

---

# RAPPORT DE STAGE

---

**Utilisation de l'imagerie hyperspectrale aérienne pour cartographier les fonds marins sur l'île de Porquerolles dans le Var**

Josselin Fatah-Roux  
M2 : Physique et Sciences de l'Ingénieur  
Spé. : Physique et Surveillance de l'Environnement  
Année universitaire : 2017 - 2018

Stage effectué du 05 février au 18 juillet 2018  
au sein du laboratoire LIS à l'Université de Toulon  
Encadrant : Madame Audrey Minghelli

## Remerciements :

Je tiens à remercier tout d'abord ma tutrice de stage, Madame Audrey Minghelli, qui, tout au long du stage m'a conseillée, aidée et accompagnée lors de mes missions.

Je tiens à remercier, Madame Vincente Guis et Monsieur Jérôme Spagnoli, pour leur aide ponctuelle sur le logiciel ENVI et leurs conseils prodigués.

Je tiens à remercier, Madame Di Santi Adoracion, concernant toute la gestion administrative.

J'adresse également mes remerciements aux salariés du laboratoire LIS pour leur accueil chaleureux.

# Table des matières

1 – Introduction .....	4
a) Le laboratoire LIS .....	4
b) Objectif et cadre du stage .....	4
2 – Présentation de l'imagerie hyperspectrale .....	5
a) Principe d'une caméra hyperspectrale .....	5
b) Résolution spatiale .....	6
c) Résolution spectrale .....	6
3 – Zone d'étude et données .....	7
a) Zone d'étude .....	7
b) Images aériennes hyperspectrales HYSPEX .....	9
c) La bathymétrie Litto 3D .....	10
d) Les photos sous-marines pour la vérité de terrain .....	10
e) Stations de mesures in situ (chlorophylle, MES et CDOM) .....	11
4 – Méthodes .....	11
a) Correction des effets spéculaires (réflexion du soleil sur la surface) .....	11
b) L'inversion du modèle de Lee .....	13
c) Méthode de cartographie des fonds par correction de l'atténuation de la colonne d'eau .....	16
d) Validation des cartes de fond .....	18
e) Réduction de la résolution pour diminuer le bruit .....	22
5 - Résultats .....	22
a) Composition de la colonne d'eau .....	22
b) Bathymétrie .....	24
c) Cartographie des fonds .....	25
c.1) Par inversion du modèle de Lee .....	25
c.2) Sur l'image corrigée de l'atténuation de la colonne d'eau .....	26
d) Réduction de la résolution .....	27
e) Comparaison avec les données des années 2000 .....	28
6) Discussion .....	29
7) Conclusion et perspectives .....	30
a) Conclusion .....	30
b) Perspectives .....	30
c) Synthèse personnelle .....	30
Références bibliographiques .....	31
Annexes .....	32
Répertoire des acronymes .....	32
Glossaire .....	32
Tableau des unités .....	32
Programmes .....	32
Table des illustrations .....	71
Table des tableaux .....	71

# 1 – Introduction

## a) Le laboratoire LIS

Le LIS (Laboratoire d’Informatique et Systèmes) est une nouvelle structure issue de la fusion de deux UMR : le Laboratoire d’Informatique Fondamentale de Marseille (LIF) UMR 7279 et le Laboratoire des Sciences de l’Information et des Systèmes (LSIS) UMR 7296. C’est une Unité Mixte de Recherche (UMR) sous tutelles du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) rattachée à l’Institut des sciences de l’information et de leurs interactions (INS2I), de l’Université d’Aix-Marseille (AMU) et de l’Université de Toulon (UTLN). L’Ecole Centrale de Marseille est par ailleurs partenaire du LIS. Ses locaux sont situés sur les campus de Saint-Jérôme et de Luminy à Marseille et sur le campus de l’Université de Toulon. Le LIS fédère plus de 375 membres ; 190 permanents chercheurs et enseignants chercheurs, plus de 125 doctorants, plus de 40 post-doctorants et 20 IT/IATSS.

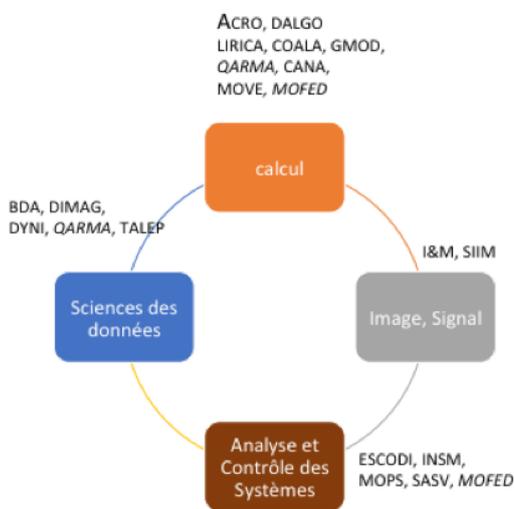


Figure 1 : Les 4 pôles du LIS

Ce laboratoire est structuré en 4 principaux pôles : le pôle calcul, image et signal, sciences des données et analyses et contrôle des systèmes pôle de recherche. Chacun d’eux étant divisé en plusieurs équipes projet de recherche centrée sur les activités fondamentales et appliquées dans les domaines de l’informatique, de l’automatique, du signal et de l’image.

Pour ma part, j’ai réalisé mon travail au sein de l’équipe-projet SIIM (Signal Image). Cette équipe fait partie du Pôle Image.

Site internet : <http://www.lis-lab.fr/>

## b) Objectif et cadre du stage

La télédétection hyperspectrale est de plus en plus utilisée pour cartographier les zones émergées et les fonds marins. Dans la mer la colonne d’eau a pour effet d’atténuer le signal provenant du fond. L’objectif de ce stage est de comparer 2 types de méthodes : une méthode inversant un modèle radiatif et une méthode corrigeant l’atténuation de l’eau. Pour cela, nous utilisons des images hyperspectrales aériennes acquises avec le spectro-imageur HYSPEX au large de la plage de Notre Dame sur l’île de Porquerolles dans le Var en septembre 2017. Des images avaient déjà été acquises en 2000 et une comparaison pourra également être réalisée.

Ce stage s’inscrit dans le cadre du projet ASTRID HYPFOM en partenariat avec le parc national de Port-Cros. ASTRID est un programme financé par la Direction Générale de l’Armement qui a pour vocation de soutenir des projets à caractère fortement exploratoire et innovant comme HYPFOM qui lui montre l’apport de l’hyperspectral pour cartographier les fonds marins. Quant au parc national de Port-Cros, son objectif est de protéger son patrimoine naturel terrestre et marin situé sur son territoire dans cette étude de surveiller la couverture de la posidonie et de la caulerpa taxifolia à Porquerolles.

## 2 – Présentation de l'imagerie hyperspectrale

### a) Principe d'une caméra hyperspectrale

Une caméra hyperspectrale est constituée d'un objectif, d'une fente, d'un collimateur et d'un élément dispersif comme un réseau (ou spectrographe).

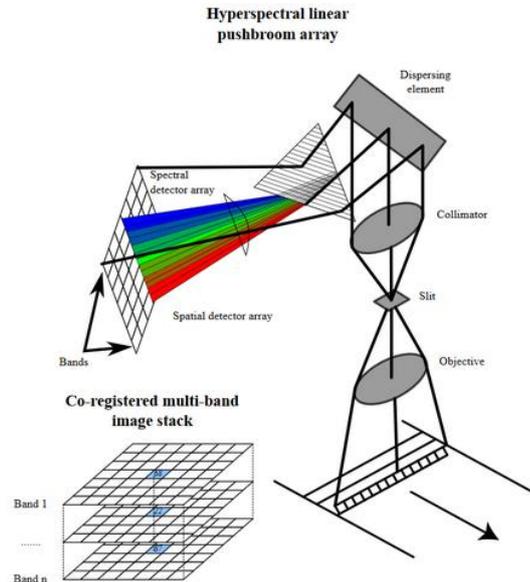


Figure 2 : Caméra hyperspectrale (Source : [wikimedia.org](http://wikimedia.org) (Arbeck))

Lorsque le faisceau lumineux atteint l'objectif celui-ci est convergé sur une fente qui ne laisse passer qu'une seule ligne de l'image. À la sortie les rayons restants sont diffractés sur un collimateur permettant de les rendre parallèles. L'élément dispersif décompose cette lumière arrivant en ces différentes longueurs d'onde qui sont ensuite focalisées sur un réseau de détecteur. La somme de toutes les lignes parcourues amène à une matrice cubique correspondant à une image hyperspectrale.

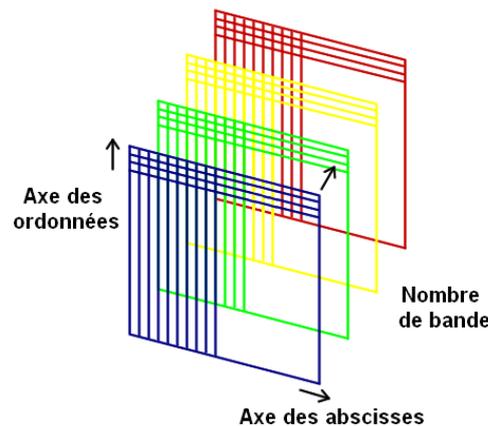


Figure 3 : Image hyperspectrale

Ainsi une image hyperspectrale peut être vue comme plusieurs images accolées les unes aux autres, chacune correspondant à une portion fine du spectre visible-proche-infrarouge. La représentation habituelle est un cube dont les axes des abscisses et des ordonnées représentent l'espace plan et z le nombre de bandes. Plus le nombre de bandes est élevé et meilleure sera la classification des objets car chacun possède une signature spectrale qui lui est propre (c'est à dire n'absorbant pas et donc ne réémettant pas de la même manière la lumière dans les différentes longueurs d'onde).

## b) Résolution spatiale

La taille du pixel représente en largeur et en longueur, la surface d'un détecteur projetée au sol qui correspond à un pixel de l'image. Elle dépend de deux facteurs : la distance entre le capteur et la surface (altitude) et de l'angle solide des détecteurs. L'altitude dépend de la plateforme et est considérée comme étant fixe dans le cas d'une plateforme satellite classique et variable dans le cas d'une plateforme aérienne. L'altitude  $C$  et l'angle solide d'un détecteur (d'angle sommet  $A$ ) permettent de déterminer le pas d'échantillonnage  $B$  de la surface observée pour chaque pixel de l'image :

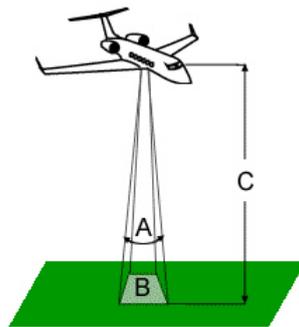


Figure 4 : Grandeurs physiques déterminant la résolution spatiale.

( $A$  : angle sommet correspondant à l'angle solide d'un détecteur,  $B$  : pas d'échantillonnage,  $C$  : altitude du couple capteur/plateforme)

$$B = 2 \cdot C \cdot \tan\left(\frac{A}{2}\right)$$

Équation 1

La solution aérienne à basse altitude est donc préférable lorsqu'on désire une haute résolution spatiale. Une caméra hyperspectrale est embarquée sur un avion et observe perpendiculairement à sa trajectoire tout en balayant un couloir parallèlement à sa vitesse. Toutefois pour des raisons de dimension limite de la matrice de détection, le passage du véhicule sur la zone étudiée nécessite parfois plusieurs lignes de vols. La construction de la mosaïque est alors possible grâce au géoréférencement des images.

## c) Résolution spectrale

La résolution spectrale d'une image de télédétection est, par abus de langage, associée à plusieurs notions. En effet, la résolution spectrale définit à la fois le nombre de bandes spectrales, leur position et leur largeur respectives. La largeur de bande est intimement liée à la résolution spatiale car toutes deux déterminent la quantité d'énergie qui parvient au détecteur. Une résolution spatiale fine associée à des bandes spectrales fines implique donc une quantité d'énergie mesurée faible et donc une sensibilité accrue au bruit (diminution du rapport signal sur bruit) ainsi qu'un pouvoir discriminant de l'information réduit (Sylla, 2014) [1].

On différencie généralement les capteurs possédant un nombre réduit de bandes spectrales, appelés capteurs multispectraux (4-20 bandes environ), et les capteurs possédant un nombre important de bandes spectrales, appelés capteurs hyperspectraux (>50 bandes).

Les capteurs multispectraux utilisent en général un jeu de filtres pour décomposer le rayonnement incident alors que les capteurs hyperspectraux utilisent des réseaux capables de décomposer le spectre de façon quasi-continue (Lillesand et al., 2004) [2].

### 3 – Zone d'étude et données

#### a) Zone d'étude

La zone d'étude est la plage Notre Dame au Nord-Est de l'île de Porquerolles dans le Var où l'on se limitera à une étendue rectangulaire pour une longitude et une latitude comprise respectivement entre [6.22008611 : 6.24107402 ; 43.00988636 : 43.02648056] :



Figure 5 : La plage Notre Dame de Porquerolles (Source : Google Earth)

Cette région comprend plusieurs types de fonds dont :

-la posidonie océanique :



Figure 6 : La posidonie océanique (Source : futura-sciences.com)

La posidonie océanique est une plante aquatique endémique de la Méditerranée, reconnaissable par ces longues feuilles en ruban. Elle forme de vastes prairies, appelée herbiers de posidonie qui peuvent se trouver sur des profondeurs de 1 à 30 m.

Leur présence est primordiale car ceux-ci jouent un rôle capital dans l'écologie. Ils produisent de l'oxygène, absorbent une partie du dioxyde de carbone par le processus de photosynthèse et diminuent l'érosion des côtes en réduisant la puissance des vagues.

-la caulerpa taxifolia :



Figure 7 : La caulerpa taxifolia (Source : [dinosoria.com](http://dinosoria.com))

La caulerpa taxifolia est une algue verte toxique non endémique qui provient des eaux chaudes tropicales. Sa faculté à survivre sur de faibles températures lui a permis de s'implanter en Méditerranée. Bien qu'elle ne puisse pas se déplacer toute seule, l'accès à de nouveaux territoires lui a été rendu possible via l'activité humaine maritime (pêche, bateaux touristiques ...).

Le problème majeur de la caulerpa taxifolia est son expansion sachant qu'elle a un impact très négatif sur l'environnement. En effet étant très envahissante elle provoque un étouffement des autres espèces d'algues, des herbiers et d'invertébrés sessiles. Elle s'attaque particulièrement en mer Méditerranée aux herbiers de posidonies qui sont pourtant un écosystème-pivot en ce lieu [3].

Diverses techniques ont ainsi été mises au point pour limiter la propagation de cette algue. Entre autres la plus connue est l'arrachage manuel. Elle est non seulement fastidieuse avec un rendement moyen estimé à  $1 m^2$  par heure et par plongeur mais en plus le résultat n'est pas certain à cause d'éventuelles fragments isolés. Pour autant aucune solution n'est à ce jour probante pour l'éradiquer totalement.

-les algues photophiles :



Figure 8 : Algue photophile (Source : [inpn.mnhn.fr](http://inpn.mnhn.fr))

Une algue est qualifiée d'algue photophile lorsque celle-ci nécessite un éclairage important. Elle se développe donc essentiellement dans les milieux fortement éclairés et à faible profondeur comme les rochers.

-le sable fin mouillé.

## b) Images aériennes hyperspectrales HYSPEX

Des images aériennes hyperspectrales ont été réalisées avec un capteur HYSPEX qui présente la particularité d'échantillonner sur une largeur de bande de 3.7 nm dans une gamme spectrale de 400 à 1000 nm, soit un total de 160 bandes. Ces caractéristiques principales sont résumées dans le tableau suivant :

Module	Pixel spatiaux	FOV across-track	Gamme spectrale	Echantillonnage spectral	Nombre de bandes spectrales	Dynamique	Vitesse acquisition max.
VNIR-1600	1600	17°	0.4-1 $\mu\text{m}$	3.7 nm	160	12 bit	120 fps*

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur hyperspectral mis en œuvre

Ainsi le 13 septembre 2017, quatre lignes de vol à une hauteur de 1350 m via un aéronef bimoteur non pressurisé de type Partenavia P98 Observer ont été opérées dans un périmètre représenté par le Polygone PQ02 sur la Figure 9. La résolution spatiale et spectrale de ces images est de respectivement 50 cm et 4.5 nm. La surface totale cartographiée est de 2.72  $\text{km}^2$ .

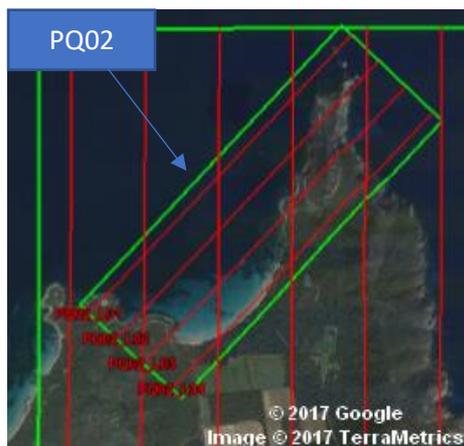


Figure 9 : Polygone (PQ02) lever et lignes de vol accomplies



Figure 10 : Mosaïque

En raison des contraintes météorologiques, les lignes réalisées ne sont pas parfaitement rectilignes. Les images sont donc corrigées géométriquement avec la centrale à inertie située sur l'avion qui enregistre ses mouvements au moment du vol. La mosaïque présentée sur la Figure 10 a été construite grâce au géoréférencement des données qui associe chaque pixel à des coordonnées géographiques.

Le prestataire qui a effectué les acquisitions d'image est l'entreprise HyTECH Imaging. Elle a également réalisé les corrections géométriques ainsi que les corrections atmosphériques.

La correction atmosphérique consiste à gommer les effets d'absorption et de diffusion produits par les gaz et les aérosols dans la colonne d'air. Pour cela des données météorologiques et des épaisseurs optiques en entrée du modèle de correction ATCOR-4 sont utilisées.

### c) La bathymétrie Litto 3D

Litto3D est un partenariat entre le SHOM et l'Institut géographique national dont le projet commun est de fournir une description en trois dimensions du littoral français grâce à la technologie lidar avec une résolution de 1 m. Leurs bases de données sont disponibles gratuitement sur le site : <http://diffusion.shom.fr/>.

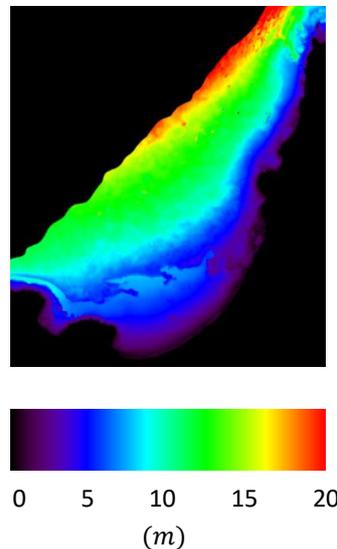


Figure 11 : Bathymétrie Litto3D (2015) pour la zone étudiée

La Figure 11 représente la bathymétrie Litto3D pour la zone étudiée dont les profondeurs varient de 0 à 20 m. Elle nous servira de référence pour la validation de nos cartes bathymétriques produites.

### d) Les photos sous-marines pour la vérité de terrain

En 2016 des images sous-marines avec une résolution de 2 cm au format .tiff ont été acquises par Ifremer sur un transect de 2 km parallèlement à la plage de Notre Dame à l'aide du véhicule opéré à distance (ROV) VORTEX. Les images acquises sont des images classiques RVB. Une classification supervisée multispectrale a été ensuite appliquée avec deux distances - la Distance Euclidienne et l'Angle Spectral Mapper - afin d'obtenir la carte du fond avec 3 classes : la posidonie, la caulerpa taxifolia et le sable.

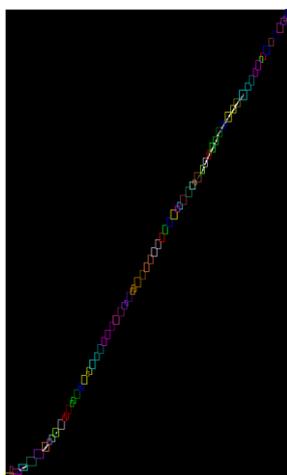


Figure 12 : Mosaïque des images sous-marines

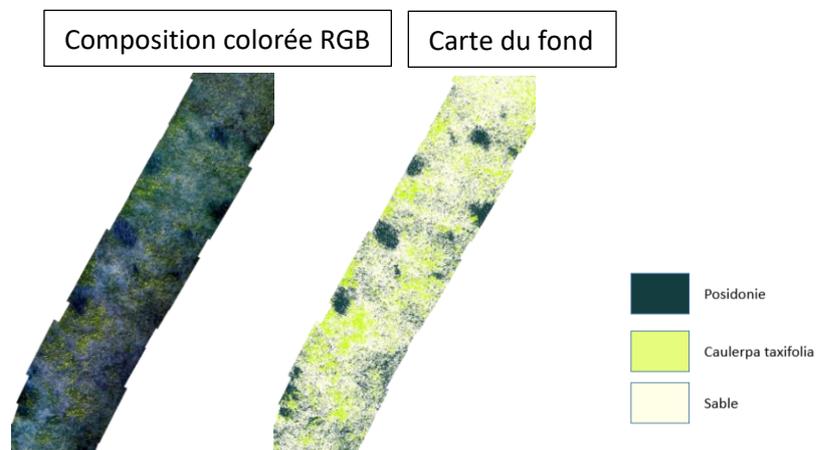


Figure 13 : Extrait de la mosaïque sous-marines (image 24)

### e) Stations de mesures in situ (chlorophylle, MES et CDOM)

Le jour de la campagne, des prélèvements d'échantillons d'eau (MES, CDOM) et des mesures de fluorescence (sonde Chlorophylle a) ont été pratiqués en bateau sur six stations (2 au large et 4 proches de la côte) :

#### Stations de mesures (chl, mes, cdom)

Point 1  
43°00'40" 43.011 43°00.66  
6°13'41" 6.228 6°13.68

Point 2  
43°01'02" 43.017 43°01.03  
6°13'59" 6.233 6°13.98

Point 3  
43°01'22" 43.023 43°01.36  
6°14'12" 6.236 6°14.20

Point 4  
43°01'37" 43.027 43°01.61  
6°14'21" 6.239 6°14.35

Point 5  
43°01'29" 43.025 43°01.48  
6°13'44" 6.229 6°13.73

Point 6  
43°01'04" 43.018 43°01.06  
6°13'26" 6.224 6°13.43

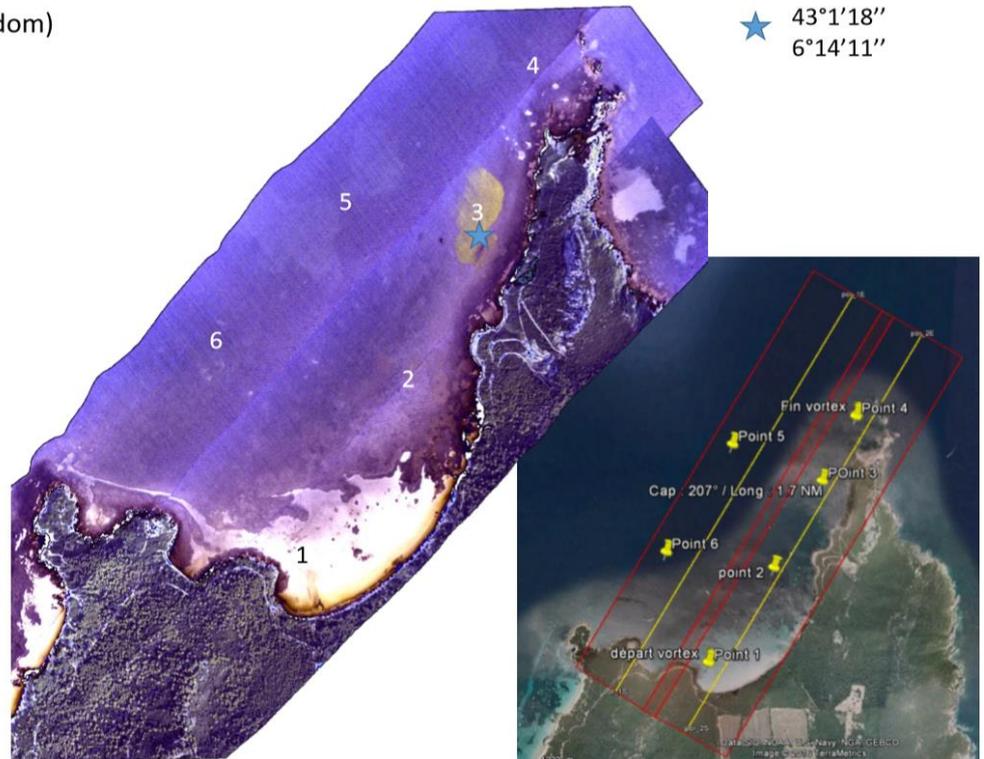


Figure 14 : Stations de mesures in situ

La concentration de matière en suspension (MES) est estimée par le poids obtenu en filtrant puis séchant deux litres d'eau. La concentration en matières organiques dissoutes (CDOM) est quant à elle calculée avec la loi de Beer-Lambert sur des mesures d'absorbance faites à l'aide d'un spectromètre double faisceaux à monochromateurs (UV 1800 Shimadzu) de 220 à 600 nm par pas de 0.2 nm.

Ces données pourront être comparées à celles estimées avec les méthodes aux mêmes points géographiques.

## 4 – Méthodes

### a) Correction des effets spéculaires (réflexion du soleil sur la surface)

Dans certaines conditions d'observation et d'éclairement, la réflexion du soleil sur la surface de la mer peut être gênante pour cartographier les fonds. Lors de la campagne, la mer était agitée en raison d'un vent de force 6 (environ 50 km/h), ce qui a accentué le phénomène. Les images acquises doivent donc être corrigées. Hochberg and al. (2003) [4] ont proposés une méthode de correction qui a été améliorée par Hedley and al. (2004) [5].

La méthode développée par Hochberg and al. (2003) part de deux hypothèses :

- D'une part les eaux même profondes ont un rayonnement très faible dans le proche infrarouge, indépendamment du fond. La réflectance mesurée dans cette gamme ne peut être alors constituée que de la réflexion du soleil.
- D'autre part l'indice de réfraction est quasi constant pour toutes les longueurs d'onde. Il est ainsi possible d'établir une relation linéaire entre la réflectance mesurée dans le proche infrarouge et celle mesurée dans les bandes du visible.

Néanmoins cette technique présente un défaut, celui de n'utiliser que deux pixels : le plus brillant correspondant au maximum du proche infrarouge et le plus sombre correspondant au minimum du proche infrarouge.

Ainsi en absence d'éclairement solaire les deux sont supposées similaires. Cependant le plus sombre n'est pas sans absence de réflexion spéculaire et rien ne prouve également que le choix porté sur ces points soit des plus judicieux. En effet, la présence par exemple d'une bouée peut créer ce qu'on appelle un pixel aberrant d'une très forte blancheur avec une valeur qui n'est pas logique par rapport aux autres. La confiance placée sur un si faible nombre d'échantillons peut donc se révéler erronée.

Hedley and al. (2004) ont donc amélioré cette méthode en calculant une régression linéaire pour ne plus dépendre de pixels particuliers. L'équation est la suivante :

$$R'_i = R_i - b_i(R_{NIR} - Min_{NIR})$$

Équation 2

où  $i$  est le numéro de la bande,  $R'_i$  la réflectance corrigée,  $R_i$  la réflectance initiale,  $b_i$  la pente de la droite,  $R_{NIR}$  la valeur du pixel dans l'infrarouge étudiée et  $Min_{NIR}$  la valeur du pixel le plus sombre dans l'échantillon ou dans l'image.

Illustration :

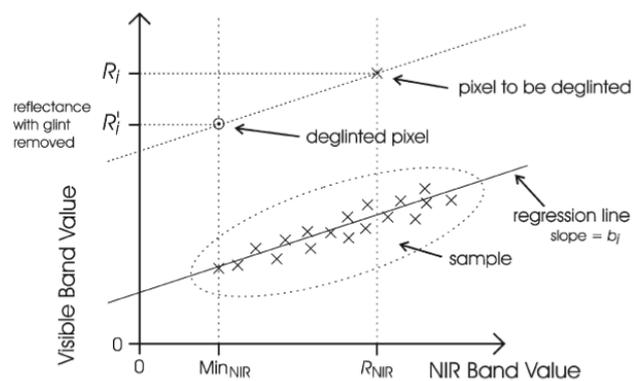


Figure 15 : Régression linéaire entre bande visible et proche infrarouge (Source : Hedley and al. (2004))

Pour calculer cette relation linéaire, il convient de choisir une région d'intérêt où la réflexion spéculaire est importante afin d'obtenir une droite cohérente et éventuellement une meilleure estimation pour la valeur du pixel le plus sombre.

La correction sur l'image hyperspectrale de la plage de Notre Dame est effectuée grâce à l'utilisation du logiciel ENVI Classic + IDL (64-bit) au moyen d'un script écrit par Luke Pinner en 2012. La région d'intérêt est réalisée sur une zone sans moutons, au large, dans les eaux profondes où le fond n'influe pas sur la réflectance de surface dans les bandes visibles.

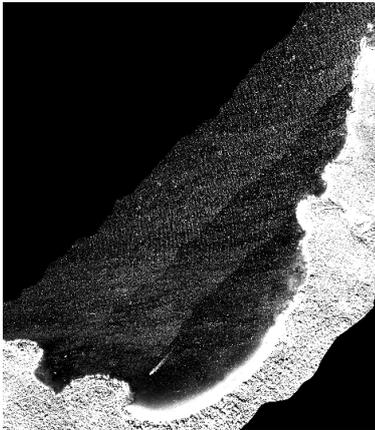


Figure 16 : Bande infrarouge

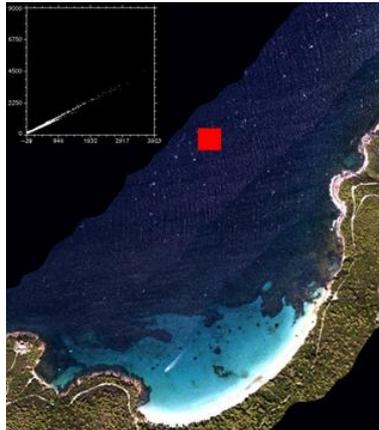


Figure 17 : Zone d'intérêt

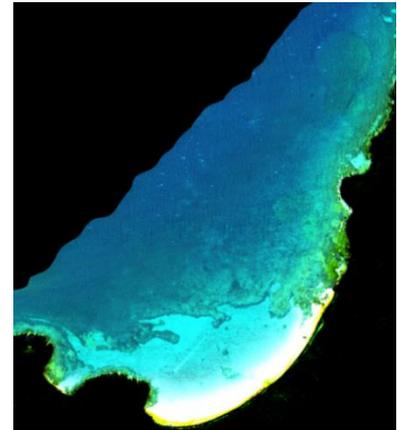


Figure 18 : Correction des effets spéculaires

## b) L'inversion du modèle de Lee

Les océans présentent des couleurs dont les nuances dépendent de plusieurs paramètres. Ces couleurs sont en réalité le résultat du rayonnement qui a pénétré dans l'océan puis interagi avec l'eau de mer, les matières dissoutes et en suspension pour être enfin réfléchi par le fond jusqu'à ressortir à la surface.

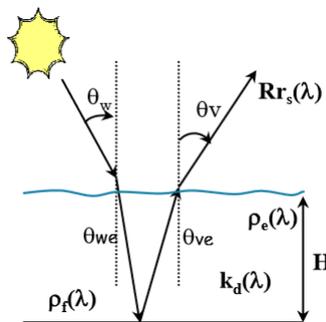


Figure 19 : Paramètres mis en jeu pour le rayonnement réfléchi.

( $\theta_w$  : angle solaire dans l'air,  $\theta_{we}$  : angle solaire dans l'eau,  $\theta_{ve}$  : angle après réflexion du fond,  $\theta_v$  : angle de visée,  $\rho_f$  : réflectance du fond,  $K_d$  : coefficient de l'atténuation diffuse,  $H$  : hauteur de la colonne d'eau,  $\rho_e$  : réflectance de l'eau et  $R_{rs}$  : la réflectance de surface)

Lors de ces interactions, la composition spectrale, et donc la couleur est modifiée. Ainsi, une couleur verte indique des eaux à forte teneur en chlorophylle (celle-ci absorbant le bleu). À l'inverse une couleur bleue indique des eaux à faible teneur en chlorophylle, matières minérales en suspension et matières organiques dissoutes.

Le rapport de l'onde incidente sur l'onde réfléchi, est appelé réflectance de surface. Elle donne la proportion de la lumière transmise, diffusée par la colonne d'eau et réfléchi par le fond. Lee et al. [6] ont cherché à modéliser la réflectance de surface en fonction de la concentration en chlorophylle ( $C_{chl}$ ), de la concentration en particules minérales en suspension ( $C_{NAP}$ ), des matières organiques dissoutes ( $C_{CDOM}$ ), de la profondeur  $z$ , de l'angle solaire  $\theta_w$ , de l'angle de visée  $\theta_v$  et de la réflectance du fond  $\rho_f$ .

Dans ce modèle, les coefficients d'absorption, de rétro-diffusion et d'atténuation diffuse de la colonne d'eau sont déterminés par les équations suivantes :

### **Absorption :**

Le coefficient d'absorption total  $a(\lambda)$  est défini par la somme des absorptions liées à chaque composant (eau, chlorophylle, particules minérales en suspension et matières organiques dissoutes) en fonction de leur concentration :

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{phy}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda)$$

Équation 3

Avec :

- $a_{phy}(\lambda) = C_{chl} \times a_{phy}^*(\lambda)$
- $a_{NAP}(\lambda) = C_{NAP} \times a_{NAP}^*(440) \times e^{-S_{NAP}(\lambda - 440)}$
- $a_{CDOM}(\lambda) = C_{CDOM} \times e^{-S_{CDOM}(\lambda - 440)}$

où  $a_w(\lambda)$ ,  $a_{phy}^*(\lambda)$ ,  $a_{NAP}^*(440)$  représentent respectivement les coefficients spécifiques d'absorption de l'eau pure, du phytoplancton et des particules minérales en suspension (leurs valeurs sont connues, fournies en fichier texte ou dans le tableau des constantes). Les constantes des pentes spectrales  $S_{CDOM}$  et  $S_{NAP}$  sont quant à elles fixées (tableau des constantes).

### **Rétro-diffusion :**

Le coefficient de rétro-diffusion  $b_b(\lambda)$  est défini par la somme des coefficients de rétro-diffusion liés à l'eau pure, la chlorophylle et les particules minérales en fonction de leur concentration :

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)$$

Équation 4

Où :

- $b_{bw}(\lambda)$  représente le coefficient de rétro-diffusion de l'eau pure :

$$b_{bw}(\lambda) = 0.00144 \times \left(\frac{\lambda}{500}\right)^{4.32}$$

- $b_{bp}(\lambda)$  représente le coefficient de rétro-diffusion particulaire :

$$b_{bp}(\lambda) = C_{chl} \times b_{bphy}^*(542) \times \left(\frac{542}{\lambda}\right)^{Y_{phy}} + C_{NAP} \times b_{bNAP}^*(542) \times \left(\frac{542}{\lambda}\right)^{Y_{NAP}}$$

- $b_{bphy}^*$  et  $b_{bNAP}^*$  représentent respectivement les coefficients de rétro-diffusion du phytoplancton et des particules minérales en suspension.  $Y_{phy}$  et  $Y_{NAP}$  sont eux des scalaires définis (tableau des constantes)

### **Atténuation diffuse :**

Le coefficient d'atténuation diffuse  $K(\lambda)$  ascendante et descendante résulte de la somme des coefficients d'absorption et de rétro-diffusion :

$$K(\lambda) = a(\lambda) + b_b(\lambda)$$

Équation 5

**Réflectance de télédétection :**

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad u_p(\lambda) = \frac{b_{bp}(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

$$D_u^C(\lambda) = 1.03(1 + 2.4 \times u(\lambda))^{0.5} \quad D_u^B(\lambda) = 1.04(1 + 2.4 \times u(\lambda))^{0.5}$$

$$g_p(\lambda) = 0.184(1 - 0.602 \times e^{-3.852 \times u_p(\lambda)}) \quad g_w(\lambda) = 0.115$$

$$r_{rs}^{dp}(\lambda) = g_w \left( \frac{b_{bw}(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right) + g_p \left( \frac{b_{bp}(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right)$$

$$r_{rs}C = r_{rs}^{dp}(\lambda) \left( 1 - e^{-\left( \frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^C(\lambda)}{\cos(\theta_v)} \right) K(\lambda)z} \right) \quad (\text{Réflectance due à la colonne d'eau})$$

$$r_{rs}B = \frac{1}{\pi} \rho_f(\lambda) e^{-\left( \frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^B(\lambda)}{\cos(\theta_v)} \right) K(\lambda)z} \quad (\text{Réflectance due au fond})$$

où  $\rho_f = C1 \times \rho_{f1} + C2 \times \rho_{f2} + \dots + CN \times \rho_{fN}$  avec  $C1, C2, \dots, CN$  la proportion des différents fonds dont la somme vaut 1 et  $\rho_{f1}, \rho_{f2}, \dots, \rho_{fN}$  les spectres de réflectance des différents fonds.

$$r_{rs}(\lambda) = r_{rs}C + r_{rs}B$$

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{0.52r_{rs}(\lambda)}{1 - 1.56r_{rs}(\lambda)}$$

Équation 6

Une fois que l'image hyperspectrale a été corrigée des effets de l'atmosphère et de la réflexion spéculaire, la réflectance de surface de chaque pixel peut être utilisée pour minimiser la distance entre ce spectre et le modèle de Lee afin de déduire les propriétés physiques de la colonne d'eau, la proportion des types de fond et la bathymétrie. C'est ce que l'on nomme l'inversion du modèle :

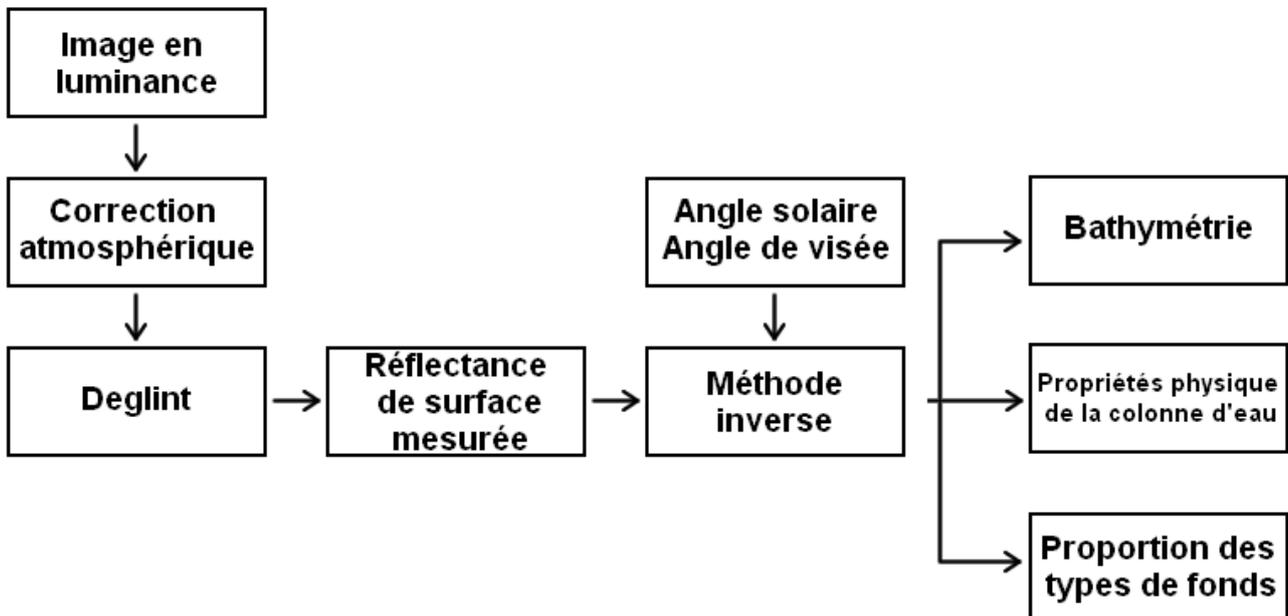


Figure 20 : Inversion du modèle de Lee et traitement global des images

### c) Méthode de cartographie des fonds par correction de l'atténuation de la colonne d'eau

Le modèle de Lee n'est pas la seule technique permettant de cartographier les fonds marins. Une autre méthode consiste à supprimer l'effet d'atténuation de la colonne d'eau pour obtenir la réflectance du fond [7].

Pour corriger ce phénomène non-linéaire, on va inverser le modèle simplifié de Maritorena [8] qui donne la réflectance de surface en fonction de la réflectance du fond :

$$\rho_s(\lambda) = [\rho_b(\lambda) - \rho_w(\lambda)]e^{-2K_d(\lambda)z} + \rho_w(\lambda)$$

Équation 7

où  $\rho_s(\lambda)$ ,  $\rho_b(\lambda)$ ,  $\rho_w(\lambda)$ ,  $K_d(\lambda)$  et  $z$  sont respectivement la réflectance de surface, la réflectance du fond, la réflectance pour des eaux profondes, l'atténuation de la diffusion et la profondeur.

Pour pouvoir inverser cette équation, il va falloir estimer  $\rho_w(\lambda)$ ,  $K_d(\lambda)$  et  $z$  :

En zone très profonde  $\rho_w$  est mesurable puisque la réflexion du fond n'a pas d'influence sur les eaux profondes. Ainsi pour  $z \rightarrow +\infty$  l'exponentielle venant de l'expression précédente tend vers 0 :

$$\rho_s(\lambda) = \rho_w(\lambda)$$

Équation 8

En supposant que l'eau est claire à Porquerolles en raison d'absence d'embouchure de fleuve :  $\rho_w$  et  $K_d$  doivent être considérés constants sur l'image.

L'atténuation est estimée grâce à la mesure de la réflectance à la surface de la mer du sable homogène situés à des profondeurs différentes. Cette réflectance peut être tracée en fonction de la profondeur pour chaque bande spectrale. La courbe alors obtenue décrit une fonction exponentielle décroissante qui devient, en logarithme naturel, une droite dont la pente est égale à l'atténuation dans cette bande [9].

La seule variable inconnue restante est la profondeur qui peut être déterminée via la rotation de deux bandes spectrales (la bleue et la verte) de l'équation 7 [10] :

$$\begin{aligned} X &= \ln(\rho_s(\lambda_1) - \rho_w(\lambda_1)) = \ln(\rho_b(\lambda_1) - \rho_w(\lambda_1)) - 2K_d(\lambda_1)z \\ Y &= \ln(\rho_s(\lambda_2) - \rho_w(\lambda_2)) = \ln(\rho_b(\lambda_2) - \rho_w(\lambda_2)) - 2K_d(\lambda_2)z \\ Y &= \frac{K_d(\lambda_2)}{K_d(\lambda_1)} X + \ln(\rho_b(\lambda_2) - \rho_w(\lambda_2)) - \frac{K_d(\lambda_2)}{K_d(\lambda_1)} \ln(\rho_b(\lambda_1) - \rho_w(\lambda_1)) \end{aligned}$$

Équation 9

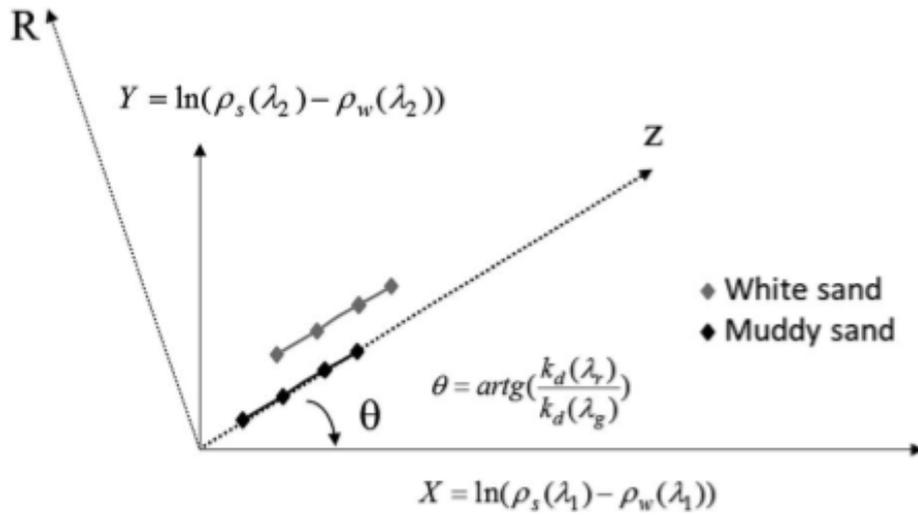


Figure 21 : Rotation spectrale pour l'estimation de la bathymétrie (Source : Audrey Minghelli and Cécile Dupouy)

Les variables étant connues/estimées, la réflectance du fond peut être déduite pour tous les pixels :

$$\rho_b(\lambda) = \frac{\rho_s(\lambda) - \rho_w(\lambda)}{e^{-2K_d(\lambda)z}} + \rho_w(\lambda)$$

Équation 10

La Figure 22 ci-dessous représente l'image corrigée de l'atténuation de la colonne d'eau :

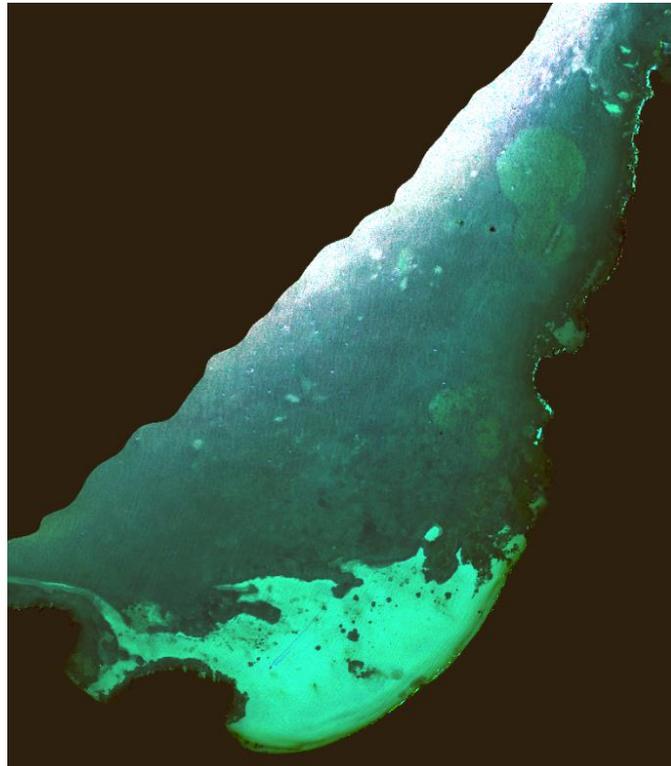


Figure 22 : Image hyperspectrale corrigé de l'atténuation de la colonne d'eau

La cartographie des fonds marins est ensuite réalisée aux moyens de classifications supervisées tels que :

Euclidean Distance (ED) :

$$ED(X, Y) = \sqrt{\frac{\sum_i^n [X(i) - Y(i)]^2}{n}}$$

Équation 11

Spectral Angle Mapper (SAM) :

$$SAM(X, Y) = \sqrt{\frac{\sum_i^n [X(i)Y(i)]}{\sum_i^n X(i)^2 \sum_i^n Y(i)^2}}$$

Équation 12

$i$  : le numéro de la bande spectrale  
 $X$  : le profil spectral du pixel  
 $Y$  : le spectre de la classe

Une autre méthode possible pour cartographier les fonds est la décomposition des pixels mixtes qui consiste à supposer que la réflectance de chaque pixel de l'image corrigée de l'atténuation est une combinaison linéaire de la réflectance de chaque fond présent dans le pixel. L'équation s'écrit :

$$R_{rs}(\lambda) = \alpha_s \times R_{sable}(\lambda) + \alpha_p \times R_{posidonie}(\lambda) + \alpha_t \times R_{taxifolia}(\lambda) + \alpha_a \times R_{algue\_photofile}(\lambda)$$

Équation 13

où  $R_{sable}$ ,  $R_{posidonie}$ ,  $R_{taxifolia}$ ,  $R_{algue\_photofile}$  sont les différents spectres de réflectance du fond et  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_t$ ,  $\alpha_a$  sont les proportions à minimiser.

#### d) Validation des cartes de fond

Pour comparer les cartographies de fonds obtenues avec la vérité de terrain, on a réalisé un échantillonnage tous les 1 m dans les cartes fournies par Ifremer en partant pour chacune du coin inférieur gauche au coin supérieur droit. Les points centraux d'échantillonnage sont créés en appliquant le théorème de Pythagore :

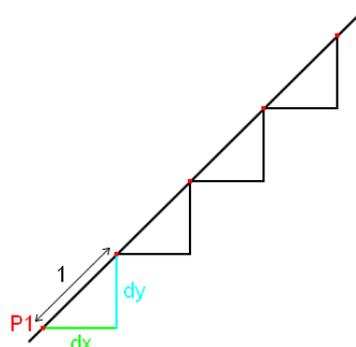


Figure 23 : Points d'échantillonnage centraux

L'équation s'écrit donc :

$$\boxed{dx^2 + dy^2 = 1}$$

Équation 14

La conversion en mètre nous amène à :

$$(dx \times \text{résolution}_x)^2 + (dy \times \text{résolution}_y)^2 = 1$$

Or la pente de la droite est égale à :

$$\text{pente} = \frac{dy}{dx} \Leftrightarrow dy = \text{pente} \times dx$$

D'où :

$$(dx \times \text{résolution}_x)^2 + (\text{pente} \times dx \times \text{résolution}_y)^2 = 1$$

La pente est calculée grâce au nombre de ligne et de colonne :

$$\text{pente} = \frac{\text{nombre de ligne}}{\text{nombre de colonne}}$$

Ainsi :

$$(dx \times \text{résolution}_x)^2 + \left(\frac{\text{nombre de ligne}}{\text{nombre de colonne}} \times dx \times \text{résolution}_y\right)^2 = 1$$

$dx$  peut-être déterminé pour en déduire par la suite  $dy$  :

$$\boxed{dx = \sqrt{\frac{1}{\text{résolution}_x^2 + \text{pente}^2 \times \text{résolution}_y^2}}}$$

Équation 15

Chaque point central d'échantillonnage s'exprime alors par les formules suivantes :

$$\boxed{\begin{aligned} P_x(n) &= x(n) + dx \\ P_y(n) &= y(n) + dy = y(n) + \text{pente} \times dx \end{aligned}}$$

Équation 16

La résolution entre les images sous-marines et l'image hyperspectrale n'étant pas la même, la délimitation du domaine d'échantillonnage autour du point s'effectue via la création d'un nouveau  $dx$  et  $dy$ , nommé respectivement  $deltax$  et  $deltay$ , qui sont le ratio des deux résolutions :

$$deltax = \frac{0.5}{résolution_x}$$

$$deltay = \frac{0.5}{résolution_y}$$

Équation 17

Cependant pour éviter les débordements, il est nécessaire d'appliquer une condition initiale et une condition aux limites :

Condition initiale :

$$x = deltax$$

$$y = \text{nombre de ligne} - deltay - 1$$

Équation 18

Condition aux limites :

$$x < \text{nombre de colonne} - deltax$$

$$y > deltay$$

Équation 19

L'initialisation entraîne un léger décalage des points sur une autre droite parallèle à l'originale sans que cela soit particulièrement gênant.

Les cartes étant converties en niveaux de gris (échelle d'un octet qui est égale à 8bits soit  $2^8 - 1 = 255$  valeurs), la composition des pixels échantillonnés se déduit grâce aux valeurs 255, 27 et 203 qui correspondent respectivement au sable, à la posidonie et à la caulerpa taxifolia. La proportion des fonds pour chaque carré d'échantillonnage est calculée grâce au nombre de pixel du type de fond sur le nombre de pixel total contenu dans ce domaine. Les données sont ensuite classées par leur position géographique afin d'obtenir le profil recherché.

La méthode est résumée en image sur la Figure 24 disponible à la page suivante.

Le même profil est effectué sur les résultats du modèle de Lee et de la correction de l'atténuation de la colonne d'eau avec le logiciel ENVI.

Illustration :

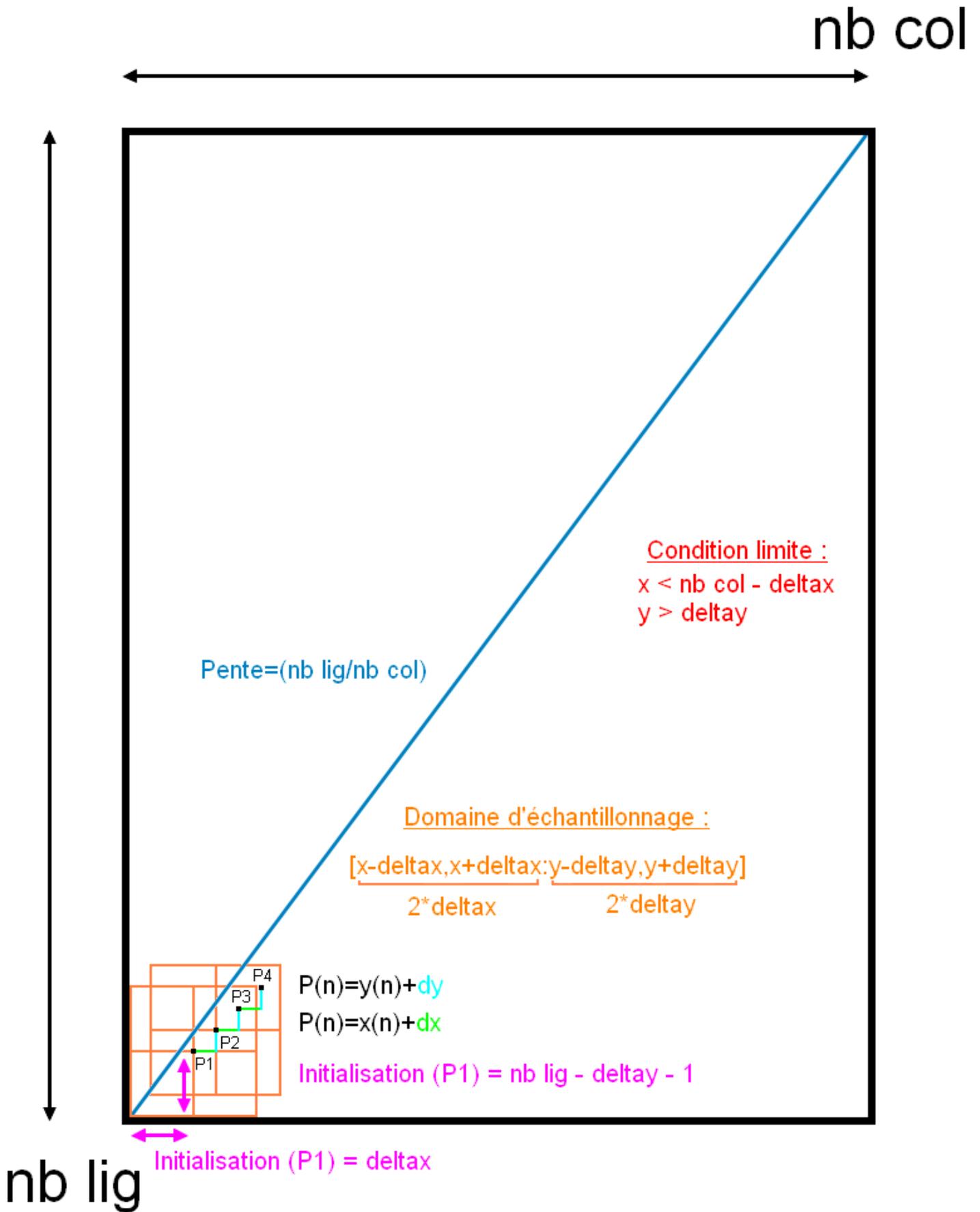


Figure 24 : Résumé de la méthode d'échantillonnage des images sous-marines

### e) Réduction de la résolution pour diminuer le bruit

Certaines études [11], [12] ont montré que réduire la résolution de l'image hyperspectrale conduisait également à une diminution du bruit. Dans ce stage le redimensionnement est réalisé à l'aide de la technique « Pixel Aggregate » qui consiste à faire la moyenne de toutes les valeurs de pixels qui contribuent au pixel de sortie.

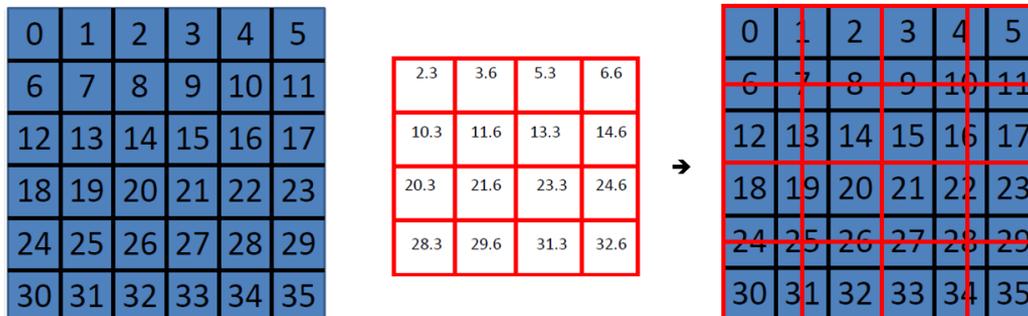


Figure 25 : Schématisation de la méthode Pixel Aggregate avec à gauche l'image à redimensionner, au centre la taille recherchée et à droite la superposition des deux (Source : harrisgeospatial.com)

Sur l'exemple ci-dessus le carré à gauche est composé de  $6 \times 6$  pixels. On souhaite qu'il soit rééchantillonné à la taille  $4 \times 4$  pixels. Le ratio est donc de  $6/4$  soit 1.5. La valeur de chaque pixel de sortie sera alors :

Pixel 0,0 :  $(0 + 0.5 \times 1 + 0.5 \times 6 + 0.25 \times 7)/(1.5^2) = 2.3$

Pixel 1,0 :  $(0.5 \times 1 + 2 + 0.25 \times 7 + 0.5 \times 8)/(1.5^2) = 3.6$

Pixel 2,0 :  $(3 + 0.5 \times 4 + 0.5 \times 9 + 0.25 \times 10)/(1.5^2) = 5.3$

etc.

## 5 - Résultats

### a) Composition de la colonne d'eau

La Figure 26 présente la composition de la colonne d'eau estimées en minimisant la distance euclidienne entre le spectre mesuré et le spectre modélisé par le modèle de Lee pour une erreur inférieure à  $10^{-12}$  :

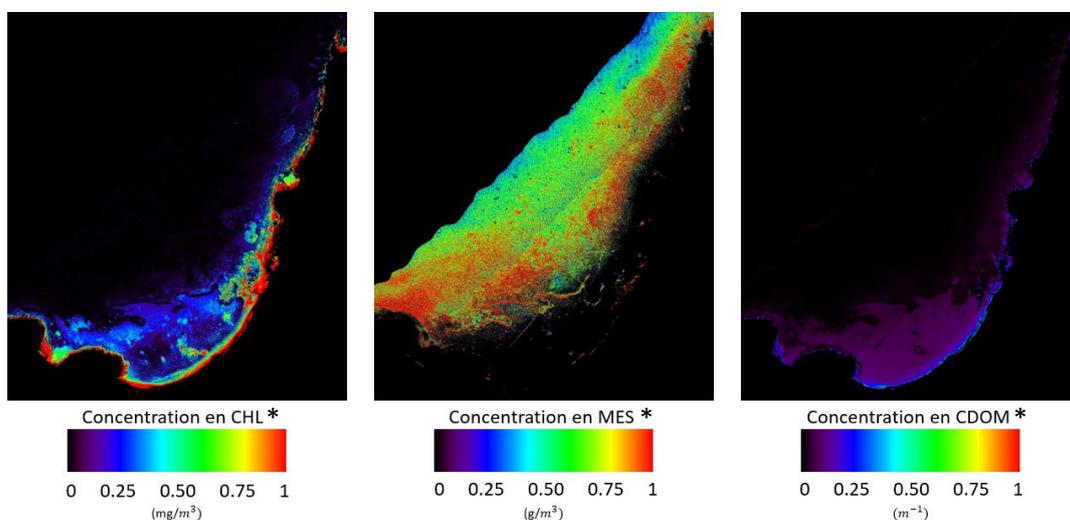


Figure 26 : Composition de la colonne d'eau estimées par l'inversion du modèle de Lee (CHL : chlorophylle, MES : matières minérales en suspension, CDOM : matières organiques dissoutes colorées)

On observe sur le littoral une concentration assez élevée en chlorophylle variant de 0.25 à 1  $mg/m^3$ . Quant aux matières organiques dissoutes on les observe en très faible quantité au même endroit que la chlorophylle. Cela s'explique par le fait qu'ils sont issus en grande partie de la dégradation du phytoplancton. Enfin les matières minérales en suspension se situent au large avec une concentration moyenne de 0.75  $g/m^3$ .

Pour vérifier la validité de ces résultats on compare les relevés des six stations effectués le jour de la campagne avec les données estimées pour les mêmes points :

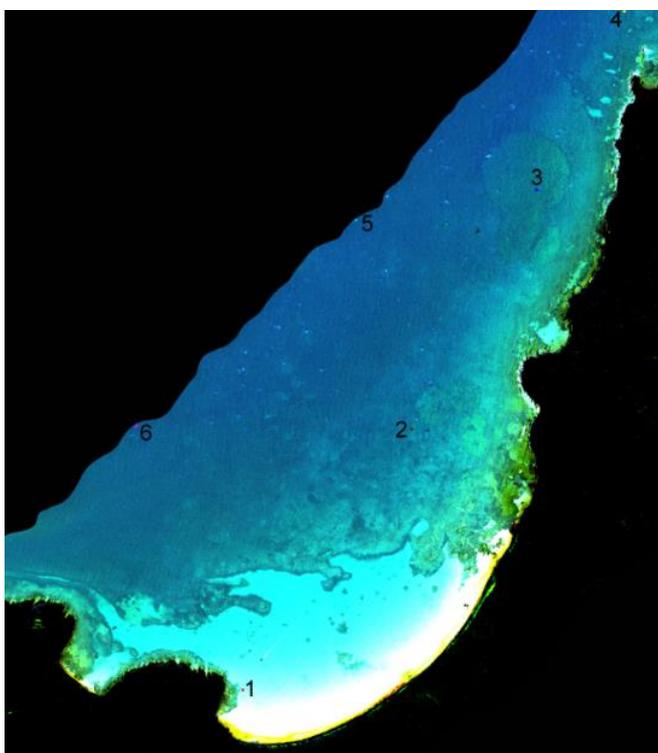


Figure 27 : Points de comparaison. Pour chaque repère un ensemble de pixels voisins est sélectionné et une moyenne effectuée. Cette technique vise à réduire l'impact de pixels sous-estimés ou surestimés.

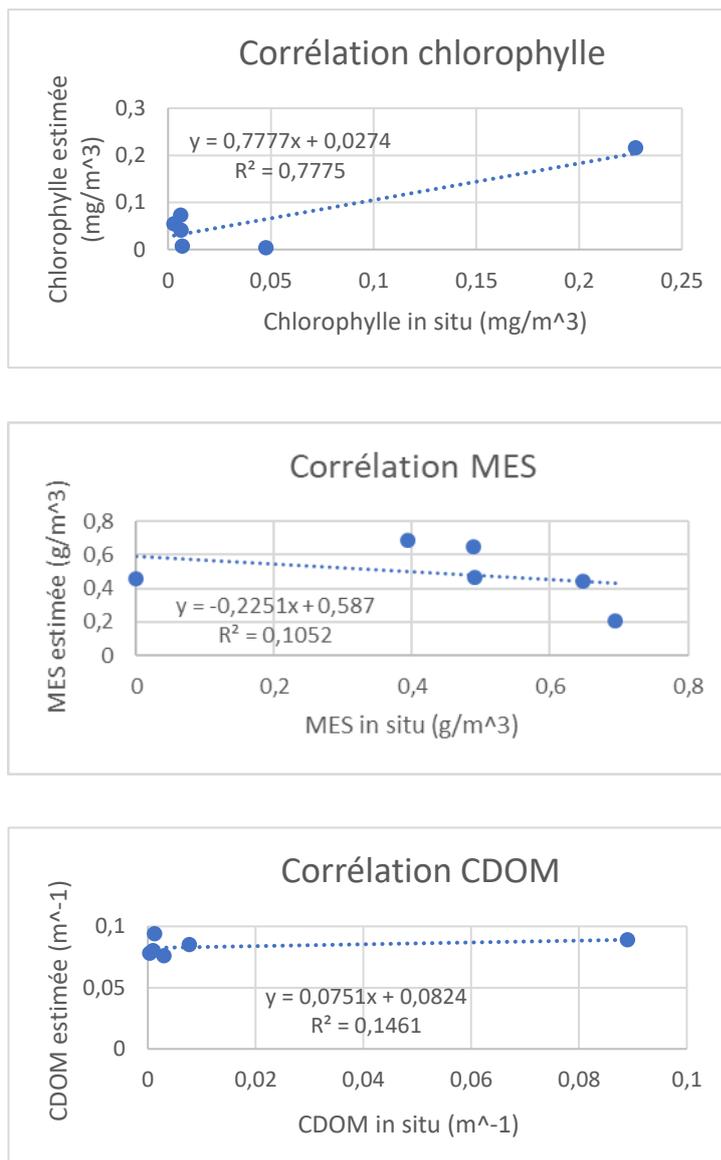


Figure 28 : Corrélation entre mesures in situ et estimées pour la composition de la colonne d'eau

Dans le cas de la chlorophylle, on constate une assez bonne corrélation avec un coefficient de détermination de 0.7775. En revanche les points pour les matières minérales en suspension et les matières organiques dissoutes forment des nuages plus dispersifs. Les valeurs estimées restent toutefois assez proches des valeurs mesurées.

## b) Bathymétrie

La Figure 29 présente à gauche la bathymétrie résultant de l'inversion du modèle de Lee, au centre la bathymétrie obtenue par la rotation de deux bandes spectrales et à droite la bathymétrie Litto3D :

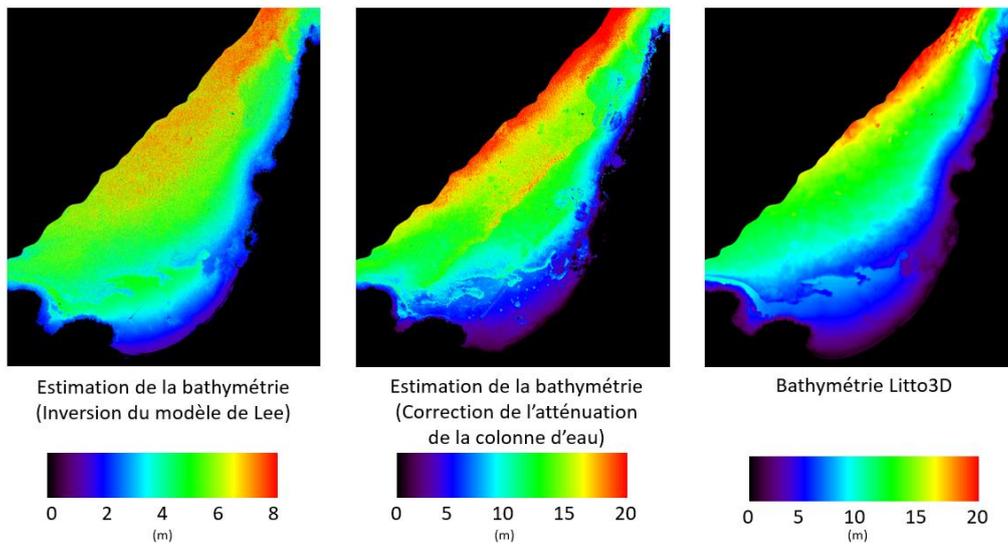


Figure 29 : Comparaison entre bathymétries estimées et bathymétrie Litto3D

La comparaison visuelle montre une forte ressemblance dans les trois cartes près des côtes ainsi qu'au niveau de la démarcation eaux profondes et eaux côtières. Néanmoins, l'inversion du modèle de Lee tend à sous-estimer les profondeurs au large. Pour mieux visualiser ces différences, un histogramme bidimensionnel est tracé entre les images estimées et l'image Litto3D :

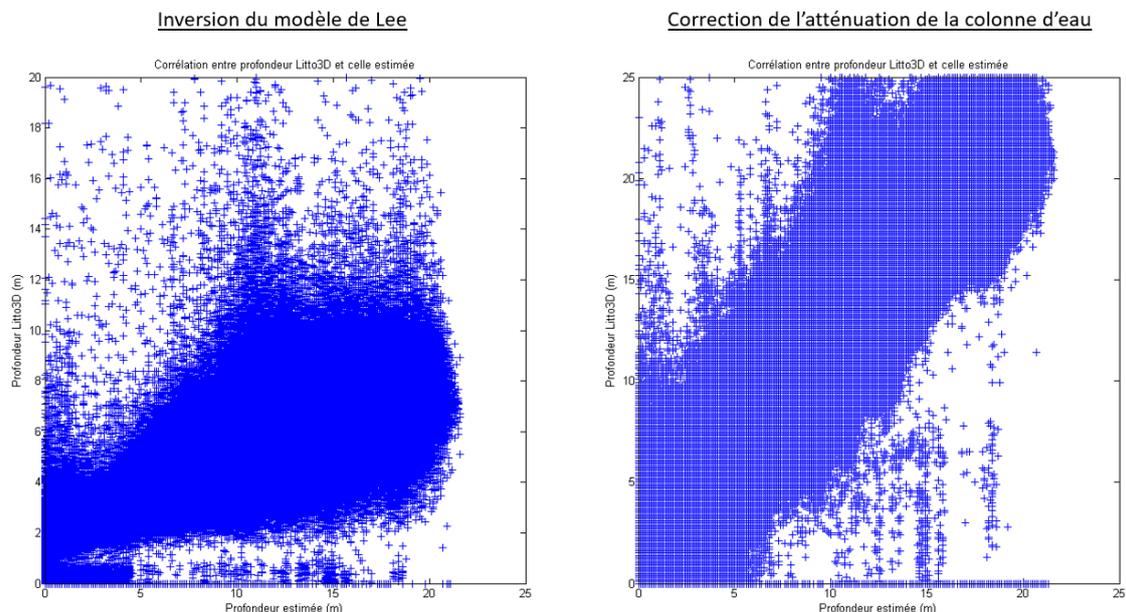


Figure 30 : Corrélation entre images bathymétriques estimées et celle du Litto3D

Sur le premier graphique le nuage de point est très resserré en zone littorale mais finit par se dégrader au large, alors que pour le second il est relativement constant et forme un nuage étroit. La bathymétrie estimée pour la correction de l'atténuation de la colonne d'eau est donc beaucoup plus proche de la réalité que celle fournie par l'inversion du modèle de Lee.

## c) Cartographie des fonds

### c.1) Par inversion du modèle de Lee

La Figure 31 présente la proportion des fonds estimées par l'inversion du modèle de Lee en même temps que la composition de la colonne d'eau :

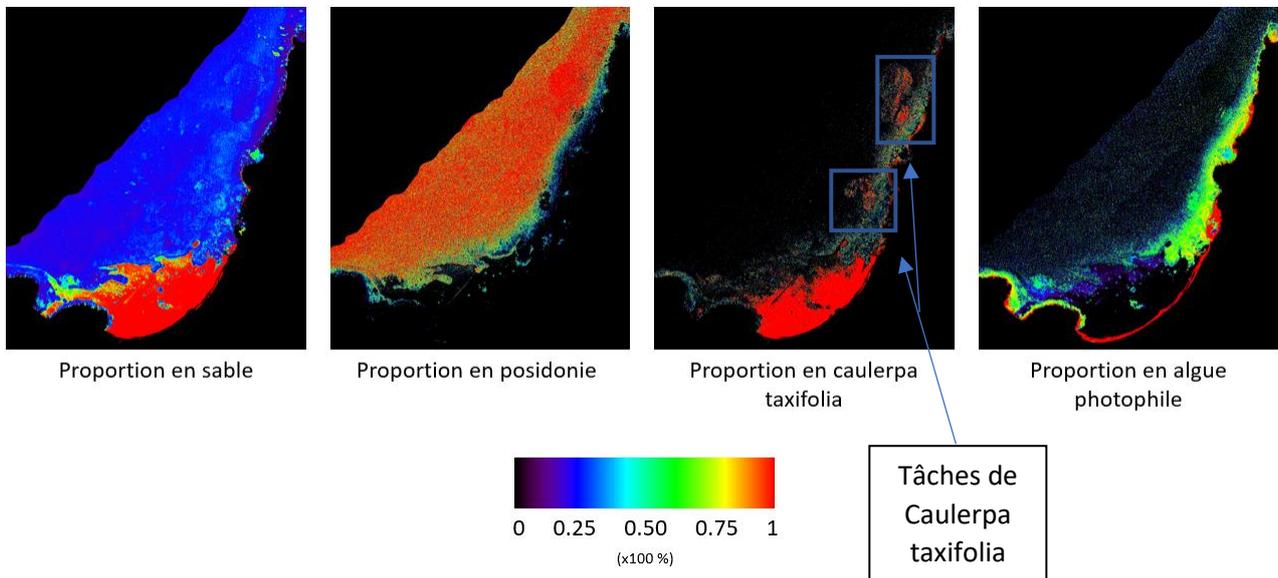


Figure 31 : La proportion des fonds résultant de l'inversion du modèle de Lee

On trouve en très grande abondance du sable sur la zone à forte réflectance en bas à droite, de la posidonie au large et des algues photophile près des côtes sur les roches. Quant à la caulerpa taxifolia malgré une erreur flagrante en relation avec le sable, de légères tâches sont discernables.

Pour vérifier la validité de ces résultats, on réalise le même profil entre les images sous-marines et la cartographie des fonds obtenue :

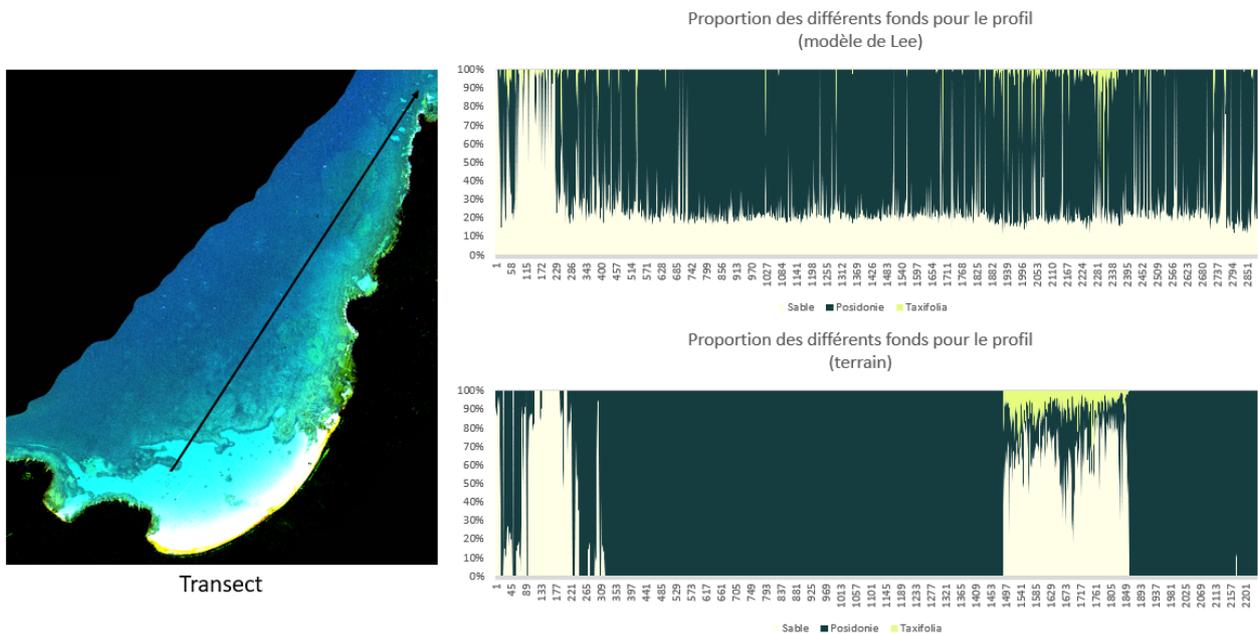


Figure 32 : Profils des fonds obtenus par l'inversion du modèle de Lee et avec les images sous-marines

Le modèle distingue bien la posidonie sur tout le trajet et la tâche de *Caulerpa taxifolia*, bien que celle-ci soit légèrement sous-estimée. Le sable est également bien visible en début de transect mais pas vers la fin. De plus sa présence en faible proportion sur toute la longueur n'est pas corrélée avec les images sous-marines.

c.2) Sur l'image corrigée de l'atténuation de la colonne d'eau

La Figure 33 présente les cartographies des fonds réalisées sur l'image corrigée de l'atténuation de la colonne d'eau à l'aide des classifications supervisées (équation 11) et (équation 12). Les spectres de référence utilisés sont ceux directement échantillonnés sur l'image :

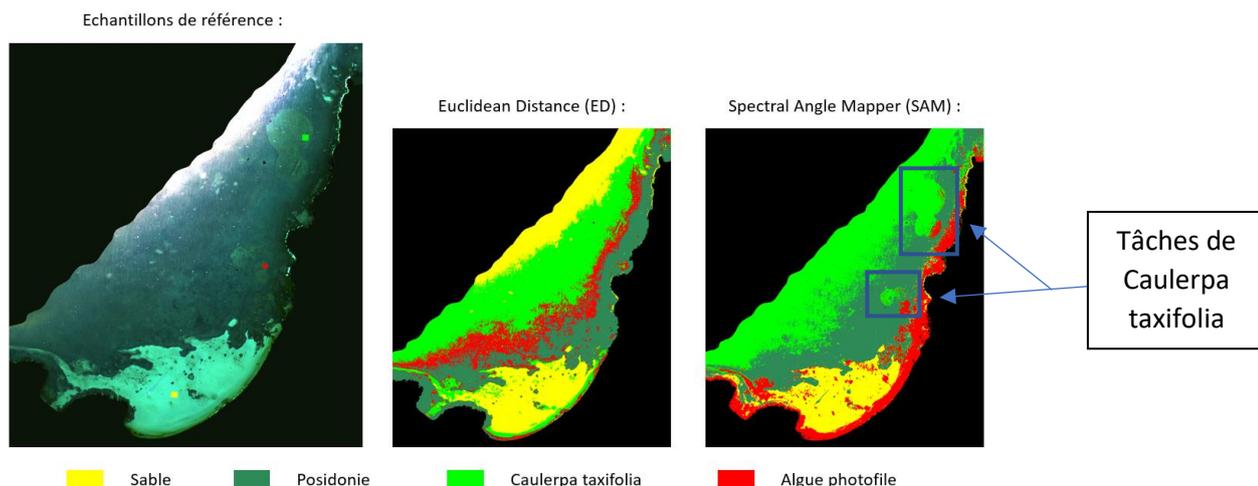


Figure 33 : Cartographies réalisées aux moyens des classifications supervisées (équation 11) et (équation 12) avec les spectres de réflectance directement échantillonnés sur l'image corrigée de l'atténuation

On constate que la distance euclidienne donne un résultat plus que mitigé avec de la caulerpa taxifolia et des algues photophiles au large. La posidonie est quant-à-elle sous-estimée. À côté les résultats obtenus avec l'angle spectral sont relativement corrects sur l'ensemble des fonds avec toutefois de la *Caulerpa taxifolia* surestimée mais dont les tâches recherchées sont bien perceptibles.

La figure 34 présente la proportion des fonds obtenues par la décomposition des pixels mixtes, également appelée démélange :

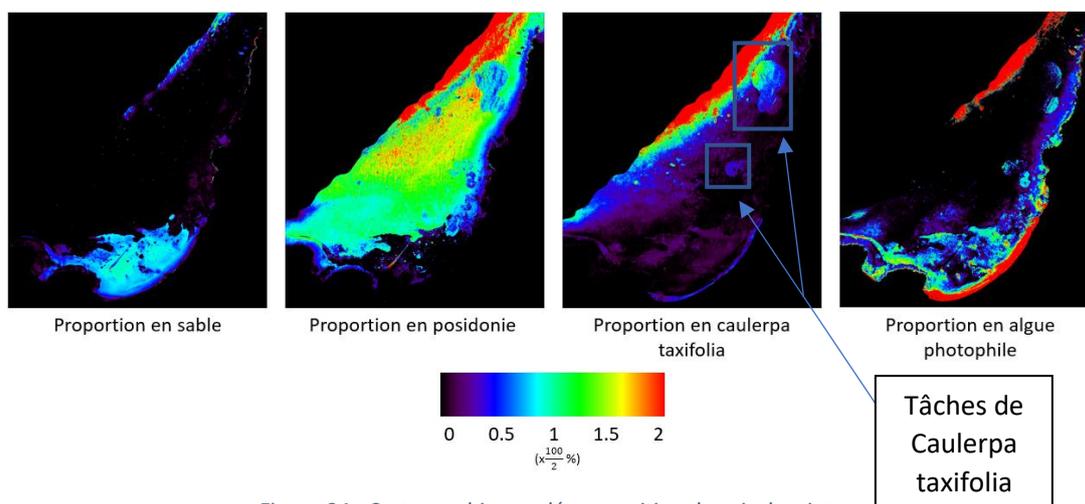


Figure 34 : Cartographie par décomposition des pixels mixtes

Comme pour les résultats de l'inversion du modèle de Lee on trouve, en très grande abondance du sable sur la zone à forte réflectance en bas à droite, de la posidonie au large et des algues photophiles près des côtes sur les roches. Cependant pour la *Caulerpa taxifolia* les tâches sont beaucoup plus apparentes et il n'y a pas d'erreur en relation avec le sable.

Pour vérifier la validité de ces résultats, on réalise le même profil entre les images sous-marines et la cartographie des fonds précédemment vue :

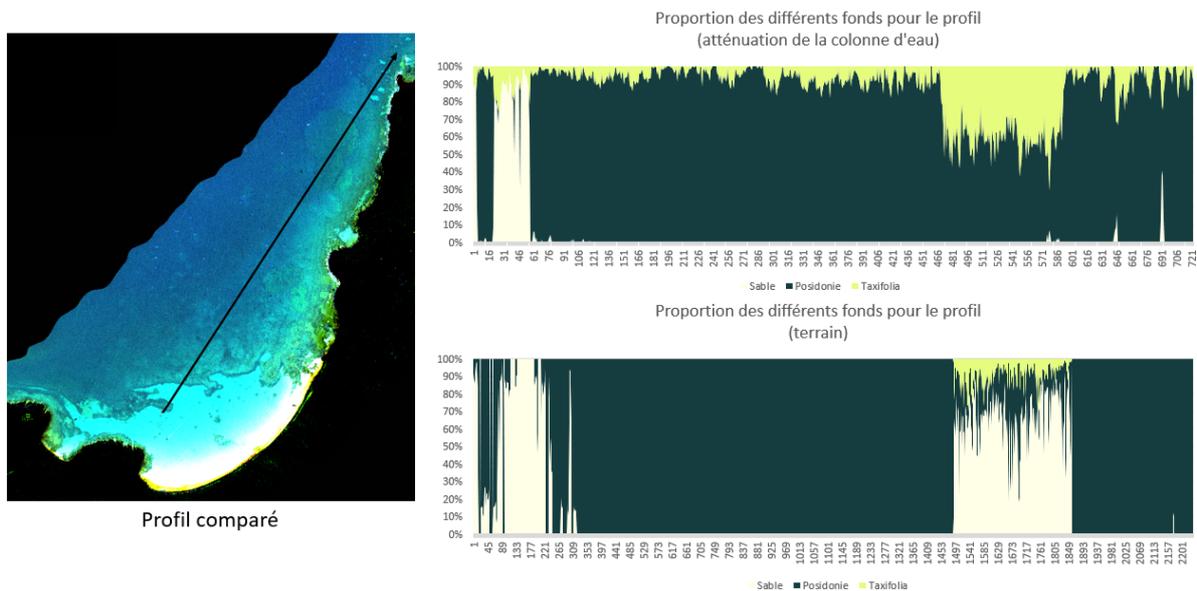


Figure 35 : Profil des fonds sur la cartographie des pixels mixtes et sur les images sous-marines

Le modèle distingue bien la posidonie sur tout le trajet et la tâche de *Caulerpa taxifolia*, bien que celle-ci soit surestimée. Le sable est également bien visible en début de transect mais pas vers la fin. En revanche contrairement à l'inversion du modèle de Lee, le sable qu'on voyait en faible proportion sur toute la longueur (Figure 32) n'est pas présent dans ce cas.

#### d) Réduction de la résolution

Une diminution de la résolution de l'image hyperspectrale d'un facteur quatre par la méthode Pixel Aggregate a été effectuée, amenant la résolution de l'image à 2 m. Puis l'inversion du modèle de Lee lui a été appliquée. La Figure 36 présente seulement les cartographies dont la suppression du bruit est bien perceptible :

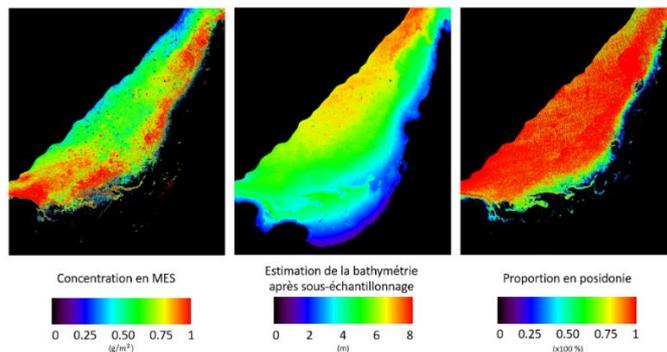


Figure 36 : Les cartographies où la suppression du bruit est bien perceptible pour une résolution de 2 m

On remarque sur la carte des matières minérales en suspension, de la bathymétrie et de la proportion en posidonie qu'il y a bien eu un lissage. En traçant à nouveau le même transect que les cas précédents pour la cartographie des fonds (Figure 32 et 35), on peut constater très clairement une atténuation du bruit pour le sable après sous-échantillonnage.

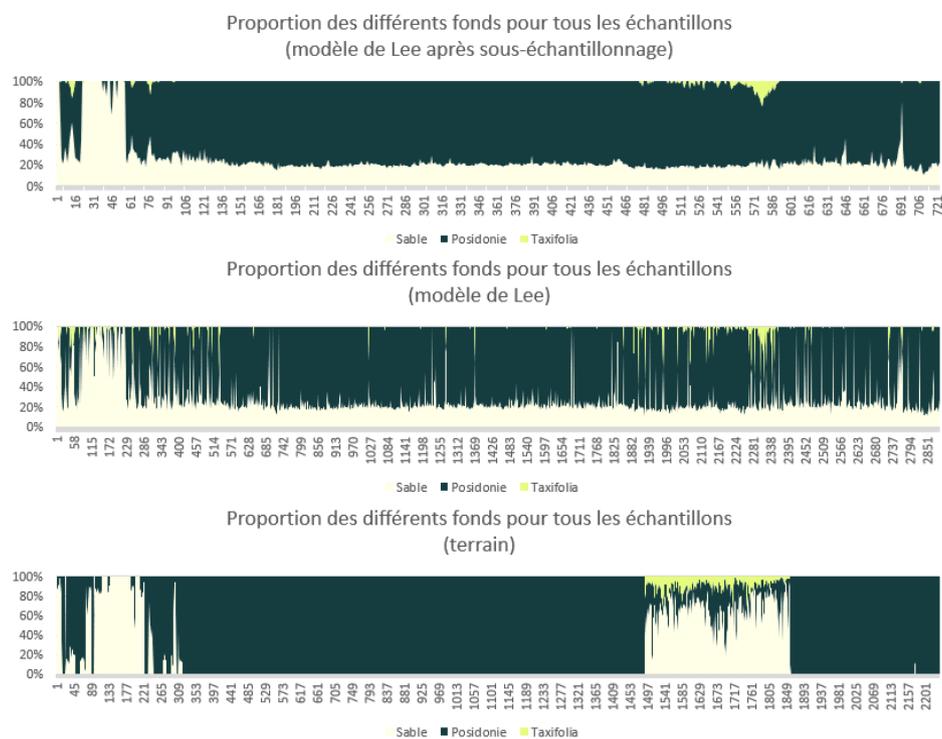


Figure 37 : Profils des fonds obtenus par l'inversion du modèle du Lee pour une résolution de 2 m et sur les images sous-marines

### e) Comparaison avec les données des années 2000

La figure 37 présente à gauche la cartographie des fonds réalisée en 2000 et à droite la cartographie des fonds réalisée en 2017 :

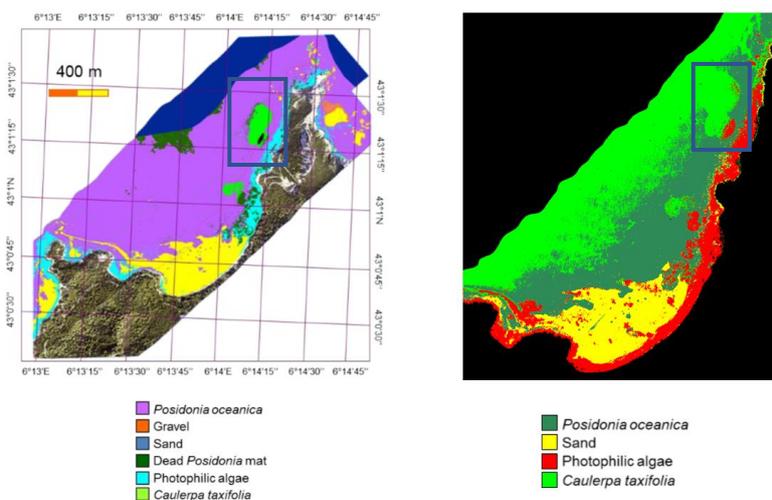


Figure 38 : Comparaison de la cartographie des fonds réalisée en 2017 avec celle réalisée en 2000

Les cartes sont dans l'ensemble identiques avec néanmoins la grosse tâche de Caulerpa taxifolia qui semble s'être étalée, mais cela peut être dû à la sensibilité du capteur HYSPEX vis-à-vis du capteur CASI utilisé en 2000.

## 6) Discussion

### Modèle de Lee :

La cartographie de la composition de la colonne d'eau (Figure 26) aurait dû montrer une concentration relativement constante sur tout le domaine en chlorophylle, en matières minérales en suspension et en matières organiques dissoutes car les eaux sont homogènes dans cette zone. Cependant l'absence des deux premiers au niveau de la posidonie et du dernier sur le sable peut s'expliquer par l'influence non négligeable que peut avoir les fonds lors de la minimisation. Par ailleurs il est à noter que les valeurs sont relativement faibles ce qui n'a pas d'incidence majeures sur les cartes obtenues.

Le sable en fin de profil que l'on ne voit pas sur les résultats par l'inversion du modèle de Lee (Figure 32) et de la correction de l'atténuation de la colonne d'eau (Figure 35) semble sur l'image corrigée des effets spéculaires (Figure 18) beaucoup plus foncé que celui rencontré au début du profil. Les deux méthodes l'interpréteraient ainsi comme de la posidonie dont le spectre de réflectance est le plus proche. En revanche, la faible proportion de sable visible sur le profil de l'inversion du modèle de Lee (Figure 32) pourrait être due aux épibiontes qui sont des algues calcaires qui recouvrent la posidonie en lui donnant un aspect blanchâtre.

Les équations utilisées dans le modèle de Lee ne sont pas adaptées pour des profondeurs allant au-delà de 10 m, ce qui justifie l'observation faite de la dégradation de la bathymétrie au large (Figure 30). En conséquence l'équilibre entre les variables est quelque peu impacté par cette contrainte physique.

L'erreur que l'on peut constater entre le sable et la *Caulerpa Taxifolia* (Figure 31) est dû à une sur-correction des effets spéculaires pour cette zone. Les réflectances étant très élevées le modèle de Lee compense en ajoutant de la *Caulerpa Taxifolia* qui n'existe pas.

### Correction de l'atténuation de la colonne d'eau :

La correspondance de l'angle spectral (valeurs relatives) est plus précise que la distance euclidienne (valeurs absolues) car elle prend en compte la forme du spectre et non la valeur absolue comme la distance euclidienne, ce qui élimine une bonne partie des résidus non corrigés de l'atténuation de l'eau (Figure 33). Ces classifications supervisées appliquées à l'image corrigée de l'atténuation de la colonne d'eau n'indiquent qu'un type de fond pour chaque pixel de l'image, qui n'est autre que la classe la plus proche du profil spectral du pixel. En revanche la décomposition en pixels mixtes à l'avantage de présenter cartographie en proportion des fonds.

### La validation des résultats :

Les mesures in situ effectuées en faible nombre ne permettent pas d'obtenir des coefficients de détermination fiables, mais ils apportent toutefois un élément de réponse en faveur ou pas des estimations. Les données sous-marines sont-elles bien meilleures car elles ratissent sur un transect plus large. Néanmoins toute la difficulté réside sur le fait qu'il est presque impossible à l'heure actuelle de valider une carte entière en raison du manque de moyen et du coût phénoménal que cela engendrerai.

## 7) Conclusion et perspectives

### a) Conclusion

Dans ce stage nous avons cherché à cartographier les fonds marins de la plage de Notre Dame sur l'île de Porquerolles en inversant un modèle de transfert radiatif - le modèle de Lee - et en corrigeant l'atténuation de l'eau – via l'inversion du modèle simplifié de Maritorena. Les estimations ont ensuite été comparées aux données in situ afin de vérifier leur fiabilité. On a pu constater que l'inversion du modèle de Lee était nettement moins performante que la correction de l'atténuation de la colonne d'eau. Cependant, il est toujours possible de jouer sur les paramètres du modèle pour améliorer les résultats. De plus, le nombre de données de validation in situ n'était pas suffisant pour affirmer avec certitude que l'une des deux méthodes était plus précise

### b) Perspectives

La suite du travail va consister en une modification des paramètres du modèle de Lee pour qu'ils soient plus représentatifs du site de Porquerolles. Les autres images acquises sur la zone (ouest et sud de Porquerolles et Port Cros) pourront également être traitées.

### c) Synthèse personnelle

Ce stage portant sur un sujet très intéressant qui est "l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale aérienne pour cartographier les fonds marins sur l'île de Porquerolles dans le Var" m'a permis de me perfectionner dans la recherche et dans la démarche scientifique en y découvrant une méthodologie nouvelle : effectuer des recherches bibliographiques sur des méthodes de télédétection associées à ma problématique ou encore établir des données de validation afin de juger et de discuter de la fiabilité des résultats donnés par les méthodes.

Le développement de ces méthodes a été effectué sous le logiciel MATLAB ainsi que sous ENVI Classic + IDL, j'ai donc pu m'améliorer sur le premier et découvrir le second très utilisé dans le domaine du traitement et de l'analyse d'images.

Ce stage a donc été une expérience enrichissante à tous points de vue.

## Références bibliographiques

- [1] D. Sylla, "Fusion de données provenant de différents capteurs satellitaires pour le suivi de la qualité de l'eau en zones côtières", Application au littoral de la région PACA (PhD Thesis), UTLN, 2014.
- [2] T. Lillesand, R. Kiefer, J. Chipman, others, "Remote sensing and image interpretation", *John Wiley & Sons Ltd*, 2004.
- [3] Global Invasive Species Database (GISD), Species profile : *Acacia mearnsii*. Downloaded from <http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=51> on 20-07-2018.
- [4] E. Hochberg, S. Andrefouet, M. Tyler, "Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 1724–1729, Aug. 2003.
- [5] J. Hedley, A. Harborne, P. Mumby, "Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, pp. 2107-2112, 2005.
- [6] L. Zhongping, L. Kendall, G. Steward, G. Peacock, O. Davis, J. Mueller, "Remote sensing reflectance and inherent optical properties of oceanic waters derived from above-water measurements", *Proc. SPIE*, vol. 2963, pp. 160-166, Feb. 1997.
- [7] A. Minghelli-Roman, C. Dupouy, "Correction of the water column attenuation : Application to the seabed mapping of the lagoon of new caledonia using MERIS images", *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observations Remote Sens.*, vol. 7, no. 6, pp. 2619-2629, Jun. 2014.
- [8] S. Maritorena, A. Morel, B. Gentili, "Diffuse reflectance of oceanic shallow waters : Influence of water depth on bottom albedo", *Limnol. Oceanogr.*, vol. 37, pp. 1689–1703, 1994.
- [9] D. Lyzenga, "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsar data", *Int. J. Remote Sens*, vol. 2, pp. 71–82, 1981.
- [10] W. Philpot, "Bathymetric mapping with passive multispectral imagery", *Appl. Opt.*, vol. 28, pp. 1569–1578, 1989.
- [11] D. Matheson, P. Dennison, "Evaluating the effects of spatial resolution on hyperspectral fire detection and temperature retrieval", *Remote sensing of environment*, 124, pp. 780-792, 2012.
- [12] M. Nelson, R. McRoberts, G. Holden, M. Bauer, "Effects of satellite image spatial aggregation and resolution on estimates of forest land area", *International Journal of Remote Sensing*, 30:8, pp. 1913-1940, 2009.

## Annexes

### Répertoire des acronymes

CDOM : matières organiques dissoutes colorées

CHL : chlorophylle

fps : frame per second

MES : matières minérales en suspension

### Glossaire

Frame per second : est une unité de mesure correspondant au nombre d'images affichées en une seconde par un dispositif.

Matières minérales en suspension : désigne l'ensemble des matières solides insolubles, visibles à l'œil nu et présentes en suspension dans un liquide.

Matières organiques dissoutes colorées : désigne les molécules dissoutes qui proviennent soit de la dégradation d'organismes morts soit de l'excrétion de molécules.

Sessile : désigne tout organisme, en générale aquatique, qui vit fixé directement sur le substrat (les éponges, les balanes, palourdes etc).

### Tableau des unités

	Matières	Unités	Description
Modèle de Lee	CHL	$mg/m^3$	Concentration
	MES	$g/m^3$	Concentration
	CDOM	$m^{-1}$	Absorbance

Tableau 2 : Tableau des unités

### Programmes

Programmes pour l'inversion du modèle de Lee : p33-p51

Programme pour le profil des images sous-marines : p52-p55

Programme pour la bathymétrie obtenue par la rotation de deux bandes spectrales : p56-p59

Programme pour la correction de l'atténuation de la colonne d'eau : p60-p62

Programmes pour la décomposition en pixels mixtes : p63-p67

Programme pour la corrélation entre les bathymétries estimées et la bathymétrie Litto3D : p68-p70

Programmes pour l'inversion du modèle de Lee

Minimisation\_4fonds.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% Stage M2 : minimisation de la distance entre le spectre      %%  
%% de chaque pixel et le spectre modélisé par le modèle de Lee. %%  
%% Auteur : Josselin Fatah-Roux                                %%  
%% Date : 01/03/2018                                          %%  
%%                                                            %%  
%% Reference:                                                 %%  
%%                                                            %%  
%% L. Zhongping, L. Kendall, G. Steward, G. Peacock,         %%  
%% O. Davis, J. Mueller, "Remote sensing reflectance and     %%  
%% inherent optical properties of oceanic waters derived from %%  
%% above-water measurements", Proc. SPIE, vol. 2963, pp.     %%  
%% 160-166, Feb. 1997.                                       %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% Initialisation :
```

```
%Pour la propreté du programme :  
clear;clc;close all
```

```
%Données de chaque morceau de la mosaïque pour la boucle :  
Numero=[11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26];
```

```
%Chargement des différents spectres :  
t=load('hyspex_aphy_699.txt');  
p=load('hyspex_aw_699.txt');  
typefond1=load('hyspex_spectre2_sable_699.txt');  
typefond1(:,2)=typefond1(:,2)*2;  
typefond2=load('hyspex_posidonie_fraiche_699.txt');  
typefond3=load('hyspex_taxifolia_699.txt');  
typefond4=load('hyspex_algue_photofile_699.txt');
```

```
%Initialisation des variables :  
Chloro=input('Quelle concentration en chlorophylle maximale : ');  
NAP=input('Quelle concentration en NAP maximale : ');  
CDOM=input('Quelle concentration en DOM maximale : ');  
Prof=input('Quelle profondeur maximale : ');  
X01=input('Quelle concentration initiale en chlorophylle : ');  
X02=input('Quelle concentration initiale en NAP : ');  
X03=input('Quelle concentration initiale en DOM : ');  
X04=input('Quelle profondeur initiale : ');
```

```
%Minimisation pour chaque morceau de la mosaïque :
```

```
for n=1:length(Numero)
```

```
    Num=num2str(Numero(n));
```

```
    %Les fichiers donnees.mat doivent comporter la variable  
    %Reflectance et la variable Masque en valeurs logiques :  
    str0=['donnees_1_',Num,'.mat'];  
    load(str0)
```

```
    Masque=Masquefinale;  
    whos Masque  
    rhos=Reflectance;
```

```
    %Passage de valeurs logiques en valeurs numériques :  
    Masque=double(Masque);
```

```
    %Mettre des 0 sur terre pour éviter des calculs inutiles :  
    for i=1:length(rhos(1,1,:))
```

```

        rhos(:,:,i)=rhos(:,:,i).*Masque;
end

%% Minimisation :

Carto=zeros(length(rhos(:,1,1)),length(rhos(1,:,1)),7);

options=optimset('TolFun',1e-10,'Display','off');
lb=[0 0 0 0 0 0 0];
ub=[Chloro NAP CDOM Prof 1 1 1];

for i=1:length(rhos(:,1,1))
    for j=1:length(rhos(1,:,1))
        if rhos(i,j,1)>0
            Rrsmesure=squeeze(rhos(i,j,:));
            assignin('base','mesure',Rrsmesure)
            X0=[X01 X02 X03 X04 1/4 1/4 1/4];
            Xopt=lsqnonlin(@erreur_4fonds,X0,lb,ub,options);
            figure(1)
            plot(Rrsmesure,'g')
            hold on
            plot(lee_4fonds(Xopt),'b')
            plot(lee_4fonds(X0),'r')
            hold off
            Carto(i,j,:)=Xopt;
        end
    end
end
i
end

%Masque en blanc (avec des NaN) :
toto=Masque./Masque;
symVtoto=toto(end:-1:1,:,1);

%% Propriétés de la colonne d'eau :

figure(1)

%Cartographie marine C_Ch1 :
subplot(2,2,1)
symV1=Carto(end:-1:1,:,1);
pcolor(symV1.*symVtoto);a=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Concentration en chlorophylle')
ylabel(a,'mg/m^3')

% imagesc(Carto(:,:,1)),colorbar,caxis([0 0.1])

%Cartographie marine C_NAP :
subplot(2,2,2)
symV2=Carto(end:-1:1,:,2);
pcolor(symV2.*symVtoto);b=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Concentration en particules minérales en suspension')
ylabel(b,'g/m^3')

% imagesc(Carto(:,:,2)),colorbar,caxis([0 10])

%Cartographie marine C_CDOM :
subplot(2,2,3)

```

```

symV3=Carto(end:-1:1, :, 3);
pcolor(symV3.*symVtoto);c=colorbar;caxis([1e-12 1/2]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Concentration en matières organiques dissoutes colorées')
ylabel(c, 'm^-1')

% imagesc(Carto(:, :, 3)),colorbar,caxis([0 0.1])

%Cartographie marine z :
subplot(2,2,4)
symV4=Carto(end:-1:1, :, 4);
pcolor(symV4.*symVtoto);d=colorbar;caxis([0 8]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Profondeur')
ylabel(d, 'm')

% imagesc(Carto(:, :, 4)),colorbar,caxis([0 0.1])

Titre='Propriétés physiques de la colonne d'eau';
[ax,h3]=suplabel(Titre, 't');
set(h3, 'FontSize', 18)

str1=sprintf('Prop_4fs2_e1%d', str2double(Num) );
print('-dpng', str1);

close

%% Proportion des différents fonds :

figure(2)

%Cartographie marine sable :
subplot(2,2,1)
symV5=Carto(end:-1:1, :, 5);
pcolor(symV5.*symVtoto);c=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Proportion en sable')
ylabel(c, 'x100%')

% imagesc(Carto(:, :, 5)),colorbar,caxis([0 0.1])

%Cartographie marine posidonie :
subplot(2,2,2)
symV6=Carto(end:-1:1, :, 6);
pcolor(symV6.*symVtoto);c=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Proportion en posidonie océanique fraîche')
ylabel(c, 'x100%')

% imagesc(Carto(:, :, 6)),colorbar,caxis([0 0.1])

%Cartographie marine taxifolia :
subplot(2,2,3)
symV7=Carto(end:-1:1, :, 7);
pcolor(symV7.*symVtoto);c=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image

```

```

xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Proportion en caulerpa taxifolia')
ylabel(c,'x100%')

% imagesc(Carto(:,:,7)),colorbar,caxis([0 0.1])

%Cartographie marine algue photofile :
subplot(2,2,4)
symV8=1-Carto(end:-1:1, :, 5)-Carto(end:-1:1, :, 6)-Carto(end:-1:1, :, 7);
pcolor(symV8.*symVtoto);c=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
xlabel('Pixel sur x')
ylabel('Pixel sur y')
title('Proportion en algue photophile')
ylabel(c,'x100%')

% imagesc(Carto(:,:,8)),colorbar,caxis([0 0.1])

Titre='Proportion des différents fonds';
[ax,h3]=suplabel(Titre,'t');
set(h3,'FontSize',18)

str2=sprintf('fonds_4fs2_e1%d',str2double(Num));
print('-dpng',str2);

close

%% Sauvegarde :

str3=sprintf('carto_mar_4f_s2_1%d',str2double(Num));

save(str3,'Carto','Masque')

clear Num

end

```

lee\_4fonds.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%% Stage M2 : fonction Lee. %%%  
%%% Auteur : Josselin Fatah-Roux %%%  
%%% Date : 01/03/2018 %%%  
%%% %%%  
%%% Reference: %%%  
%%% %%%  
%%% L. Zhongping, L. Kendall, G. Steward, G. Peacock, %%%  
%%% O. Davis, J. Mueller, "Remote sensing reflectance and %%%  
%%% inherent optical properties of oceanic waters derived from %%%  
%%% above-water measurements", Proc. SPIE, vol. 2963, pp. %%%  
%%% 160-166, Feb. 1997. %%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Fonction lee :  
function [Rrs]=lee_4fonds(Xreel)
```

```
%Initialisation :
```

```
C_chl=Xreel(1);  
C_nap=Xreel(2);  
C_cdom=Xreel(3);  
z=Xreel(4);  
c1=Xreel(5);  
c2=Xreel(6);  
c3=Xreel(7);  
c4=1-c1-c2-c3;  
tetaw=40;  
tetav=0;
```

```
%Constantes :
```

```
aNAPe400=0.048;  
SCDOM=0.0157;  
SNAP=0.0106;  
bbphys542=0.00038;  
Yphy=0.681;  
bbNAPs542=0.0054;  
YNAP=0.2;  
gw=0.115;
```

```
%Chargement des fichiers :
```

```
t=evalin('base','t');  
p=evalin('base','p');
```

```
%aw en fonction de la longueur d'onde :
```

```
lambdat=t(:,1);  
aw=p(:,2);
```

```
%aphy en fonction de la longueur d'onde :
```

```
aphys=t(:,2);
```

```
%Calcul de aphy :
```

```
aphy=C_chl*aphys;
```

```
%Calcul de aNAP :
```

```
aNAP=C_nap*aNAPe400*exp(-SNAP*(lambdat-440));
```

```
%Calcul de aCDOM :
```

```
aCDOM=C_cdom*exp(-SCDOM*(lambdat-440));
```

```
%Calcul de l'absorption totale :
```

```
a=aw+aphy+aNAP+aCDOM;
```

```

%Calcul du spectre de rétrodiffusion de l'eau bbw :
bbw=0.00144*(lambdat/500).^(-4.32);

%Calcul de la rétrodiffusion particulaire bbp :
bbp=C_chl*bbphys542*(542./lambdat).^Yphy+C_nap*bbNAPs542*(542./lambdat).^YNAP;

%Calcul de la rétrodiffusion total bb :
bb=bbw+bbp;

%Calcul de l'atténuation diffuse K :
K=a+bb;

%Calcul de l'atténuation diffuse u :
u=bb./(a+bb);

%Calcul de l'atténuation diffuse up :
up=bbp./(a+bb);

%Calcul de l'atténuation diffuse DuC :
DuC=1.03*(1+2.4*u).^0.5;

%Calcul de l'atténuation diffuse DuB :
DuB=1.04*(1+5.4*u).^0.5;

%Calcul de l'atténuation diffuse gp :
gp=0.184*(1-0.602*exp(-3.852*up));

%Calcul de l'atténuation diffuse rrsdp :
rrsdp=gw*(bbw./(a+bb))+gp.*(bbp./(a+bb));

%Calcul de rrsC :
rrsC=rrsdp.*(1-exp(-(1/cosd(tetaw))+(DuC/cosd(tetav)))*K*z));

%Chargement du fichier de réflectance de fond :
typefond1=evalin('base','typefond1');
typefond2=evalin('base','typefond2');
typefond3=evalin('base','typefond3');
typefond4=evalin('base','typefond4');

%Calcul de rrsB :
typefond=c1*typefond1(:,2)+c2*typefond2(:,2)+c3*typefond3(:,2)+c4*typefond4(:,2);
rrsB=(1/pi)*typefond.*exp(-(1/cosd(tetaw))+(DuB/cosd(tetav)))*K*z);

%Calcul de rrs :
rrs=rrsC+rrsB;

%Calcul de la réflectance :
Rrs=(0.52*rrs)./(1-1.56*rrs);

end

```

erreur\_4fonds.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%% Stage M2 : calcul de l'erreur. %%%  
%%% Auteur : Josselin Fatah-Roux %%%  
%%% Date : 01/03/2018 %%%  
%%% %%%  
%%% Reference: %%%  
%%% %%%  
%%% L. Zhongping, L. Kendall, G. Steward, G. Peacock, %%%  
%%% O. Davis, J. Mueller, "Remote sensing reflectance and %%%  
%%% inherent optical properties of oceanic waters derived from %%%  
%%% above-water measurements", Proc. SPIE, vol. 2963, pp. %%%  
%%% 160-166, Feb. 1997. %%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function err=erreur_4fonds(X)  
  
Rrsmesure=evalin('base','mesure');  
Rrs_lee=lee_4fonds(X);  
err=Rrsmesure-Rrs_lee;  
  
end
```

suplabel.m

```
function [ax,h]=suplabel(text,whichLabel,supAxes)
% Places text as a title, xlabel, or ylabel on a group of subplots.
% Returns a handle to the label and a handle to the axis.
% [ax,h]=suplabel(text,whichLabel,supAxes)
% returns handles to both the axis and the label.
% ax=suplabel(text,whichLabel,supAxes)
% returns a handle to the axis only.
% suplabel(text) with one input argument assumes whichLabel='x'
%
% whichLabel is any of 'x', 'y', 'yy', or 't', specifying whether the
% text is to be the xlabel, ylabel, right side y-label,
% or title respectively.
%
% supAxes is an optional argument specifying the Position of the
% "super" axes surrounding the subplots.
% supAxes defaults to [.08 .08 .84 .84]
% specify supAxes if labels get chopped or overlay subplots
%
% EXAMPLE:
% subplot(2,2,1);ylabel('ylabel1');title('title1')
% subplot(2,2,2);ylabel('ylabel2');title('title2')
% subplot(2,2,3);ylabel('ylabel3');xlabel('xlabel3')
% subplot(2,2,4);ylabel('ylabel4');xlabel('xlabel4')
% [ax1,h1]=suplabel('super X label');
% [ax2,h2]=suplabel('super Y label','y');
% [ax3,h2]=suplabel('super Y label (right)','yy');
% [ax4,h3]=suplabel('super Title' ,'t');
% set(h3,'FontSize',30)
%
% SEE ALSO: text, title, xlabel, ylabel, zlabel, subplot,
%           suptitle (Matlab Central)
%
% Author: Ben Barrowes <barrowes@alum.mit.edu>

%modified 3/16/2010 by IJW to make axis behavior re "zoom" on exit same as
%at beginning. Requires adding tag to the invisible axes

currax=findobj(gcf,'type','axes','-not','tag','suplabel');

if nargin < 3
    supAxes=[.08 .08 .84 .84];
    ah=findall(gcf,'type','axes');
    if ~isempty(ah)
        supAxes=[inf,inf,0,0];
        leftMin=inf; bottomMin=inf; leftMax=0; bottomMax=0;
        axBuf=.04;
        set(ah,'units','normalized')
        ah=findall(gcf,'type','axes');
        for ii=1:length(ah)
            if strcmp(get(ah(ii),'Visible'),'on')
                thisPos=get(ah(ii),'Position');
                leftMin=min(leftMin,thisPos(1));
                bottomMin=min(bottomMin,thisPos(2));
                leftMax=max(leftMax,thisPos(1)+thisPos(3));
                bottomMax=max(bottomMax,thisPos(2)+thisPos(4));
            end
        end
        supAxes=[leftMin-axBuf,bottomMin-axBuf,leftMax-leftMin+axBuf*2,bottomMax-
bottomMin+axBuf*2];
    end
end
if nargin < 2, whichLabel = 'x'; end
```

```

if nargin < 1, help(mfilename); return; end

if ~isstr(text) | ~isstr(whichLabel)
    error('text and whichLabel must be strings')
end
whichLabel=lower(whichLabel);

ax=axes('Units','Normal','Position',supAxes,'Visible','off','tag','suplabel');
if strcmp('t',whichLabel)
    set(get(ax,'Title'),'Visible','on')
    title(text);
elseif strcmp('x',whichLabel)
    set(get(ax,'XLabel'),'Visible','on')
    xlabel(text);
elseif strcmp('y',whichLabel)
    set(get(ax,'YLabel'),'Visible','on')
    ylabel(text);
elseif strcmp('yy',whichLabel)
    set(get(ax,'YLabel'),'Visible','on')
    ylabel(text);
    set(ax,'YAxisLocation','right')
end

for k=1:length(currax), axes(currax(k));end % restore all other axes

if (nargout < 2)
    return
end
if strcmp('t',whichLabel)
    h=get(ax,'Title');
    set(h,'VerticalAlignment','middle')
elseif strcmp('x',whichLabel)
    h=get(ax,'XLabel');
elseif strcmp('y',whichLabel) | strcmp('yy',whichLabel)
    h=get(ax,'YLabel');
end

%%%ah=findall(gcf,'type','axes');
%%% 'ssssssss',kb

```

image\_ENVI.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%% Stage M2 : concaténation des extraits. %%%  
%%% Auteur : Josselin Fatah-Roux %%%  
%%% Date : 01/03/2018 %%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Pour la propreté du programme :  
clear;clc;close all
```

```
% Chargement et concaténation des fichiers.mat des extraits :
```

```
%Extrait 1 :  
load('carto_mar_4f_s2_111.mat')
```

```
Carto1=Carto;
```

```
%Extrait 2 :  
load('carto_mar_4f_s2_112.mat')
```

```
Carto2=Carto;
```

```
%Extrait 3 :  
load('carto_mar_4f_s2_113.mat')
```

```
Carto3=Carto;
```

```
%Extrait 4 :  
load('carto_mar_4f_s2_114.mat')
```

```
Carto4=Carto;
```

```
%Extrait 5 :  
load('carto_mar_4f_s2_115.mat')
```

```
Carto5=Carto;
```

```
%Extrait 6 :  
load('carto_mar_4f_s2_116.mat')
```

```
Carto6=Carto;
```

```
%Extrait 7 :  
load('carto_mar_4f_s2_117.mat')
```

```
Carto7=Carto;
```

```
%Extrait 8 :  
load('carto_mar_4f_s2_118.mat')
```

```
Carto8=Carto;
```

```
%Extrait 9 :  
load('carto_mar_4f_s2_119.mat')
```

```
Carto9=Carto;
```

```
%Extrait 10 :  
load('carto_mar_4f_s2_120.mat')
```

```
Carto10=Carto;
```

```

%Extrait 11 :
load('carto_mar_4f_s2_121.mat')

Carto11=Carto;

%Extrait 12 :
load('carto_mar_4f_s2_122.mat')

Carto12=Carto;

%Extrait 13 :
load('carto_mar_4f_s2_123.mat')

Carto13=Carto;

%Extrait 14 :
load('carto_mar_4f_s2_124.mat')

Carto14=Carto;

%Extrait 15 :
load('carto_mar_4f_s2_125.mat')

Carto15=Carto;

%Extrait 16 :
load('carto_mar_4f_s2_126.mat')

Carto16=Carto;

%Concaténation verticale :
Y1=[Carto1;Carto3;Carto5;Carto7;Carto9;Carto11;Carto13;Carto15];
Y2=[Carto2;Carto4;Carto6;Carto8;Carto10;Carto12;Carto14;Carto16];

clearvars -except Y1 Y2

%Concaténation horizontale :
X1=[Y1 Y2];

clearvars -except X1

%Transposer la matrice :
for i=1:7
    S(:, :, i)=X1(:, :, i)';
end

%% Création du fichier .img :
C=3300;
L=3800;

name_file='Cartographie.img';
Fid = fopen(name_file, 'w');
carto_t=reshape(S, C*L*7, 1, 1);
fwrite(Fid, carto_t, 'float');
fclose(Fid);

figure(1)
imshow(X1(:, :, 1))
colormap(jet); a=colorbar; caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')

```

```

ylabel('y')
title('Concentration en chlorophylle')
ylabel(a, 'Concentration')

print -dpng img1

close

figure(2)
imshow(X1(:, :, 2))
colormap(jet);b=colorbar;caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Concentration en particules minérales en suspension')
ylabel(b, 'Concentration')

print -dpng img2

close

figure(3)
imshow(X1(:, :, 3))
colormap(jet);c=colorbar;caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Chlorophylle')
ylabel(c, 'Concentration en matières organiques dissoutes')

print -dpng img3

close

figure(4)
imshow(X1(:, :, 4))
colormap(jet);d=colorbar;caxis([0 10])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Profondeur')
ylabel(d, 'm')

print -dpng img4

close

figure(5)
imshow(X1(:, :, 5))
colormap(jet);e=colorbar;caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Sable (spectre 2)')
ylabel(e, 'Sable (spectre 2)')

print -dpng img5

close

figure(6)
imshow(X1(:, :, 6))
colormap(jet);f=colorbar;caxis([0 1])

```

```

impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Posidonie fraîche')
ylabel(f, 'Posidonie fraîche')

print -dpng img6

close

figure(7)
imshow(X1(:,:,7))
colormap(jet);g=colorbar;caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Caulerpa taxifolia')
ylabel(g, 'Caulerpa taxifolia')

print -dpng img7

close

figure(8)
imshow(1-X1(:,:,5)-X1(:,:,6)-X1(:,:,7))
colormap(jet);h=colorbar;caxis([0 1])
impixelinfo
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Algue photofile')
ylabel(h, 'Algue photofile')

print -dpng img8

close

%Sauvegarde :

save('Cartographie_ENVI', 'X1', 'S')

```

image\_pcolor.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% Stage M2 : concaténation des extraits.           %%  
%% Auteur : Josselin Fatah-Roux                    %%  
%% Date : 01/03/2018                               %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Pour la propreté du programme :  
clear;clc;close all
```

```
% Chargement et concaténation des fichiers .mat des extraits :
```

```
%Extrait 1 :
```

```
load('carto_mar_4f_s2_111.mat')
```

```
Carto1=Carto;
```

```
toto1=Masque./Masque;
```

```
for h=1:length(Carto1(1,1,:))  
    Carto1(:, :, h)=Carto1(:, :, h).*toto1(:, :, 1);  
end
```

```
%Extrait 2 :
```

```
load('carto_mar_4f_s2_112.mat')
```

```
Carto2=Carto;
```

```
toto2=Masque./Masque;
```

```
for h=1:length(Carto2(1,1,:))  
    Carto2(:, :, h)=Carto2(:, :, h).*toto2(:, :, 1);  
end
```

```
%Extrait 3 :
```

```
load('carto_mar_4f_s2_113.mat')
```

```
Carto3=Carto;
```

```
toto3=Masque./Masque;
```

```
for h=1:length(Carto3(1,1,:))  
    Carto3(:, :, h)=Carto3(:, :, h).*toto3(:, :, 1);  
end
```

```
%Extrait 4 :
```

```
load('carto_mar_4f_s2_114.mat')
```

```
Carto4=Carto;
```

```
toto4=Masque./Masque;
```

```
for h=1:length(Carto4(1,1,:))  
    Carto4(:, :, h)=Carto4(:, :, h).*toto4(:, :, 1);  
end
```

```
%Extrait 5 :
```

```
load('carto_mar_4f_s2_115.mat')
```

```
Carto5=Carto;
```

```

toto5=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto5(1,1,:))
    Carto5(:,:,h)=Carto5(:,:,h).*toto5(:,:,1);
end

%Extrait 6 :
load('carto_mar_4f_s2_116.mat')

Carto6=Carto;

toto6=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto6(1,1,:))
    Carto6(:,:,h)=Carto6(:,:,h).*toto6(:,:,1);
end

%Extrait 7 :
load('carto_mar_4f_s2_117.mat')

Carto7=Carto;

toto7=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto7(1,1,:))
    Carto7(:,:,h)=Carto7(:,:,h).*toto7(:,:,1);
end

%Extrait 8 :
load('carto_mar_4f_s2_118.mat')

Carto8=Carto;

toto8=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto8(1,1,:))
    Carto8(:,:,h)=Carto8(:,:,h).*toto8(:,:,1);
end

%Extrait 9 :
load('carto_mar_4f_s2_119.mat')

Carto9=Carto;

toto9=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto9(1,1,:))
    Carto9(:,:,h)=Carto9(:,:,h).*toto9(:,:,1);
end

%Extrait 10 :
load('carto_mar_4f_s2_120.mat')

Carto10=Carto;

toto10=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto10(1,1,:))
    Carto10(:,:,h)=Carto10(:,:,h).*toto10(:,:,1);
end

%Extrait 11 :

```

```

load('carto_mar_4f_s2_121.mat')

Carto11=Carto;

toto11=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto11(1,1,:))
    Carto11(:,:,h)=Carto11(:,:,h).*toto11(:,:,1);
end

%Extrait 12 :
load('carto_mar_4f_s2_122.mat')

Carto12=Carto;

toto12=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto12(1,1,:))
    Carto12(:,:,h)=Carto12(:,:,h).*toto12(:,:,1);
end

%Extrait 13 :
load('carto_mar_4f_s2_123.mat')

Carto13=Carto;

toto13=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto13(1,1,:))
    Carto13(:,:,h)=Carto13(:,:,h).*toto13(:,:,1);
end

%Extrait 14 :
load('carto_mar_4f_s2_124.mat')

Carto14=Carto;

toto14=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto14(1,1,:))
    Carto14(:,:,h)=Carto14(:,:,h).*toto14(:,:,1);
end

%Extrait 15 :
load('carto_mar_4f_s2_125.mat')

Carto15=Carto;

toto15=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto15(1,1,:))
    Carto15(:,:,h)=Carto15(:,:,h).*toto15(:,:,1);
end

%Extrait 16 :
load('carto_mar_4f_s2_126.mat')

Carto16=Carto;

toto16=Masque./Masque;

for h=1:length(Carto16(1,1,:))

```

```

    Carto16(:,:,h)=Carto16(:,:,h).*toto16(:,:,1);
end

%Concaténation verticale :
Y1=[Carto1;Carto3;Carto5;Carto7;Carto9;Carto11;Carto13;Carto15];
Y2=[Carto2;Carto4;Carto6;Carto8;Carto10;Carto12;Carto14;Carto16];

clearvars -except Y1 Y2

%Concaténation horizontale :
X1=[Y1 Y2];

clearvars -except X1

figure(1)
pcolor(X1(:,:,1));a=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir','reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Concentration en chlorophylle')
ylabel(a, 'Concentration')

print -dpng im1

close

figure(2)
pcolor(X1(:,:,2));b=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir','reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Concentration en particules minérales en suspension')
ylabel(b, 'Concentration')

print -dpng im2

close

figure(3)
pcolor(X1(:,:,3));c=colorbar;caxis([0 0.5]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir','reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Concentration en matières organiques dissoutes')
ylabel(c, 'Concentration')

print -dpng im3

close

figure(4)
pcolor(X1(:,:,4));d=colorbar;caxis([0 10]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir','reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Profondeur')
ylabel(d, 'm')

print -dpng im4

```

```

close

figure(5)
pcolor(X1(:, :, 5));e=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir', 'reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Sable (spectre 2)')
ylabel(e, 'Sable (spectre 2)')

print -dpng im5

close

figure(6)
pcolor(X1(:, :, 6));f=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir', 'reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Posidonie fraîche')
ylabel(f, 'Posidonie fraîche')

print -dpng im6

close

figure(7)
pcolor(X1(:, :, 7));g=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir', 'reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Caulerpa taxifolia')
ylabel(g, 'Caulerpa taxifolia')

print -dpng im7

close

figure(8)
pcolor(1-X1(:, :, 5)-X1(:, :, 6)-X1(:, :, 7));h=colorbar;caxis([0 1]);shading flat
axis image
set(gca, 'Ydir', 'reverse')
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Algue photofile')
ylabel(h, 'Algue photofile')

print -dpng im8

close

%% Sauvegarde :

save('Cartographie_pcolor', 'X1')

```

Programme pour le profil des images sous-marines

```
couverture_versionfinale.pro
```

```
pro couverture_versionfinale
```

```
;Stage M2 : échantillonnage tous les 1 m dans les cartes fournies par Ifremer.  
;Auteurs : Audrey Minghelli, Fatah-Roux Josselin
```

```
for n=1,78 do begin
```

```
    print, n
```

```
    A=STRING(n)+'_classif.tif'
```

```
    B='C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\Blended_Mosaic_'  
    fname=STRCOMPRESS(B+A, / REMOVE_ALL)
```

```
    ;fname = envi_pickfile(title='Choisir une image', filter='*.tif')
```

```
    if (fname eq '') then return
```

```
    ENVI_OPEN_DATA_FILE, fname, /TIFF, r_fid=fid
```

```
    if (fid eq -1) then return
```

```
    ENVI_FILE_QUERY, fid, dims=dims, nb=nb, data_type=dt, $
```

```
    interleave=inter, fname=fname, sname=sname, bnames=bnames, file_type=ft
```

```
    pos=LINDGEN(nb)
```

```
    ns=dims[2]+1
```

```
    nl=dims[4]+1
```

```
    ;print, ns
```

```
    ;print, nl
```

```
    image=FLTARR(ns,nl,nb)
```

```
    for i=0,nb-1 do begin
```

```
        image[*,*,i]=ENVI_GET_DATA(fid=fid,dims=dims,pos=pos[i])
```

```
    end
```

```
    map_info=ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
```

```
    res=map_info.PS
```

```
    ref=map_info.MC
```

```
    ;print, ref
```

```
    ;print, dims
```

```
    ;print, res
```

```
    iproj=ENVI_PROJ_CREATE(/utm,zone=32)
```

```
    oproj=ENVI_PROJ_CREATE(/geographic)
```

```
    pente=DOUBLE(nl)/ns
```

```
    ;print, pente
```

```
    dx=SQRT(1/(res[0]^2+pente^2*res[1]^2))
```

```
    dy=pente*dx
```

```
    ;print, dx
```

```
    ;print, dy
```

```
    deltax=ROUND(1/res[0])
```

```
    deltay=ROUND(1/res[1])
```

```
    ;print, deltax
```

```
    ;print, deltay
```

```

img=UINTARR(deltax*2+1,deltay*2+1,4)
x=deltax
y=n1-deltay-1
;-debordement [6 18 0 81 63 69]
nb_points=ROUND(SQRT(ns^2*res[0]^2+n1^2*res[1]^2))

;print, nb_points

prop=FLTARR(10,nb_points+1)

;OPENW, 1, 'C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\prop.txt',/append
;OPENW, 2,
'C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\fonds.txt',/append
OPENW, 1,
'C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\prop_f.txt',/append
OPENW, 2, 'C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\ech_f.txt',/append

i=0

while ((x lt ns-deltax) AND (y gt deltax)) do begin

    ;print, x
    ;print, y
    print, ' '

    img=image[x-deltax:x+deltax,y-deltay:y+deltay,*]

    a=WHERE(img[*,*,0] eq 255, countsand)
    a=WHERE(img[*,*,0] eq 27, countposi)
    a=WHERE(img[*,*,0] eq 203, counttaxi)
    a=WHERE(img[*,*,3] eq 255, count)

    prop[0,i]=n
    prop[1,i]=x
    prop[2,i]=y
    prop[3,i]=ref[2]+x*res[0]

    ;print, ref[2]
    ;print, res[0]
    ;print, x

    prop[4,i]=ref[3]-y*res[1]

    iXmap=prop[3,i]
    iYmap=prop[4,i]

    ENVI_CONVERT_PROJECTION_COORDINATES, iXmap, iYmap, iProj, oXmap, oYmap,
oProj

    prop[5,i]=oXmap
    prop[6,i]=oYmap

    prop[7,i]=DOUBLE(countsand)/count
    prop[8,i]=DOUBLE(countposi)/count
    prop[9,i]=DOUBLE(counttaxi)/count

    ;WRITE_CSV, 'C:\Users\Josselin\Desktop\Classif_Porquerolles\prop.txt',prop

    print, prop[*,i]
    ;printf, 1, prop[0:5,i]
    ;printf, 2, prop[6:8,i]

```

```
        printf, 1, prop[*], i],
FORMAT=' (F3.0,1X,F7.0,1X,F7.0,1X,F8.1,1X,F10.1,1X,F7.5,1X,F7.4,1X,F7.5,1X,F7.5,1
X,F7.5) '

        x=ROUND(x+dx)
        y=ROUND(y-dy)
        i=i+1

    endwhile

    printf, 2, i

    close, /all

endfor

end
```

Programme pour la bathymétrie obtenue par la  
rotation de deux bandes spectrales

```

calcul_bathymetrie.pro

pro calcul_bathymetrie

;Auteur : Audrey Minghelli

ENVI_DELETE_ROIS, /all
file_name_in=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner image source",filter='*.img')
;file_name_in='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013
WV2\porquerolles1_refl_wv2_divided_by_100000.img'
ENVI_OPEN_FILE, file_name_in, r_fid=fid_in
ENVI_FILE_QUERY, fid_in, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
interleave=inter, fname=fname, sname=sname, bnames=bnames, wl=wavelengths, file_type=
ft

bverte=0
read,bverte,prompt='Bande Verte='

; choix de la bande rouge
brouge=0
read,brouge,prompt='Bande Rouge='

image_verte=fltarr(ns,nl)
image_rouge=fltarr(ns,nl)
pos=LINDGEN(nb)
dims=[-1, 0,ns-1,0,nl-1]
i=bverte-1
image_verte=float(ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[i]))
i=brouge-1
image_rouge=float(ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[i]))

image_rouge=smooth( image_rouge,3 )
image_verte=smooth( image_verte,3 )

;npoly=0
;read,npoly,prompt='Nombre de polygones='

roi_file=ENVI_PICKFILE(title='Selectionner le fichier ROI du
sable',filter='*.roi')
;roi_file='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013
WV2\sables.roi'
ROI_RESTORE,roi_file
roi_ids=ENVI_GET_ROI_IDS(ns=ns,nl=nl,roi_names=roi_names)
npoly = (size(roi_ids,/DIMENSIONS))[0]
print, npoly
L_v=fltarr(npoly-1)
L_r=fltarr(npoly-1)
pos=LINDGEN(nb)

for i=0,npoly-2 do begin
    bache_id=roi_ids(i)
    bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
    bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
    bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
    ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flg=
g=1
    L_v(i)=mean_bache(bverte-1)
    L_r(i)=mean_bache(brouge-1)
endfor

bache_id=roi_ids(i)

```

```

bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
Le_v=mean_bache(bverte-1)*0.6
Le_r=mean_bache(brouge-1)*0.6

X_r=Alog(L_r-Le_r)
X_v=Alog(L_v-Le_v)

plot,X_v,X_r

;calcul de la pente de (X_v,X_r)

res= linfit(X_v,X_r)

pente=res[1]
print, pente
file_name_mask=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner le masque",filter='*.img')
;file_name_mask='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles
2013 WV2\mask_eau.img'
ENVI_OPEN_FILE, file_name_mask, r_fid=fid_mask
ENVI_FILE_QUERY,fid_mask,ns=ns_mask,nl=nl_mask,nb=nb_mask,$
file_type=ft
pos_mask=[0]
dims_mask=[-1, 0,ns_mask-1,0,nl_mask-1]
mask=ENVI_GET_DATA(fid=fid_mask,dims=dims_mask,pos=pos_mask)
image_bathy=fltarr(ns,nl)

pos_data=where(mask eq 1)
image_bathy(pos_data)= float((Alog(image_verte(pos_data)-Le_v)-
pente*Alog(image_rouge(pos_data)-Le_r)))

file_name_bathy=ENVI_PICKFILE(title="Image de bathy",filter='*.img')
;file_name_bathy='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles
2013 WV2\bathy.img'
OpenW,unit,file_name_bathy,/Get_LUN
WriteU,unit,image_bathy
free_LUN,unit
ENVI_SETUP_HEAD,data_type=4,fname=file_name_bathy,interleave=0,ns=ns,$
nl=nl,nb=1,/open,/write

ENVI_OPEN_FILE, file_name_bathy, r_fid=fid_bathy
ENVI_FILE_QUERY,fid_bathy,ns=ns,nl=nl,nb=nb,data_type=dt,$
interleave=inter,fname=fname,sname=sname,bnames=bnames,wl=wavelengths,file_type=
ft

bathy=fltarr(npoly-1)
z=fltarr(npoly-1)

pos=LINDGEN(nb)
for i=0,npoly-2 do begin
  bache_id=roi_ids(i)
  bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_bathy,pos=pos)
  bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
  bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]

ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_bathy,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=
1
  bathy[i]=mean_bache

```

```

;read,z[i],prompt='z'+ strtrim(i,2)+'= '
;read,z[i], prompt='z'+ strtrim(i,2)+'= '

endfor

print, bathy

z[0]=1.59
z[1]=2.89
z[2]=4.2
z[3]=5.97
z[4]=7.03
;z[5]=6.60
;z[6]=22.5

res=linfit(bathy,z)
image_z=intarr(ns,nl)

image_z(pos_data)= fix(( res[1] * image_bathy(pos_data) + res[0] ) * 10)

file_name_out=ENVI_PICKFILE(title="Image de sortie",filter='*.img')
;file_name_out='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013
WV2\z.img'
OpenW,unit,file_name_out,/Get_LUN
WriteU,unit,image_z
free_LUN,unit
ENVI_SETUP_HEAD,data_type=2,fname=file_name_out,interleave=0,ns=ns,$
nl=nl,nb=1,/open,/write

end

```

Programme pour la correction de l'atténuation de  
la colonne d'eau

```

correction_attenuation.pro

pro correction_attenuation

;Auteur : Audrey Minghelli

ENVI_DELETE_ROIS, /all

file_name_in=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner l'image source", filter='*.img')
;file_name_in='g:\idl\mosa_st_jean_geo.img'
ENVI_OPEN_FILE, file_name_in, r_fid=fid_in
ENVI_FILE_QUERY, fid_in, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
interleave=inter, fname=fname, sname=sname, bnames=bnames, wl=wavelengths, file_type=
ft

file_name_z=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner l'image bathymétrique",
filter='*.img')
;file_name_z='g:\idl\z.img'
ENVI_OPEN_FILE, file_name_z, r_fid=fid_z
ENVI_FILE_QUERY, fid_z, ns=ns, nl=nl, nb=nb_z, data_type=dt, $
interleave=inter, file_type=ft

;ouverture du fichier de ROI des baches immergees
;npoly=0
;read,npoly,prompt='Nombre de polygones='

roi_file=ENVI_PICKFILE(title='Selectionner le fichier ROI du sable',
filter='*.roi')
;roi_file='g:\idl\sable.roi'
ROI_RESTORE,roi_file
roi_ids=ENVI_GET_ROI_IDS(ns=ns,nl=nl)
npoly = (size(roi_ids,/DIMENSIONS))[0]
L=fltarr(npoly-1,nb)
Lw=fltarr(nb)
pos=LINDGEN(nb)
pos_z=[0]
z=fltarr(1,npoly-1)

for i=0,npoly-2 do begin
    bache_id=roi_ids(i)
    bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
    bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
    bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
    ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flg
g=1
    L(i,*)=mean_bache(*)
    bache_z=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_z,pos=pos_z)
    bache_ptr_z=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
    bache_DIMS=[bache_ptr_z,0,0,0,0]
    ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_z,dims=bache_DIMS,pos=pos_z,mean=mean_bache,comp_flg
ag=1
    z(0,i)=mean_bache/10.0
endfor

bache_id=roi_ids(i)
bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
Lw=mean_bache*0.4

```

```

print, 'Lw=', Lw

k=fltarr(nb)

for i=0,nb-1 do begin
    Y=alog(L(*,i)-Lw(i))
    res= linfit(z,Y)
    k(i)=-res[1]/2

end

print, 'z=', z
print, 'k=', k
plot, k

file_name_mask=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner le masque", filter='*.img')
;file_name_mask='g:\idl\mask.img'
ENVI_OPEN_FILE, file_name_mask, r_fid=fid_mask
ENVI_FILE_QUERY, fid_mask, ns=ns, nl=nl, nb=nb_mask, data_type=dt, $
interleave=inter, file_type=ft

pos=lindgen(nb)
dims=[-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
bathy=ENVI_GET_DATA(fid=fid_z, dims=dims, pos=[0])
image_z=bathy/10.0
mask=ENVI_GET_DATA(fid=fid_mask, dims=dims, pos=[0])
file_name_out=ENVI_PICKFILE(title="Image de sortie", filter='*.img')
;file_name_out='g:\idl\mosa_st_jean_geo_attcor.img'
OpenW, unit, file_name_out, /Get_LUN

image_sortie=fltarr(ns, nl)
pos_eau=where(mask eq 1)
image_entree=ENVI_GET_DATA(fid=fid_in, dims=dims, pos=pos[0])
pos_terre=where((mask eq 0) and (image_entree ne 0))
for i=0,nb-1 do begin
    image_entree=ENVI_GET_DATA(fid=fid_in, dims=dims, pos=pos[i])
    ;image_entree(pos_eau)=smooth( image_entree(pos_eau), 3 )
    image_sortie(pos_eau)=((image_entree(pos_eau)-Lw(i))/exp(-
2*k(i)*image_z(pos_eau))+Lw(i))
    ;image_sortie(pos_eau)=((image_entree(pos_eau))/exp(-
2*k(i)*image_z(pos_eau)))
    image_sortie(pos_eau)=smooth( image_sortie(pos_eau), 3 )
    ;image_sortie(pos_terre)=image_entree(pos_terre)
    WriteU, unit, image_sortie
    print, i
endfor

free_LUN, unit
ENVI_SETUP_HEAD, data_type=4, fname=file_name_out, interleave=0, ns=ns, $
nl=nl, nb=nb, /open, /write, wl=wavelengths

ENVI_FILE_MNG, id=fid_in, /remove

end

```

Programmes pour la décomposition en pixels  
mixtes

```

unmix_n21.m

clear all
close all

name_file='D:\Travail\HYPFoM\campagne 2017\image hyspex\mosaique PQ 50cm
postref\correction colonne deau\image corrigee de lattenuation2m.img';

Fid = fopen(name_file);

C=825;
L=950;
B=50;

donnees = fread(Fid, C * L * B, 'int16');

fclose(Fid);

Rrs_t = reshape(donnees, C, L, B);
clear donnees
Rrs=zeros(L,C,B);
for i=1:B
    Rrs(:, :, i)=Rrs_t(:, :, i)';
end
clear Rrs_t
toto=zeros(L,C,3);
toto(:, :, 1)=Rrs(:, :, 50);
toto(:, :, 2)=Rrs(:, :, 40);
toto(:, :, 3)=Rrs(:, :, 15);

figure(1)
imshow(uint8(toto/5))
impixelinfo
Rrs=Rrs/10000;

name_file='D:\Travail\HYPFoM\campagne 2017\image hyspex\mosaique PQ 50cm
postref\masque_2m.img';

Fid = fopen(name_file);

donnees = fread(Fid, C * L, 'uint8');

fclose(Fid);

masque_t = reshape(donnees, C, L, 1);
masque=masque_t';

file_name=('spectres fond image.txt');
[rfs rfp rfa rft]= textread(file_name, '%f %f %f %f', 'delimiter', '\n');
rfs=rfs/10000;
rfp=rfp/10000;
rfa=rfa/10000;
rft=rft/10000;

assignin('base', 'rfs', rfs );
assignin('base', 'rfp', rfp );
assignin('base', 'rfa', rfa );
assignin('base', 'rft', rft );

figure (3)
plot(rfs)
hold on
plot(rfp)

```

```

hold on
plot(rft)
hold on
plot(rfa)

X0=[0.25 0.25 0.25 0.25];
lb=[0 0 0 0];
ub=[2 2 2 2];

carto=zeros(L,C,4);
options = optimset('Display','off','TolFun',1e-12);

for i=1:L
    for j=1:C
        if masque(i,j) == 1
            spectre=Rrs(i,j,:);
            spectre=squeeze(spectre);
            assignin('base', 'mesure', spectre);
            Xopt=lsqnonlin(@erreur_nsl,X0, lb, ub);
            carto(i,j,1)=Xopt(1);
            carto(i,j,2)=Xopt(2);
            carto(i,j,3)=Xopt(3);
            carto(i,j,4)=Xopt(4);
        end
    end
end

name_file='carto_lm_nsl_4f.img';

Fid = fopen(name_file,'w');

for i=1:4
    carto_t(:,:,i)=carto(:,:,i)';
end

carto_t=reshape(carto_t, C * L * 4,1,1);

fwrite(Fid, carto_t, 'float');

fclose(Fid);

```

Rrs\_ns1.m

```
function Rrs=Rrs_ns21(X)
```

```
coef_sable=X(1);  
coef_posi=X(2);  
coef_taxi=X(3);  
coef_algue=X(4);
```

```
toto=evalin('base','rfs');  
rfs=toto(1:50);  
toto=evalin('base','rfp');  
rfp=toto(1:50);  
toto=evalin('base','rft');  
rft=toto(1:50);  
toto=evalin('base','rfa');  
rfa=toto(1:50);
```

```
Rrs=coef_sable*rfs+coef_posi*rfp+coef_taxi*rft+coef_algue*rfa;
```

```
erreur_ns1.m  
function err=erreur_ns1(X)  
Rrsmesure=evalin('base','mesure');  
Rrs_model=Rrs_ns1(X);  
err=Rrsmesure-Rrs_model;
```

Programme pour la corrélation entre les  
bathymétries estimées et la bathymétrie Litto3D

Corr\_bathy.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Stage M2 : corrélations entre les bathymétries estimées et   %%%
%%% celle du Litto3D.                                           %%%
%%% Auteur : Josselin Fatah-Roux                                %%%
%%% Date : 01/03/2018                                           %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% Initialisation :
```

```
clear;clc;close all
```

```
%% Importation de la matrice Litto3D:
```

```
Profondeur=load('Litto3D.txt')./10;
```

```
Masquefinale=imread('Masks.png');
```

```
Masquefinale=Masquefinale(:,:,1)>0;
```

```
figure(1)
```

```
imshow(Masquefinale)
```

```
title('Masque réalisé via ENVI Classic et à la main')
```

```
Masque=Masquefinale;
```

```
Masque=double(Masque);
```

```
toto=Masque./Masque;
```

```
Profondeur=Profondeur.*toto;
```

```
idx=isnan(Profondeur);
```

```
Profondeur(idx)=[];
```

```
Profondeur1D=abs(Profondeur(:));
```

```
%% Importation de la matrice 1 estimée :
```

```
Estimation1=load('Lee.txt');
```

```
Estimation1=Estimation1.*toto;
```

```
idx=isnan(Estimation1);
```

```
Estimation1(idx)=[];
```

```
Estimation11D=Estimation1(:);
```

```
clear Profondeur
```

```
clear Estimation1
```

```
%% Exportation des variables dans fichier .txt :
```

```
file_name='Corr_bathy1.txt';
```

```
fid1=fopen(file_name, 'w');
```

```
for i=1:length(Profondeur1D(:,1))
```

```
    fprintf(fid1, '%d %f \n', Profondeur1D(i,1), Estimation11D(i,1));
```

```
end
```

```
fclose(fid1);
```

```
%% Importation de la matrice 2 estimée :
```

```
Estimation2=load('Bathy_att_excel.txt');
```

```
Estimation2=Estimation2.*toto;
```

```
idx=isnan(Estimation2);
```

```
Estimation2(idx)=[];
```

```

Estimation21D=Estimation2(:);

clear Estimation2

%% Exportation des variables dans fichier .txt :
file_name='Corr_bathy2.txt';
fid2=fopen(file_name, 'w');

for i=1:length(Profondeur1D(:,1))
    fprintf(fid2,'%d %f \n',Profondeur1D(i,1), Estimation21D(i,1));
end

fclose(fid2);

%% Graphiques :
figure(2)
subplot(1,2,1)
plot(Profondeur1D,Estimation11D,'+')
title('Corrélation entre profondeur Litto3D et celle estimée')
xlabel('Profondeur estimée (Lee) (m)')
ylabel('Profondeur Litto3D (m)')
axis([0 25 0 15])
subplot(1,2,2)
plot(Profondeur1D,Estimation21D,'+')
title('Corrélation entre profondeur Litto3D et celle estimée')
xlabel('Profondeur estimée (atténuation) (m)')
ylabel('Profondeur Litto3D (m)')
axis([0 25 0 25])

print -dpng Correlations_bathymetriques

```

## Table des illustrations

Figure 1 : Les 4 pôles du LIS .....	4
Figure 2 : Caméra hyperspectrale (Source : wikimedia.org (Arbeck)) .....	5
Figure 3 : Image hyperspectrale.....	5
Figure 4 : Grandeurs physiques déterminant la résolution spatiale. (A : angle sommet correspondant à l'angle solide d'un détecteur, B : pas d'échantillonnage, C : altitude du couple capteur/plateforme) .....	6
Figure 5 : La plage Notre Dame de Porquerolles (Source : Google Earth) .....	7
Figure 6 : La posidonie océanique (Source : futura-sciences.com).....	7
Figure 7 : La Caulerpa Taxifolia (Source : dinosoria.com) .....	8
Figure 8 : Algue photophile (Source : inpn.mnhn.fr) .....	8
Figure 9 : Polygone (PQ02) lever et lignes de vol accomplies.....	9
Figure 10 : Mosaïque .....	9
Figure 11 : Bathymétrie Litto3D (2015) pour la zone étudiée .....	10
Figure 12 : Mosaïque des images sous-marines .....	10
Figure 13 : Extrait de la mosaïque sous-marines (image 24) .....	10
Figure 16 : Stations de mesures in situ .....	11
Figure 17 : Régression linéaire entre bande visible et proche infrarouge (Source : Hedley and al. (2004)) .....	12
Figure 18 : Bande infrarouge .....	13
Figure 19 : Zone d'intérêt.....	13
Figure 20 : Correction des effets spéculaires.....	13
Figure 21 : Paramètres mis en jeu pour le rayonnement réfléchi. ....	13
Figure 22 : Inversion du modèle de Lee et traitement global des images.....	15
Figure 23 : Rotation spectrale pour l'estimation de la bathymétrie (Source : Audrey Minghelli and Cécile Dupouy) .....	17
Figure 24 : Image hyperspectrale corrigé de l'atténuation de la colonne d'eau .....	17
Figure 25 : Points d'échantillonnage centraux.....	18
Figure 26 : Résumé de la méthode d'échantillonnage des images sous-marines .....	21
Figure 27 : Schématisation de la méthode Pixel Aggregate avec à gauche l'image à redimensionner, au centre la taille recherchée et à droite la superposition des deux (Source : harrisgeospatial.com) .....	22
Figure 28 : Composition de la colonne d'eau estimées par l'inversion du modèle de Lee (CHL : chlorophylle, MES : matières minérales en suspension, CDOM : matières organiques dissoutes colorées) .....	22
Figure 29 : Points de comparaison. Pour chaque repère un ensemble de pixels voisins est sélectionné et une moyenne effectuée. Cette technique vise à réduire l'impact de pixels sous-estimés ou surestimés. ....	23
Figure 30 : Corrélations entre mesures in situ et estimées pour la composition de la colonne d'eau .....	23
Figure 31 : Comparaison entre bathymétries estimées et bathymétrie Litto3D .....	24
Figure 32 : Corrélations entre images bathymétriques estimées et celle du Litto3D .....	24
Figure 33 : La proportion des fonds résultant de l'inversion du modèle de Lee .....	25
Figure 34 : Profils des fonds obtenus par l'inversion du modèle de Lee et avec les images sous-marines.....	25
Figure 35 : Cartographies réalisées aux moyens des classifications supervisées (équation 11) et (équation 12) avec les spectres de réflectance directement échantillonnés sur l'image corrigée de l'atténuation .....	26
Figure 36 : Cartographie par décomposition des pixels mixtes.....	26
Figure 37 : Profil des fonds sur la cartographie des pixels mixtes et sur les images sous-marines.....	27
Figure 38 : Les cartographies où la suppression du bruit est bien perceptible pour une résolution de 2 m .....	27
Figure 39 : Profils des fonds obtenus par l'inversion du modèle du Lee pour une résolution de 2 m et sur les images sous-marines.....	28
Figure 40 : Comparaison de la cartographie des fonds réalisée en 2017 avec celle réalisée en 2000 .....	28

## Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur hyperspectral mis en œuvre .....	9
Tableau 2 : Tableau des unités.....	32