De l'hyperspectral aux paysages sous-marins :

SWIM® et apports du programme REFCAR dans l'Océan Indien

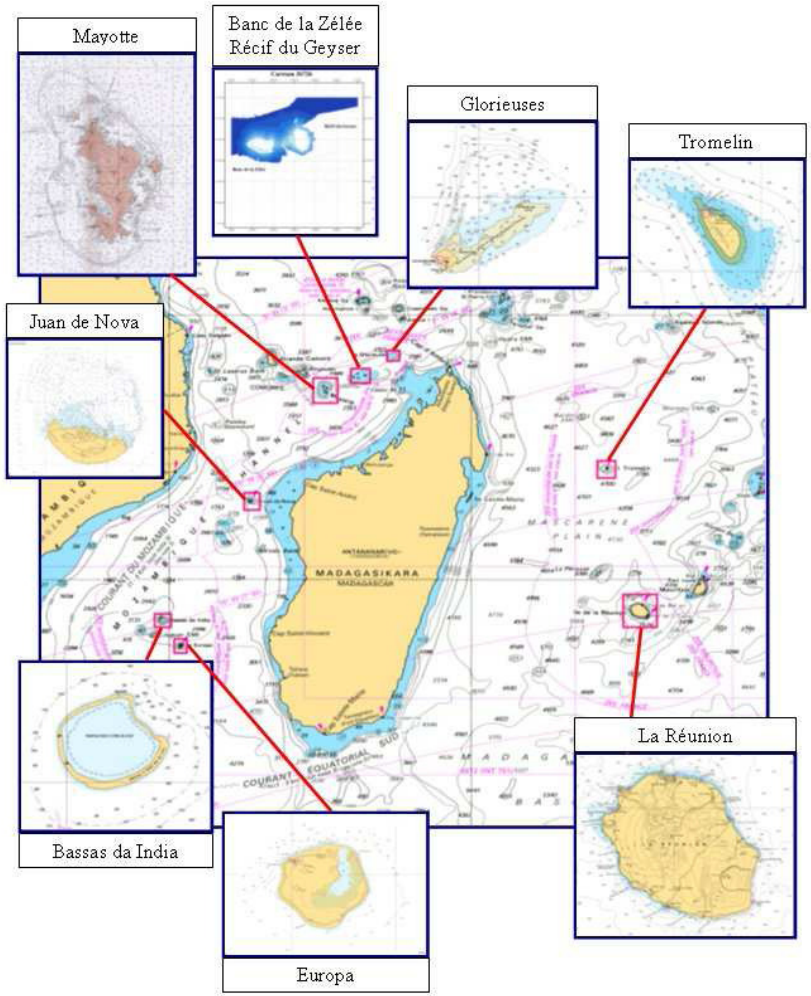
Marc LENNON, Guillaume SICOT, Nicolas THOMAS, Sébastien SMET,

David CORMAN, Olivier MUSARD, Pierre WATREMEZ, François GAUTHIEZ

marc.lennon@actimar.fr
02 98 44 29 63

ACTIMAR – 36, quai de la Douane – F 29200 Brest - +33 (0)298 44 24 51
www.actimar.fr

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien



Agence des aires marines protégées

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFECTURE DE LA RÉUNION

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
TERRES AUSTRALES
ET ANTARCTIQUES FRANÇAISES

Programme d'acquisition de données aéroportées Lidar bathymétrique et hyperspectrales sur l'ensemble des zones littorales françaises de l'Océan Indien

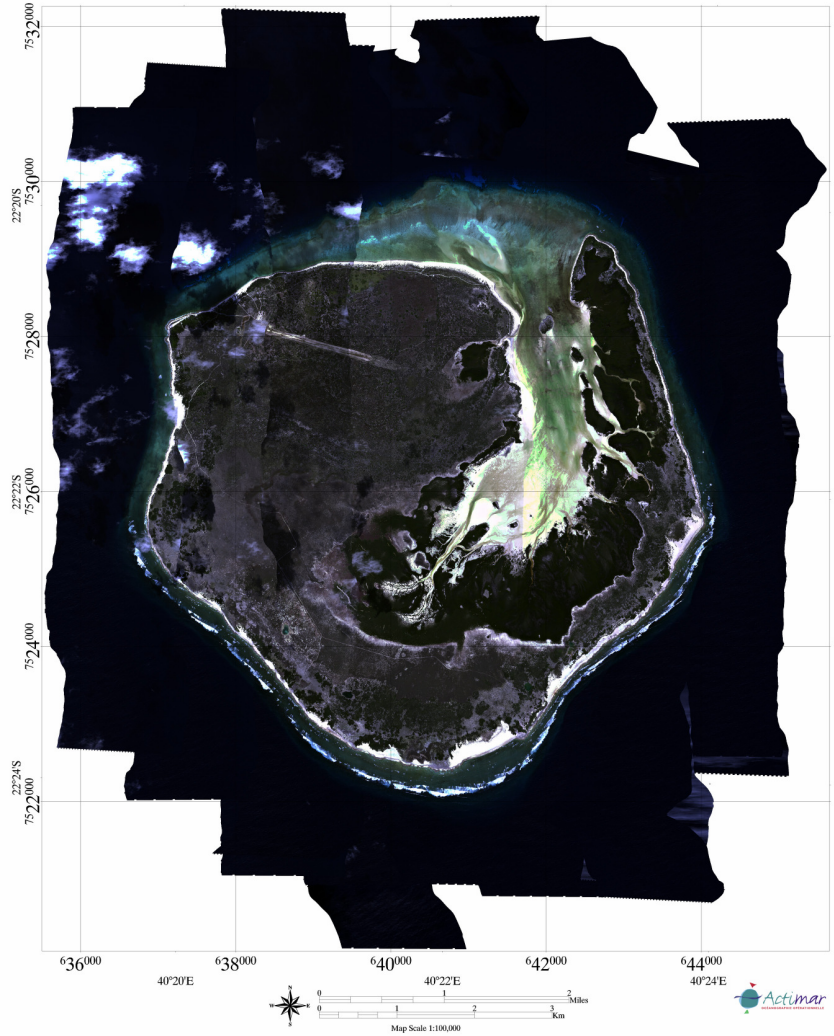
2009-2010

Réalisation : BLOM / ACTIMAR

BLOM
IMAGING THE WORLD

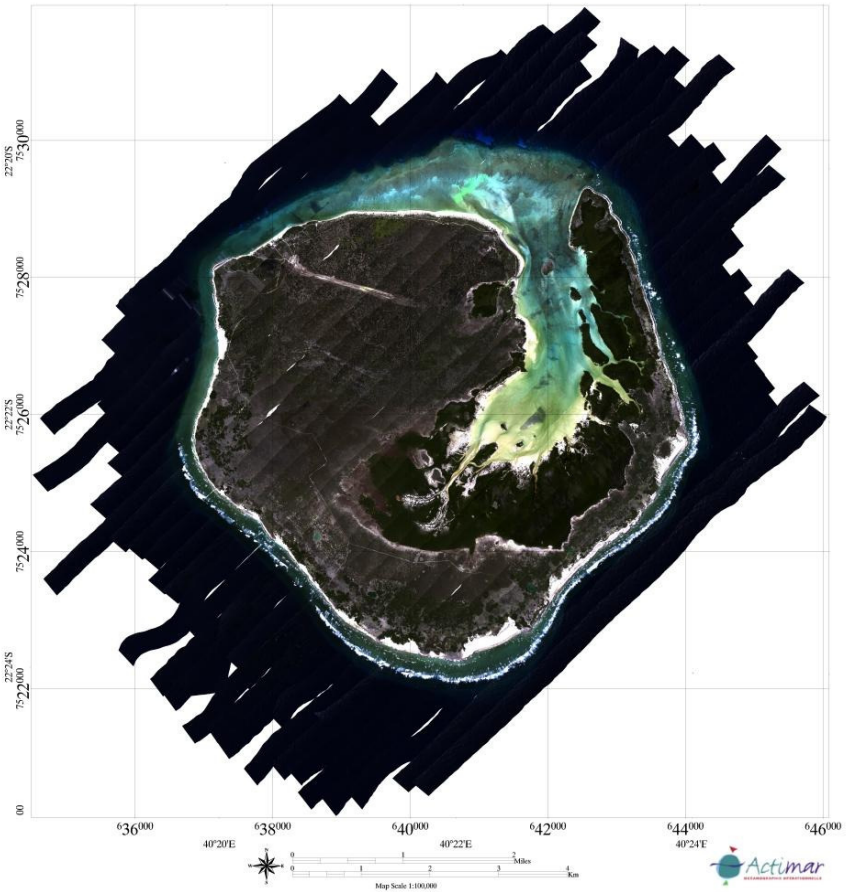
CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

Acquisitions hyperspectrales sur Europa



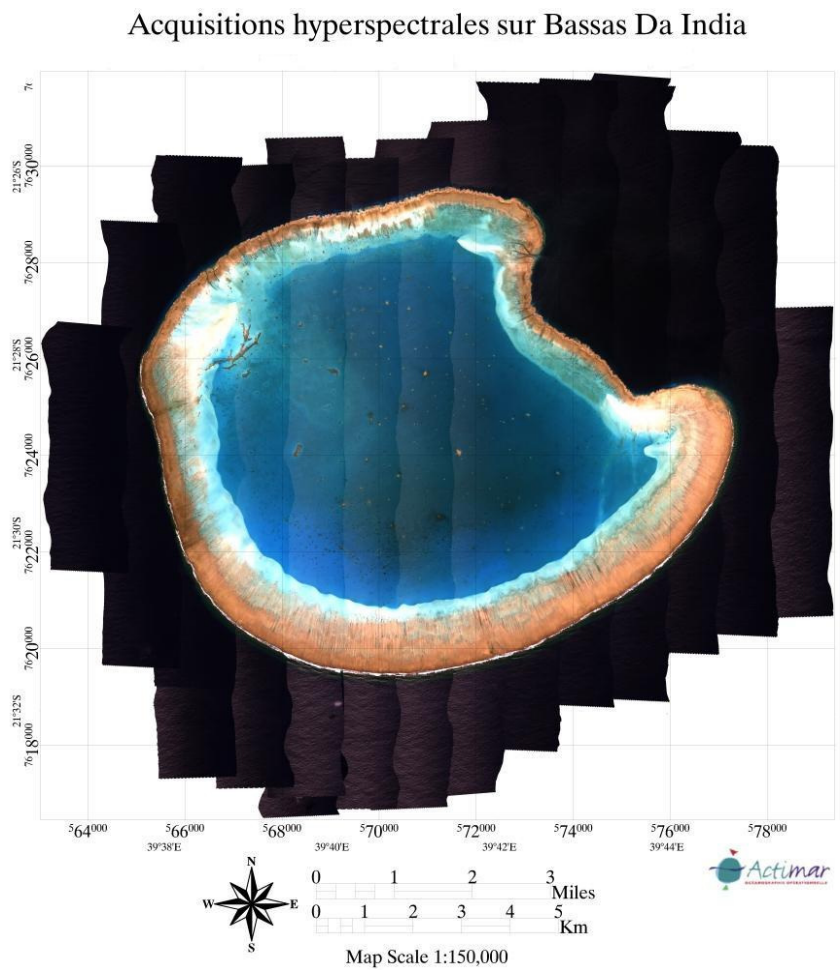
Acquisition optimisée Hyperspectral

Acquisitions hyperspectrales sur Europa

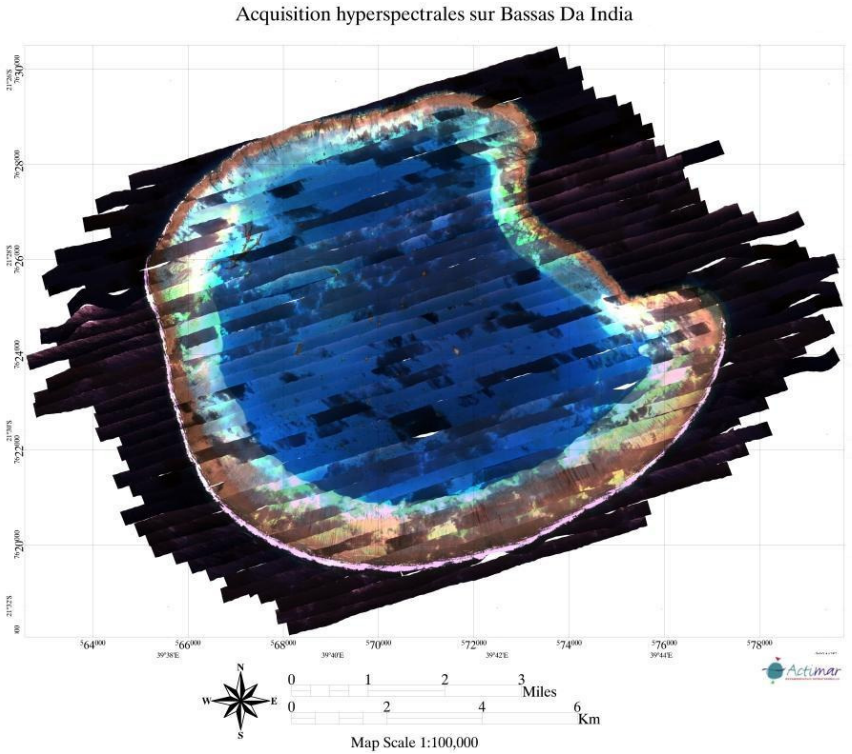


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

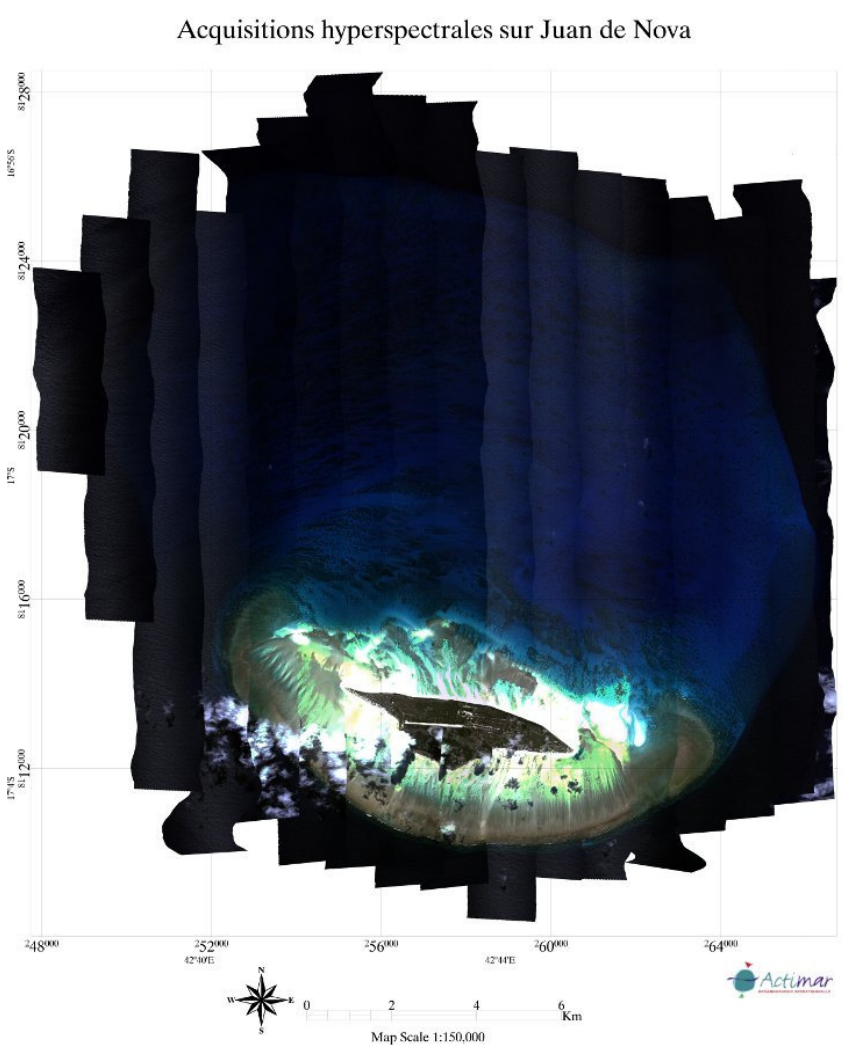


Acquisition optimisée Hyperspectral

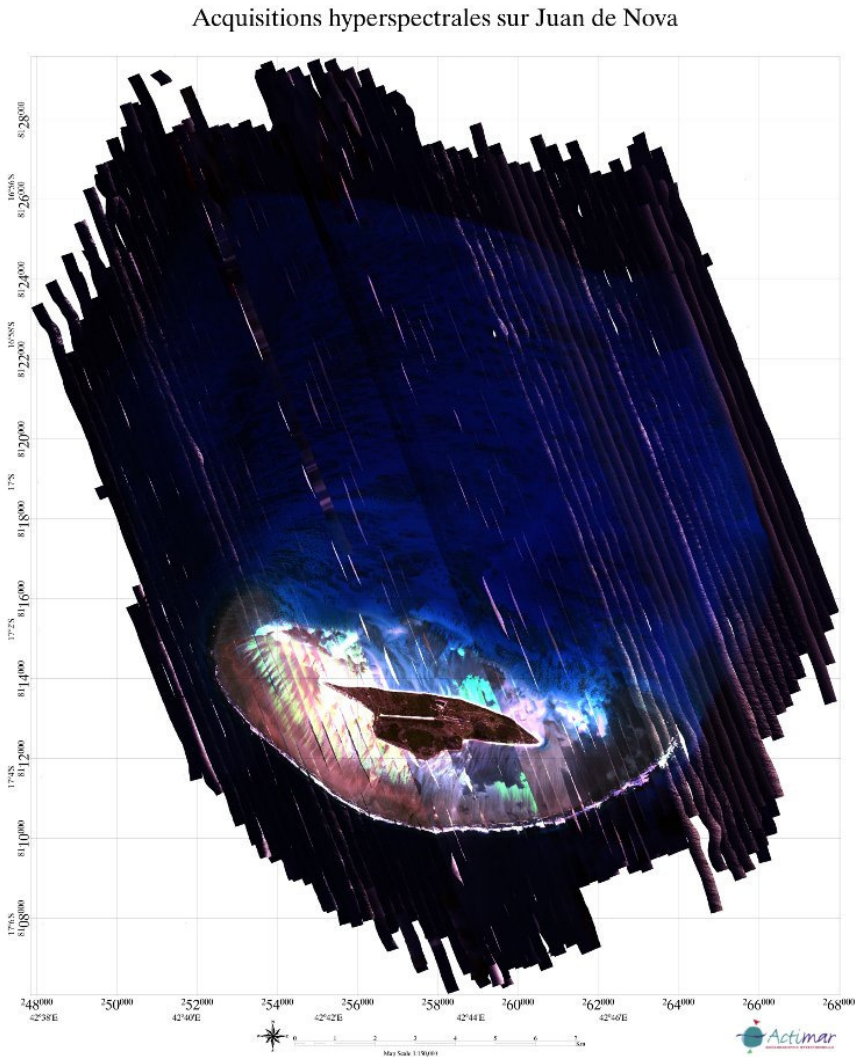


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

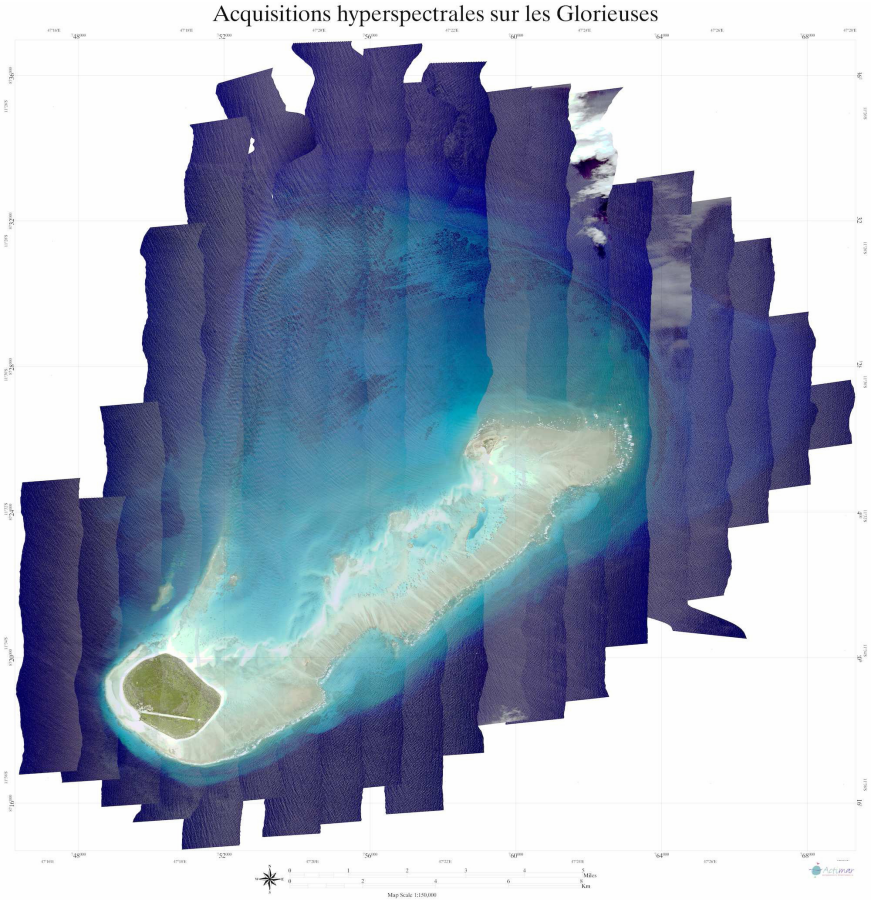


Acquisition optimisée Hyperspectral

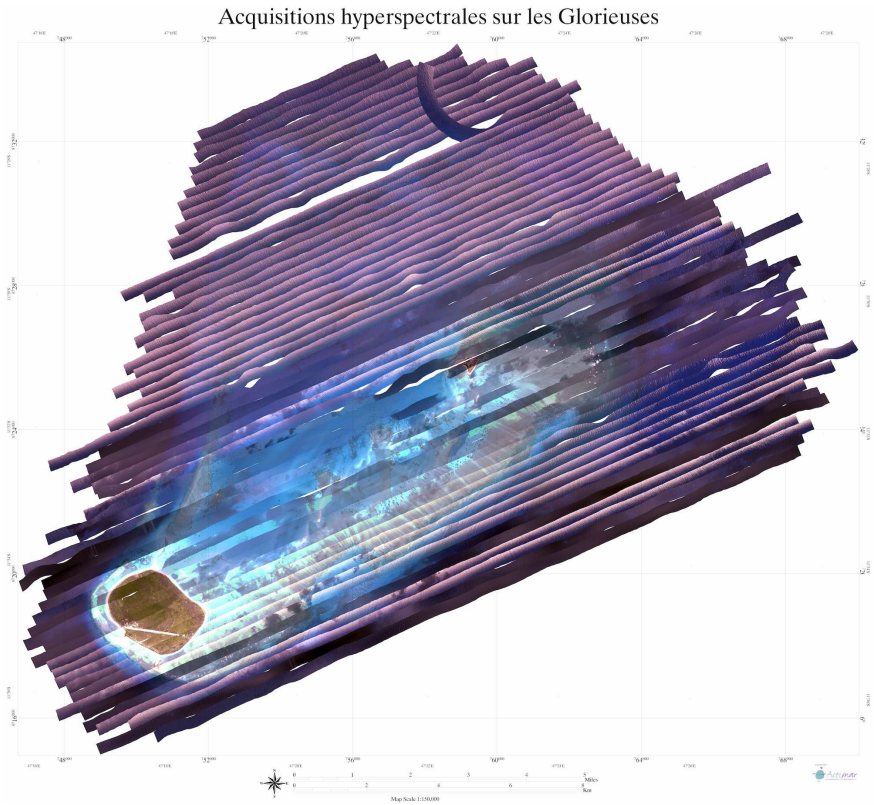


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

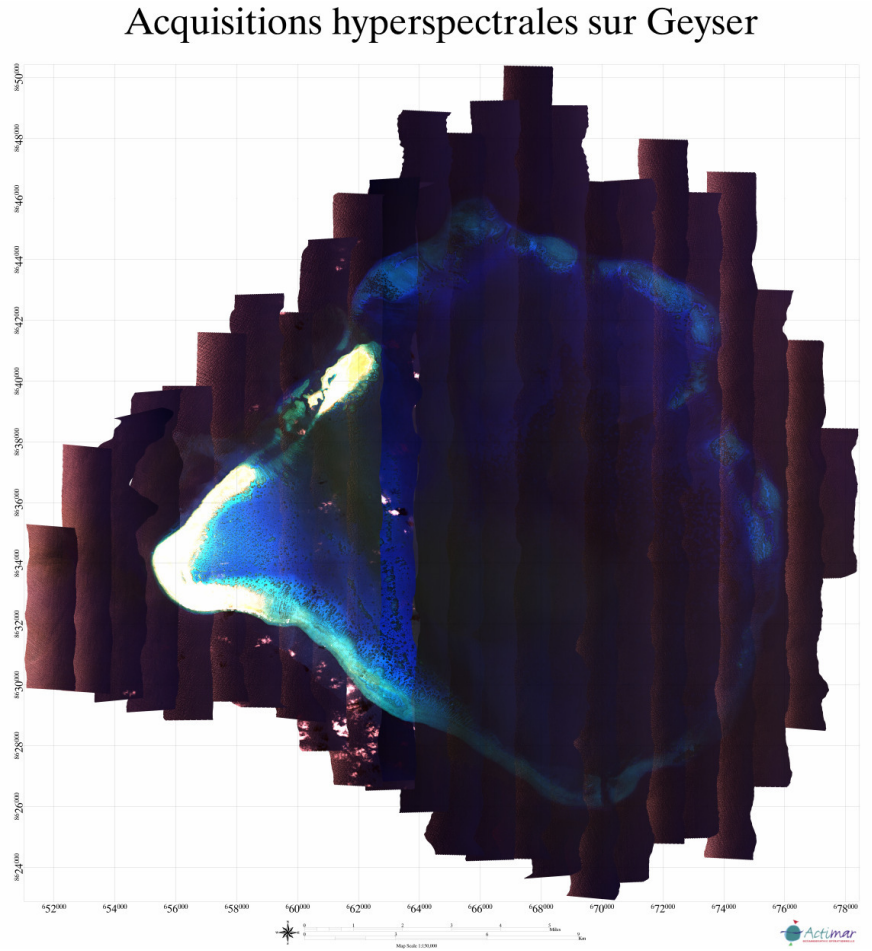


Acquisition optimisée Hyperspectral

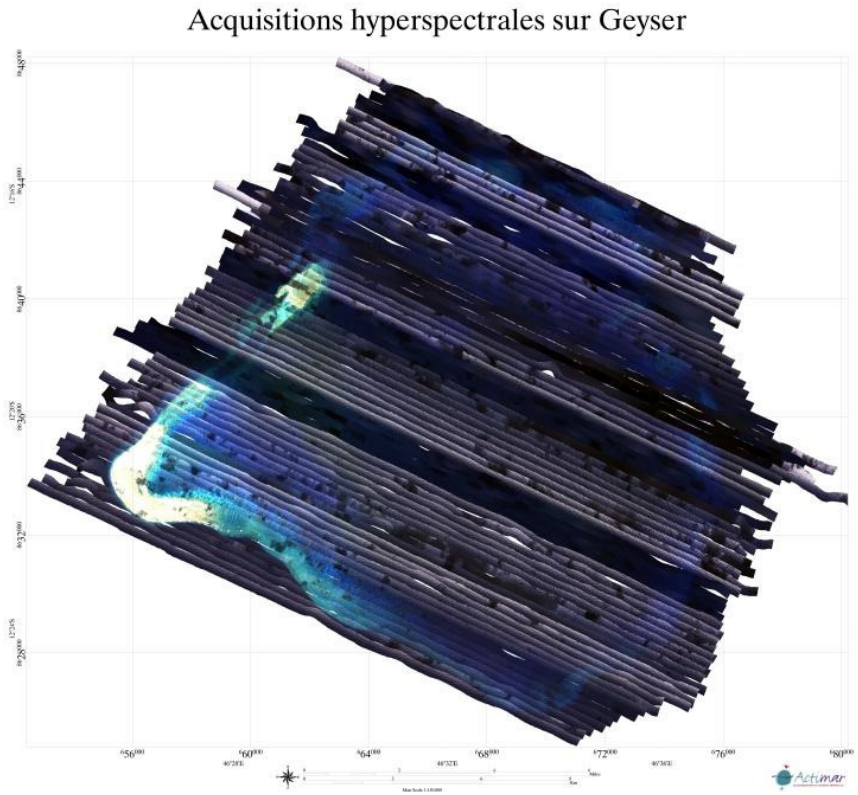


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

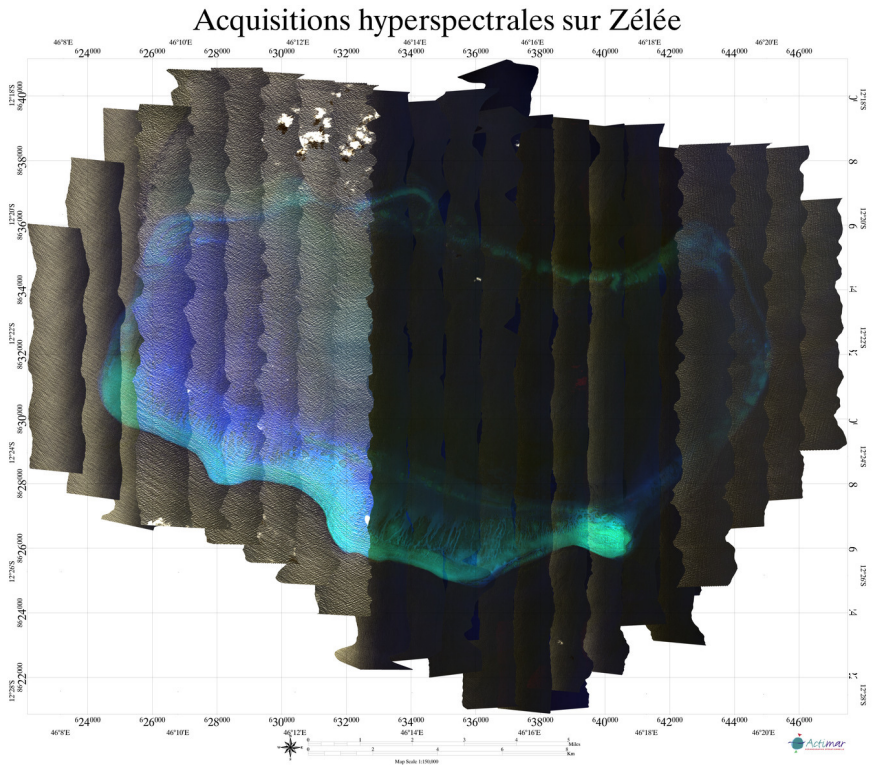


Acquisition optimisée Hyperspectral

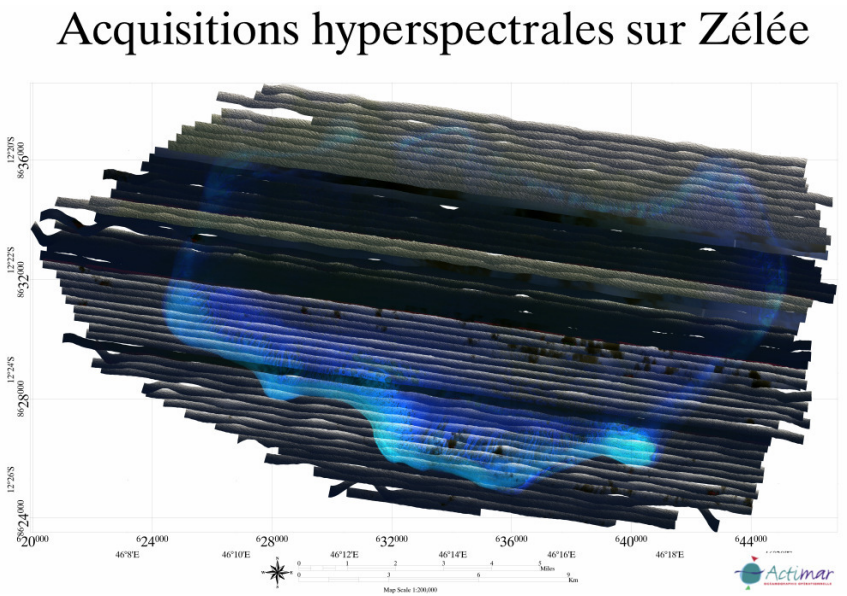


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

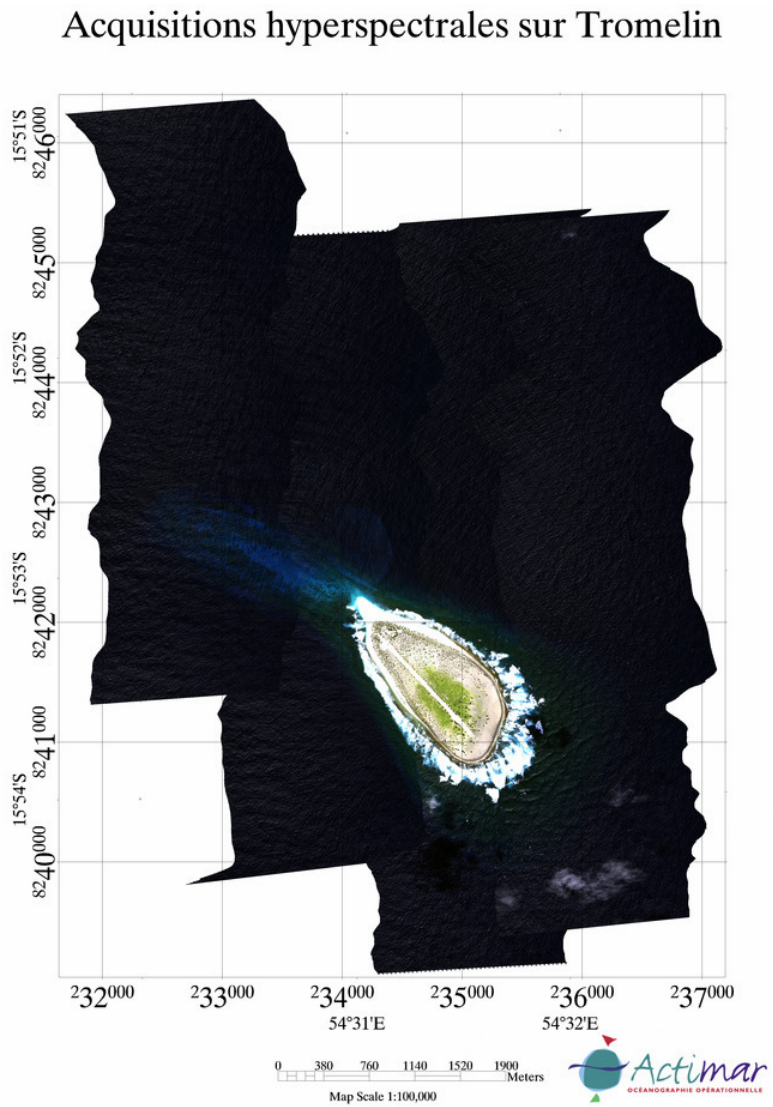


Acquisition optimisée Hyperspectral

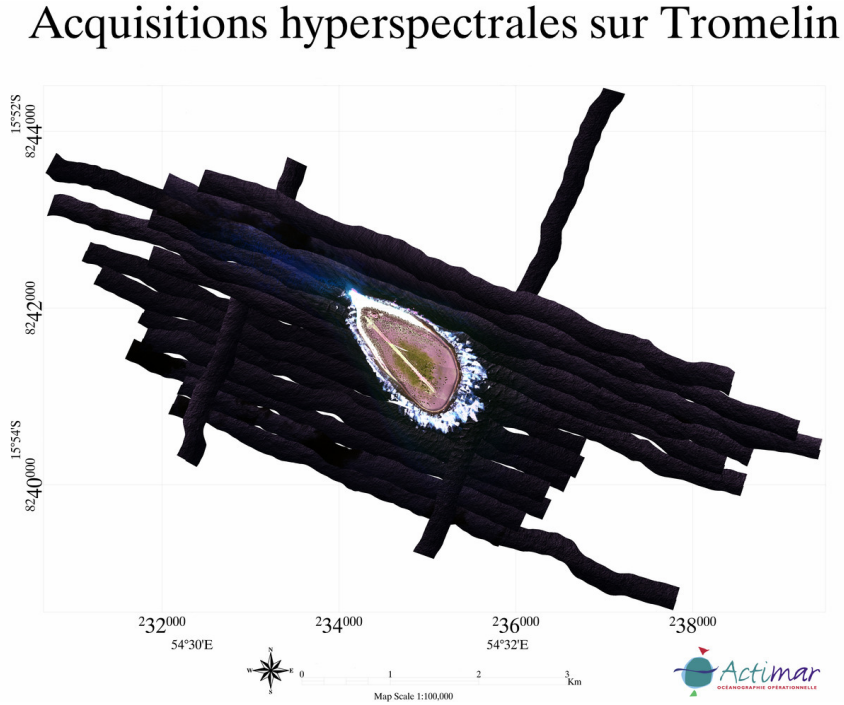


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

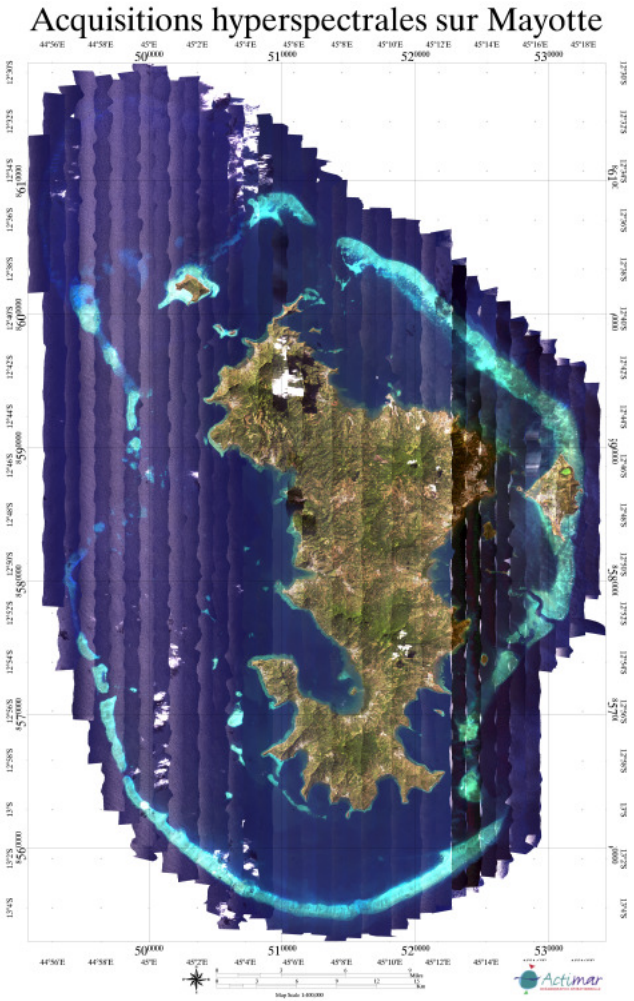


Acquisition optimisée Hyperspectral

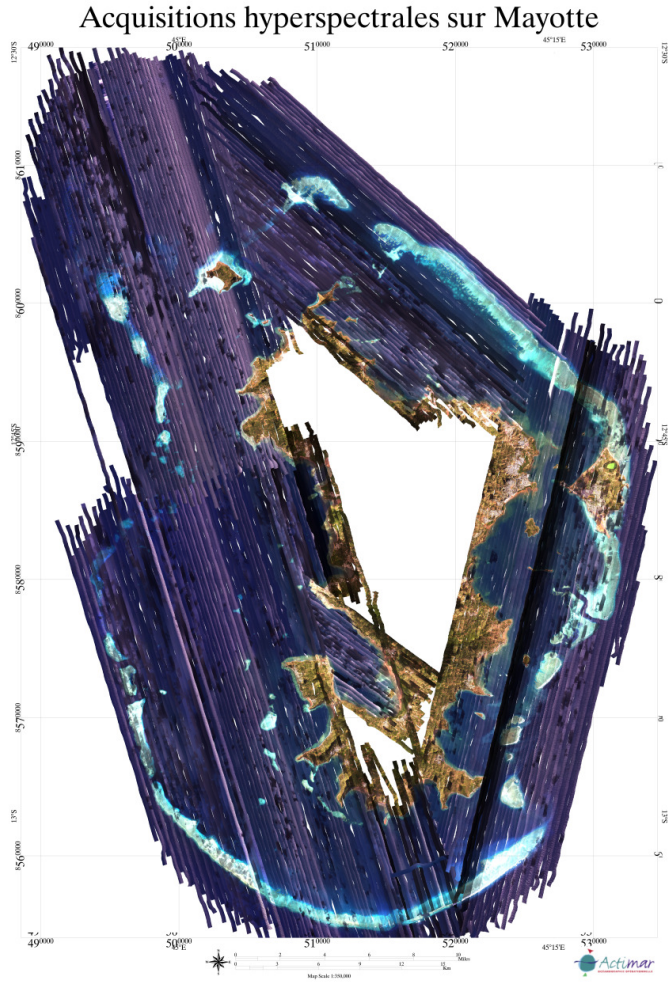


Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

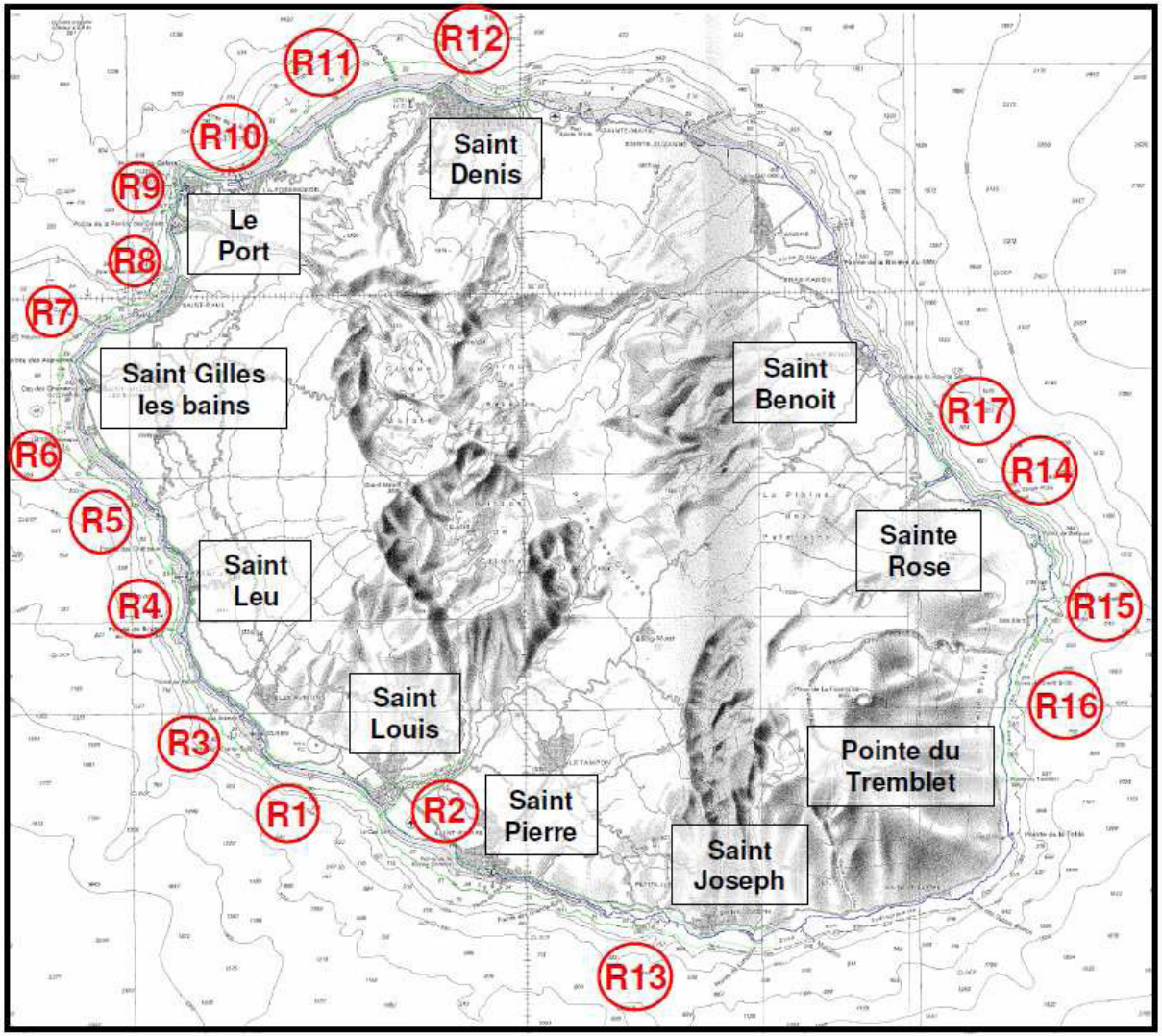


Acquisition optimisée Hyperspectral



Acquisition Hyperspectral / Lidar

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

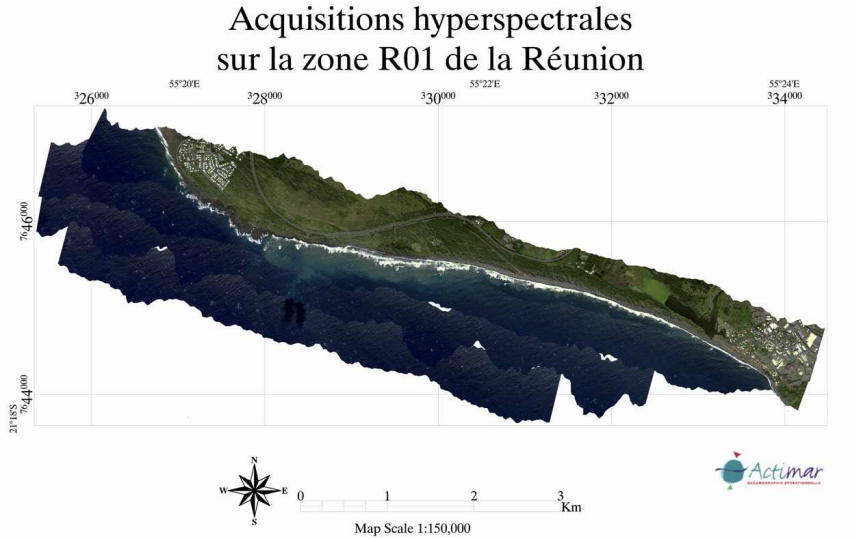


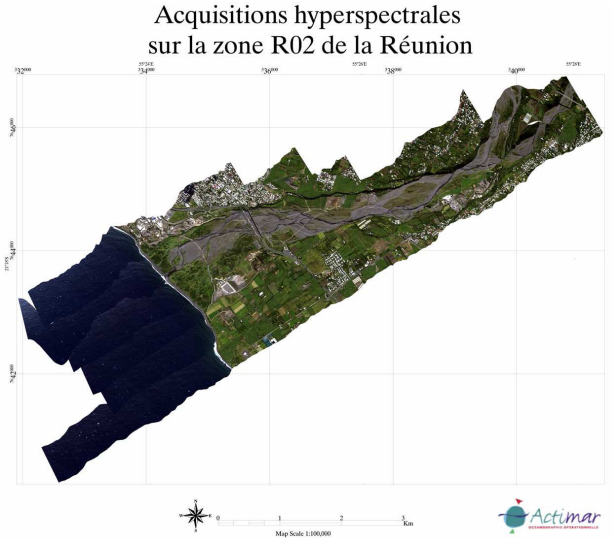
La Réunion

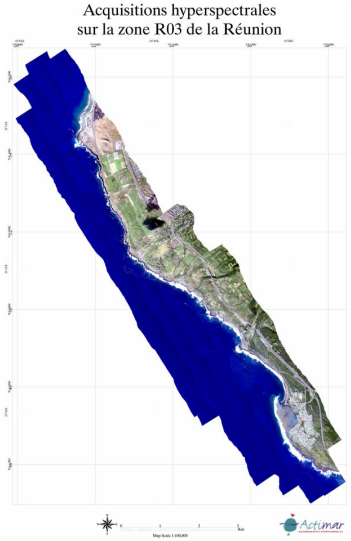
Hyperspectral flights

Id Zone	BLOM Block	Number of lines	Altitude [feets]	Approx. duration
R1	13	4	3450	25min
R2	13	6	3450	35min
R3	14	6	3450	45min
R4	15	4	3450	20min
R5	15	6	3450	45min
R6	16	8	3450	45min
R7	16	4	3450	30min
R8	1	4	8530	25min
R9	2	2	8530	10min
R10	3	2	8530	10min
R11	4	4	8530	25min
R12	5	4	8530	25min
R13	12-13	4	8530	50min
R14	8	2	8530	30min
R15	9	2	8530	15min
R16	10	2	8530	30min
R17	8	2	8530	15min

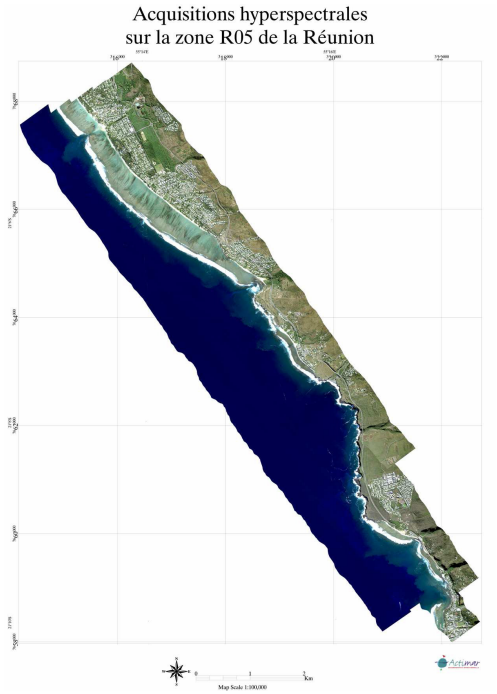
CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

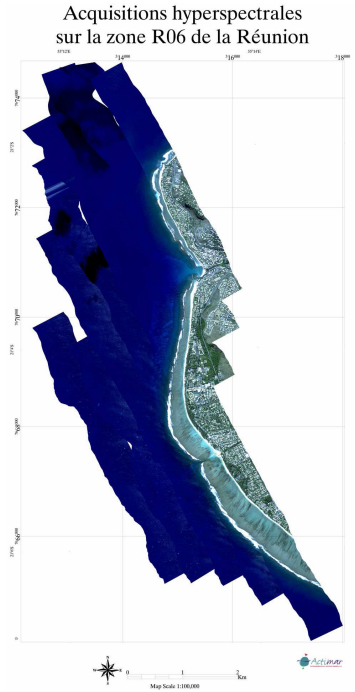


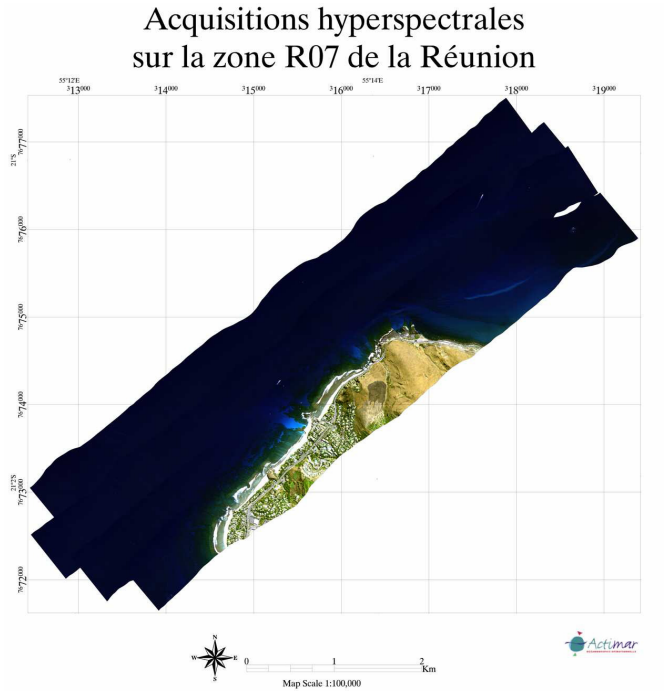




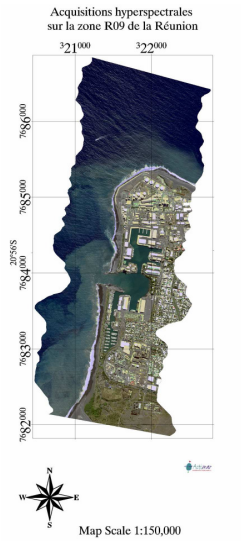
CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

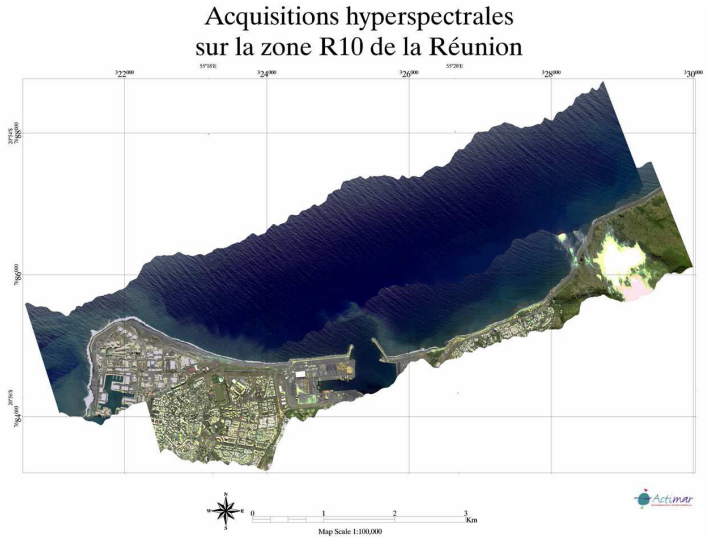


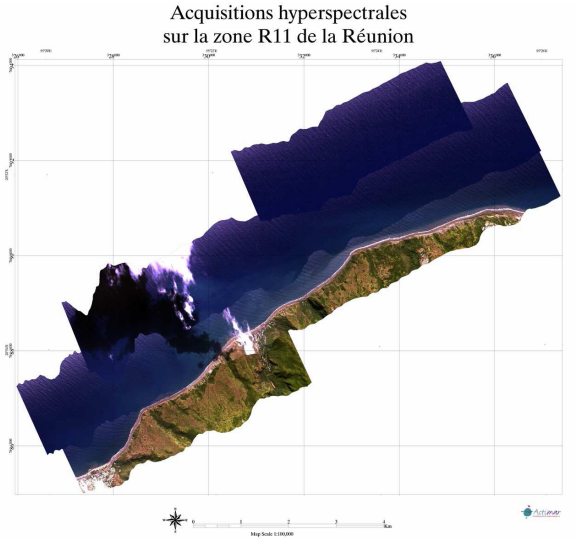




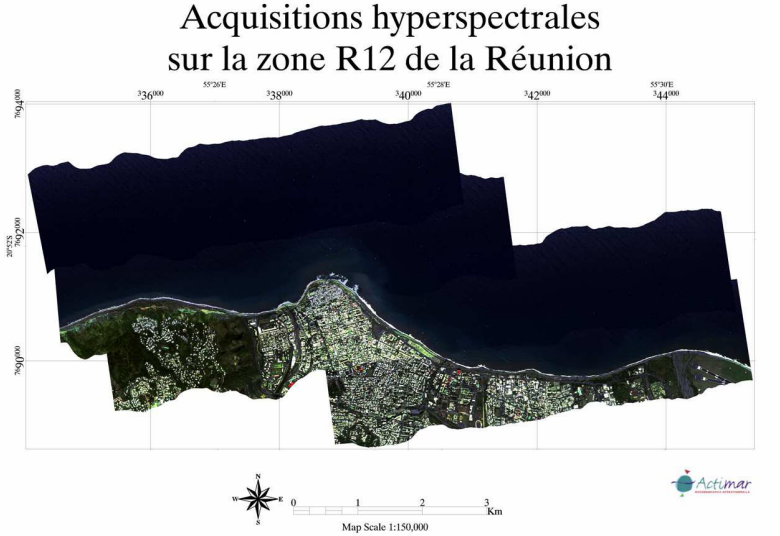
CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

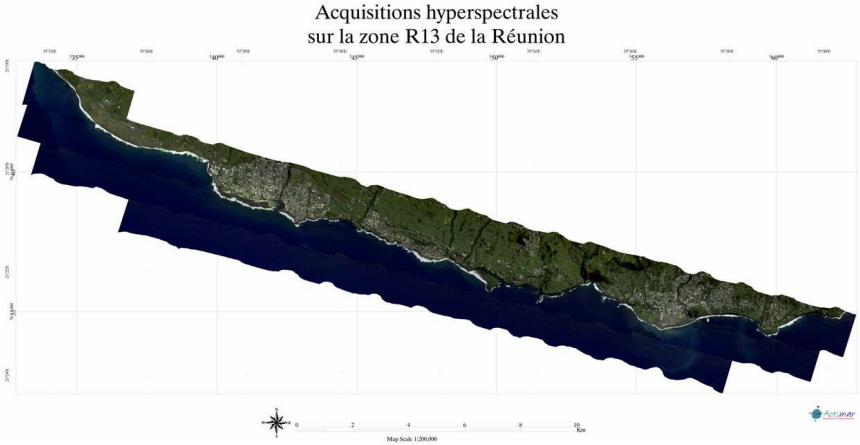


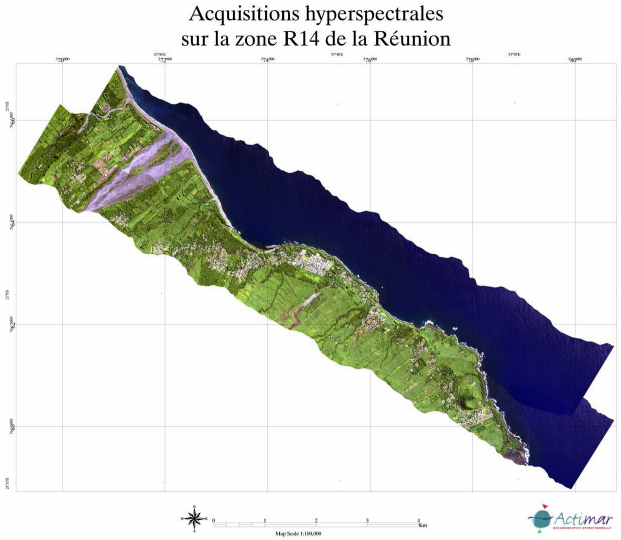


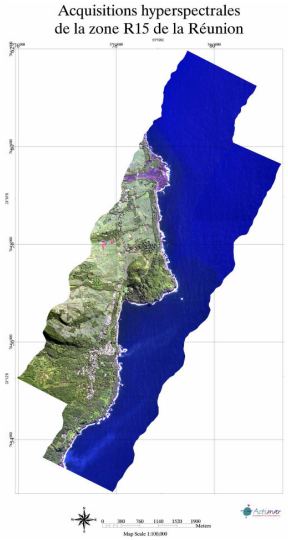


CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien



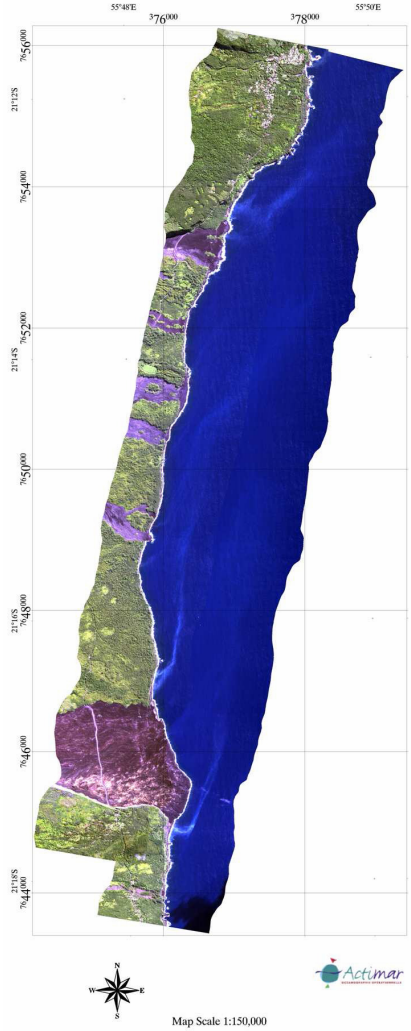






CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

Acquisitions hyperspectrales
sur la zone R16 de la Réunion

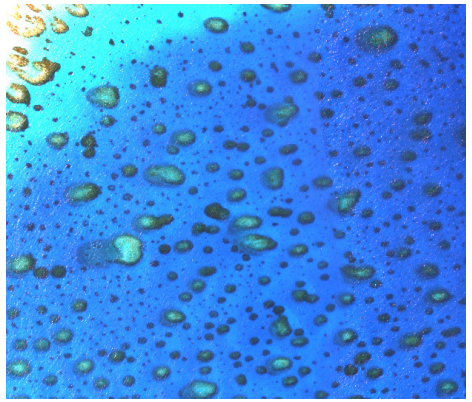


Acquisitions hyperspectrales
sur la zone R17 de la Réunion

CONTEXTE : LITTO3D® Océan Indien

~ 6 mois de campagne
~ 500 heures de vol

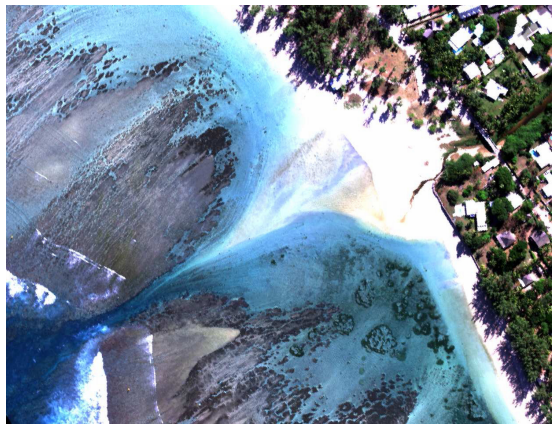
~ 1600 lignes de vol
~ 3500 km² BA + 3500 km² HA

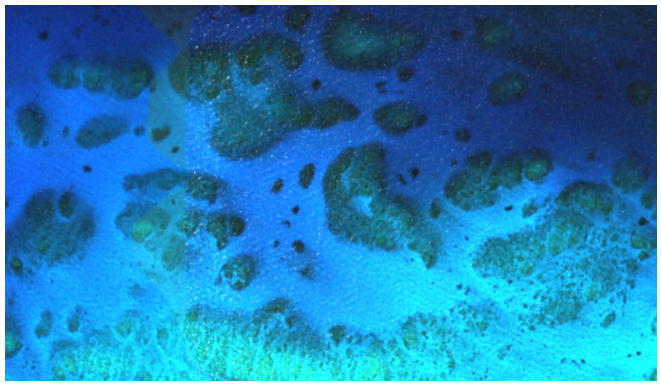


~ 100 To de données

Résolutions 20 cm / 40 cm / 1m / 2m

Configs :
HA : 2m / 160 bandes spectrales 4.5 nm / 400-1000nm (40cm + 1m Réunion)
BA : 40cm / 80 bandes spectrales 7.4 nm / 400-1000nm (20cm Réunion)





SPECTRHABENT (AAMP / IFREMER / DEAL Reunion) :
Cartographie des habitats benthiques subtidaux du pourtour des îles françaises de l'Océan Indien

REFCAR (Convention de partenariat AAMP / ACTIMAR)
Valorisation des données hyperspectrales (et lidar) pour la gestion des Aires Marines Protégées de l'Océan Indien (Parcs Marins, réserves marines naturelles)

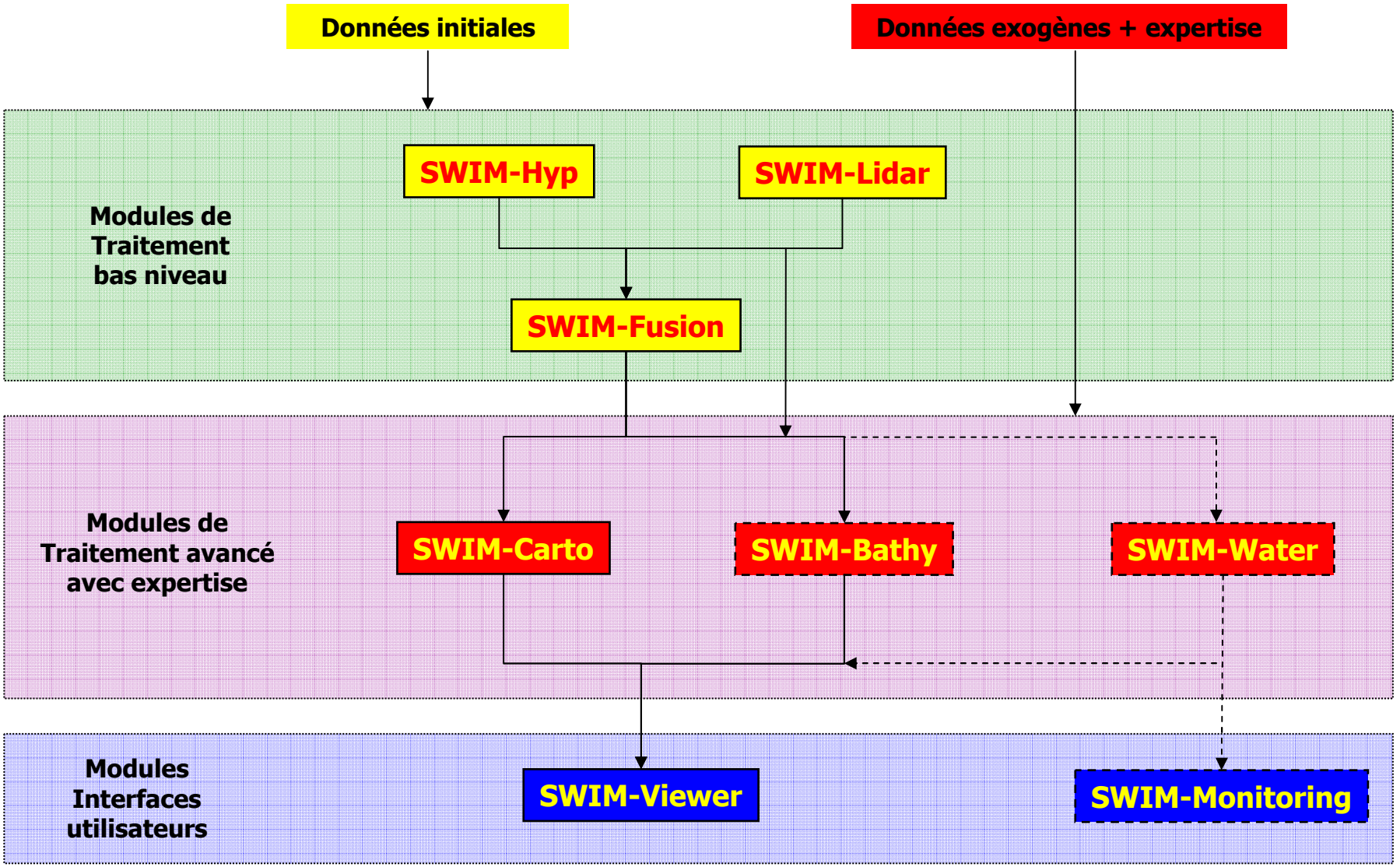
REFCAR (2012-2014) :
- **Développement d'une méthode d'inversion de modèle de transfert radiatif dans la colonne d'eau pour estimation de la réflectance du fond**
- **Production des couches d'informations Rfond sur l'ensemble des données Litto3D-OI**

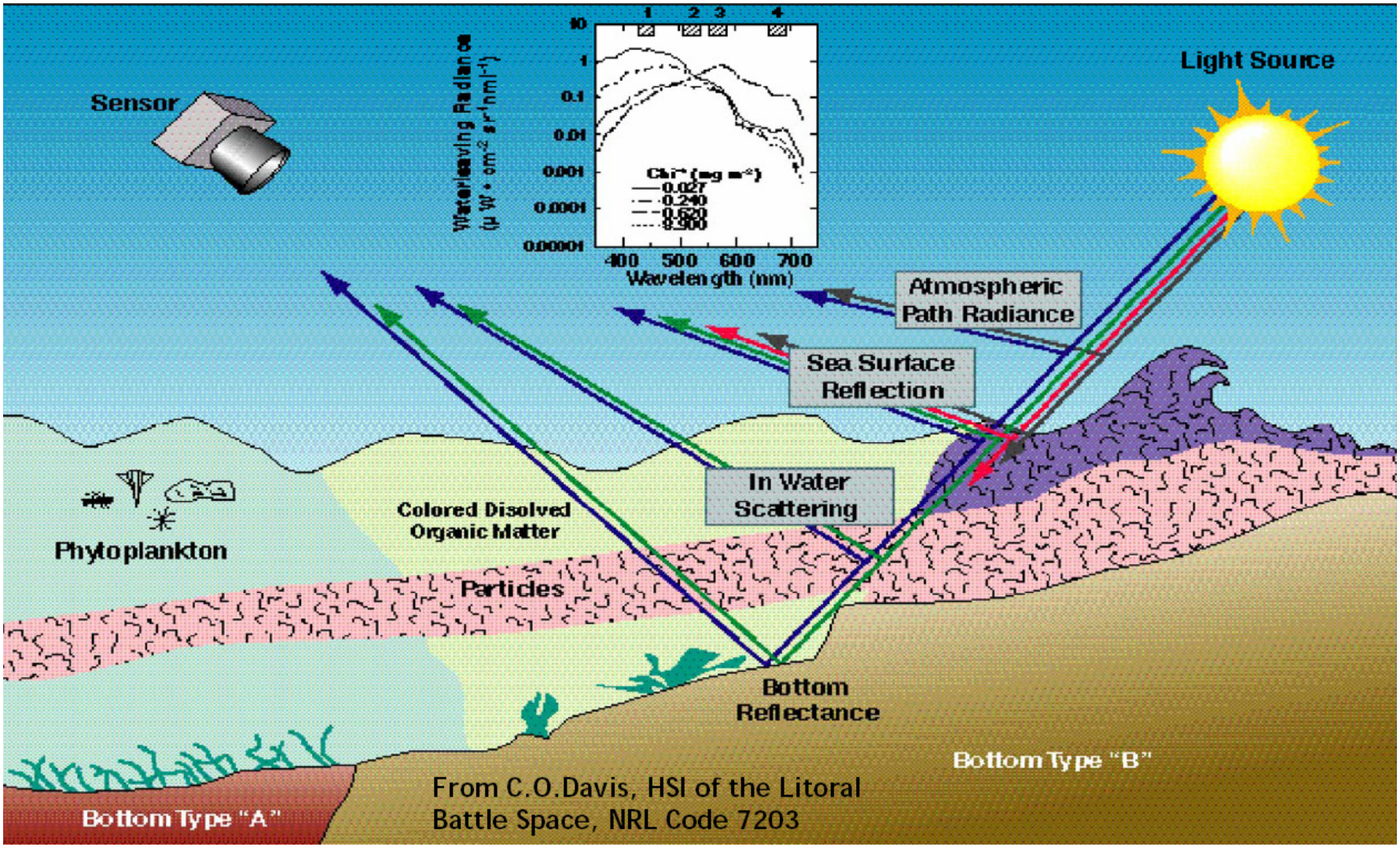
REFCAR-CARTO (2014-2015) :
- **Développement d'une méthode de classification hiérarchique pour cartographie des habitats**
- **Production des cartes d'habitats sur l'ensemble des données Litto3D-OI**

SWIM : Intégration des briques développées dans REFCAR dans un outil à visée opérationnelle

Shallow Water mappIng using optical reMote sensor(s)

ARCHITECTURE DE SWIM

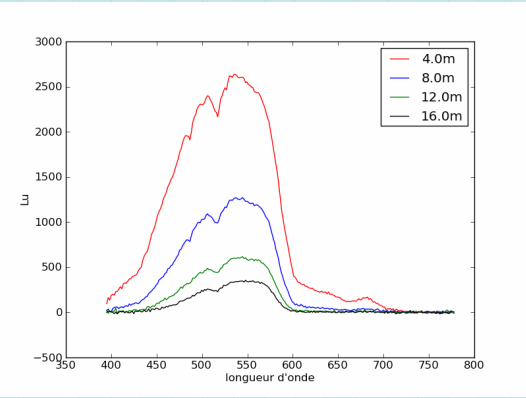



Sensor
Waterleaving Radiance
1
2
3
4
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
0.00001
Chl (mg m⁻³)
0.027
0.240
0.620
2.900
400
500
600
700
Wavelength (nm)
Light Source
Atmospheric
Path Radiance
Sea Surface
Reflection
In Water
Scattering
Colored Disolved
Organic Matter
Phytoplankton
Particles
Bottom
Reflectance
Bottom Type "B"
Bottom Type "A"
From C.O.Davis, HSI of the Litoral
Battle Space, NRL Code 7203

- **Expression générale du modèle de transfert radiatif**
  - **Réflectance sous la surface de l'eau**

$$R_{rs}^{-} = R_{rs}^{\infty}(1 - A_1 e^{-(K_d + k_{uW})Z}) + A_2 R_{rs}^{B} e^{-(K_d + k_{uB})Z}$$

  - **Avec**
    - R_{rs}^{∞} **réflectance en profondeur infinie**
    - K_d, k_{uW}, k_{uB} **coefficients d'atténuation diffuse**
    - A_1, A_2 **constantes**
    - R_{rs}^{B} **réflectance du fond**
    - Z **hauteur de la colonne d'eau**



CORRECTIONS DE SURFACE: SOURCES DE BRUIT

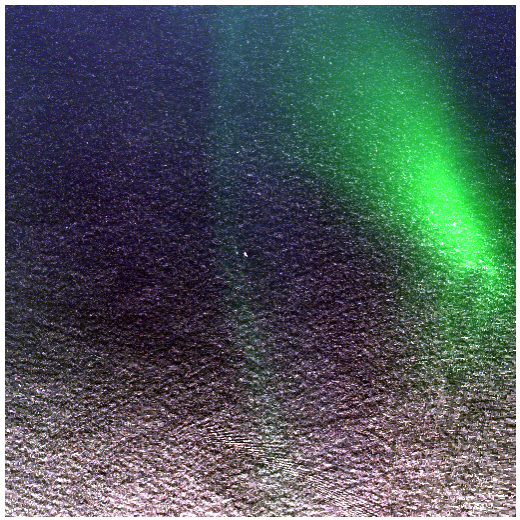
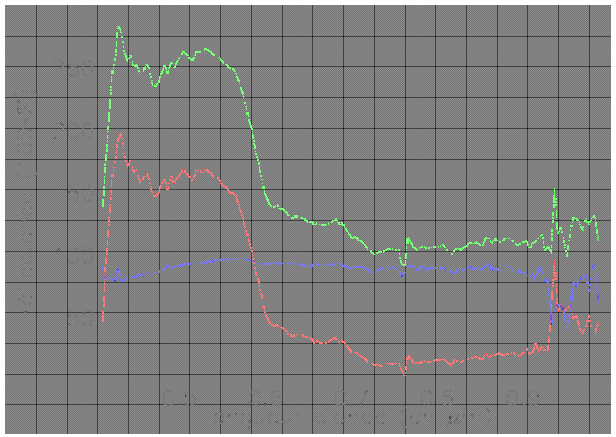


Image en pseudo-vraie couleur avec du sunglint et du skyglint



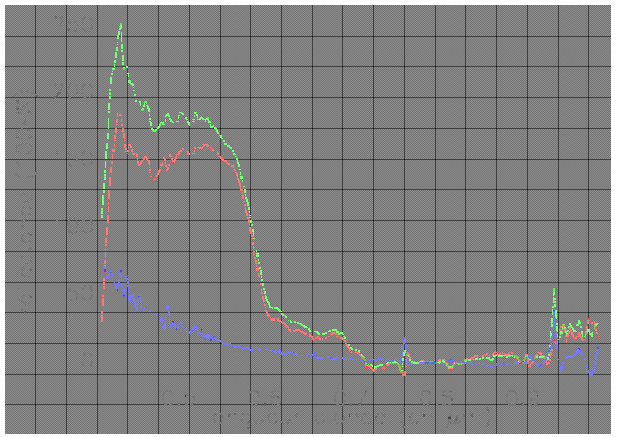
Mise en évidence du sunglint

↓

Spectre blanc

Correction « simple »

Application systématique



Mise en évidence du skyglint

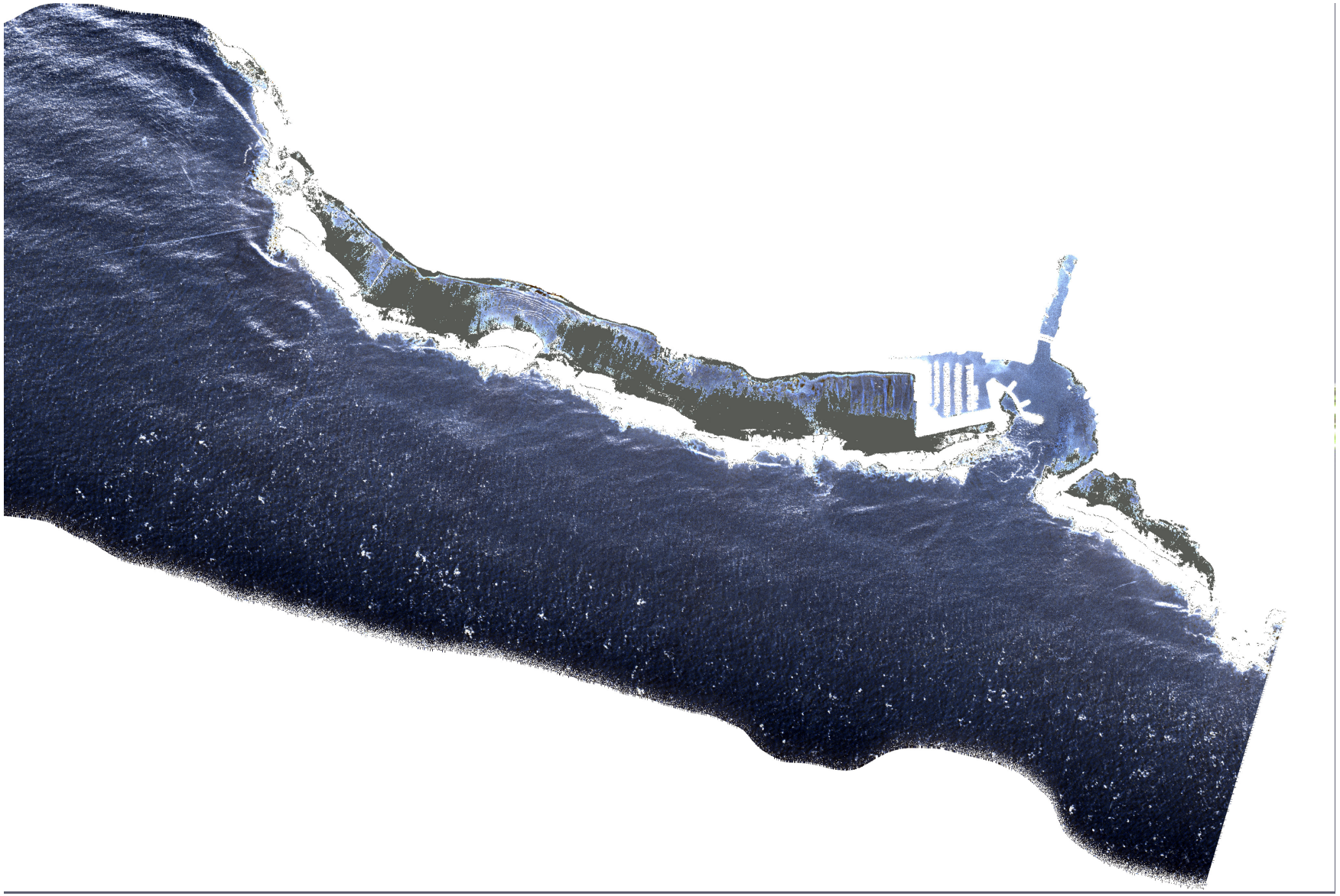
↓

Spectre coloré
λ^{-4} diffusion de rayleigh

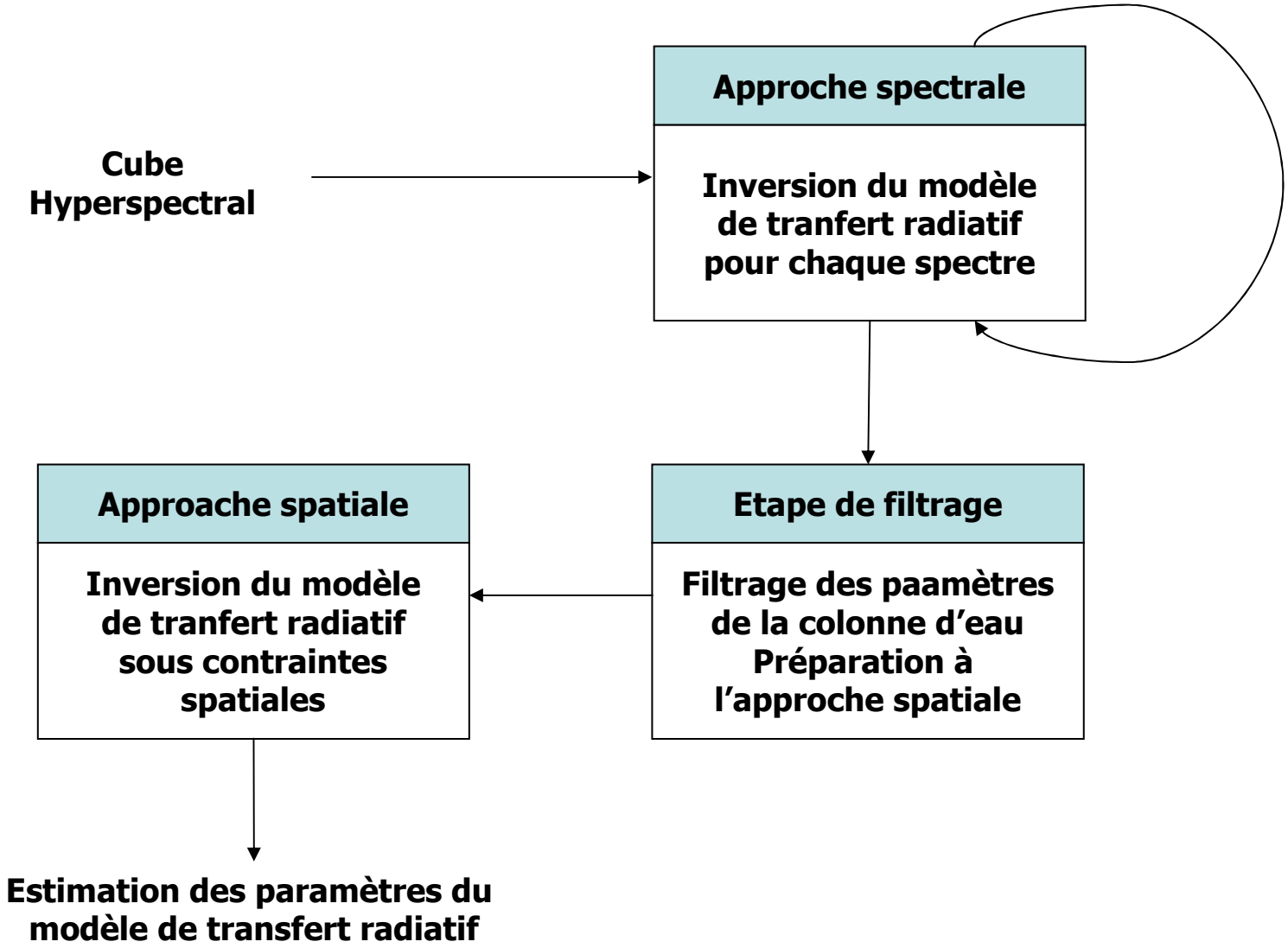
Correction « complexe »

Permet de « voir » + profond
mais parfois difficile à appliquer

CORRECTIONS DE SURFACE : ILLUSTRATION



INVERSION DU MODELE DE TRANSFERT RADIATIF



PRODUITS DE SORTIE SWIM-HYP

1. Paramètres de la colonne d'eau :

- Absorption due aux phytoplanctons
- Absorption due à la matière organique dissoute colorée
- Retrodiffusion due à la matière particulaire en suspension
- Quantité de matière en suspension
- Profondeur de Secchi

2. Hauteur de la colonne d'eau (peut être convertie en bathymetrie avec modèle local de marée)

3. Spectres de réflectance :

- Réflectance du fond estimée,
- Réflectance du fond modelisée,
- Réflectance de surface modélisée,

4. Paramètres de description de caractéristiques spectrales génériques du fond, végétales et minérales :

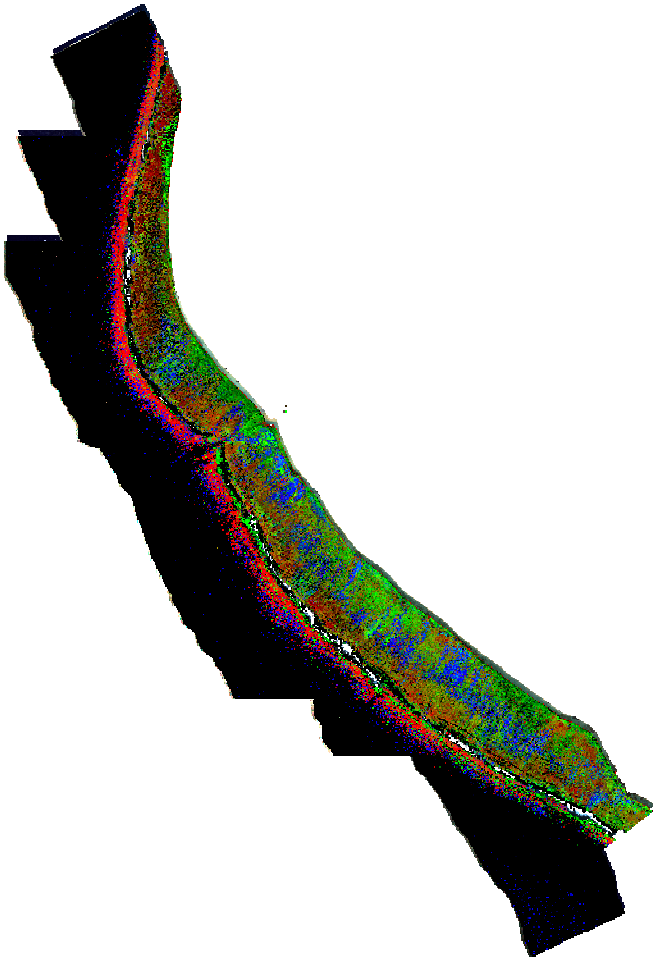
- Pigments verts
- Pigments bruns
- Pigments rouges
- Sable clair
- Sable foncé
- Roche

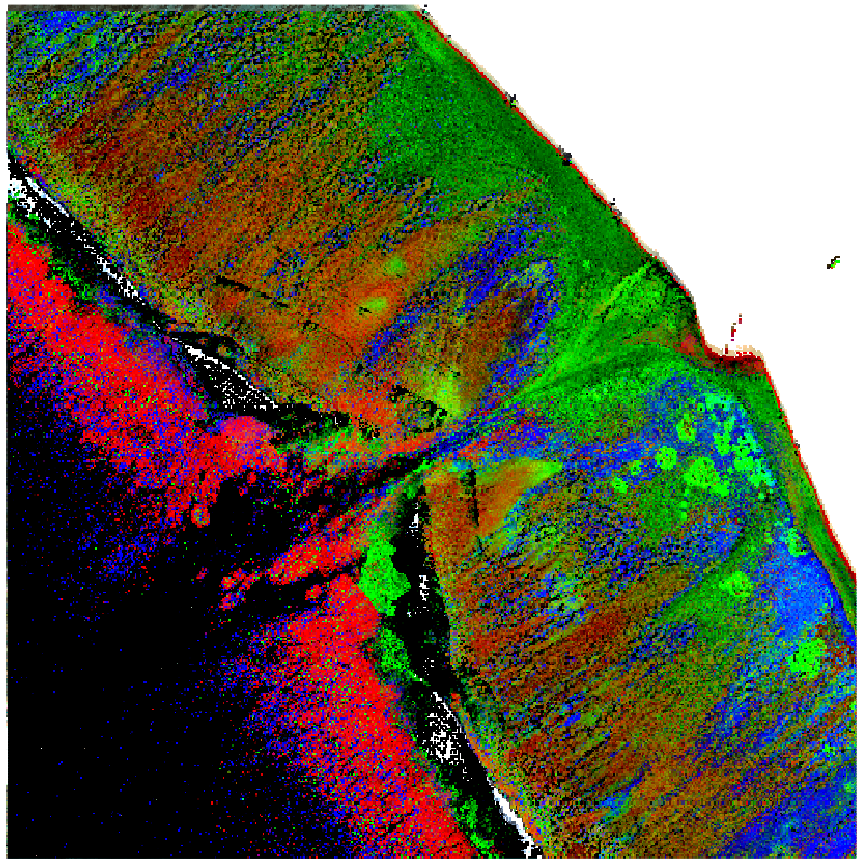
5. Paramètres qualité :

- RSB spectral de la réflectance du fond estimée,
- Pertinence globale de la réflectance du fond estimée,
- Pertinence de la hauteur d'eau estimée (= estimation de la profondeur de Secchi)

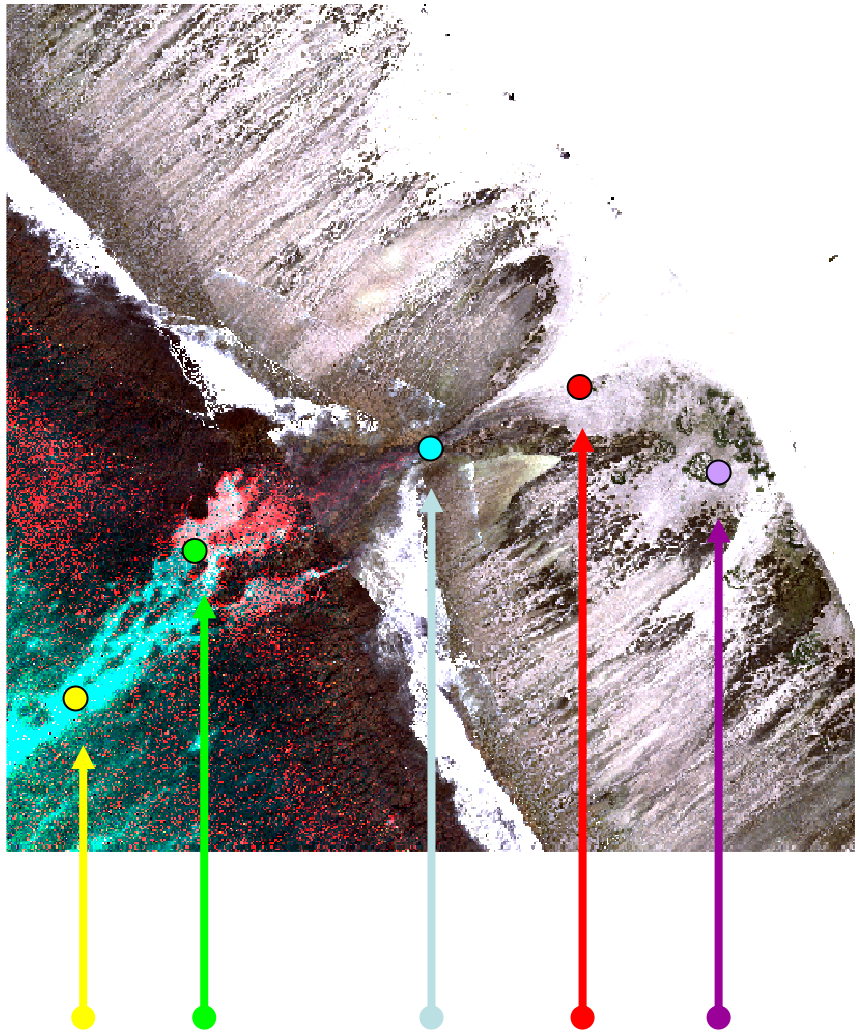
EXEMPLES DE PRODUITS SWIM-HYP: IMAGES

Ile de La Réunion – Réserve Marine Naturelle / Projet REFCAR

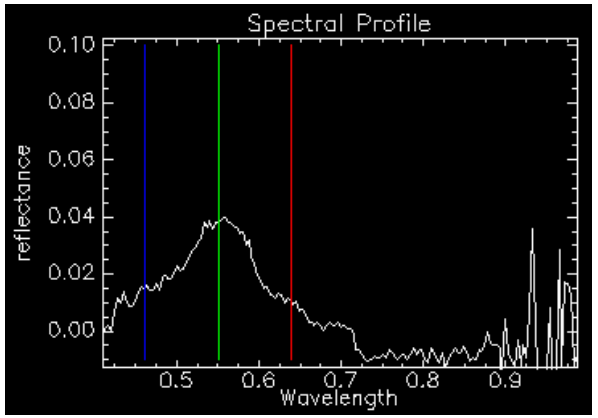




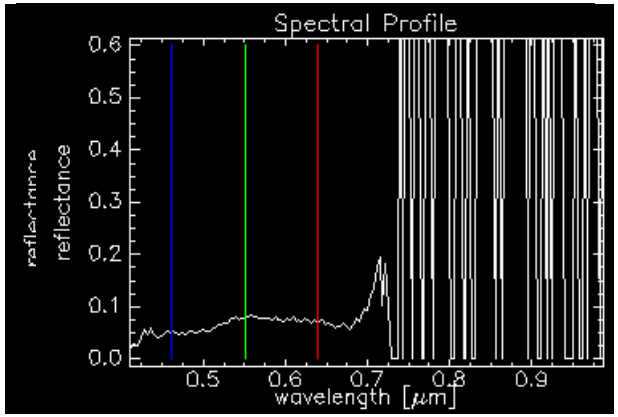
EXEMPLES DE PRODUITS SWIM-HYP: SPECTRES



Point jaune



Spectre intial Réflectance de surface

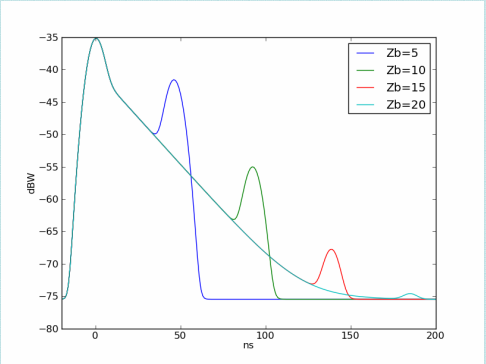


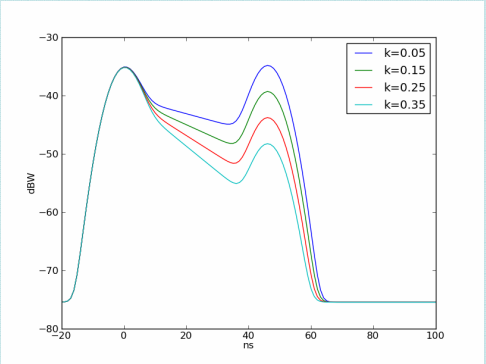
Spectre estimé Réflectance du fond

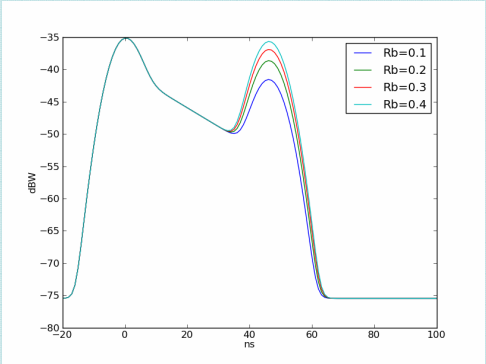
- **Modèle direct**
  - **Expression générale de la puissance reçue au capteur :**

$$P_t(t) = P_s(t) + P_v(t) + P_b(t) + N_s(t)$$

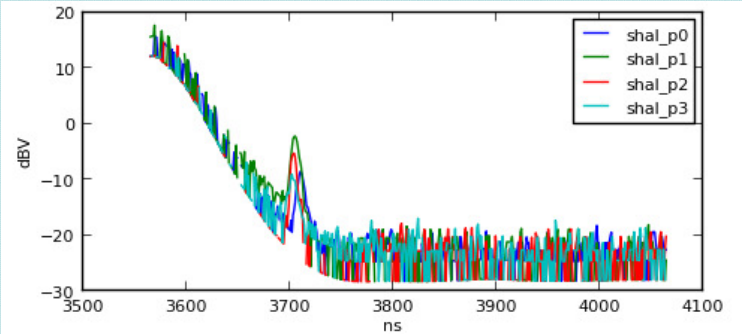
  - **Avec**
    - P_s **: contribution de l'interface air/mer**
    - P_v **: contribution de la colonne d'eau**
    - P_b **: contribution du fond**
    - N_s **: bruit**
  - **Convolution par l'impulsion Lidar et réponse en réception**

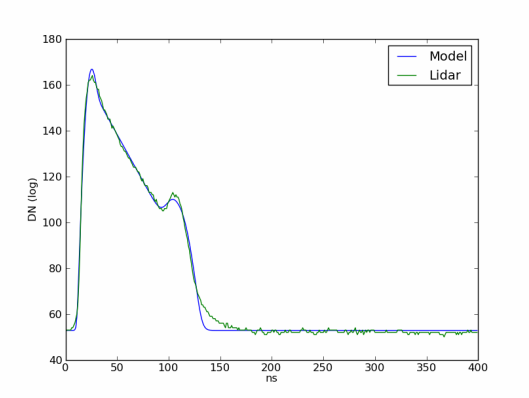






- **Calibration formes d'onde et inversion**
  - **Calibration radiométrique des WF grâce aux données hyperspectrales**
  - **Inversion des paramètres :**
    - ***z*** **: hauteur d'eau**
    - ***k*** **: coefficient d'atténuation diffuse**
    - R_b **: Réflectance du fond à 535nm**
    - ***F*** **: Facteur de perte dû au FOV du récepteur**
    - β **: fonction de diffusion de volume**
  - **Problème avec les données du capteur HawkeyeII - La Réunion : Signaux surface et colonne d'eau trop atténués par courbes de gain**
    ⇒ Utilisation du z seulement



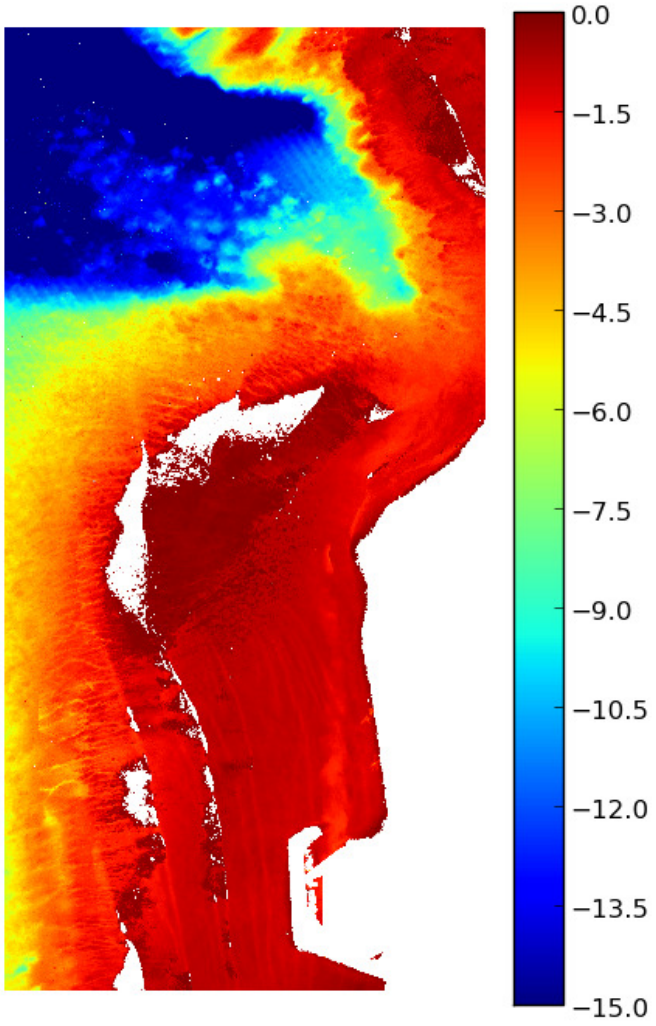


Données Hyperspectrales + **z Lidar**

→ **Inversion du MTR sur données hyperspectrales sous contrainte z Lidar**

→ **Même ensemble de paramètres estimés que SWIM-HYP**

→ **Rb** + **z**



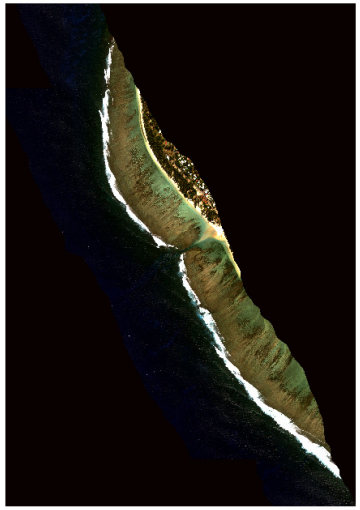
Intérêts Fusion :

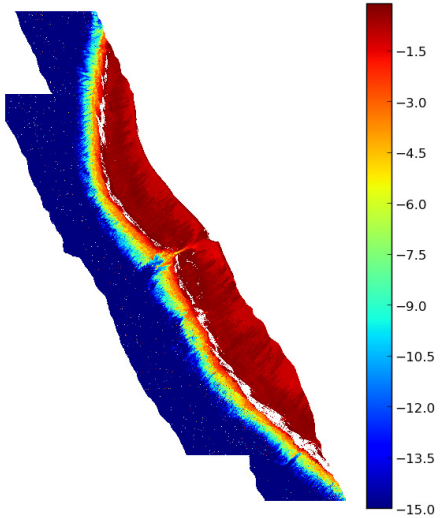
- **Complémentarité z Hyperspectral faible profondeur / Z Lidar forte profondeur**
- **Peut aider estimation Rb dans zones turbides**
- **Intégration kd serait intéressante**

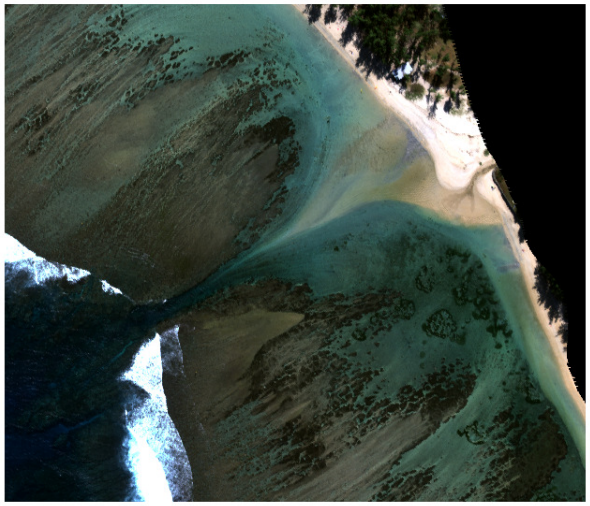
Difficultés :

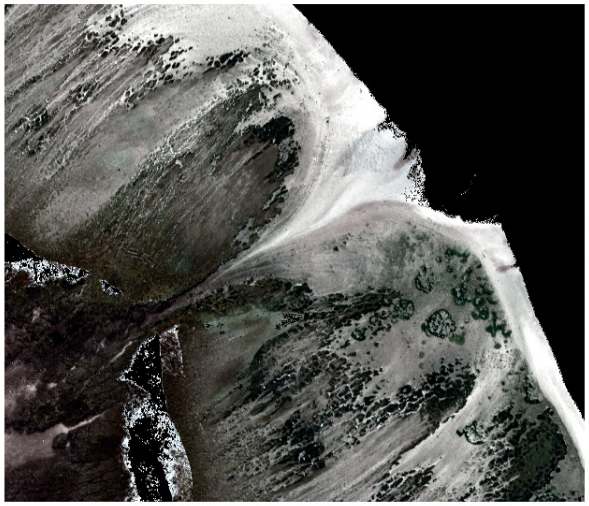
- **Résolution / Précision co-registration**

SWIM : POTENTIALITES POUR LA CARTO









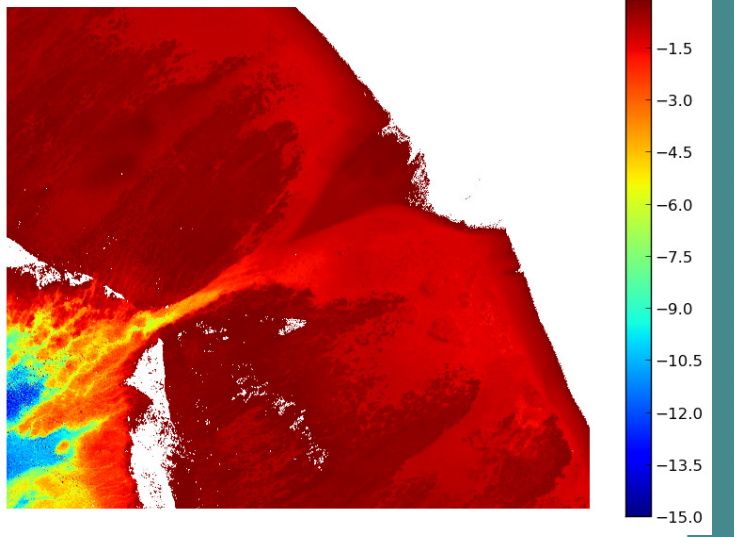
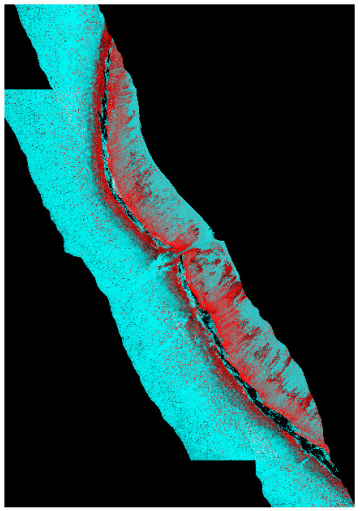
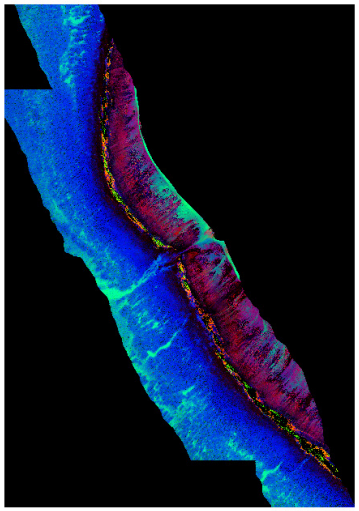
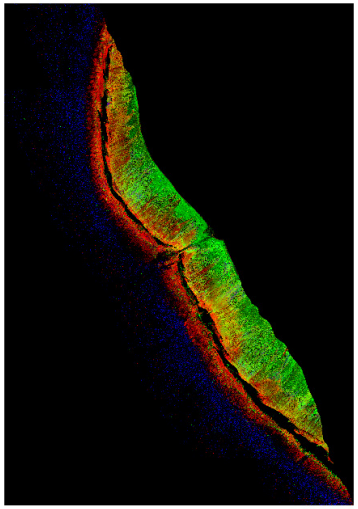


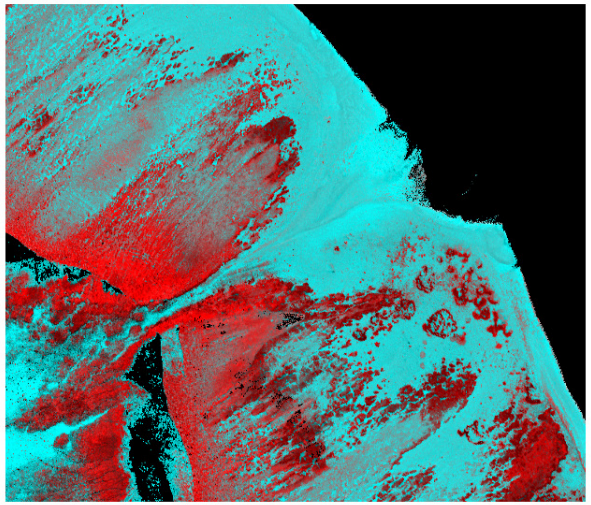
Image Originale **Description du fond** **Bathymétrie**

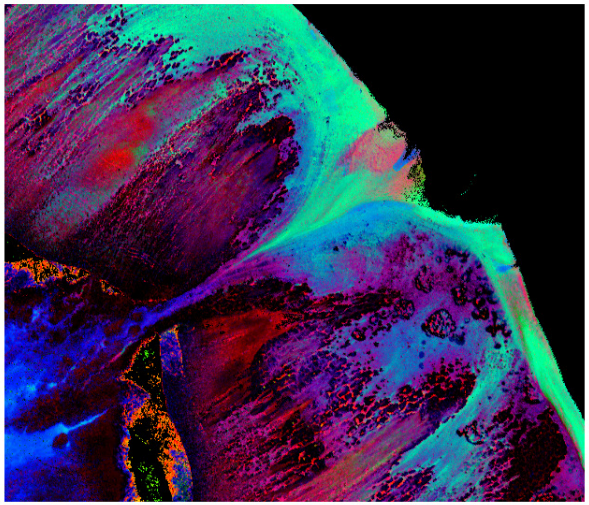
SWIM : POTENTIALITES POUR LA CARTO
DIVERSITE SPECTRALE DE L'INFORMATION SOUS-MARINE

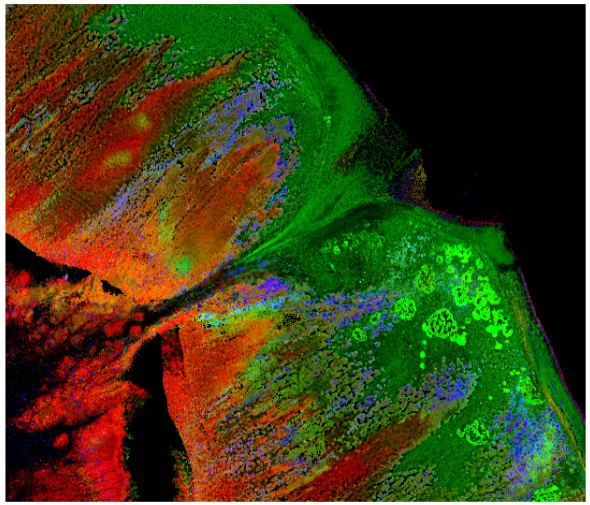












« Indice de végétation »
Sous-marin

Description minéraux
Sables / roches

Description végétaux et coraux
Algues / herbiers / coraux

La réflectance du fond est-elle nécessaire ?

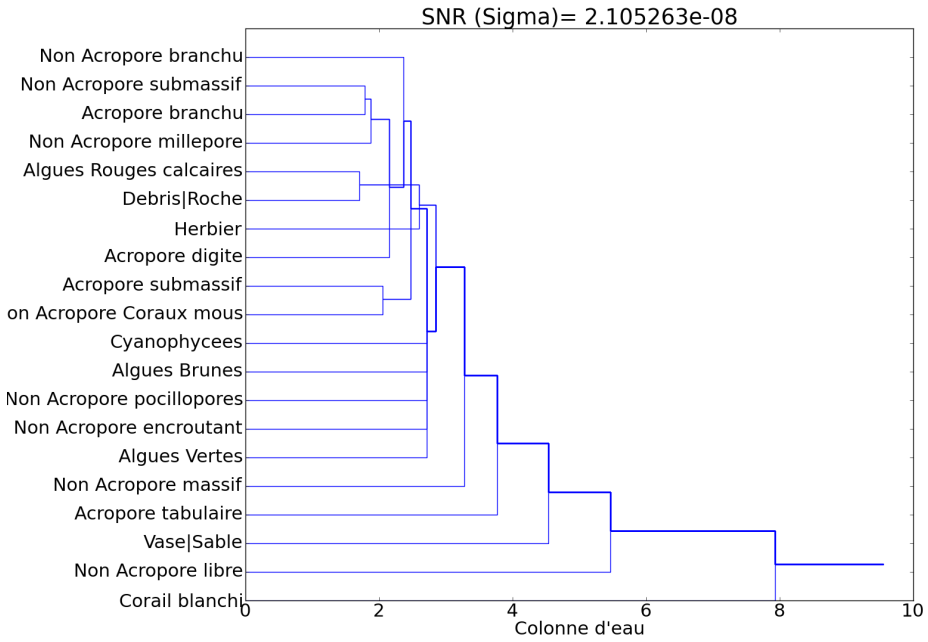
- **Inconvénients méthodes classiques (sans estimation Rfond) :**
  - **Nécessitent une librairie spectrale (exhaustivité, et comment la choisir ?) dans un processus conjoint inversion / classification**
  - **Ou des plongées intensives pour labellisation si segmentation préalable**
  - **Atténuation de la colonne d'eau : validation de la classification jusqu'à quelle profondeur ?**

⇒ **L'estimation de la réflectance du fond semble le plus pertinent pour réaliser une classification objective à partir d'une image hyperspectrale**

- **L'analyse conjointe de l'atténuation de l'eau estimée et des caractéristiques spectrales recherchées peuvent permettre :**
  - **D'évaluer la pertinence de la classification**
  - **De réaliser une classification variable en fonction de la hauteur d'eau et des constituants de la colonne d'eau**

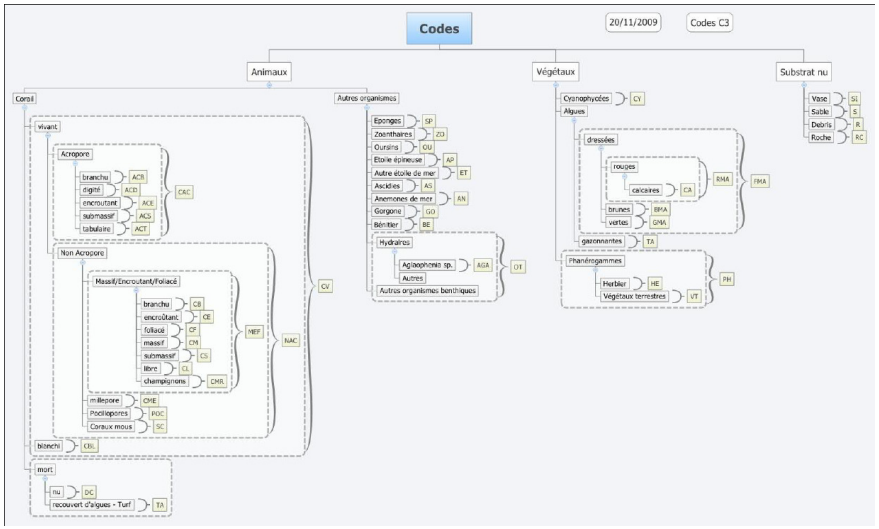
- **REFCAR-CARTO : Mise en place d'un schéma de classification :**
  - **Qui utilise des spectres de taille variable**
  - **Qui intègre la pertinence par longueur d'onde**
  - **Qui puisse être supervisé, réduisant très sensiblement le temps nécessaire en plongée (pas de labellisation exhaustive des polygones)**
  - **Classification hiérarchique de niveau variable en fonction de l'atténuation :**
    - Dépendant de la turbidité
    - Dépendant de la hauteur d'eau

Le potentiel de la réflectance du fond pour la classification



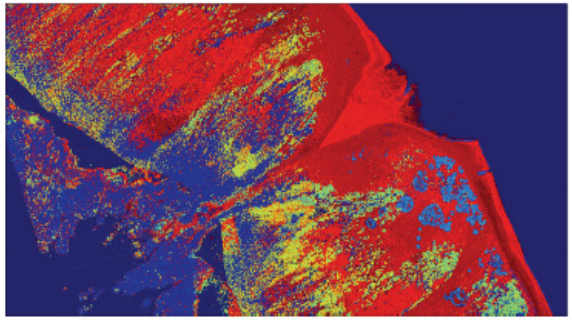
Exemple de résultats obtenus et attendus

Cf. animation séparabilité = f (SNR)

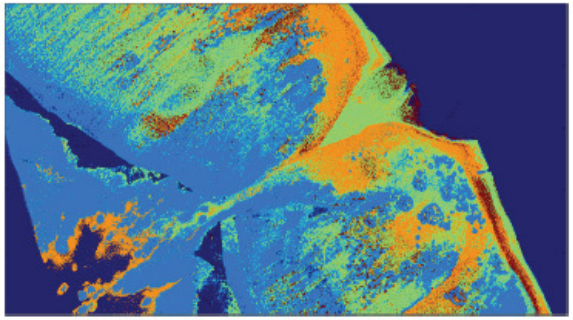


Typologie utilisée pour la librairie spectrale Spectrhabent

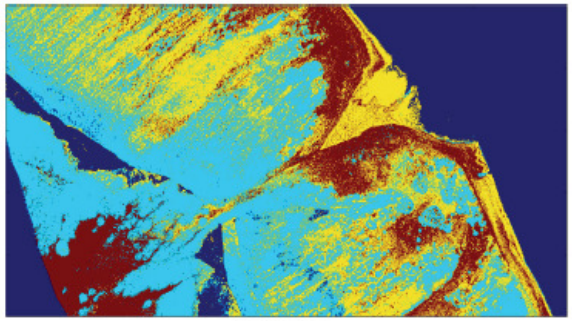
Le potentiel de la réflectance du fond pour la classification



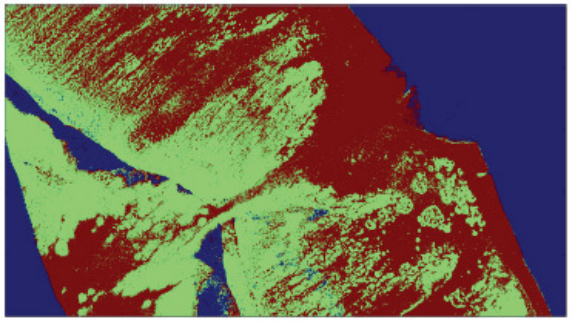
(a) 5.64m



(b) 9.85m



(c) 17.19m



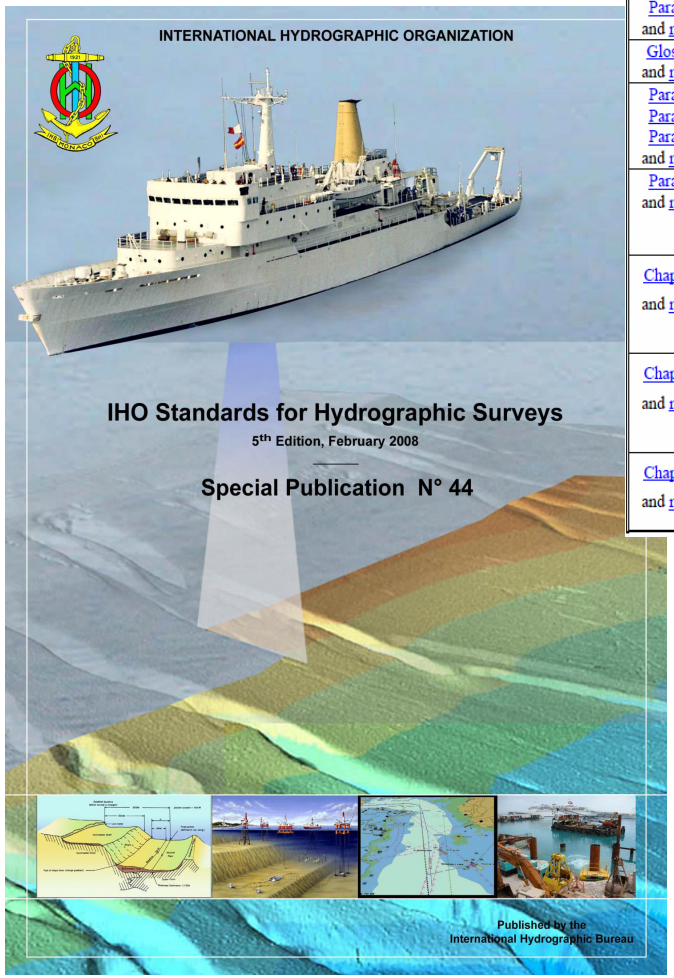
(d) 30m

Numéro de classe	Nom de classe	5.64m	9.85m	17.19m	30m
1	Algues Brunes				
2	Algues Rouges Calcaires				
3	Algues Vertes				
4	Cyanophycées				
5	Herbier				
6	Acropore Branchu				
7	Acropore Digite				
8	Acropore Submassif				
9	Acropore Tabulaire				
10	Non Acropore Branchu				
11	Non Acropore Encoutant				
12	Non Acropore Massif				
13	Non Acropore Submassif				
14	Non Acropore Millepore				
15	Non Acropore Pocillopores				
16	Non Acropore Coraux-mous				
17	Corail Blanchi				
18	Vase—Sable				
19	Debris—Roche				

Nota :
Cartographie non validée,
Démonstration du concept uniquement

Validation SWIM : validation z / normes OHI pour les levés hydrographiques

L'hyperspectral peut-il atteindre l'ordre 1b ? 1a ? l'ordre Special?



Reference	Order	Special	1a	1b	2
Chapter 1	**Description of areas.**	Areas where under-keel clearance is critical	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is less critical but *features* of concern to surface shipping may exist.	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is not considered to be an issue for the type of surface shipping expected to transit the area.	Areas generally deeper than 100 metres where a general description of the sea floor is considered adequate.
Chapter 2	**Maximum allowable THU 95% *Confidence level***	2 metres	5 metres + 5% of depth	5 metres + 5% of depth	20 metres + 10% of depth
Para 3.2 and note 1	**Maximum allowable TVU 95% *Confidence level***	a = 0.25 metre b = 0.0075	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 1.0 metre b = 0.023
Glossary and note 2	*Full Sea floor Search*	Required	Required	Not required	Not required
Para 2.1 Para 3.4 Para 3.5 and note 3	*Feature Detection*	Cubic *features* > 1 metre	Cubic *features* > 2 metres, in depths up to 40 metres; 10% of depth beyond 40 metres	Not Applicable	Not Applicable
Para 3.6 and note 4	**Recommended maximum Line Spacing**	Not defined as *full sea floor search* is required	Not defined as *full sea floor search* is required	3 x average depth or 25 metres, whichever is greater For bathymetric lidar a spot spacing of 5 x 5 metres	4 x average depth
Chapter 2 and note 5	**Positioning of fixed aids to navigation and topography significant to navigation. (95% *Confidence level*)**	2 metres	2 metres	2 metres	5 metres
Chapter 2 and note 5	**Positioning of the Coastline and topography less significant to navigation (95% *Confidence level*)**	10 metres	20 metres	20 metres	20 metres
Chapter 2 and note 5	**Mean position of floating aids to navigation (95% *Confidence level*)**	10 metres	10 metres	10 metres	20 metres

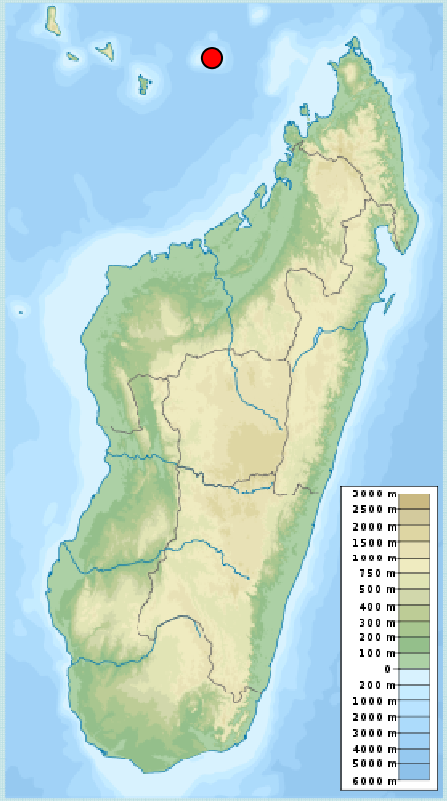
Total Vertical Uncertainty:

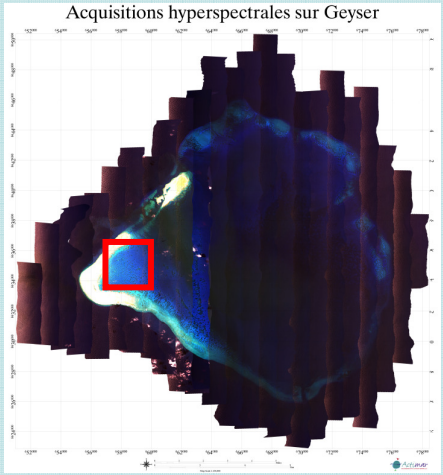
$$TVU = +/- \sqrt{(a^2 + (z \cdot b)^2)}$$

Programme intensif ACTIMAR / SHOM de validation de SWIM en cours utilisant des données de différents programmes Océan Indien / Antilles / zones côtières françaises

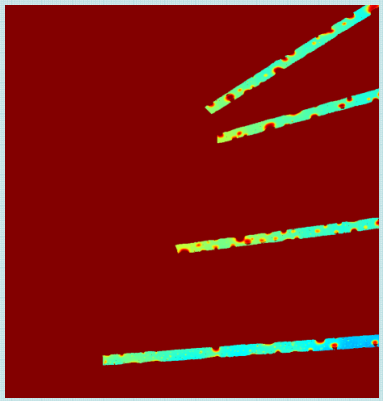
EX. Validation sur Geyser

Banc du Geyser

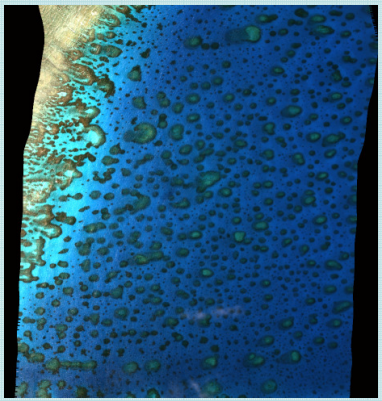




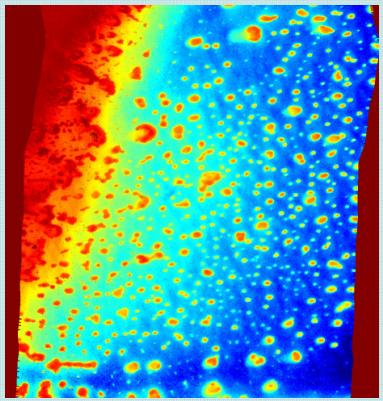
MBES →



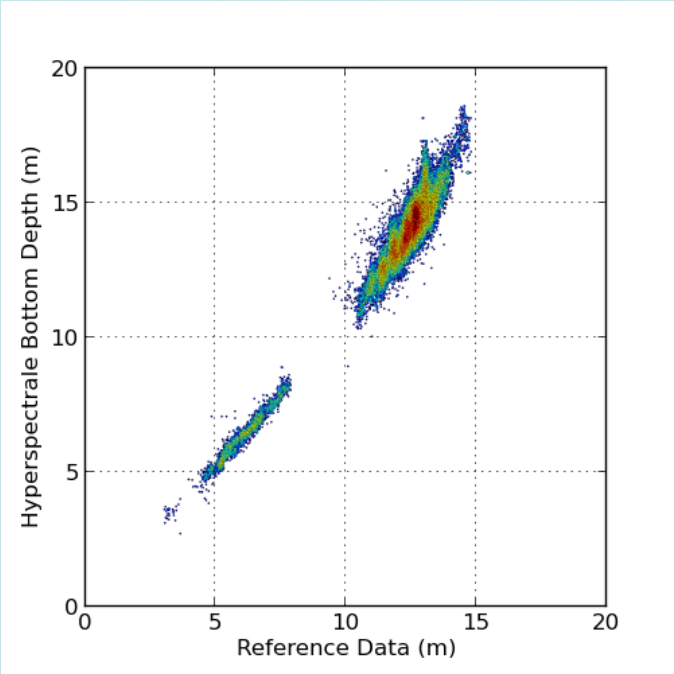
Hyperspectral ↓

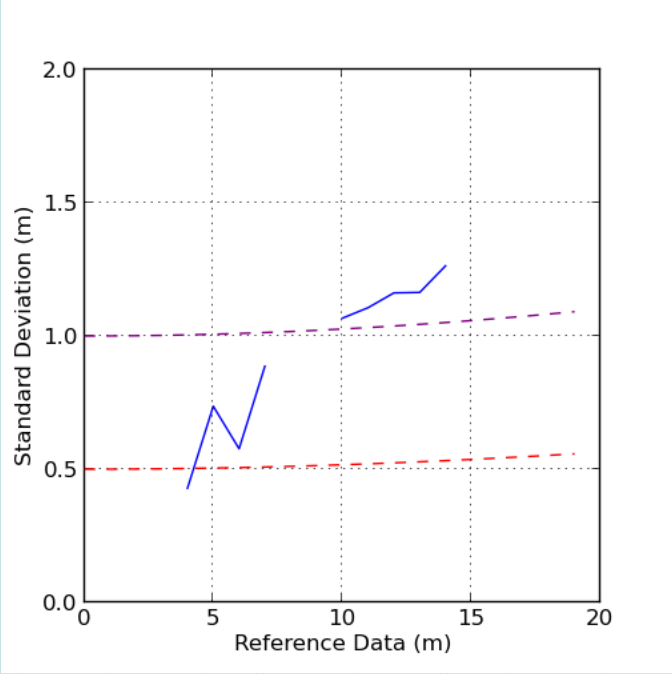


Bottom depth →



Comparison between hyperspectral bottom depth and MBES data



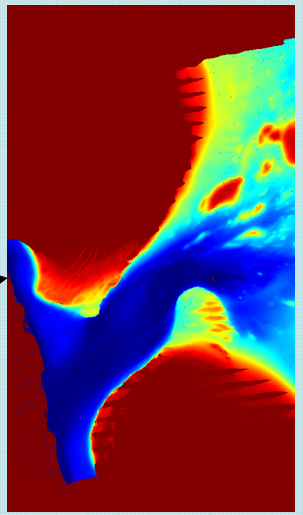


Scatter plot and estimation of the variance of the estimation compared with IHO standards (order 1b and order 2)

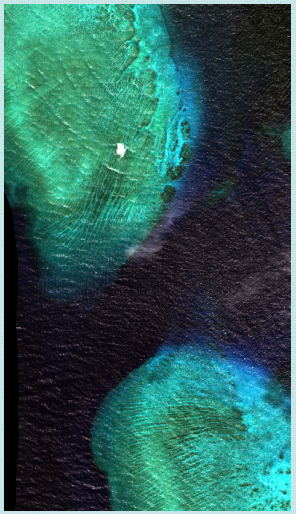
Ex. Validation sur Mayotte

Mayotte

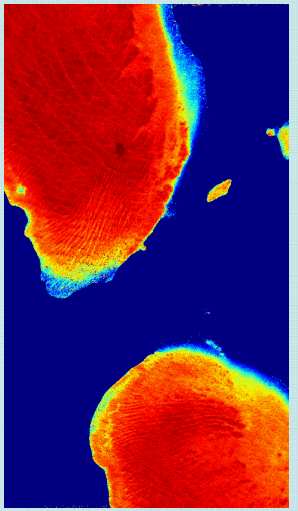
SMF



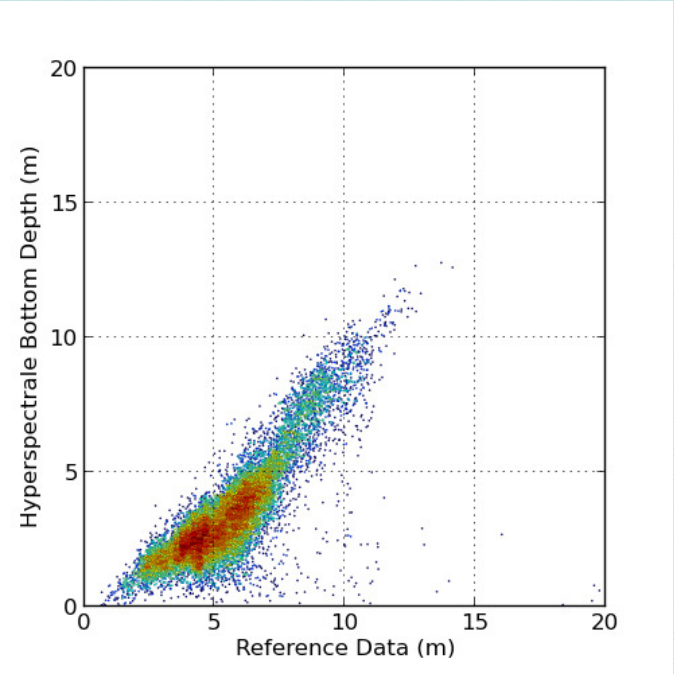
Hyperspectral

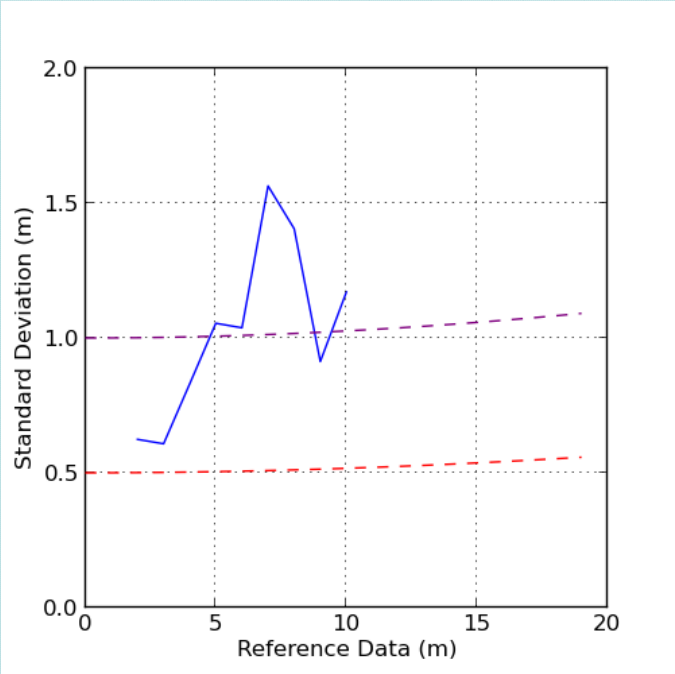


Bottom depth



Comparison between hyperspectral bottom depth and MBES data

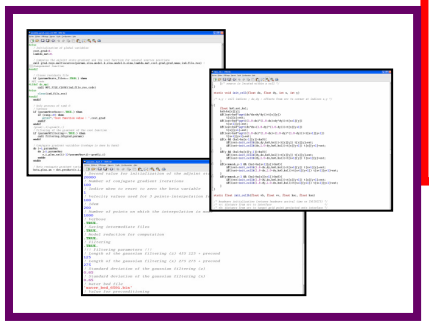




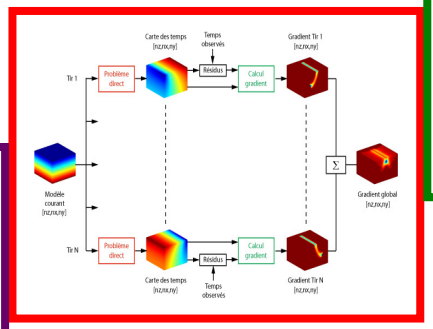
Deviation over deep slopes
The lambertian hypothesis is posibly not relevant for underwater rugged terrain

Scatter plot and estimation of the variance of the estimation compared with IHO standards (order 1b and order 2)

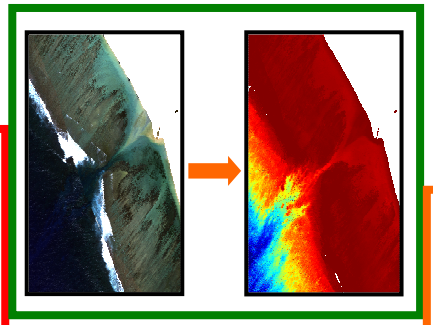
IMPLEMENTATION SWIM



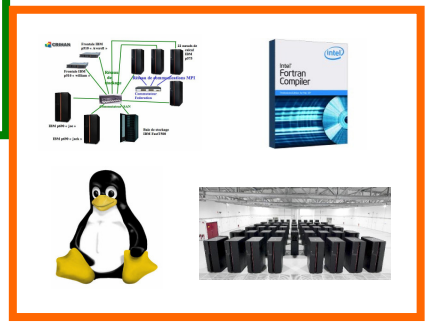
Python / Fortran 90



OpenMP



Chaîne de traitement

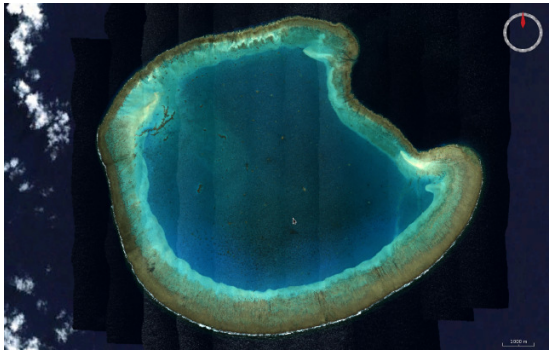
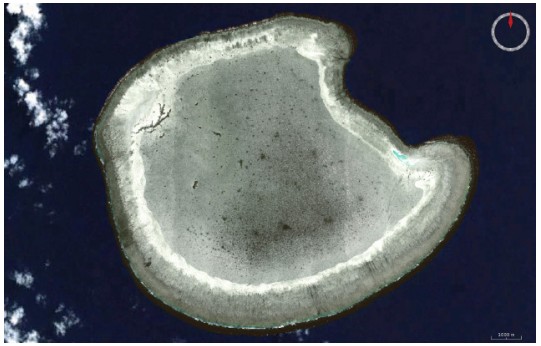
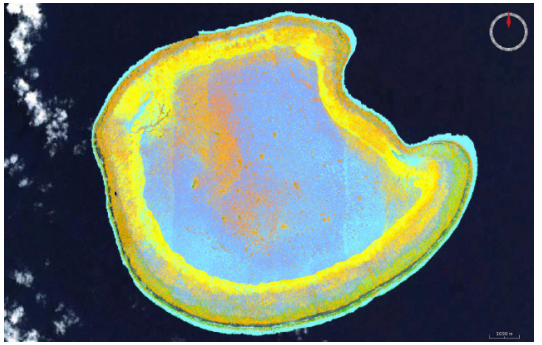
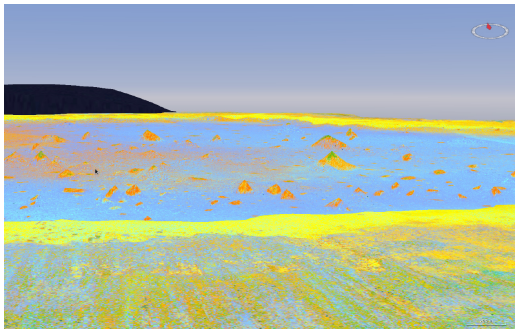
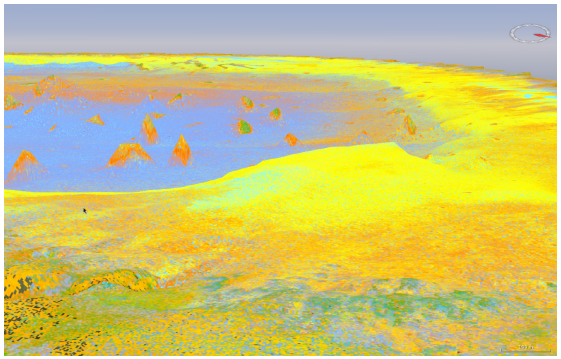
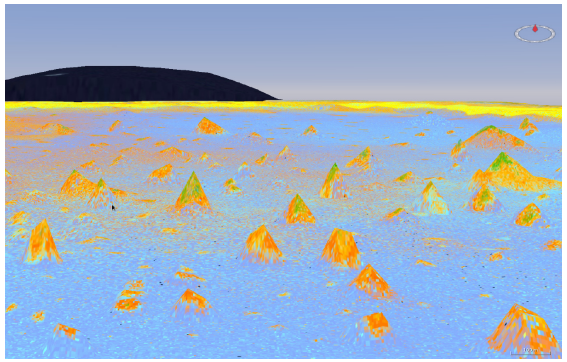


Environnements

Implémentation parallèle / Cluster 16 coeurs

	Ermitage	Réunion	Réunion	Mayotte
Résolution	40cm	40cm	2m	2m
Nb spectres	39 millions	1,5 milliards	60 millions	200 millions
Surface	6 km²	240 km²	240 km²	800 km²
Tps de Calcul	1 jour	45 jours	2 jours	7 jours

Rfond + z ⇒ modélisation 3D texturée de la zone de petits fonds

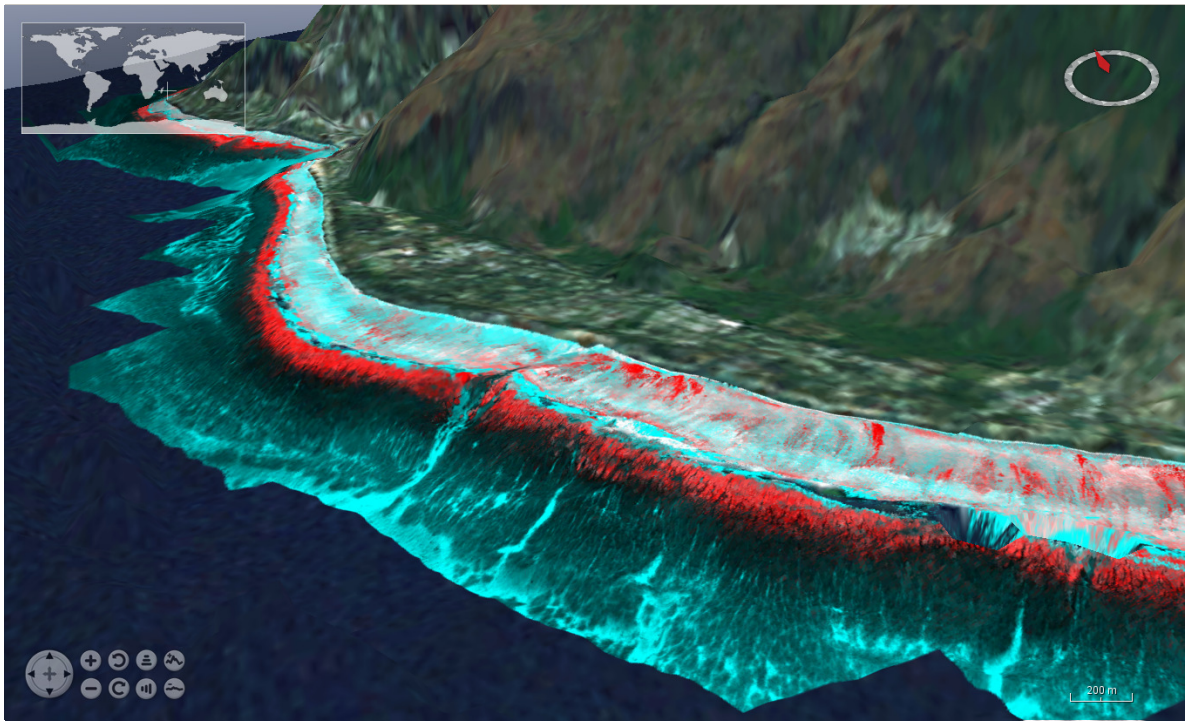







Arrivée en France des premières imprimantes 3D texturées…

SWIM

Shallow Water mappIng using optical reMote sensor(s)

Système d'information 3D sur la zone de petits fonds



CONCLUSIONS

1. **1ère version opérationnelle des modules de traitement bas niveau :**
   SWIM-HYP, SWIM-LIDAR, SWIM-FUSION

   ⇒ **Base pour des perfectionnements possibles**

   ⇒ **Implanté sur architecture parallèle / Permet de traiter de gros volumes de données**

   ⇒ **Permet la valorisation des données Litto3D® hyperspectrales et lidar**

   ⇒ **Ouvre la voie de la cartographie opérationnelle de la zone de petits fonds à grande échelle**

2. **Base pour le développement en cours des modules de traitement haut niveau avec expertise :**
   SWIM-CARTO, SWIM-BATHY, SWIM-WATER

   ⇒ **Modules nécessitant des programmes de validation ambitieux**

   ⇒ **ex. Programme de validation de SWIM-BATHY selon normes OHI en cours avec le SHOM**

   ⇒ **Le développement de SWIM-CARTO qui permettra la carto des habitats est démarré**

3. **Modules Interfaces à développer selon besoin spécifiques des gestionnaires :**
   SWIM-VIEWER, SWIM-MONITORING

PERSPECTIVES

1. **Démarrage des travaux sur la notion de paysages sous-marins**
   - Constitution d'Atlas de paysages sous-marins
   - Outils d'écologie du paysage portés dans la zone de petits fonds (unités paysagères, flux, trames…)
2. **« Démocratisation » de l'approche par augmentation de la souplesse d'utilisation**
   - Intégration de capteurs hyperspectraux sur vecteurs légers aéronefs / ULM / drones
   - Réflexions démarrées sur implantation de tâches de traitement sur architecture multi-cœurs embarquée ou GPU ⇒ SWIM embarqué à moyen terme ?
3. **Valorisation de SWIM :**
   - Nouvelles zones (discussions en cours Nouvelle-Calédonie)
   - Utilisation de SWIM comme outil de monitoring d'Aires Marines Protégées (système d'information 3D interactif sur la zone de petits fonds) et de médiation
   - Valorisation des données Litto3D® et stratégies de monitoring multitemporel hyperspectral post-Litto3D®
   - Utilisation de SWIM pour suivi de bio-indicateurs qualité des masses d'eau côtières
   - Utilisation de SWIM pour cartographie de sensibilité littorale (industrie pétrolière)
4. **Gestion de la propriété intellectuelle liée à SWIM en cours**
5. **Collaborations recherchées pour utiliser SWIM, le faire vivre, et nous aider à poursuivre son développement et la validation de ses modules**

MERCI DE VOTRE ATTENTION