

# Caractérisation des habitats benthiques et estimation de la bathymétrie par télédétection hyperspectrale

-

## Application aux récifs coralliens de l'île de la Réunion

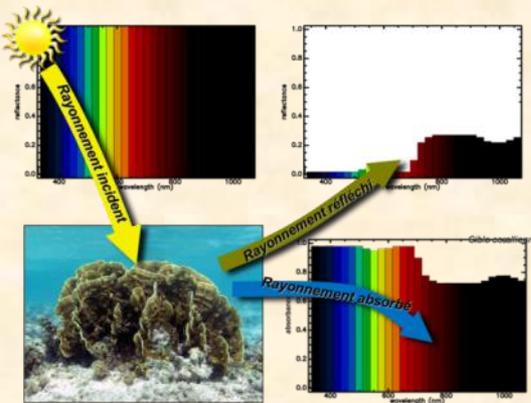
*Tristan Petit <sup>a</sup>, Touria Bajjouk <sup>a</sup>, Pascal Mouquet <sup>b</sup>, Benoit Vozel <sup>c</sup>, Christophe Delacourt <sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Ifremer, DYNECO, Brest, France

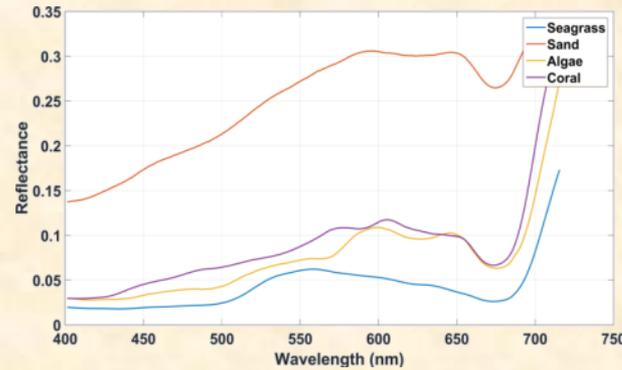
<sup>b</sup> Université de Bretagne Occidentale, UMR CNRS 6538, Brest, France

<sup>c</sup> Université de Rennes 1, IETR UMR CNRS 6164, Lannion, France

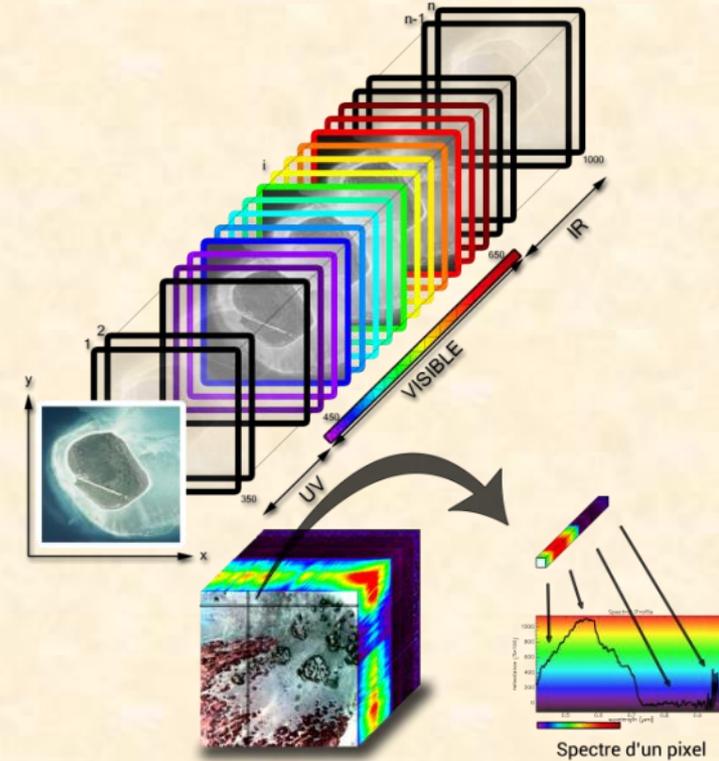
# Introduction - L'imagerie hyperspectrale



**Réflectance** : Fraction de la lumière incidente réfléchiée par la cible.



**Signature spectrale propre à chaque cible pure (=endmembers)**



**Hyperspectral aéroporté** = **Echantillonnage spectral très fin** de la lumière acquise (4nm) + **Forte résolution spatiale (40cm)**

# Introduction - Du soleil au capteur...

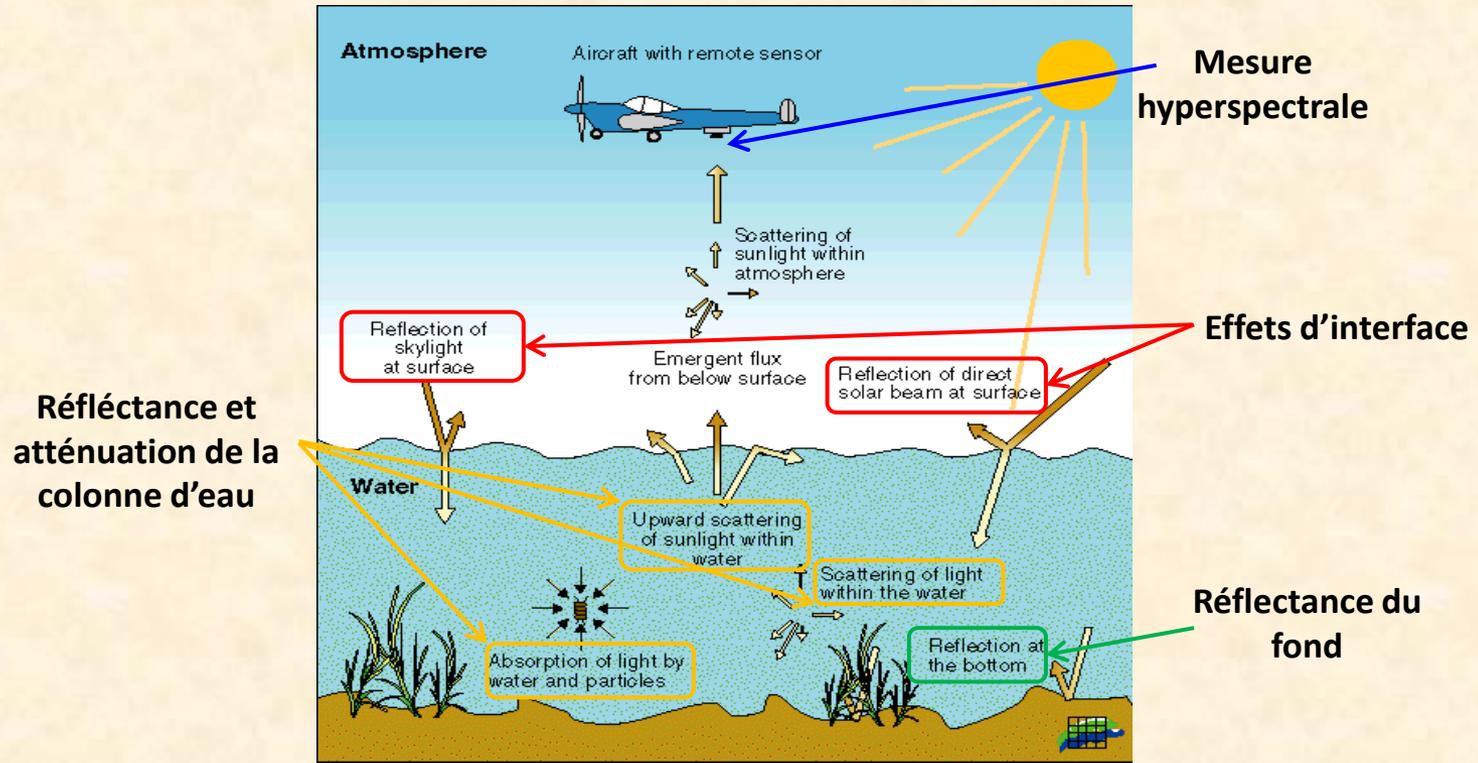


Illustration tirée de Bertels et al., 2008

**BUT :** Retrouver les **paramètres physiques du milieu** à partir de la réflectance observée à la surface de l'eau (= après correction atmosphérique)

## METHODE :

1. **construction d'un modèle direct** exprimant l'observation hyperspectrale en fonction des propriétés bio-physiques du milieu
2. **Inversion du modèle direct** pour retrouver les grandeurs physiques d'intérêt

# Modèle direct - Réflectance du fond

- Modèle de mélange linéaire

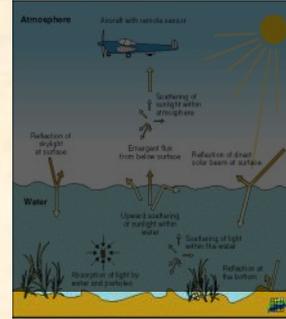
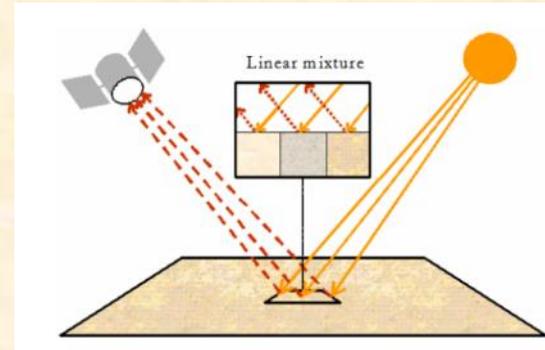
$$\rho_B = [\rho_{corail} \quad \rho_{algue} \quad \rho_{herbier} \quad \rho_{sable}] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{x}$$

$\rho_B$  : Vecteur réflectance fond ( $n \times 1$ )

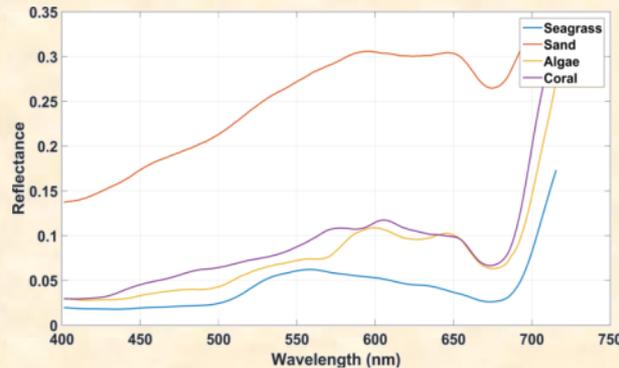
$\mathbf{E}$  : Matrice d'endmembers ( $n \times 4$ )

$\mathbf{x}$  : Vecteur d'abondance ( $4 \times 1$ )

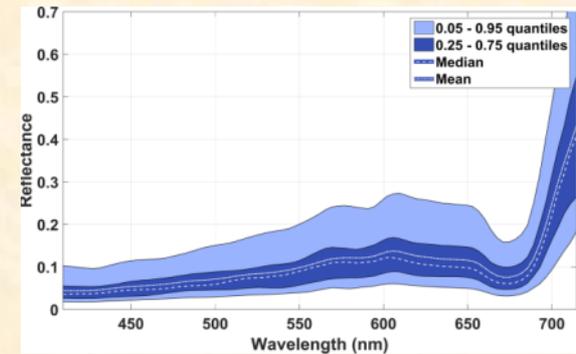
$n$  : Nombre de longueurs d'onde



Réflectance des endmembers mesurée *in-situ*



Spectres des endmembers retenus dans la matrice  $\mathbf{E}$



Variabilité spectrale du corail

➔ Réflectance du fond  $\rho_B$  exprimée en fonction de 4 scalaires qui sont les abondances en corail, algue, herbier et sable

# Modèle direct – Colonne d'eau

- **Quatre types de constituants « optiquement actifs »**

- Eau pure
- Matières organiques dissoutes colorées (CDOM)
- Matières particulaires organiques (phytoplancton)
- Matières particulaires non algales (NAP)

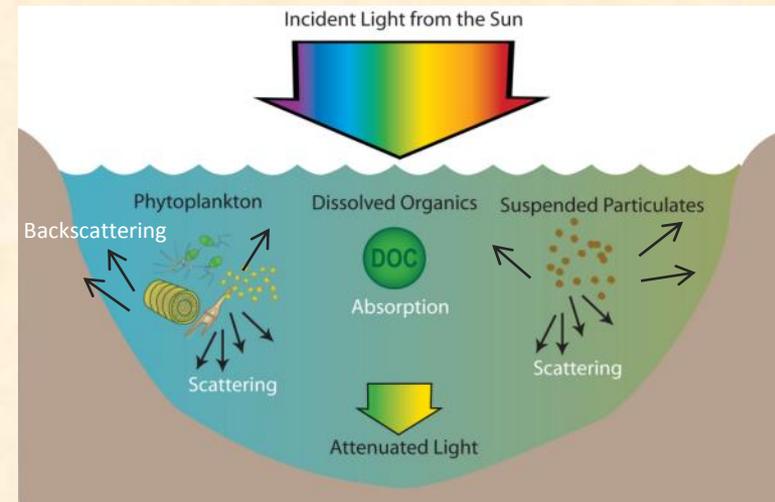
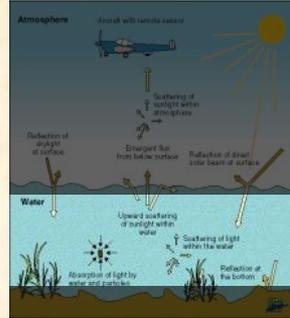
Vecteur des concentrations :  $\mathbf{C} = [C_{phy} \quad C_{CDOM} \quad C_{NAP}]$

- **Deux types de grandeurs modélisées** (Brando et al., 2009)

- Réflectance de l'eau :  $r_{rs}^{dw} = f_1(\lambda, \mathbf{C})$

- Coefficients d'absorption diffuse : 
$$\begin{cases} k_d = f_2(\lambda, \mathbf{C}) \\ k_u^c = f_3(\lambda, \mathbf{C}) \\ k_u^b = f_4(\lambda, \mathbf{C}) \end{cases}$$

➔ **Réflectance de l'eau ainsi que coefficients d'absorption diffuse exprimés en fonction de 3 scalaires qui sont les concentrations en phytoplancton, CDOM, et matières particulaires non algales.**



# Modèle direct – Réflectance surface

- **Modèle de réflectance surface** (Lee et al., 1998)

$$r_{mod}^{-}(\lambda) = r_{rs}^{dw}(\lambda) \left[ 1 - e^{-(k_d(\lambda) + k_u^C(\lambda))H} \right] + \frac{1}{\pi} \rho_B(\lambda) e^{-(k_d(\lambda) + k_u^B(\lambda))H}$$

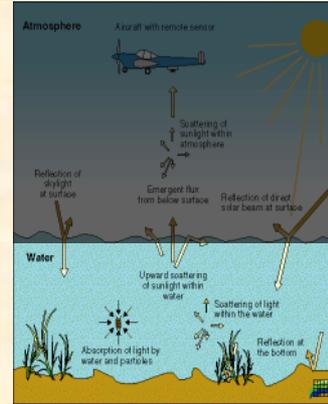
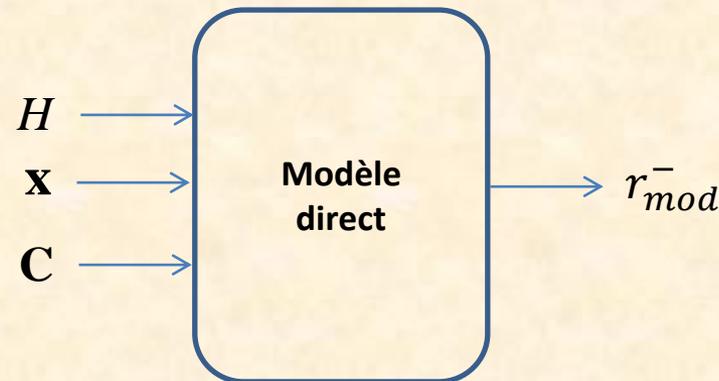
Avec :  $r_{mod}^{-}$ : Réflectance surface modélisée

$H$  : Hauteur d'eau

- **Inclusion des *a priori* dans le modèle**

$$r_{mod}^{-}(\lambda, \mathbf{C}, \mathbf{x}, H) = f_1(\lambda, \mathbf{C}) \left[ 1 - e^{-(f_2(\lambda, \mathbf{C}) + f_3(\lambda, \mathbf{C}))H} \right] + \frac{1}{\pi} \mathbf{E} \cdot \mathbf{x} \cdot e^{-(f_2(\lambda, \mathbf{C}) + f_4(\lambda, \mathbf{C}))H}$$

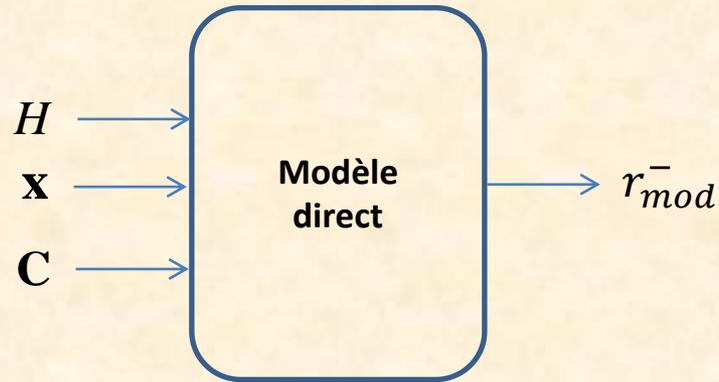
- **Synoptique du modèle direct**



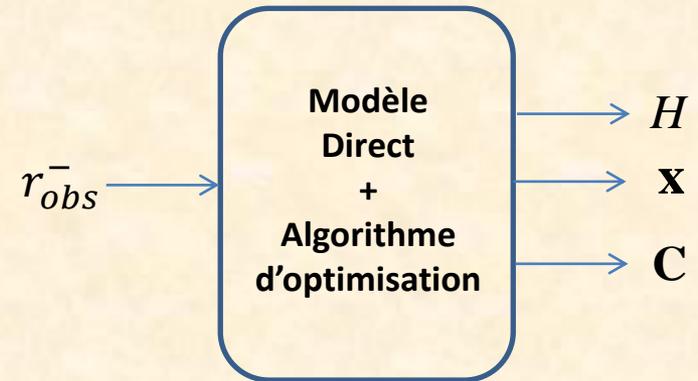
➔ **Réflectance surface exprimée en fonction de 8 scalaires (bathymétrie, abondances du fond, concentrations en éléments optiquement actifs dans l'eau).**

# Inversion du modèle - Principe

- Synoptique du modèle direct



- Synoptique du modèle inverse



- Inversion du modèle direct par optimisation

$$[\mathbf{C} \quad \mathbf{x} \quad H] = \arg \min_{\mathbf{C}, \mathbf{x}, H} c(r_{obs}^- ; r_{mod}^-(\mathbf{C}, \mathbf{x}, H))$$

➡ Fonction de coût  $c$  à définir. Elle représente la distance entre  $r_{obs}^-$  et  $r_{mod}^-$

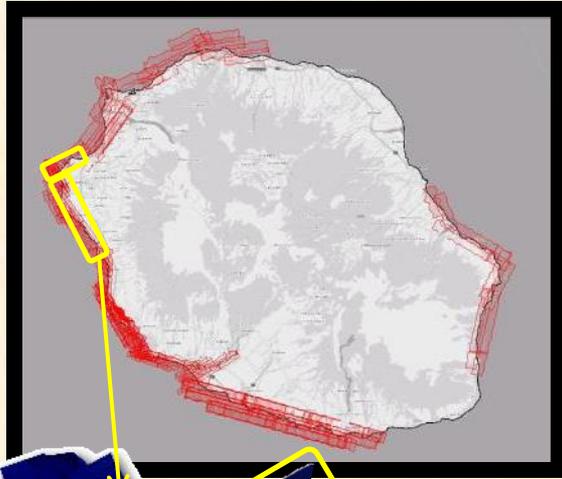
➡ Contraintes physiques à définir sur  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{x}$  et  $H$ .

# Inversion du modèle - Paramétrisation

- **Choix d'une fonction de coût**
  - **Distance euclidienne** ( $c_{euclid}$ )  
Donne la meilleure adéquation entre les spectres  $r_{obs}^-$  et  $r_{mod}^-$
  - **Angle spectral** ( $c_{SAM}$ )  
Robuste aux bruits multiplicatifs basse fréquence (variabilité amplitude endmembers)
  - **Distance euclidienne sur dérivée spectrale** ( $c_{deriv}$ )  
Robuste aux bruits additifs basse fréquence (exemple : réflexions à la surface de l'eau)
- **Contrainte sur les abondances du fond (vecteur  $x$ )**
  - **Somme à 1**  
Interprétation directe des abondances comme étant des taux de couverture
  - **Somme variable**  
Prise en compte d'une partie de la variabilité en amplitude des endmembers

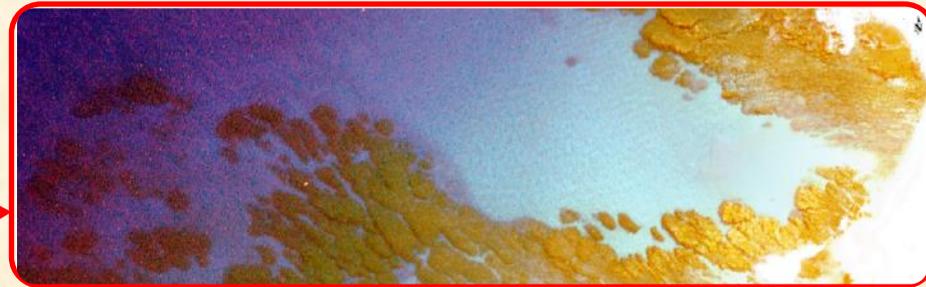
 **3 fonctions de coût x 2 types de contraintes sur les abondances = 6 algorithmes d'inversion à évaluer**

# Présentation des sites d'étude



Campagne Litto3d Océan Indien :  
Emprise des acquisitions  
hyperspectrales sur le littoral  
réunionnais

## Boucan



- Fonds homogènes
- Faible gradient bathymétrique

Lignes de vol sur le littoral de Saint-Gilles

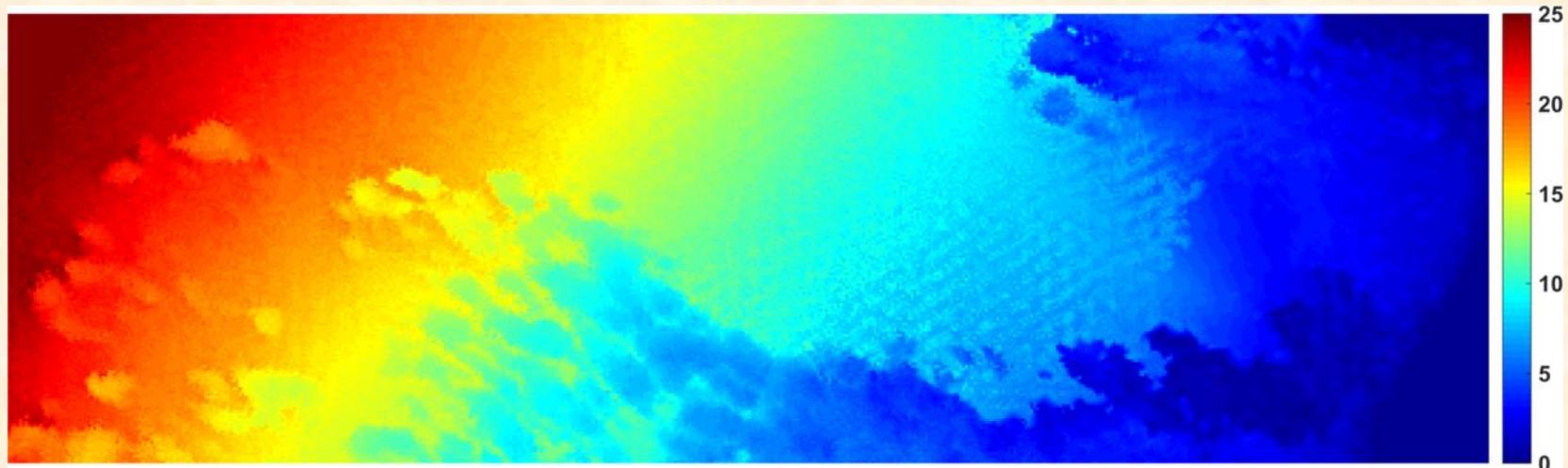
## Ermitage



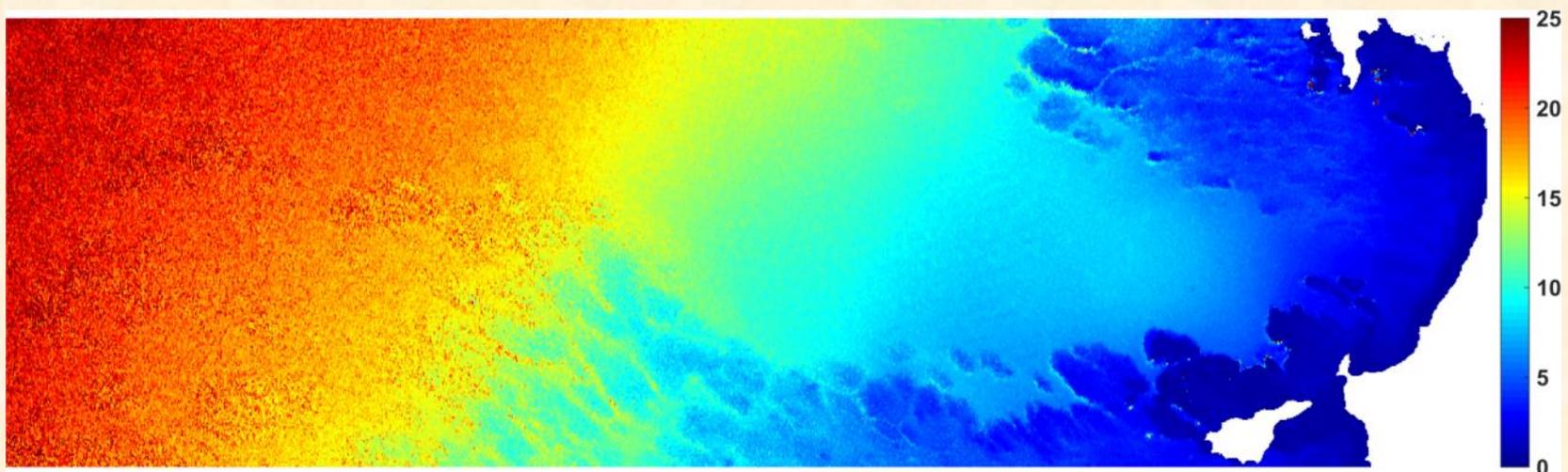
- Fonds hétérogènes
- Plateforme récifale
- Pente externe

# Résultats – Bathymétrie sur Boucan Canot

- Exemple de résultat
  - Bathymétrie LIDAR

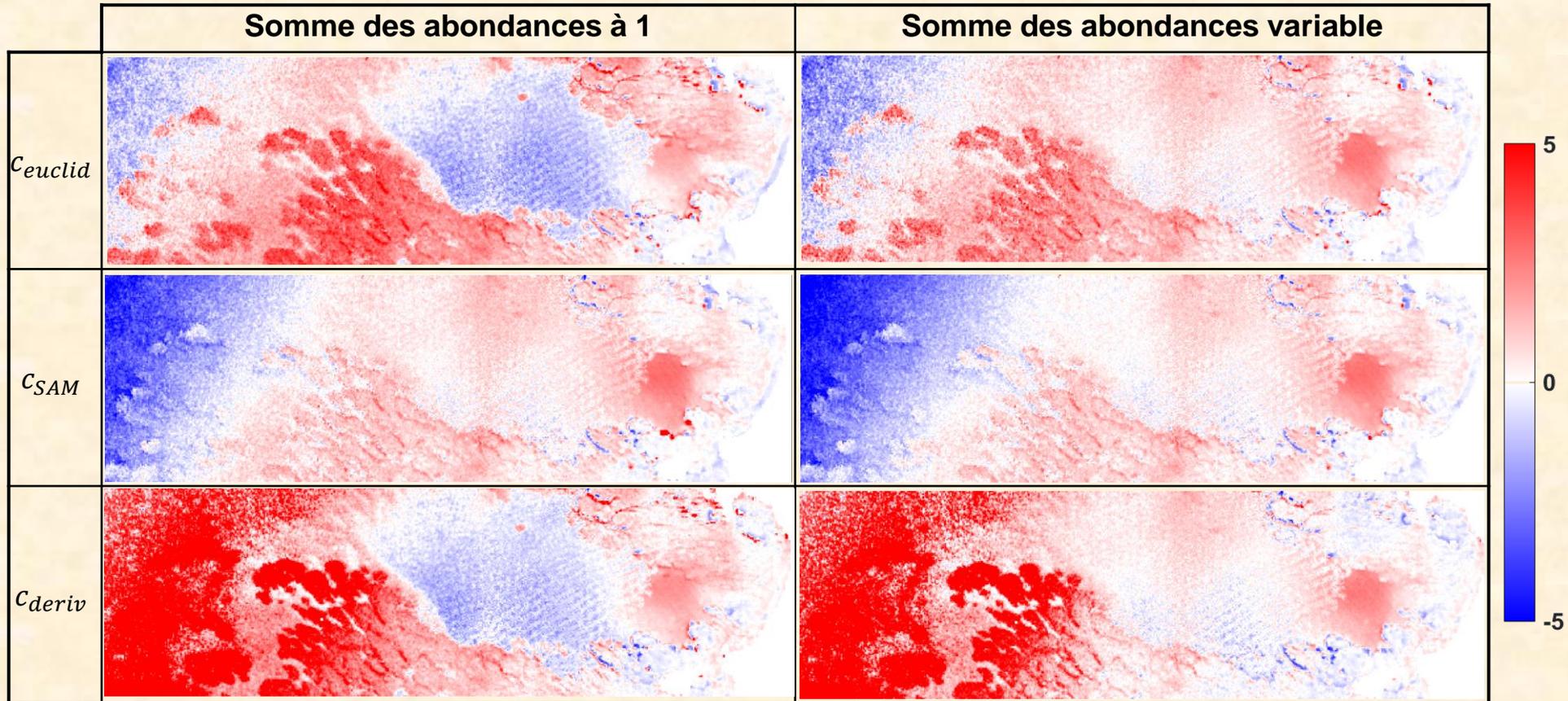


- Bathymetrie Hyperspectrale (algorithme euclid somme des abondances variable)



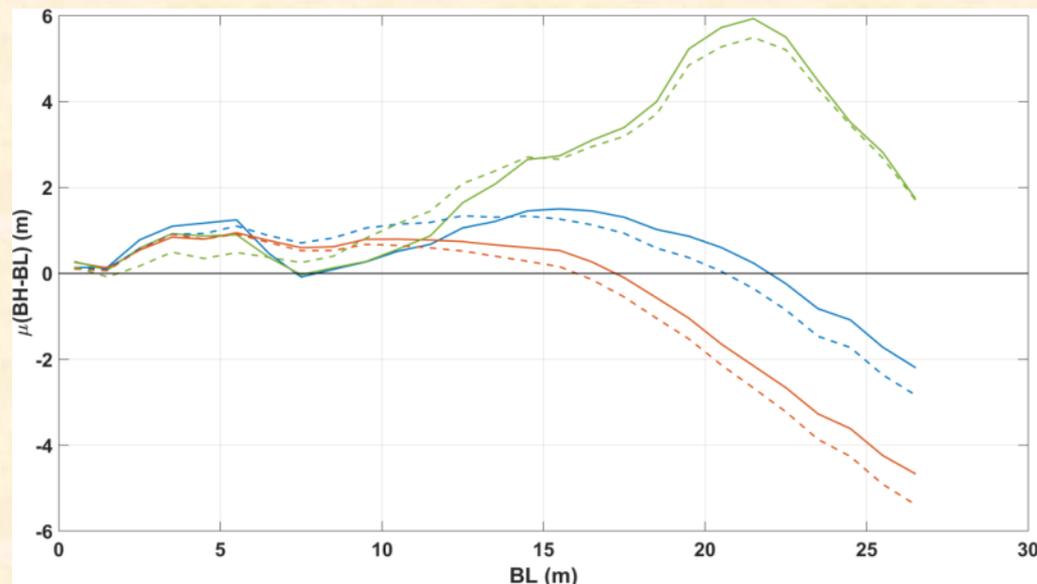
# Résultats – Bathymétrie sur Boucan Canot

- Cartes de différence entre bathymétrie hyperspectrale et Lidar pour les six algorithmes



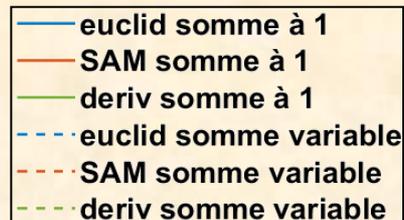
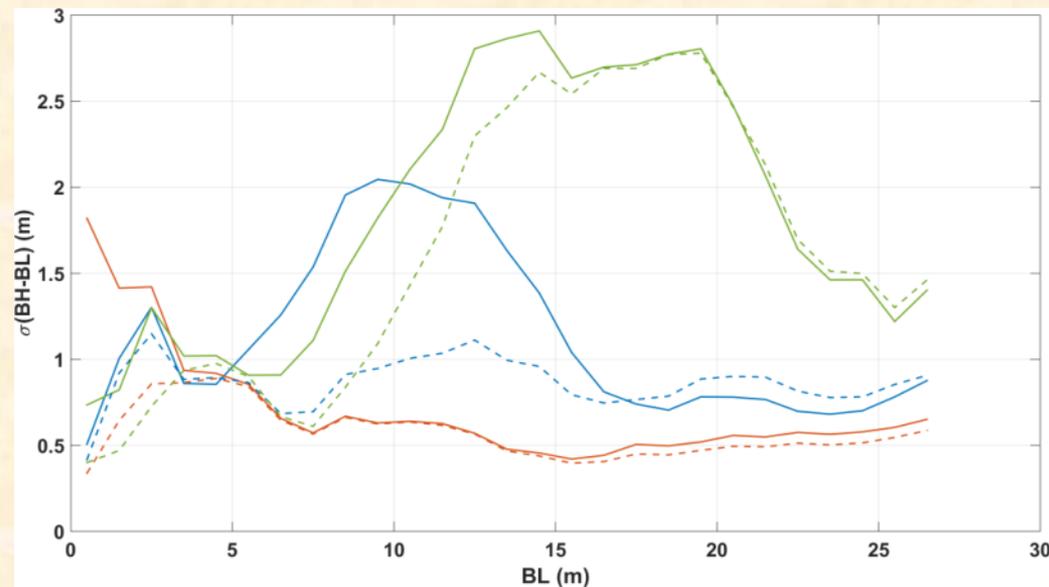
# Résultats – Bathymétrie sur Boucan Canot

## • Biais de l'estimation



- Biais faible et relativement stable jusqu'à 12m pour deriv, 15m pour SAM et 16m pour euclid
- Faible influence du changement de contrainte sur les abondances

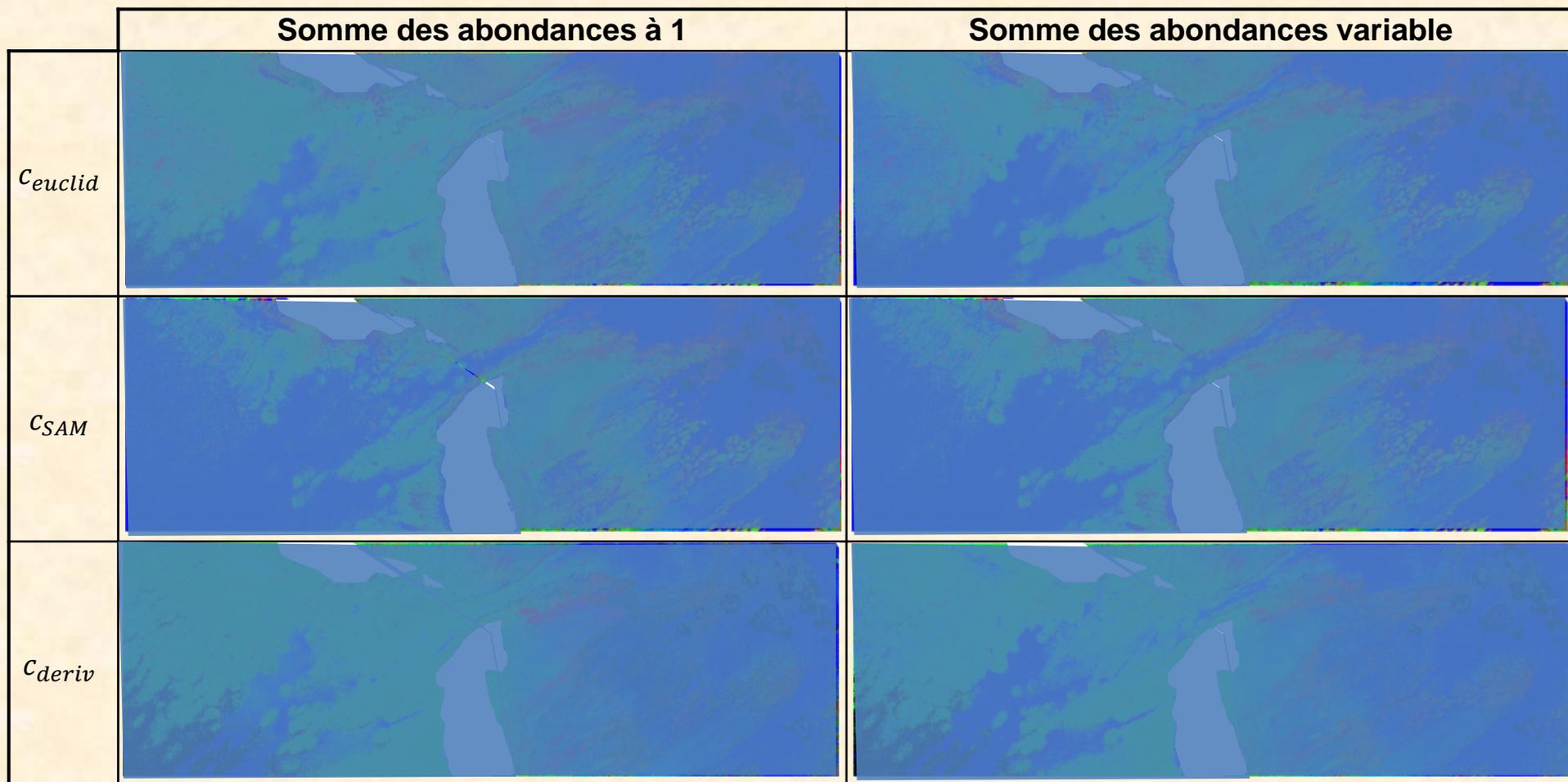
## • Ecart type de l'erreur d'estimation



- SAM présente les plus faibles variances
- Impact très positif de la contrainte « somme des abondances variable ».

# Résultats – Cartographie des fonds sur l'Ermitage

- Comparaison des résultats d'abondance issus des différents algorithmes



## Plateforme récifale :

- Bonne adéquation générale entre euclid et SAM
- Euclid somme à 1 présente des résultats localement incohérents
- Surestimation du sable sur le platier par deriv
- Surestimation des coraux entre les herbiers par euclid et SAM



## Pente externe:

- Euclid somme à 1 discrimine le mieux le couple sable/algue
- Diminution de la qualité des résultats avec l'augmentation de la bathymétrie

# Conclusions et perspectives

- **Potentiel de l'hyperspectral pour l'estimation de bathymétrie validé jusqu'à 15-20m de fond en eaux claires.**
- **L'utilisation de l'angle spectral (SAM) améliore la robustesse de l'estimation bathymétrique.**
- **Les taux de recouvrement des différents types de fonds sont globalement réalistes sur la plateforme récifale (faible bathymétrie).**
- **De fortes divergences entre les cartes d'abondance des différents algorithmes apparaissent avec l'augmentation de la bathymétrie (euclid somme à 1 semble le plus cohérent).**

 Ces conclusions tendent à montrer qu'il n'existe pas d'algorithme optimal dans l'estimation de tous les paramètres et à toutes les profondeurs.

 Ces tendances vont être validées sur d'autres zones ainsi que sur un nouveau jeu de données acquis en mai 2015 (projets Hyscores & Hypercoral)

**Merci pour votre attention !**