, regroupées par leur structure gazonnante rase recouvrant les substrats durs (roches, débris, coraux morts). Ce type est constitué d'espèces filamenteuses des trois principaux groupes algaux (Algues vertes, rouges et brunes), associées à des cyanobactéries, des diatomées et des débris [15] (photos en haut à gauche). Les gazons algaux sont rarement monospécifiques, souvent constitués d'un assemblage d'espèces [16].

La **variabilité de magnitude** spectrale des *TA* est dans la moyenne des mesures réalisées pour les coraux et les autres types d'algues : entre 3 % et 25 % de réflectance à 600 nm.

Les courbes de réflectance normalisée montrent une forte hétérogénéité au niveau de la signature spectrale, qui s'explique par la grande diversité d'espèces et d'assemblages d'espèces qui constituent ce type.

Cependant de grandes tendances sont communes à toutes les cibles : après une large zone de minimums entre 350 et 500 nm, les courbes sont globalement croissantes jusqu'à atteindre un ou plusieurs pics de réflectance entre 500 et 650 nm. Près de 90 % des mesures présentent un pic vers 600 et 650 nm. Les courbes sont ensuite décroissantes jusqu'à 675 nm (maximum d'absorption de la chlorophylle a).

Les différentes cibles de *TA* peuvent être regroupées en 5 sous-types plus homogènes au niveau spectral, constitués de 2 à 24 signatures. Ils sont présentés sur la Figure 9 ci-dessous.

Parmi ces groupes, trois montrent une très grande similarité de réponse avec les types de macroalgues décrits précédemment : *TA-BMA*, *TA-GMA* et *TA-RMA*, pour les algues brunes, vertes et rouges respectivement. Le sous-type ***TA-RMA*** des algues rouges est **très majoritaire** avec 51 % des mesures, alors que les sous-types ***TA-BMA*** et ***TA-GMA*** ne représentent que moins de **5 %** des mesures chacun.

Le sous-type ***TA-AA*** (assemblage algal), représente près de 30 % de mesures, spectralement il se rapproche des algues rouges, sans présenter de figure d'absorption forte à 565 nm (absence ou masquage de l'absorption par la phycoérythrine). Ce sous-type est certainement constitué d'un assemblage d'algues de plusieurs groupes (rouges, vertes et brunes), formant une composition pigmentaire originale, et donc une signature spectrale différente des 3 signatures des macroalgues pures.

Parmi les sous-types *TA-BMA*, *TA-RMA* et *TA-GMA*, dont les réponses spectrales sont très proches de celles des macroalgues pures, il est probable que de nombreuses cibles soient aussi constituées d'assemblages algaux plurispécifiques, mais dont la réponse globale, intégrant toutes les signatures particulières proportionnellement à leur taux de recouvrement, ne paraisse que du groupe fortement majoritaire. En nombre d'espèces, les Rhodophytes représentent environ 70 % de la diversité des *TA* [15].

Le dernier sous-type ***TA-Divers***, qui représente 11 % des mesures, est un regroupement de diverses signatures spectrales sans unité entre elles. Comme pour les *TA-AA*, la signature globale est une moyenne pondérée des constituants purs, avec une éventuelle

contribution du substrat sous-jacent et de pigments originaux (cyanobactéries, diatomées) non présents dans les macroalgues.

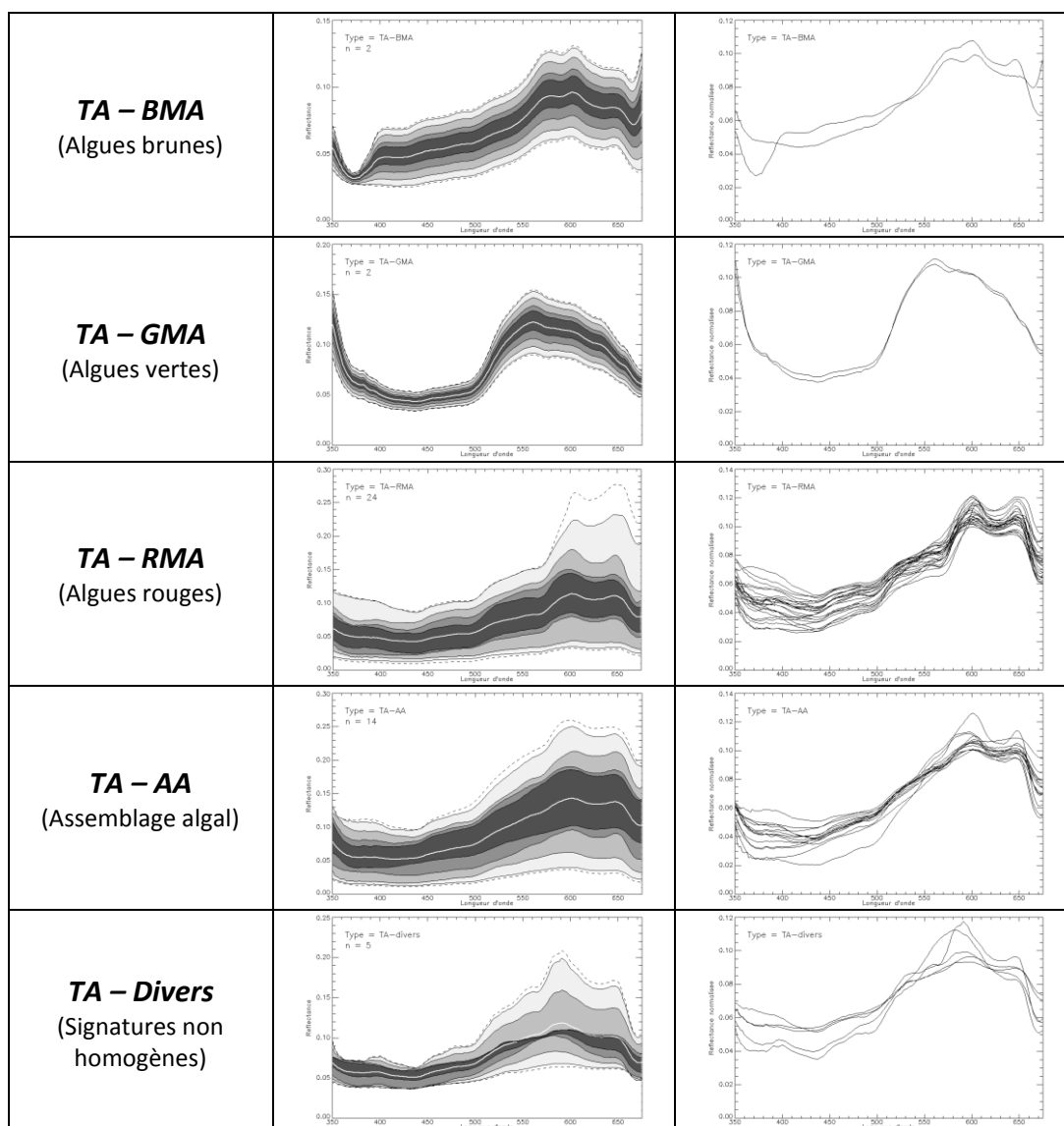


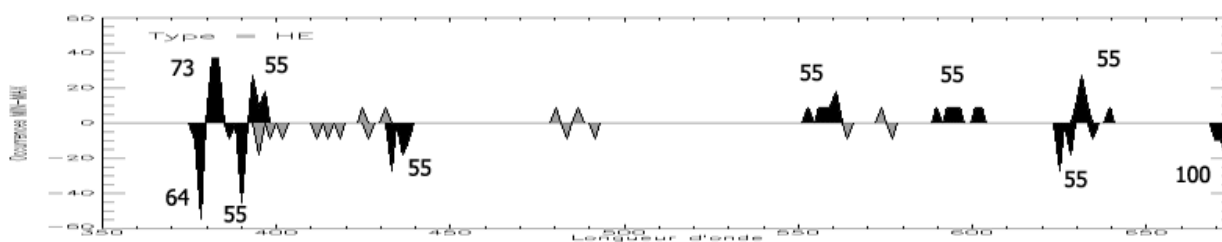
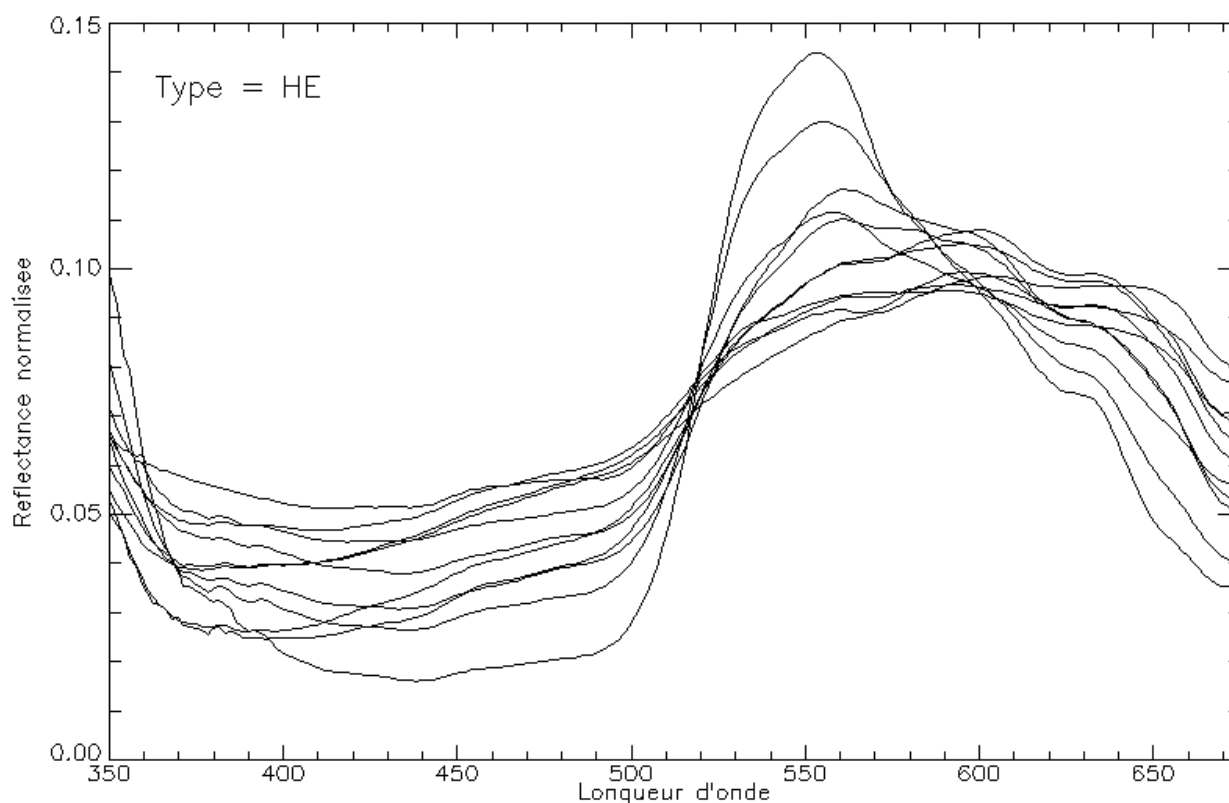
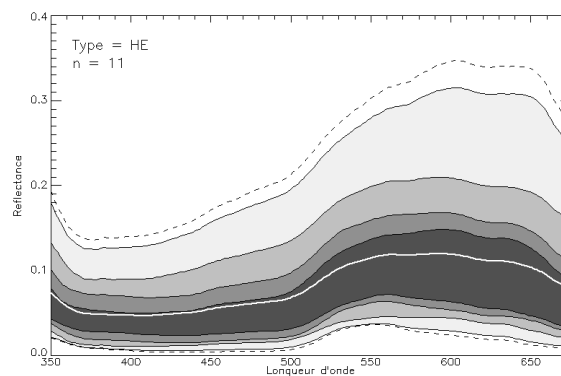
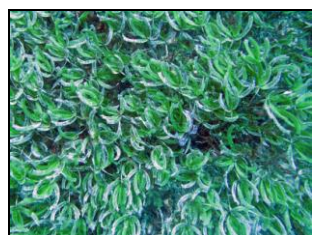
Figure 9. Comparaison des différents types de gazons algaux (TA). Selon l'assemblage d'espèces qui le compose, la signature spectrale se rapproche, de haut en bas, des macroalgues brunes, vertes et rouges. Dans les deux derniers sous-types, en bas, aucun groupe algal ne prédomine dans le mélange algal et la réponse spectrale globale est une moyenne pondérée de chacune des réponses pures, avec une contribution potentielle du substrat sous jacent.



Végétaux	Phanérogames	Marines	
----------	--------------	---------	--

**HE - Herbiers**

Principales espèces rencontrées : *Syringodium isoetifolium*, *Thalassodendron ciliatum*, *Halophila ovalis*, *Thalassia hemprichii*, *Halodula wrightii*





Après filtrage, la librairie spectrale comporte **11 mesures** exploitables d'herbiers (1 GLO, 4 MAY, et 6 RUN). Deux mesures ont été éliminées à Glorieuses en raison de la trop grande profondeur (16 m).

La **variabilité de magnitude** spectrale des *HE* est relativement élevée par rapport à la moyenne des mesures réalisées sur les coraux et les algues : entre 2 % et 35 % de réflectance à 600 nm. Ces fortes variations s'expliquent principalement par l'action d'un facteur supplémentaire : le taux de recouvrement du substrat. En effet, les Phanérogames marines sont souvent constituées par un rhizome sous-terrain rampant auquel sont rattachées des feuilles souvent longues et étroites. Seules les feuilles dressées érectophylles sortent du substrat sableux.

La contribution du substrat dans la réponse spectrale de l'herbier est systématique, dans une proportion inversement proportionnelle au taux de recouvrement par les feuilles. Ainsi, plus le taux de couverture est faible, plus la signature spectrale se rapproche de celle du sable (magnitude élevée, cf. fiche S), plus l'herbier est dense, plus la réflectance se rapproche de celle de l'herbier pur (magnitude faible).

Comme pour les algues vertes :

- on note selon les cibles une mobilité de la position du maximum de réflectance dans une fourchette de 50 nm (entre 553 et 603 nm). Seulement 45 % des cibles ont leur maximum dans le vert (553-561 nm),
- la forme des courbes est très peu régulière entre 550 et 650 nm, avec une succession d'épaulements et changements de concavité. Trois maximums de réflectance locaux sont présents sur plus de la moitié des courbes, à 560, 595 et 630 nm (des épaulements sont visibles sur toutes les courbes à ces longueurs d'ondes).

=> Les mesures réalisées sur les zones d'herbiers sont probablement, comme pour les algues vertes, polluées par la contribution d'une autre cible dans la réponse spectrale.

Les spectres présentant un maximum dans le vert (entre 553 et 561 nm) sont aussi ceux dont les réflectances sont les plus faibles (entre 2 et 7 % de réflectance à 600 nm) : ces cibles peuvent être considérées comme des HE purs. Les autres cibles, polluées par le substrat clair (sableux) sous-jacent ont des valeurs de réflectance beaucoup plus fortes (entre 10 et 35 % de réflectance à 600 nm).

Les herbiers sont rarement des étendues homogènes et monospécifiques. Ils sont souvent colonisés par de nombreux autres plantes et organismes, dont des macroalgues épiphytes et des microalgues [17]. Leur activité photosynthétique peut avoir, comme pour les algues vertes, une influence sur la réflectance mesurée. Cet effet est cumulatif avec celui des variations de taux de recouvrement.

Dans le rapport de synthèse, on a montré qu'une variation de hauteur d'eau entre la mesure de référence et la mesure sur la cible pouvait avoir des effets similaires sur les spectres, renforcés par le caractère érectophylle des herbiers.

La signature spectrale pure du type *HE* (avec un pic de réflectance marqué dans le vert) n'a été observée que dans 45 % des cibles.

Dans plus de la moitié des cas, des facteurs cumulatifs modifient la réflectance mesurée :

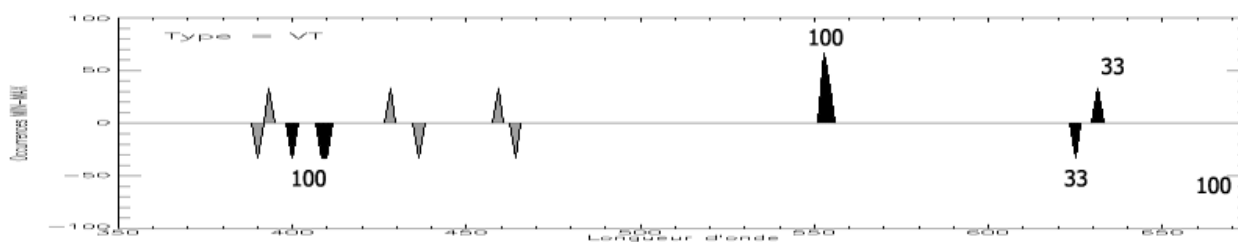
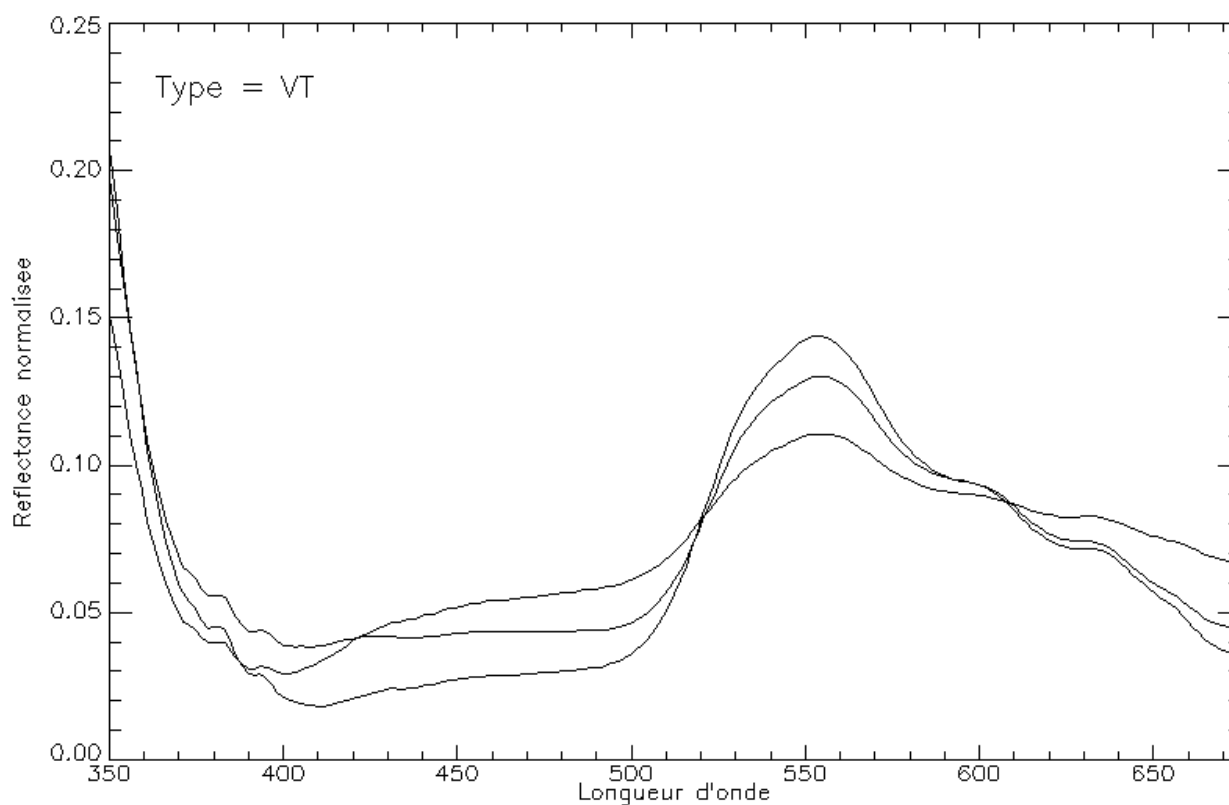
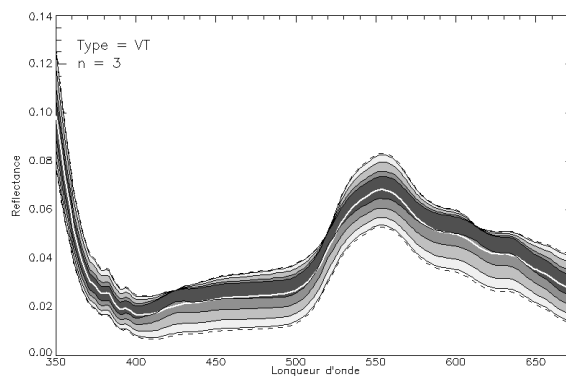
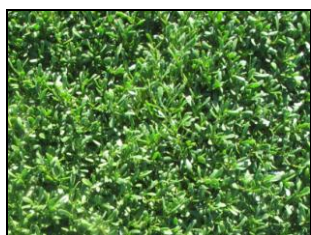
- Pollution par le substrat sableux sous-jacent (proportionnellement à sa densité spatiale).
- Contribution d'autres espèces ayant une activité photosynthétique (algues épiphytes, microalgues).
- variations de hauteur d'eau lors de la mesure (renforcé par le caractère érectophylle).

Le niveau de réflectance moyen s'élève alors, avec un aplatissement de la courbe dans le vert et un déplacement du maximum de réflectance vers les longueurs d'ondes rouges.



<b>Végétaux</b>	<b>Phanérogames</b>	<b>Terrestres</b>	
-----------------	---------------------	-------------------	--

**VT - Végétaux terrestres**



La librairie spectrale comporte **3 mesures** de végétaux terrestres (3 GLO). Ces données ont été acquises principalement pour la validation / calibration des images hyperspectrales aériennes. En raison de la plus grande qualité des données émergées (stabilité de l'éclairement, visée), aucun filtrage n'a été nécessaire.

Si la radiométrie des végétaux terrestres n'est pas directement exploitable pour la cartographie des récifs, elle apporte cependant des compléments sur la réponse spectrale de certains types de nature de fond, et notamment pour les autres végétaux « verts » (algues et phanérogames) possédant les mêmes pigments photosynthétiques (chlorophylles a & b) [18]. En effet, ces données acquises émergées et sur substrat sec, permettent de s'affranchir des effets de certains paramètres difficilement évaluables sous l'eau (*wave focusing*, profondeur, microphytobenthos, etc.) et d'atteindre ainsi la signature spectrale réellement « pure » du végétal.

Les **magnitudes spectrales** sont faibles et très **proches** dans la gamme de longueurs d'ondes étudiée : entre 3 et 6 % de réflectance à 600 nm. Les profils spectraux sont globalement similaires à ceux des deux types *GMA* et *HE* : la réflectance, faible entre 370 et 500 nm, croît rapidement pour atteindre un maximum dans le visible, avant de décroître finalement jusqu'à un minimum vers 675 nm.

Contrairement aux deux autres types végétaux « verts » (*GMA* et *HE*), les profils spectraux des VT sont très proches (voir courbes de réflectance normalisée) et admettent tous leur maximum de réflectance dans le visible à 553 nm.

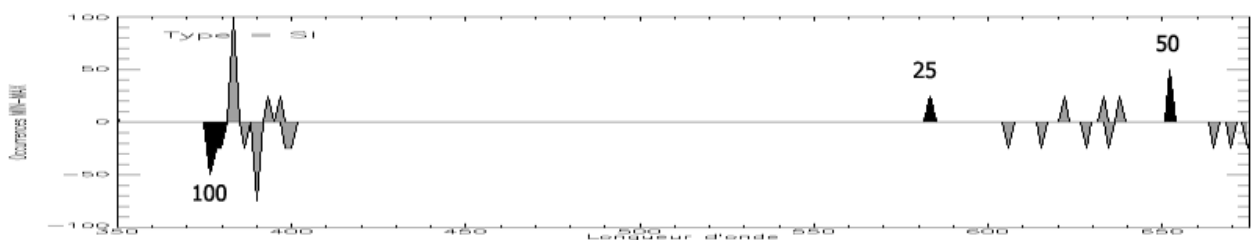
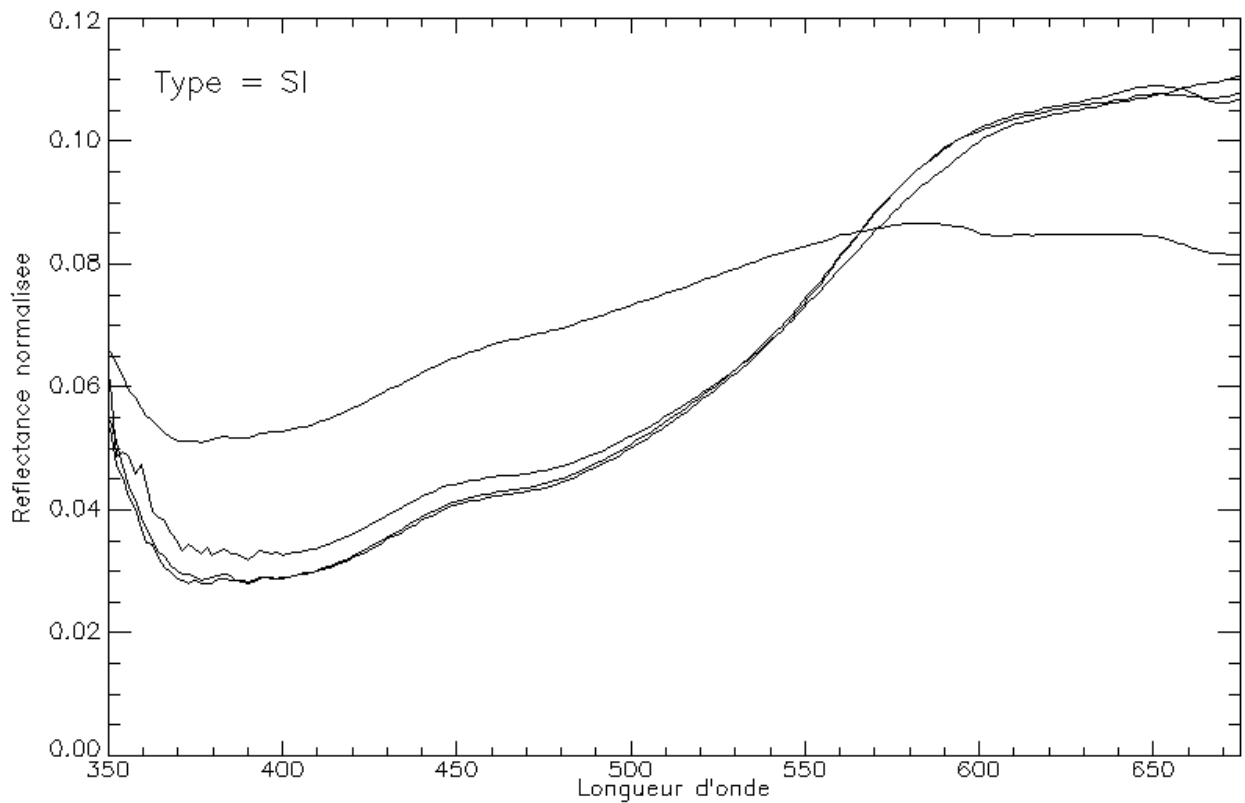
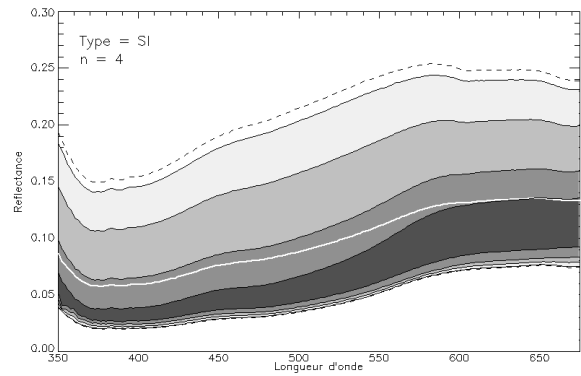
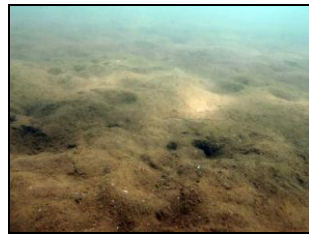
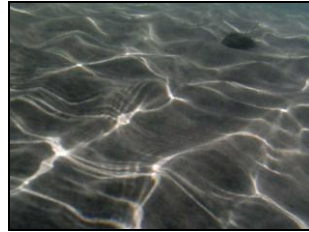
Ces cibles pouvant être considérées comme pures (taux de recouvrement du substrat de 100 %, sans pellicule adhérente en surface des feuilles pouvant modifier la réponse spectrale), et possédant les mêmes pigments photosynthétiques que les *HE* et les *GMA*, leurs réponses spectrales confirment les hypothèses suivantes :

- la signature « pure » d'une algue verte, d'un herbier ou d'un végétal supérieur en bonne santé admet un pic de réflectance marqué dans le vert entre 550 et 560 nm.
- La réflectance des cibles sous marines est très fréquemment perturbée par :
  - Le faible taux de recouvrement du substrat, qui contribue à la réponse spectrale de manière inversement proportionnelle au taux de couverture. Les effets se traduisent par une élévation globale de la réflectance (substrat sous-jacent sableux clair) et une atténuation du pic de réflectance dans le vert qui se déplace vers les longueurs d'ondes rouges.
  - Une fine pellicule photo-active en surface des thalles ou des feuilles, qui atténue le pic de réflectance dans le vert et le déplace vers les longueurs d'ondes rouges.
  - Les variations de hauteur d'eau

<b>Substrats</b>	<b>Meubles</b>		
------------------	----------------	--	--

**SI - Vases**

Principales espèces rencontrées :



La librairie spectrale comporte **4 mesures** de substrats vaseux (3 MAY, 1 RUN).

La **variabilité de magnitude** spectrale des *SI* est dans la moyenne des mesures réalisées sur les organismes vivants : entre 7 et 25 % de réflectance à 600 nm.

Contrairement aux mesures sur cibles vivantes ayant une activité photosynthétique, les spectres vaseux sont très réguliers, sans pics marqués : la réflectance est régulièrement croissante entre 370 et 670 nm. L'origine géographique des mesures est très sensible. La réflectance des trois mesures sur Mayotte, réalisées sur des vases très sombres, est la plus faible (entre 7 et 13 % à 600 nm). Le sable vaseux de la Réunion est beaucoup plus clair, avec une réflectance de 25 % à 600 nm.

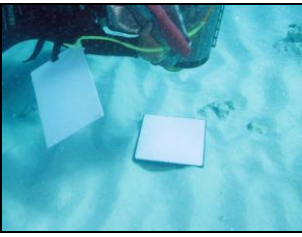

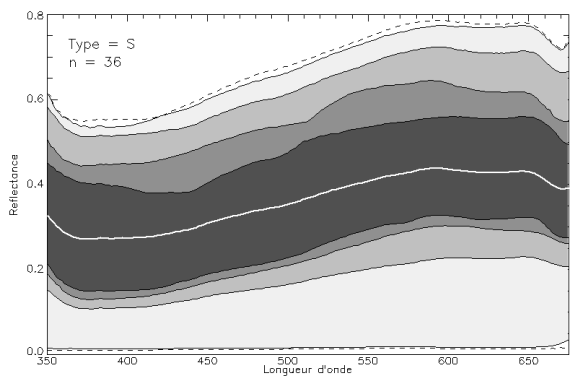

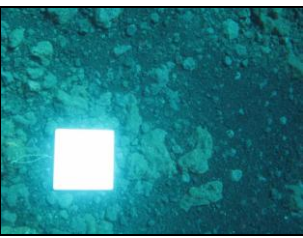
La réflectance normalisée montre, comme pour la magnitude spectrale, une grande homogénéité entre les trois mesures MAY, qui se différencient nettement de la mesure RUN dont la pente de réflectance est beaucoup plus faible.

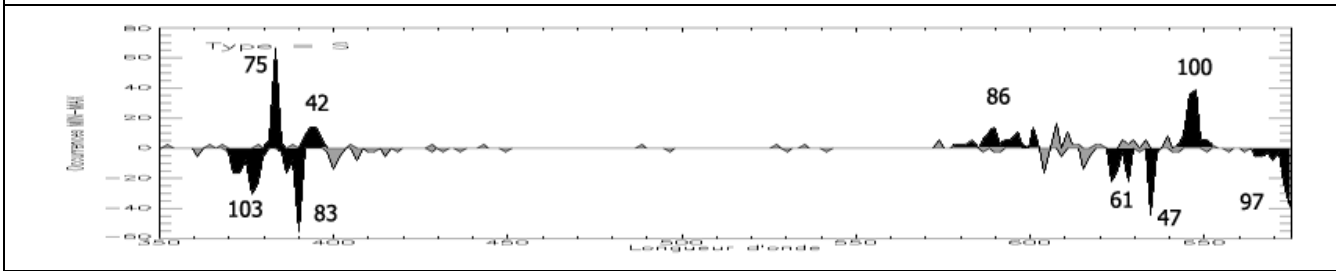
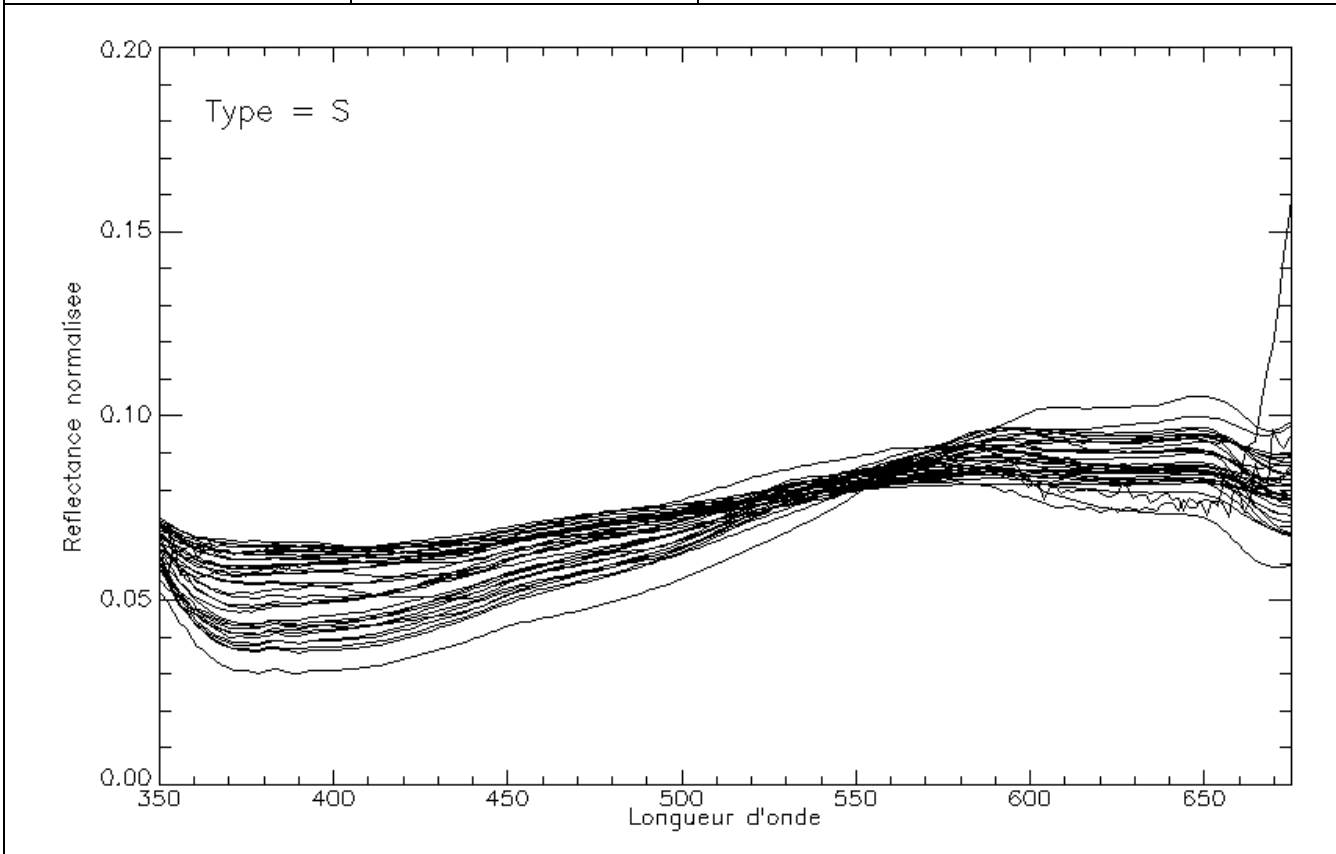
La régularité des courbes entre 500 et 650 nm, ainsi que l'absence (très faible marque) du pic d'absorption de la chlorophylle à 670 nm, laissent penser que les substrats sableux immergés analysés, à Mayotte comme à la Réunion sont très peu colonisés par des microorganismes photosynthétiques.

<b>Substrats</b>	<b>Meubles</b>		
------------------	----------------	--	--

**S - Sables**

Principales espèces rencontrées : *Sable corallien clair, sable volcanique sombre*





La librairie spectrale comporte **36 mesures** de substrats sableux (15 GLO, 2 GEY, 9 MAY et 10 RUN). Le sable est l'un des substrats les plus échantillonnés : présent sur presque tous les sites, il a permis de faire les premières calibrations du spectroradiomètre avant chaque série de mesures.

La **variabilité de magnitude** spectrale des *S* est la plus importante de la base de données : entre 1 et près de 80 % de réflectance à 600 nm. Ces fortes variations d'une localisation à l'autre s'expliquent par les différentes natures de sable analysées : d'un sable calcaire blanc sur Glorieuses à un sable volcanique noir sur les coulées de lave récentes de la Réunion.

La réflectance normalisée montre une grande homogénéité dans les profils spectraux, avec des courbes qui se superposent pratiquement, quel que soit le type de sable (calcaire, volcanique).

Comme les spectres vaseux, les courbes spectrales sableuses sont régulières et légèrement croissantes (+ 10 %) entre 370 et 650 nm. Sur de nombreux spectres, deux légers pics de réflectance sont visibles autour de 590 et 650 nm, avec un pic d'absorption relativement bien marqué à 675 nm. La comparaison avec les courbes de sable présentées en annexe du rapport de synthèse, montre que des spectres sableux émergés (et secs depuis quelques années) ne présentent pas (plus) ces figures d'absorption : une modification des propriétés spectrales du sable s'est opérée avec le temps et la modification de l'état hydrique.

La Figure 10 ci-dessous montre l'évolution de quelques profils spectraux de *S* de Glorieuses en fonction de la quantité d'eau.

- 1. Sable sec de haut de plage, ne montre pas de figure de photosynthèse.
  - 2. Sable mouillé émergé à quelques mètres du précédent, ne présente pas de figures d'absorption.
  - 3. Sable mouillé immergé (purement minéral car préalablement séché durant une période suffisamment longue), ne présente pas non plus de figures d'absorption.
  - 4. Sable mouillé émergé, présentant des figures d'absorption (zone sableuse de bas de plage où le sable reste en permanence humide)
  - 5. Sable immergé classiquement observé dans la librairie spectrale, présentant de « fortes » figures d'absorption entre 575 et 700 nm.
- ⇒ Le sable peut ou non présenter des figures d'absorption entre 575 et 700 nm, sans rapport direct avec l'état hydrique, mais plutôt liées à l'activité photosynthétique de microorganismes intégrés au substrat dont la présence est conditionnée par celle de l'eau de manière permanente.

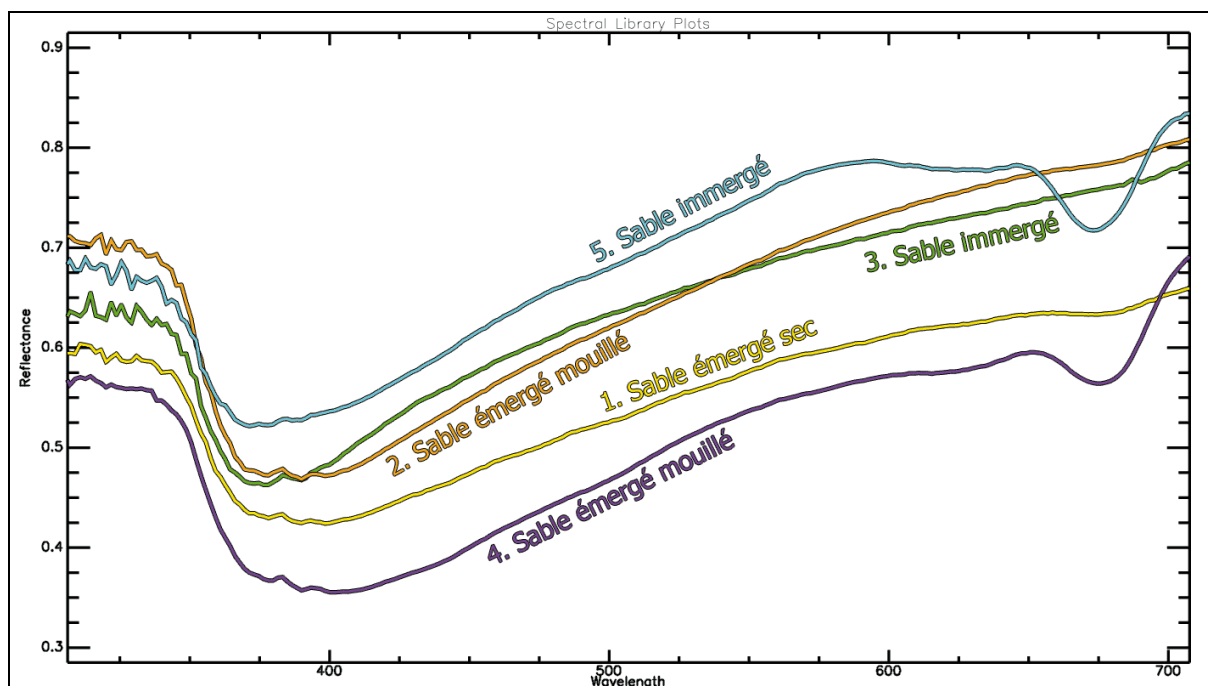




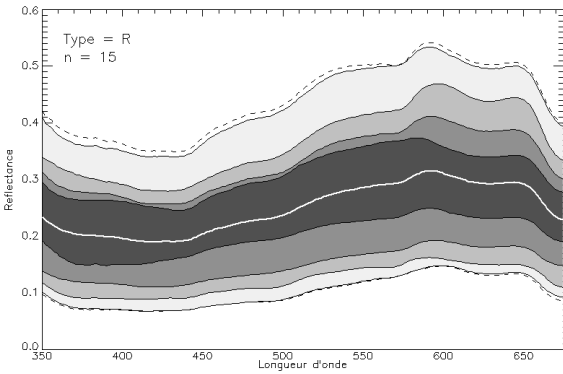

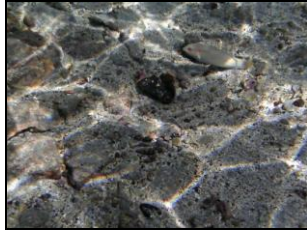
Figure 10. Comparaison des réponses spectrales sableuses en fonction de l'état hydrique.

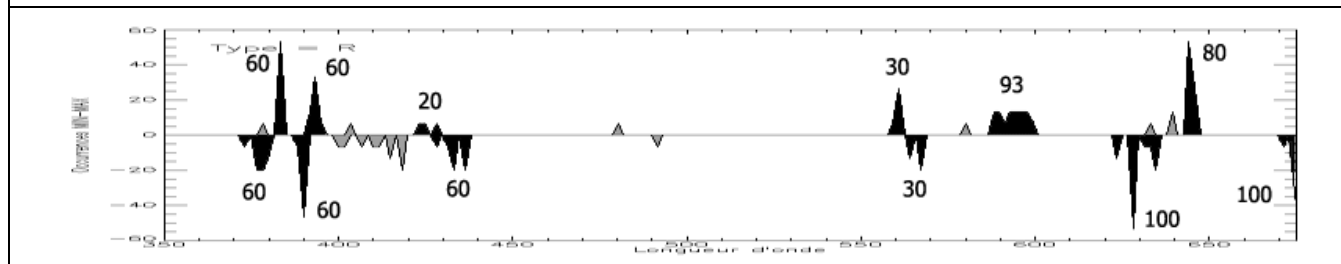
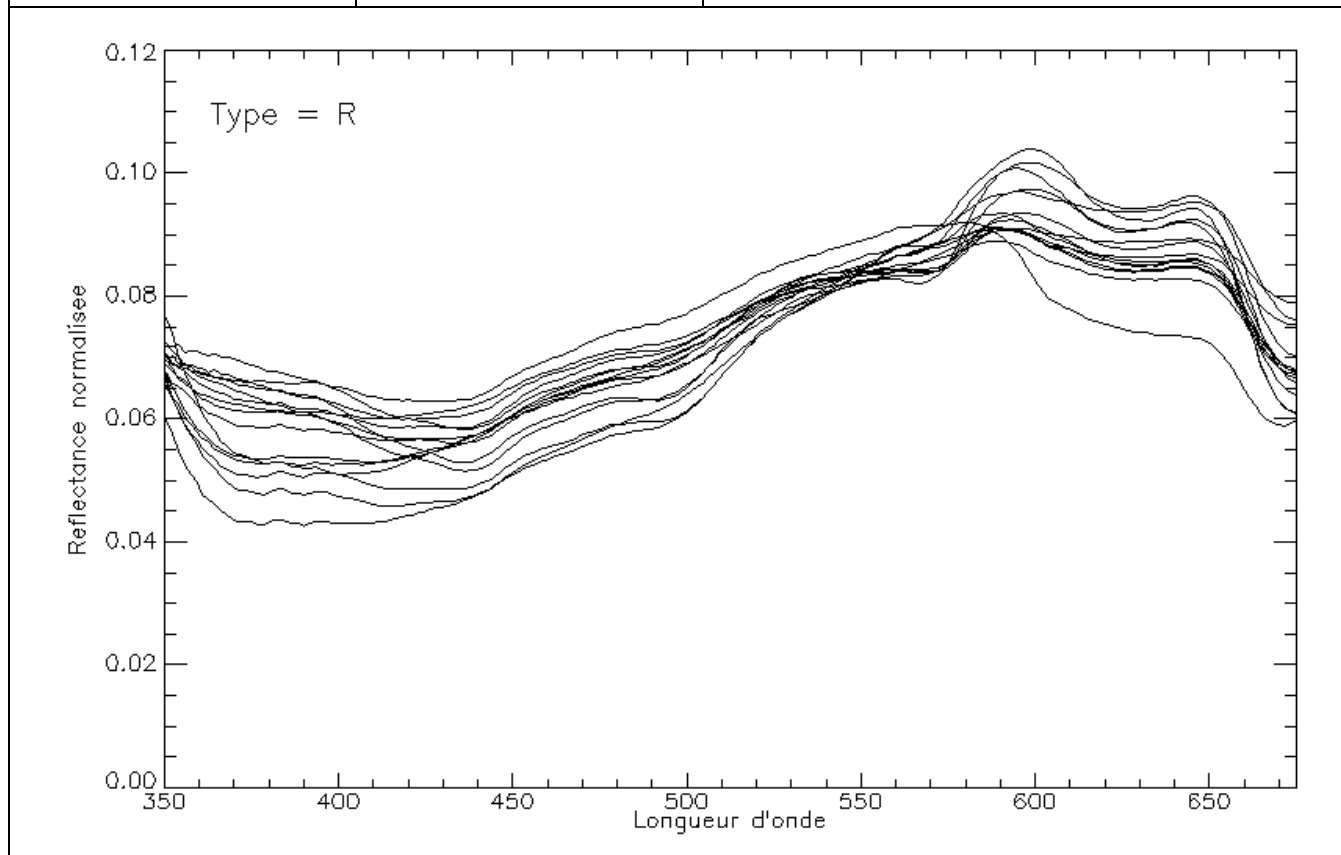
Contrairement au type vaseux précédent, une très grande majorité de spectres sableux immergés sont marqués par de petites figures d'absorption entre 575 et 700 nm, synonymes d'une faible activité photosynthétique (microphytobenthos).



<b>Substrats</b>	<b>Durs</b>		
------------------	-------------	--	--

**R - Débris**



La librairie spectrale comporte **15 mesures** classées dans le type *R - Débris* (7 GLO, 2 GEY et 6 RUN). La définition de ce type de substrat et surtout son identification sur le terrain sont délicates, car les débris coralliens et rocheux sont la plupart du temps colonisés par des algues (calcaires encrustantes, turf algaux, etc.) ou autres organismes vivants pouvant avoir une activité photosynthétique. La signature spectrale enregistrée risque donc d'être fortement influencée par ces derniers. Dans le but de caractériser le plus précisément la signature de ce type de substrat minéral pur, seules les cibles les moins colonisées ont été retenues.

La **variabilité de magnitude** spectrale des *R* est importante (entre 15 et près de 54 % de réflectance à 600 nm) à cause de la grande diversité de cibles rencontrées : d'un mélange de blocs et sable calcaires très clair de Glorieuses (photo du bas à gauche) à un fond détritique de galets basaltiques sombres et très colonisés du lagon de la Réunion (photo du haut à droite).

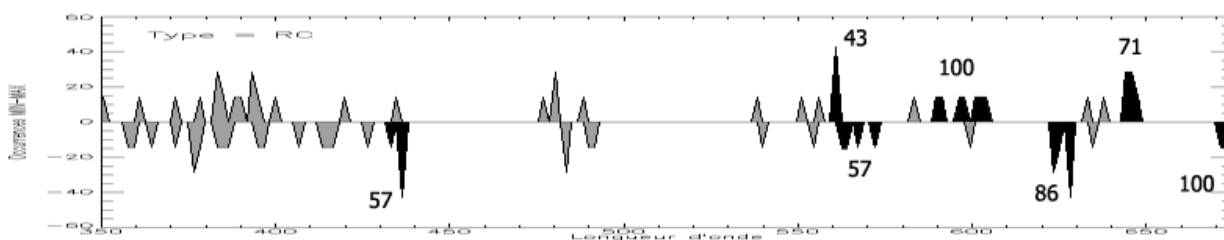
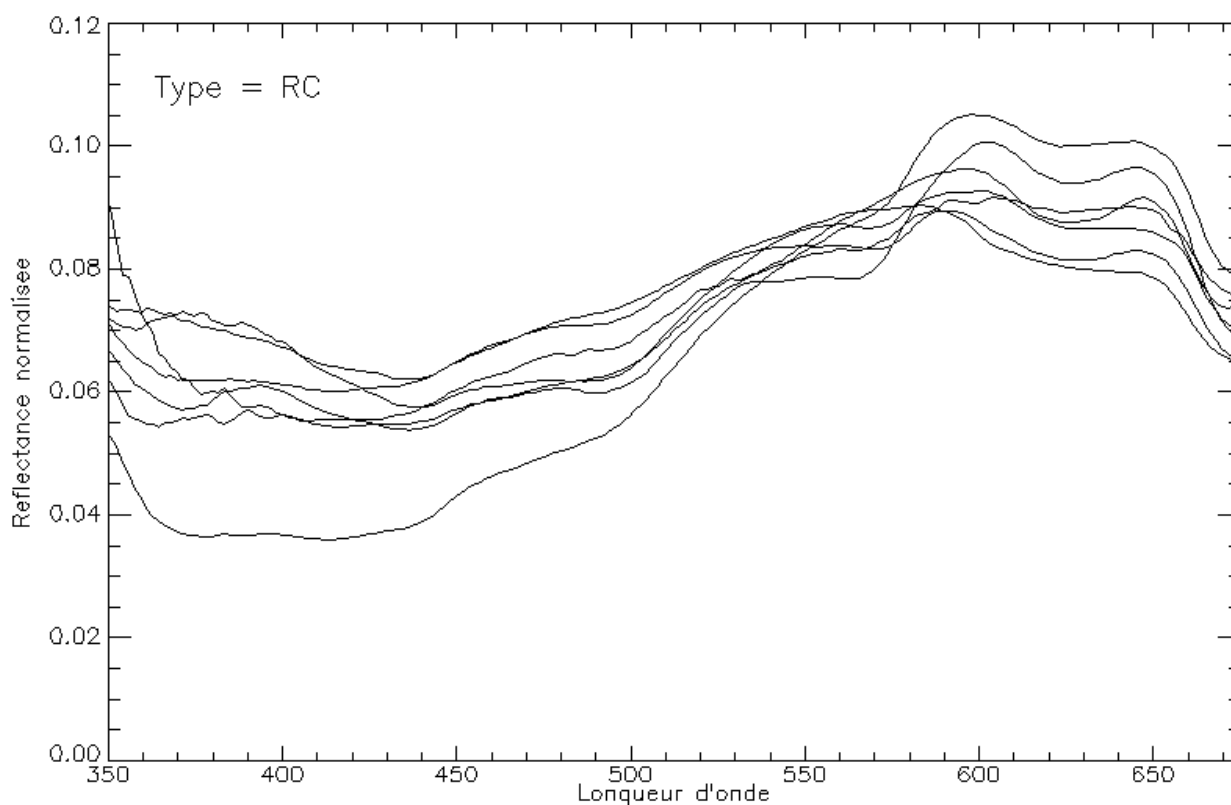
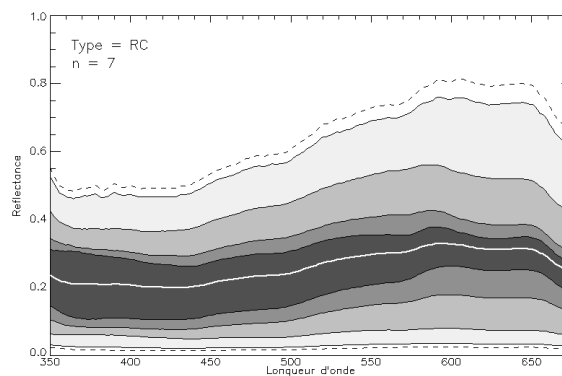
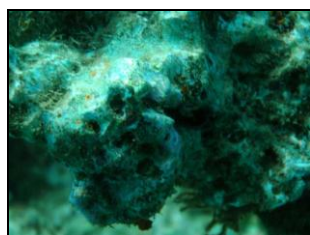
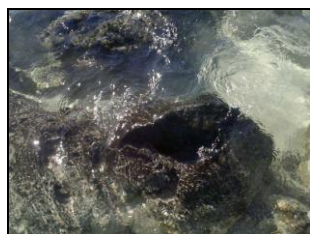
Les courbes de réflectance normalisée montrent une bonne homogénéité des mesures malgré la diversité de nature de cibles échantillonnées : après des valeurs faibles entre 350 et 500 nm (minimum vers 440 nm), la réflectance remonte jusqu'à un maximum autour de 595 nm, puis redescend jusqu'à 675 nm (la réflectance est alors proche du niveau du précédent minimum vers 440 nm) en passant par un épaulement marqué à 645 nm (80 % des cibles admettent un maximum local ici).

La forme moyenne de cette courbe spectrale rappelle celle du type *Sable*, mais avec des figures d'absorption plus marquées à 440, 495, 565, 625 et 675 nm. Ces pics confirment une végétalisation / activité photosynthétique, plus importante sur le type *R*. La similarité avec la courbe des algues rouges est aussi très forte, mais avec des absorptions moins marquées. Les deux légères absorptions à 495 et 565 nm, typiques du pigment rouge phycoérythrine (présent chez la plupart des algues rouges ainsi que les cyanobactéries et certaines cryptophytes), permet notamment de rapprocher ces deux types de nature de fond.

La colonisation du substrat par des organismes photosynthétiques influence fortement la réponse spectrale du type *R*, la rapprochant de celle des algues rouges.

<b>Substrats</b>	<b>Durs</b>		
------------------	-------------	--	--

**RC - Roches**



La librairie spectrale comporte **7 mesures** classées dans le type *RC - Roches* (3 GLO, 2 MAY et 2 RUN). Comme pour le type *R - Débris*, l'acquisition de mesures sur ce type de substrat pur est délicate, car les roches sont la plupart du temps colonisées par des algues (calcaires encroûtantes, turf algaux, etc.) ou autres organismes vivants pouvant avoir une activité photosynthétique. La signature spectrale enregistrée risque donc d'être fortement influencée par ces derniers. Dans le but de caractériser le plus précisément la signature de ce type de substrat minéral pur, seules les cibles les plus propres et les moins colonisées ont été retenues (d'où leur nombre relativement faible).

La **variabilité de magnitude** spectrale des roches est importante (entre 3 et près de 80 % de réflectance à 600 nm) à cause de la grande diversité de cibles rencontrées : d'une roche calcaire très claire de Glorieuses (photo en haut à gauche) à un fond volcanique d'une coulée récente de l'est de la Réunion.

Les courbes de réflectance normalisée, très similaires à celles du type *R* précédent, montrent une bonne homogénéité dans les mesures malgré la diversité de nature de cibles échantillonnées : après des valeurs faibles entre 350 et 500 nm (minimum vers 440 nm), la réflectance remonte jusqu'à un maximum vers 595 nm, puis redescend jusqu'à 675 nm (la réflectance est alors proche du niveau du précédent minimum vers 440 nm) en passant par un épaulement marqué à 645 nm (71 % des cibles admettent un maximum local ici).

Comme pour le type *R*, la forme moyenne des courbes spectrales rappelle celle du type *Sable*, mais avec des figures d'absorption plus marquées à 440, 495, 565, 625 et 675 nm. Ces pics confirment une végétalisation / activité photosynthétique non négligeable, même sur les roches les plus « propres ». La similarité avec la courbe des algues rouges est aussi très forte, mais avec des absorptions moins marquées. Les deux légères absorptions à 495 et 565 nm, typiques du pigment rouge phycoérythrine (présent chez la plupart des algues rouges ainsi que les cyanobactéries et certaines cryptophytes), permet, comme les *Débris*, de rapprocher ce type de nature de fond des *GMA*.

La colonisation du substrat par des organismes photosynthétiques influence fortement la réponse spectrale des roches (*RC*), en la rapprochant de celle des algues rouges (et des *Débris*).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] E.J. Hochberg, M.J. Atkinson, and S. Andrefouet, "Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, 2003, pp. 159-173.
- [2] E.J. Hochberg, M.J. Atkinson, A. Apprill, and S. Andrefouet, "Spectral reflectance of coral," *Coral Reefs*, vol. 23, 2004, pp. 84-95.
- [3] 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.
- [4] A.A. Venn, M.A. Wilson, H.G. Trapido-Rosenthal, B.J. Keely, and A.E. Douglas, "The impact of coral bleaching on the pigment profile of the symbiotic alga, *Symbiodinium*," *Environment*, 2006, pp. 2133-2142.
- [5] B.P. Krueger, S.S. Lampoura, E. Papagiannakis, J.M. Salverda, C.C. Gradinaru, D. Rutkaskas, and R.G. Hiller, "Energy Transfer in the Peridinin Chlorophyll-a Protein of," *Biophysical Journal*, vol. 80, 2001, pp. 2843-2855.
- [6] 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.
- [7] R.K. Trench, "Microalgal - invertebrate symbioses : a review," *Cell*, vol. 175, 1993, pp. 135-175.
- [8] M.S. Hill, "Symbiotic zooxanthellae enhance boring and growth rates of the tropical sponge *Anthosigmella varians forma varians*," *Marine Biology*, vol. 125, 1996, pp. 649-654.
- [9] "Phycoérythrine - Wikipédia."
- [10] F.T. Haxo and L.R. Blinks, "Photosynthetic action spectra of marine algae.," *The Journal of general physiology*, vol. 33, 1950, pp. 389-422.
- [11] "Phycocyanine - Wikipédia."
- [12] R. Aguirre-Gomez, A.R. Weeks, and S.R. Boxall, "The identification of phytoplankton pigments from absorption spectra," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, 2001, pp. 315-338.



- [13] B.M. Smith and A. Melis, "Photosystem Stoichiometry and Excitation Distribution in Chloroplasts from Surface and Minus 20 Meter Blades of *Macrocystis pyrifera*, the Giant Kelp," *Plant Physiology*, vol. 84, 1987, pp. 1325-1330.
- [14] M.W. Fawley, "A New Form of Chlorophyll c Involved in Light-Harvesting," *Plant Physiology*, vol. 91, 1989, pp. 727-732.
- [15] L. Preskitt, "A Subtidal Algal Turf Community," 2002, pp. 2002-2002.
- [16] M.E. Hay, "The functional morphology of turf-forming seaweeds : Persistence in stressful marine habitats," *Ecology*, vol. 62, 1981, pp. 739-750.
- [17] "Seagrass - Wikipedia, the free encyclopedia."
- [18] "Chlorophylle - Wikipédia."