

Vers une méthodologie de cartographie des récifs coralliens par télédétection hyperspectrale

SAS ACTIMAR
29200 Brest
www.actimar.fr

**M. LENNON, G. SICOT, N. THOMAS, S. SMET, C. TAILLENDIER,
E. DUTRIEUX, C. RICHARD, J.P. QUOD, O. DELOUMEAU,
D. CORMAN, P. WATREMEZ, F. GAUTHIEZ**
marc.lennon@actimar.fr



- **Contexte des travaux**
 - Pressions sur le milieu
 - Contexte international
 - Contexte national
 - Pourquoi l'hyperspectral ?
 - Méthodologie générale de cartographie
- **Éléments de la méthodologie de cartographie**
 - Acquisition des données
 - Prétraitement des données / spécificités maritimes
 - Estimation de paramètres colonne d'eau et fond
 - Bioindicateurs
 - Cartographie et intégration SIG
- **Conclusion et perspectives**
 - Stratégies baseline / monitoring

● Pressions naturelles

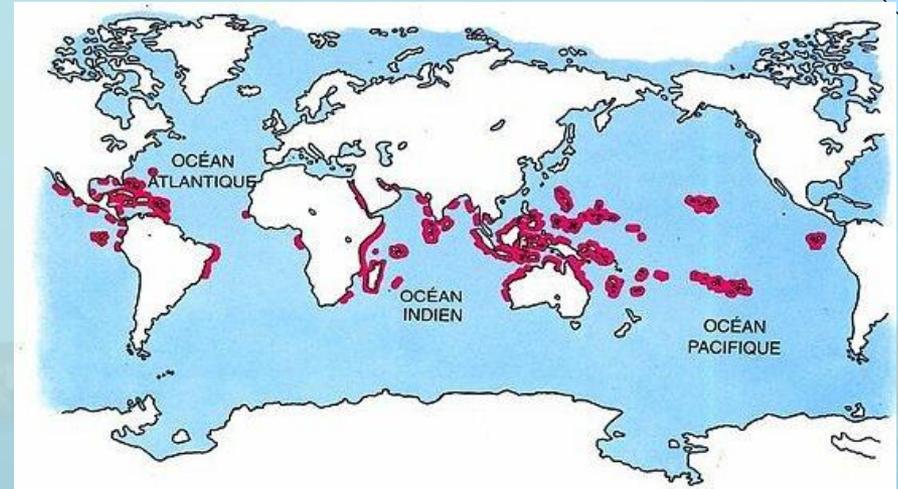
- Événements extrêmes, tempêtes
- Changement climatique / Evolution du milieu sous l'influence des changements de température de l'eau

● Activités anthropiques

- Résidentiel, récréatif, industriel

● Impacts

- Erosion / Vulnérabilité de la zone littorale
- Destruction d'habitats
- Perte de biodiversité / appauvrissement patrimoine naturel



- **Financements internationaux**
 - **Compagnies**
 - ex. Exxon MOBIL Qatar, TOTAL Yemen
 - **Gouvernements**
 - Ex. Maldives, programme lutte contre changement climatique
 - Ex. Vietnam, acquisition μ -sat hyperspectral
 - **Aide publique au développement**
 - Banque mondiale / Fonds Européen de Développement
 - Agence Française de Développement / FFEM

- **Projet Maldives pour Gouvernement Maldivien**
 - Actimar / ARVAM / CREOCEAN / FIT

- **Projet Qatar pour Exxon MOBIL**
 - Actimar / CREOCEAN

- **Aires Marines Protégées (AMP)**
 - **Objectif : 20% des eaux littorales françaises en AMP en 2020**
 - **Mise en oeuvre : Agence des Aires Marines Protégées**
 - **3 Parcs Marins déjà créés : Iroise / Mayotte / Golfe du Lion**
 - **La majorité des zones littorales françaises en zone intertropicale / France 3ème pays "corallien" au monde**
 - **Besoin de connaissance sur ces zones littorales pour implantation et gestion opérationnelle des AMP**
- **Besoins en développement méthodologique télédétection**
- **Besoins opérationnels : production de cartes à grande échelle**
 - **Baselines**
 - **Stratégies de monitoring**
- **Convention de partenariat REFCAR entre AAMP et ACTIMAR**
 - **R&D / Développement méthodologique hyperspectral**
 - **Développement de moyens opérationnels de télédétection pour cartographie et monitoring des AMP**
- **Ile de La Réunion : convention SPECTRHABENT**
 - **AAMP / IFREMER / Préfecture La Réunion / TAAF**

- **Litto3D®**
 - Programme national d'établissement du Référentiel Géographique Littoral (RGL)
 - Mise en oeuvre opérationnelle : IGN (terrestre) / SHOM (littoral)
 - Mutualisation de moyens de télédétection aéroportée entre Litto3D® et AAMP pour cartographie de la zone de petits fonds, bathymétrie et habitats, idem NCZM USA

- **Programmes Litto3D® en cours couplés Lidar / Hyperspectral avec volet cartographie récifs coralliens / habitats :**
 - Litto3D® Océan Indien
 - Litto3D® Martinique
 - Litto3D® Iroise
 - En cours de discussion : Litto3D® Aquitaine

- **Maldives**
- **Qatar**
- **Litto3D® Océan Indien**
- **Litto3D® Martinique**
- **REFCAR**
- **SPECTRHABENT**



ExxonMobil

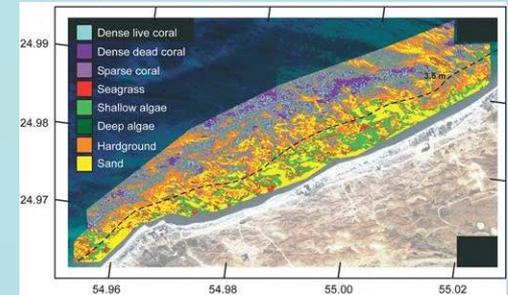


- **L'ensemble de ces programmes implique le développement d'une méthodologie de cartographie et monitoring des récifs coralliens, dans un but d'application opérationnelle à grande échelle, et reproductible sur d'autres zones**



○ Méthodologie "classique" :

- Acquisition image satellite optique THR (Quickbird, Ikonos, WorldviewII...)
- Segmentation en zones homogènes
- Observations en plongée pour labellisation



○ Stratégie performante mais :

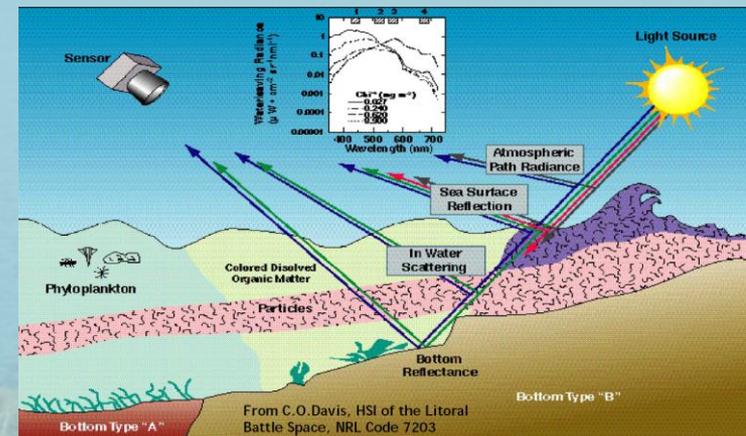
- Très lourde en moyens à la mer (temps / coût)
- Difficilement applicable à grande échelle
- Difficulté d'accès aux images en zone intertropicale (nuages...)
- Pas ou peu de capacités d'identification ni d'estimation de paramètres de fond pour création de bioindicateurs (monitoring)
- Difficile de "voir dans l'eau" sans la dimension spectrale
 - "voir dans l'eau" = séparer les informations provenant du fond, de la colonne d'eau, de la surface, et de l'atmosphère
 - Caractériser spectralement le fond pour identifier / caractériser

Intérêts hyperspectral :

- Permet la séparation des informations fond / colonne d'eau / surface / atmosphère grâce à la dimension spectrale
 - Inversion de modèle de transfert radiatif
 - Variance différentielle des sous-espaces
- Permet la caractérisation spectrale du fond (mais dépendante état de surface, turbidité, hauteur d'eau, type de fond)

Difficultés hyperspectral :

- Acquisition des données
- Dynamique / RSB
- Séparation efficace des informations
- Assez peu de travaux avec une stratégie "estimation de paramètres", rien "sur étagère"



Méthodologie générale

Acquisition données aéroportés

Stratégie d'acquisition

Couplage potentiel Lidar hydro

Corrections géométriques

Corrections atmosphériques

Estimation vapeur d'eau en côtier

Corrections effets de surface

Sun glint / Sky glint

**Estimation paramètres
colonne d'eau**

**Atténuation
diffuse
 $K_d(\lambda)$**

**Bathymétrie
(hauteur d'eau)
 Z**

Estimation paramètres fond

**Vecteur de
Paramètres de
Réflectivité $\Theta(\lambda)$**

**Réflectance
spectrale
 $R(\lambda)$**

**Bio-indicateurs
*Monitoring état de santé***

Cartographie habitats

Intégration SIG

- **Contexte des travaux**
 - Pressions sur le milieu
 - Contexte international
 - Contexte national
 - Pourquoi l'hyperspectral ?
 - Méthodologie générale de cartographie
- **Éléments de la méthodologie de cartographie**
 - Acquisition des données
 - Prétraitement des données / spécificités maritimes
 - Estimation de paramètres colonne d'eau et fond
 - Bioindicateurs
 - Cartographie et intégration SIG
- **Conclusion et perspectives**
 - Stratégies baseline / monitoring

Acquisition des données aéroportées



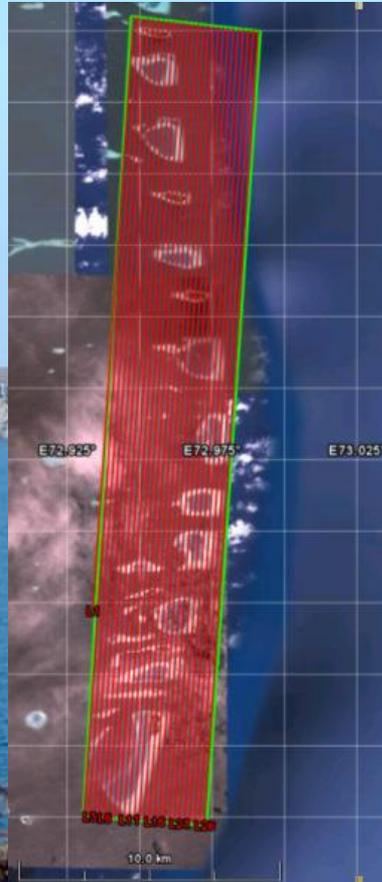
C208



PA34



Hyperspectral sensor
(Hypex-VNIR1600)
160 bands / 4.5nm FWHM
Spectral range 400-1000nm
+ Hydro Lidar



**Lidar-combined 1500ft
26 flight lines**



**Single 4000ft
10 flight lines**



**Single 8000ft
6 flight lines**

Hyperspectral airborne data acquisition – Ari atoll

- **Résolution spatiale**
 - Typiquement 0.5 à 2m / 0.2m potentiellement intéressant pour bathy THR
 - Compromis couverture / résolution
- **Conditions de vol**
 - Météo : acquisition sous nuages ?
 - Compromis météo / altitude vol / résolution milieu tropical
 - Marée / courants / états de surface
- **Géométrie d'acquisition**
 - Compromis glint / configuration géographique du littoral
 - Compromis glint / plage horaire quotidienne
- **Dynamique et SNR**
 - Stratégies à 2 TI : faible pour le très côtier / fort pour le fond
 - Compromis résolution spatiale - spectrale / SNR
- **Couplage Lidar hydro ?**
 - Pb : coût lidar hydro 5 à 10 × coût hyperspectral
 - Intérêt si vol d'opportunité. Complémentarité petits fonds / grands fonds
 - Pb de la configuration de vol basse altitude / direction / plafond
 - Avenir de la fusion avec nouveaux concepts de lidar hydro HD / petits fonds ?
- **Gestion du flux de données**
 - Campagne peut générer plusieurs To / jour pendant plusieurs semaines
 - Contrôles qualité terrain pour décisions revols : stations sol

Corrections de surface

- **Réflexion du soleil (sunlint)**
 - Spectre de réflectance plat
 - Condition géométrique particulière
- **Réflexion du ciel**
 - Spectre coloré
 - Présent sur l'ensemble de l'image

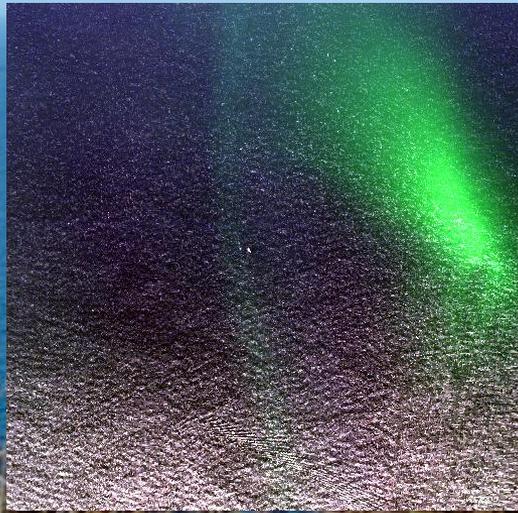
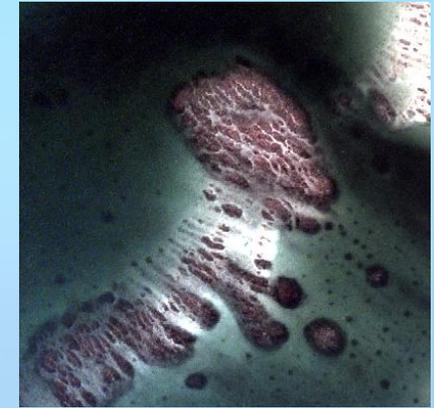
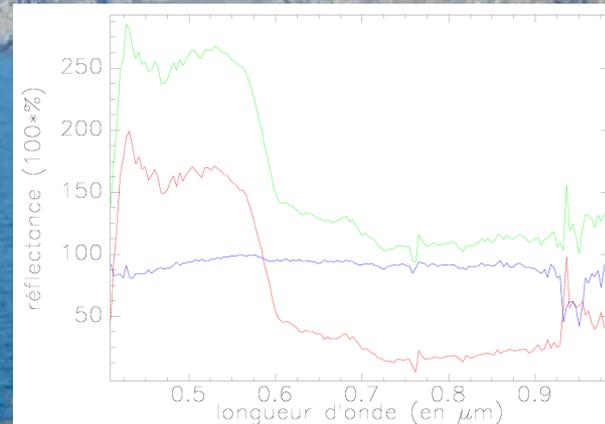
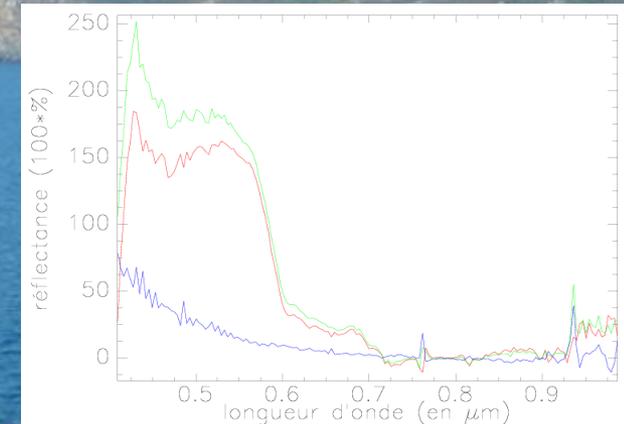


Image en pseudo-vraie couleur avec du sunlint et du skylint



Mise en évidence du sunlint



Mise en évidence du skylint

Stratégie idéale : calcul des paramètres géométriques de la surface en chaque point. **Pb : Comment faire ???**



GER 1500 et son caisson étanche



6 days
campaign
into the water

19 underwater sites
surveyed

~150 spectra
collected and
described
over the most
representative
underwater targets
of the area

+ Reference targets
over all the 5
inhabited
islands of the area



Water column
characterization



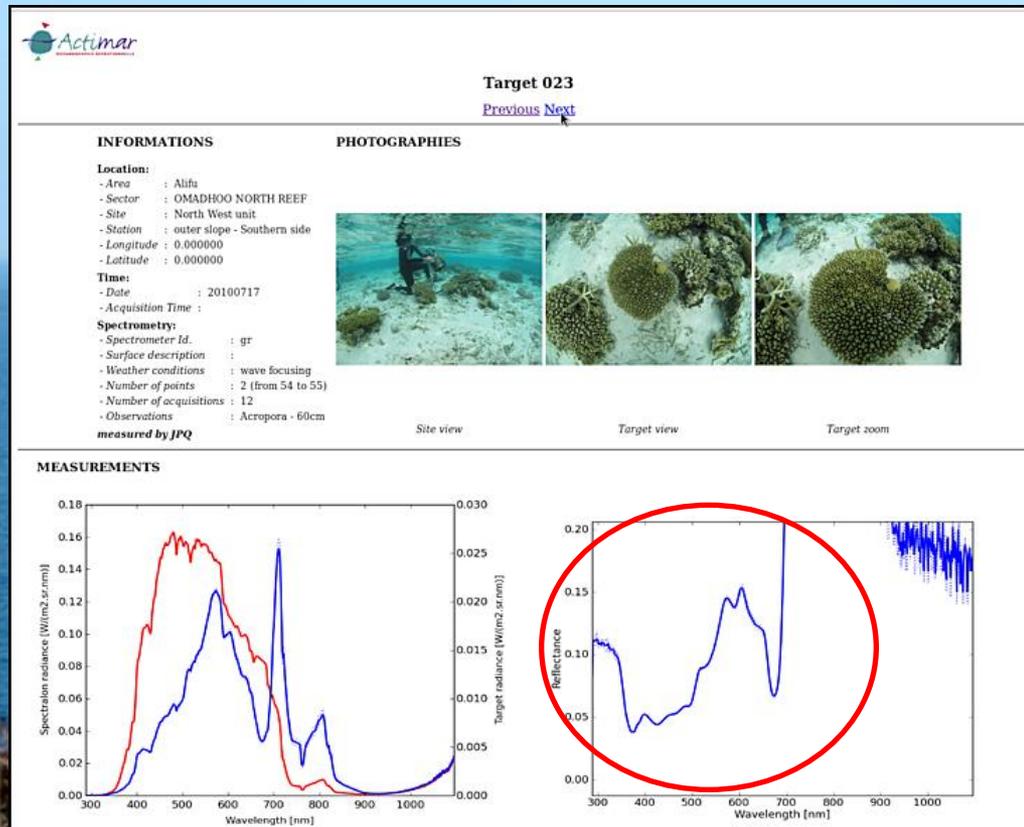
Reference targets data acquisition on the islands



Underwater spectroscopy
data acquisition

Exemple d'une entrée de la librairie spectrale

Metadata associated with the measurement



Pictures at different scales

Reflectance data (**spectral signature**) showing specific features of the coral, potential information on its type and health condition

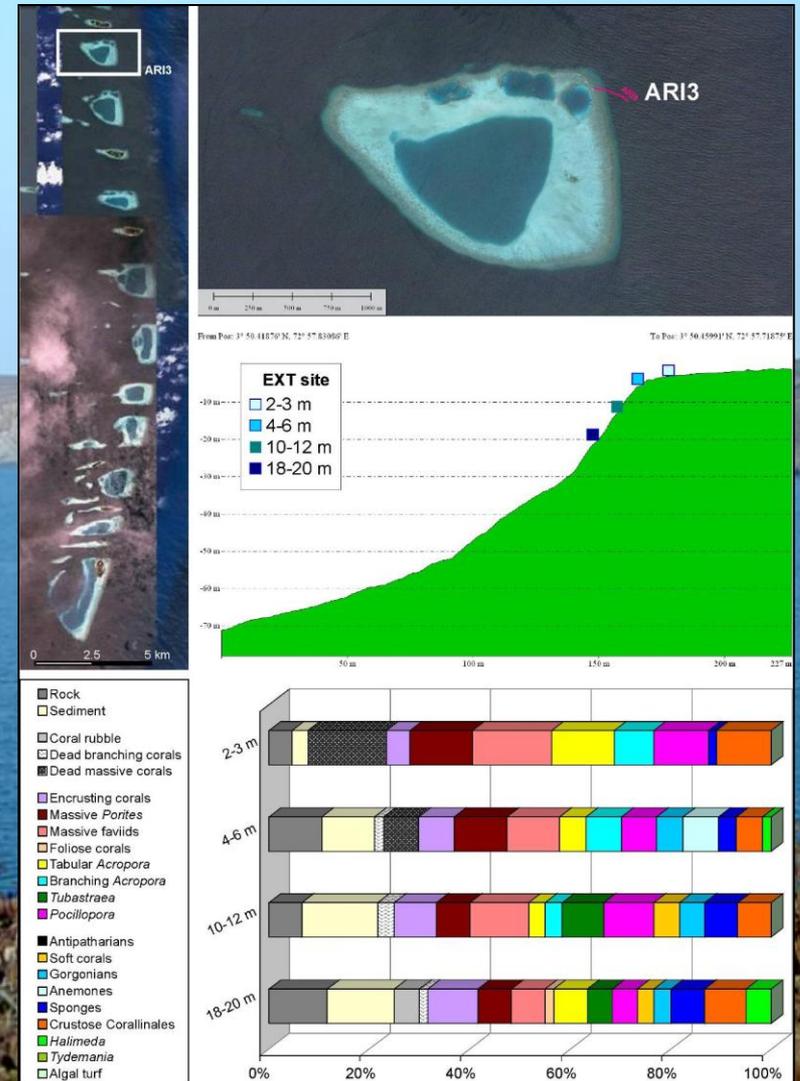
Radiance data

+ Thematic description of the site by coral expert associated with each entry

Acquisition des données sous-marines : description thématique du milieu

Methods : description of coral reef benthic assemblages between 2 and 20 m

- Profile
- Zonation
- Composition of natural benthic communities



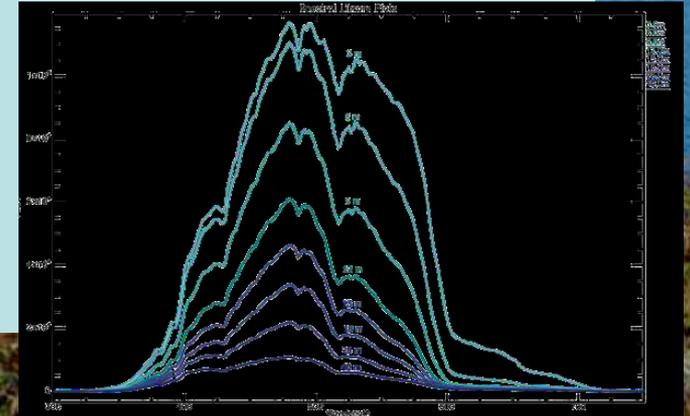
Expression générale du modèle de transfert radiatif

- **Réflectance sous la surface de l'eau**

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

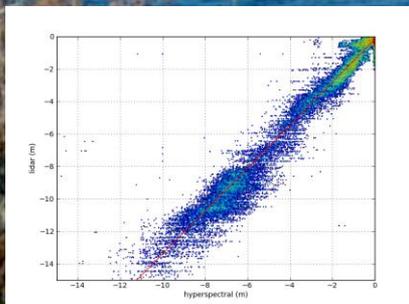
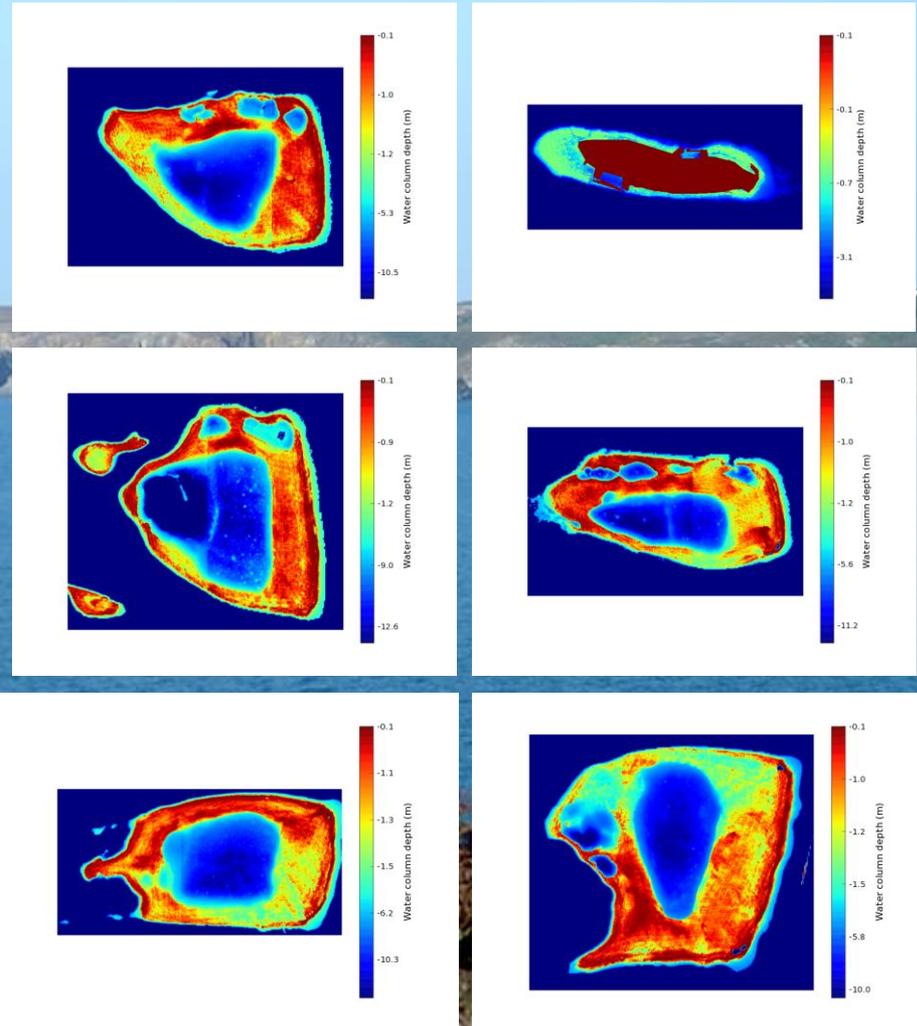
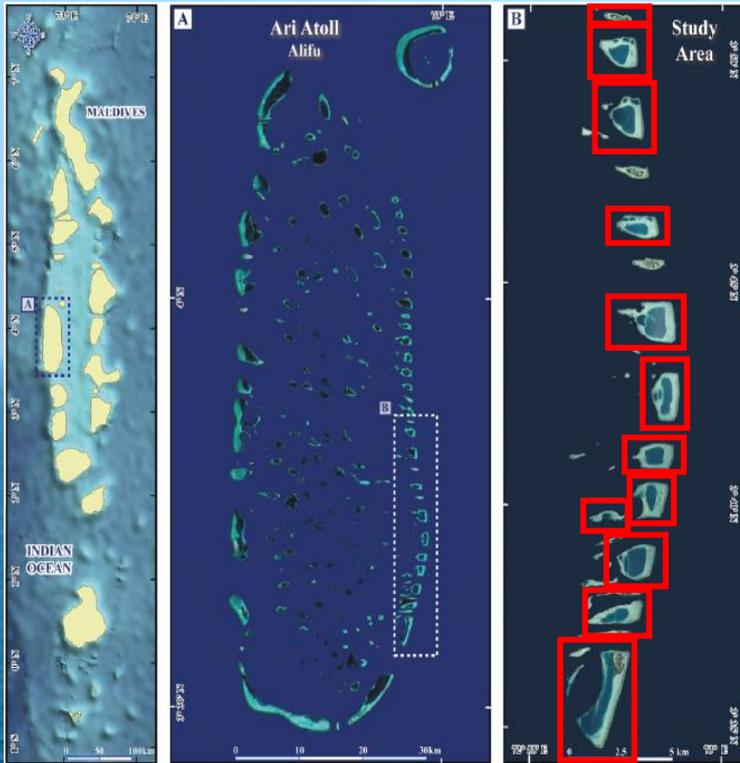
Avec :

- 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 d'eau**



- **Estimation z et paramètres de la colonne d'eau $K_d(\lambda)$**
 - Spectroscopie différentielle et passage en log
 - Réécriture du modèle de transfert radiatif pour augmenter robustesse au bruit de l'estimation
 - Ajout de contraintes spatiales : variation colonne d'eau plus lente que les autres paramètres
 - Estimation de sous-espaces invariants
 - Estimation des paramètres dans ces sous-espaces
- **Estimation des paramètres de réflectivité $\Theta(\cdot)$
(en cours réflectance spectrale $R_{\text{fond}}(\lambda)$)**
 - Pré-LUT (contrainte par estimation précédentes ou données exogènes type Lidar)
 - Optimisation sous contrainte type Levenberg-Marquardt
 - Estimation du vecteur de paramètres
 - Nb de paramètres estimable dépend de la profondeur (absorption infrarouge par la colonne d'eau)

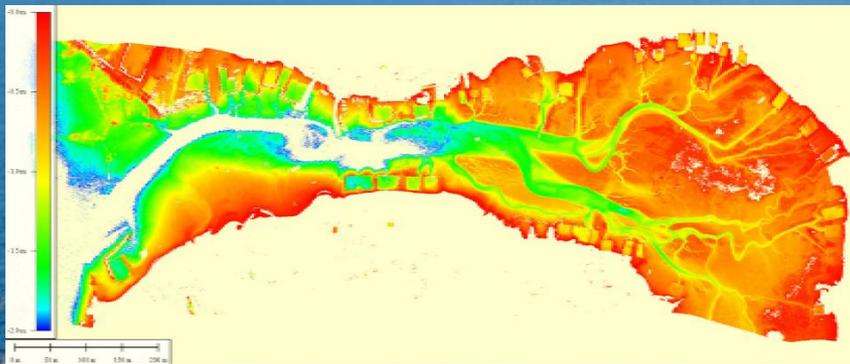
Exemples de résultats sur quelques atolls de l'archipel des Maldives



**Corrélation
Lidar hydro
96% jà 15m**

Bathymétrie

Exemple de résultats sur zone 0-2m avec fond très visible Carnac, Morbihan

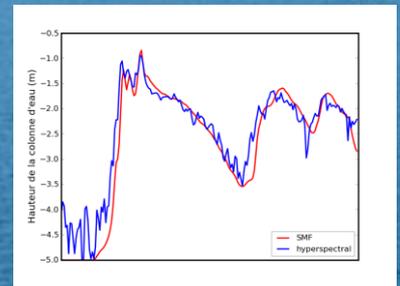
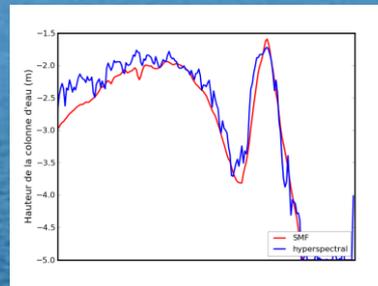
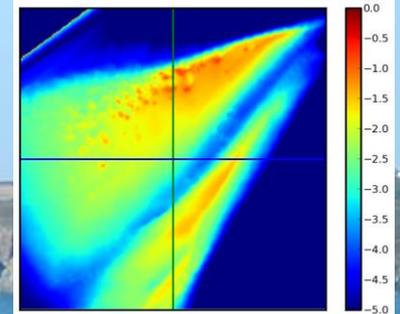
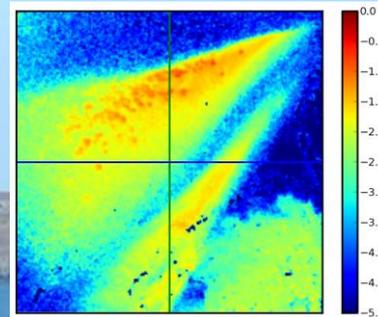


Comparaison SMF sur zone turbide, Golfe du Morbihan

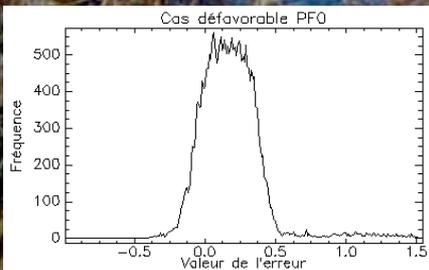


Hyperspectral

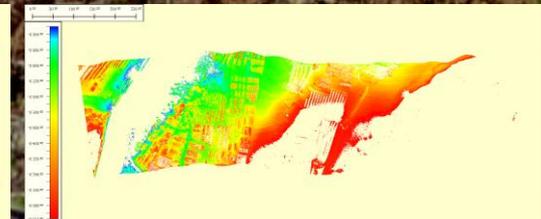
SMF



Robustesse estimation aux nuages



**Estimation
erreur /
lidar topo
à BM**



Exemple de résultat sur lagon Ile de la Réunion Fusion Lidar / hyperspectral

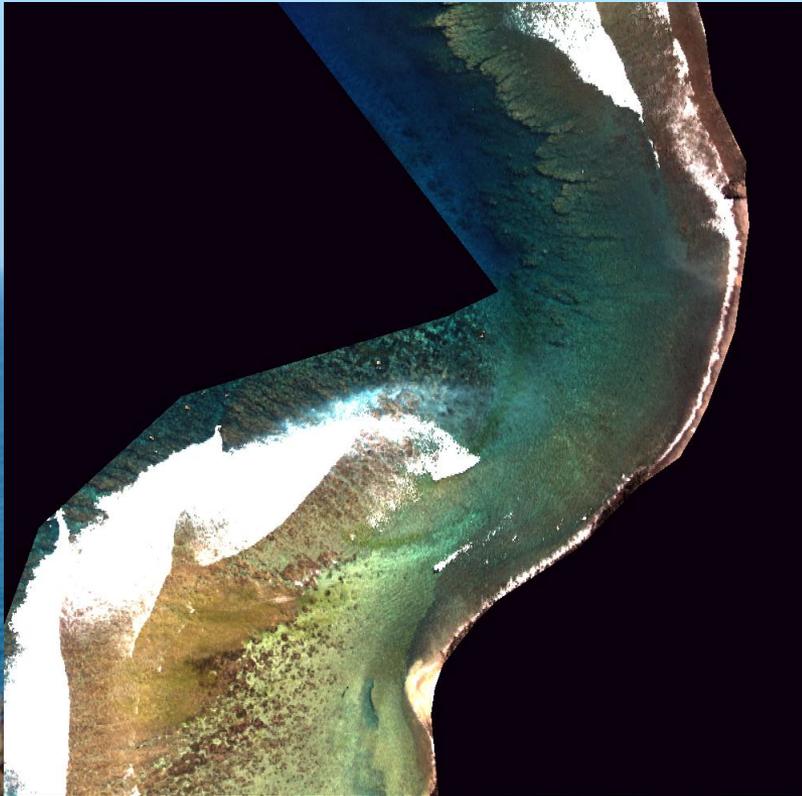
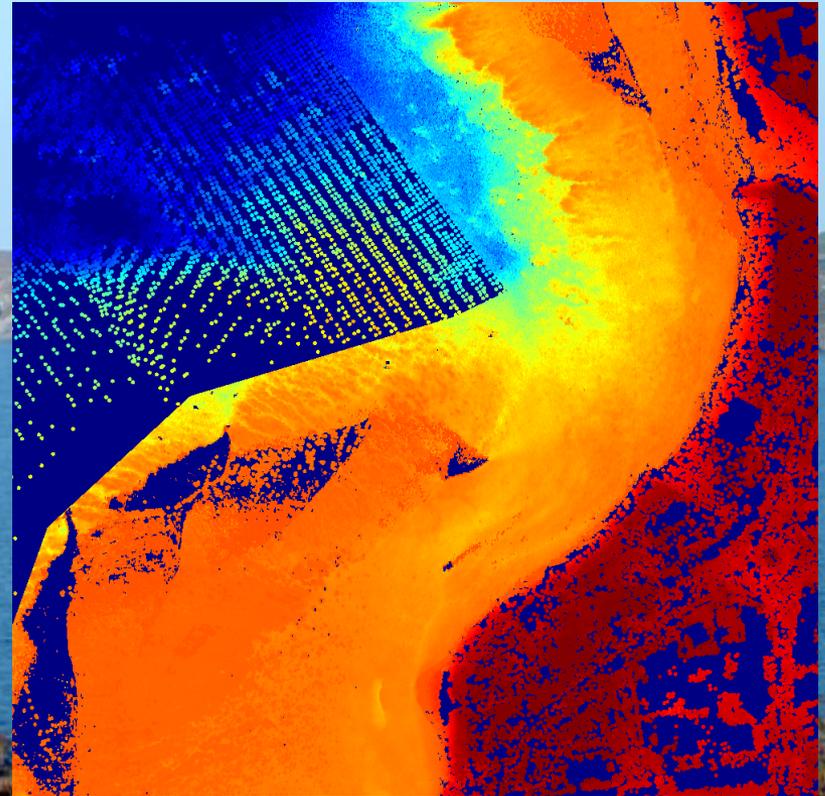


Image en pseudo-vraie couleur

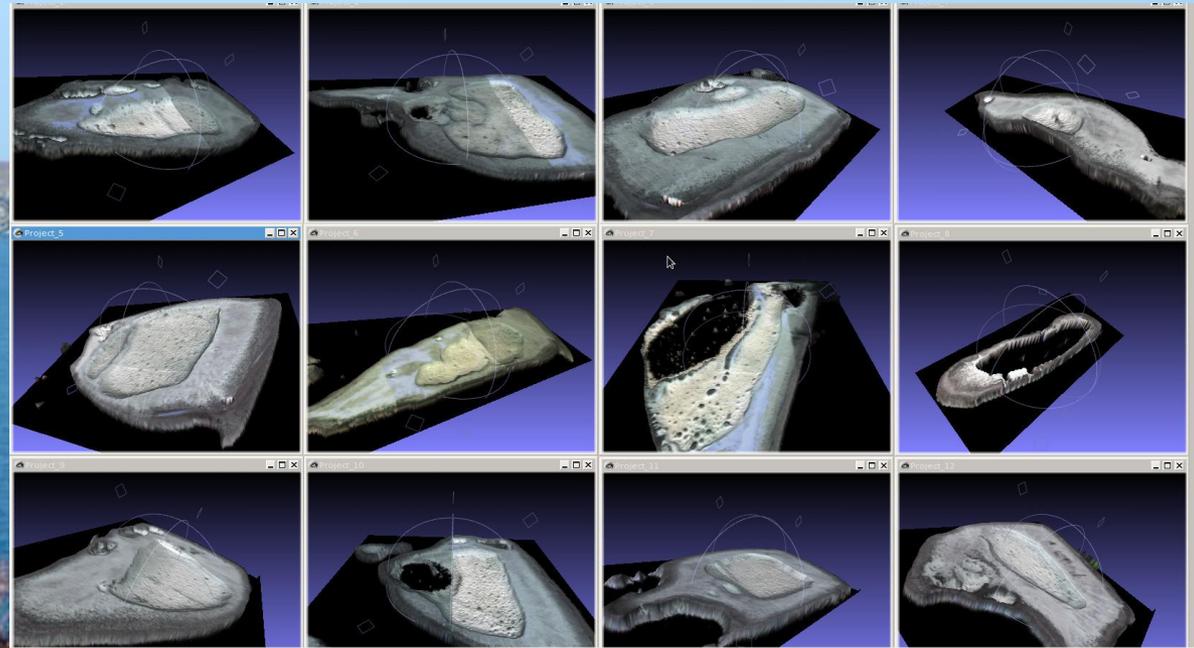
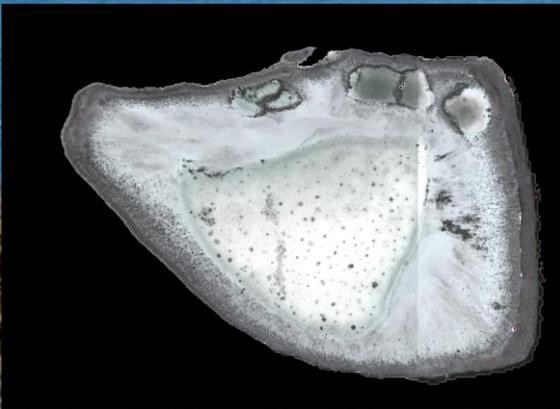
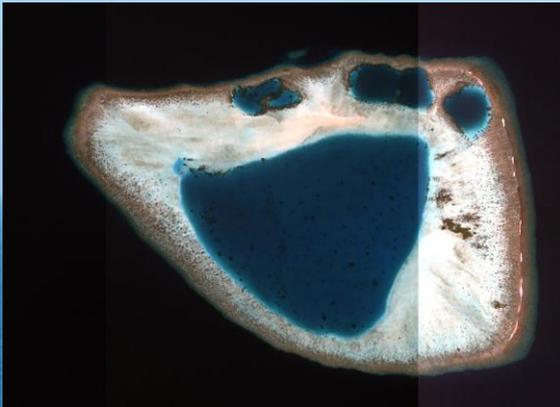


**Données Lidar
Hyperspectral**

Réflectivité du fond

**Estimation conjointe hauteur d'eau + fonds marins
⇒ pseudo-photos du fond où l'eau a été 'enlevée' et reconstruction 3D possible**

Image en pseudo-vraies couleurs



Modèles 3D texturés des fonds marins

Paramètres de réflectivité du fond

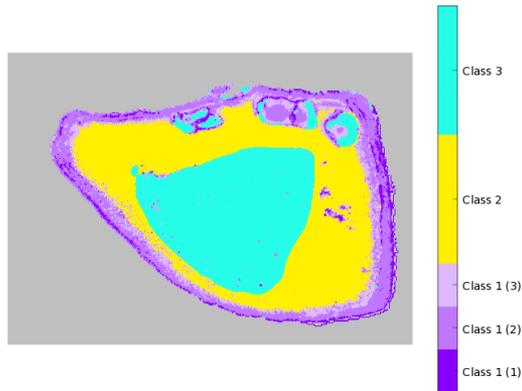
Cf. Video

Cartographie

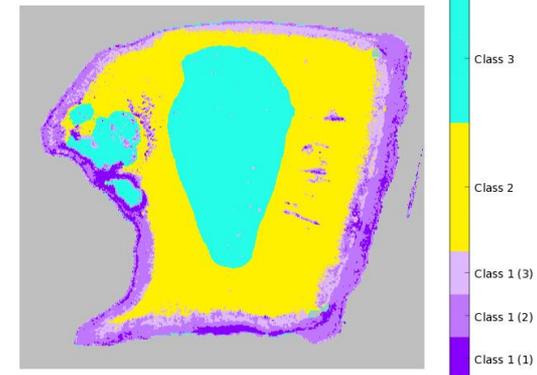
- **Typologie définie par les experts**
 - 2 niveaux d'information :
géomorphologie / assemblages biotiques
 - 2 niveaux de détail (hard / soft)
 - Classes pour chaque niveau de détail

- **Classif supervisée à partir de :**
 - Réflectivité du fond
 - bathy estimée ou exogène (lidar)
 - Base de données observations terrain

- **Perspectives :**
 - Analyse spectrale à partir de
l'estimation de réflectance du fond
+ librairie spectrale sous-marine



Class 1 : reef rim, 66ha
Class 1.1 : mixed corals 20%, 26ha
Class 1.2 : acropora 50%, 22ha
Class 1.3 : mixed corals 40%, 18ha



Class 2 : reef flat
Class 3 : lagoon, 127ha

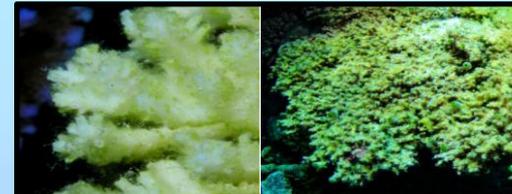
- **Indicateurs CC retenus Maldives**
 - % Acropora
 - % Coral rubble
 - % Dead corals
 - % Bleached corals



Total % Acropora



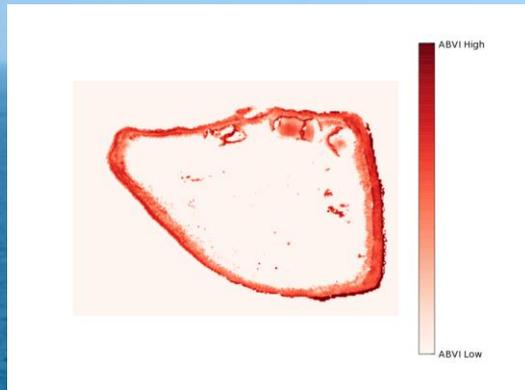
% coral rubble



% dead corals

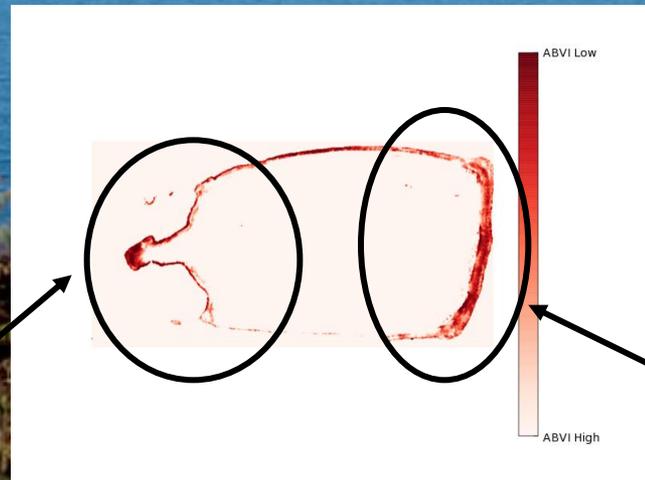


% bleached corals



Indice % Acropora ('Etat de santé')

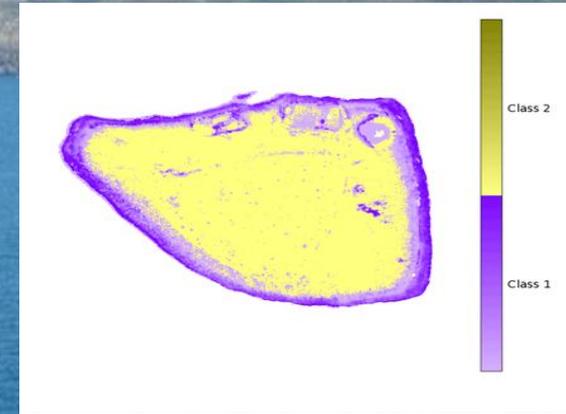
● **Calcul d'indices à partir des paramètres de réflectivité**



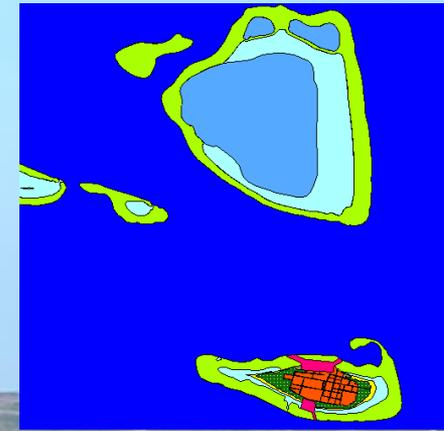
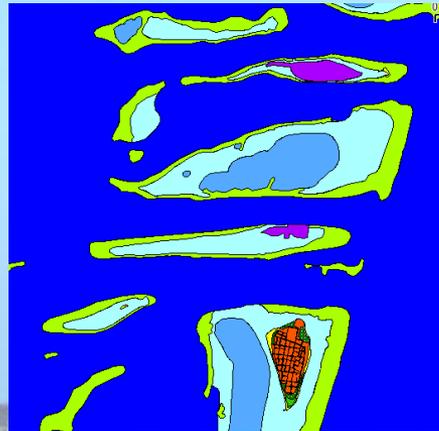
Inner faro

Intégration de l'indice dans la classif

Outer faro



- 11 Built up area - High density
- 12 Built up area - Low density
- 13 Island Resort
- 14 Roads
- 22 Harbor
- 42 Palm tree
- 43 Shrub and/or herbaceous vegetation area
- 44 Barren, sparsely vegetated area
- 45 Beaches and sand
- 51 Sea and ocean
- 52 Lagoon
- 53 Shallow lagoon
- 54 Coral reef



- **Méthodes en cours de développement**
 - Besoins de validation des estimations de bathy (programmes de validation en cours avec SHOM et service hydrographique norvégien)
 - Schéma d'inversion pas encore consolidé
 - Méthodes d'estimation de la réflectance du fond pas encore en place
 - Besoins de validation estimations paramètres colonne d'eau + fond
 - Application opérationnelle carto La Réunion / Mayotte / Iles Eparses / Martinique
- **Développement de stratégies de suivi (monitoring)**
 - Baseline à large échelle régionale (intégré Litto3D par exemple)
 - Opérationnalisation softs
 - Intégration hard sur vecteurs légers
 - Objectif moyen terme : utilisation par gestionnaires d'AMP
 - Potentielle démo Nouvelle-Calédonie début 2013 en cours de discussion opération 'Wings for Science' Virus SW80 équipé support capteur sous l'aile



Nouvelle génération de porteurs légers



Nouvelle génération de capteurs légers

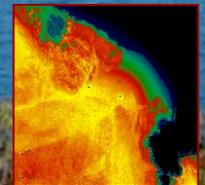
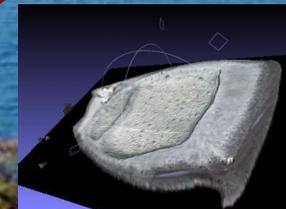
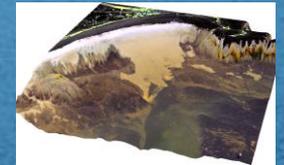


Nouvelles capacités en inversion de MTR

$$r(\lambda) = r_{\infty}(\lambda) \left(1 - a_1 e^{-2k^W(\lambda)z_B} \right) \frac{a_2}{\pi} \rho(\lambda) e^{-2k^B(\lambda)z_B}$$

avec

- $r(\lambda)$, réflectance sous la surface
- $r_{\infty}(\lambda)$, réflectance en profondeur infinie
- $\rho(\lambda)$, réflectance du fond
- $k^W(\lambda)$, $k^B(\lambda)$, coefficient d'atténuation diffuse
- z_B , hauteur de la colonne d'eau
- a_1 , a_2 , constantes



Outils et protocoles de télédétection 'smart' pour gestion zone littorale / monitoring récifs coralliens

Merci de votre attention