

Analyse des fonds en zone littorale méditerranéenne française (Port-Cros) par imagerie hyperspectrale aérienne : (du projet HypMed au) projet HypFoM

Mireille Guillaume‡, Audrey Minghelli*, Sylvain Jay ‡, Malik Chami†, Bruno Lafrance††, Yannick Deville*†, Philippe Deliot †*, Véronique Serfaty**

‡ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13013 Marseille, * Seatech, LSIS UMR 7296, Toulon, † LOV, Université Pierre et Marie Curie, Villefranche, †† CS, †* ONERA, Toulouse, ** IRAP, Université de Toulouse, Toulouse, ** MRIS, DGA



Plan de la présentation

Introduction : la problématique côtière

Du projet HypMed...

... au projet HypFoM

HypFoM : Premiers résultats

Analyse de la colonne d'eau par imagerie de télédétection en zone côtière

▷ Enjeux

- ▷ Environnement
- ▷ Défense
- ▷ Economie

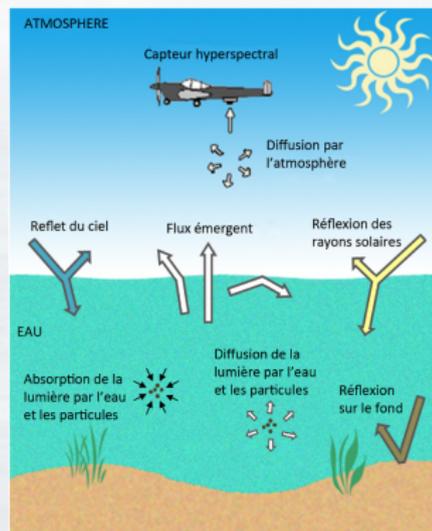
▷ Paramètres

- ▷ Bathymétrie H
- ▷ Composition de l'eau
- ▷ Composition des fonds

Atténuation par la colonne d'eau

→ complexité des transferts radiatifs

→ absorption $a(\lambda)$, et diffusion $b(\lambda)$

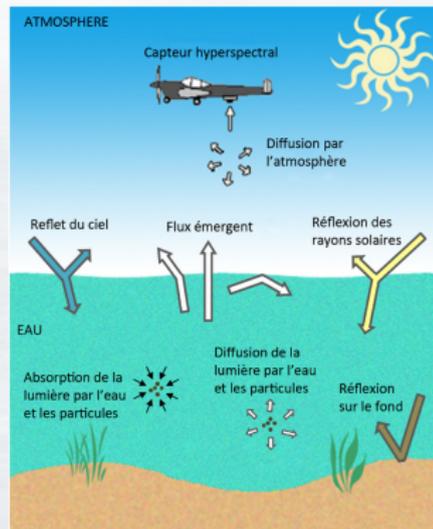


Transferts radiatifs

Analyse de la colonne d'eau par imagerie de télédétection en zone côtière

- ▷ Bathymétrie H
- ▷ Composition de l'eau (matières organiques dissoutes, matières en suspension, phytoplancton) : concentrations C_{PHY} , C_{CDOM} , C_{SM}
- ▷ Composition des fonds : coefficients du développement sur une base spectrale

Méthodes classiques : estimation des paramètres par minimisation d'une fonction de coût quadratique



Transfert radiatif en environnement côtier

Modèles simplifiés du transfert radiatif

Réflectance subsurface

$$\mathbf{r} = [r(\lambda_1), \dots, r(\lambda_L)]$$

Dépend de

- ▷ La réflectance du fond $r_{0,B}$
- ▷ La hauteur de la colonne d'eau H
- ▷ La composition de l'eau (C_{PHY} , C_{CDOM} , C_{SM})

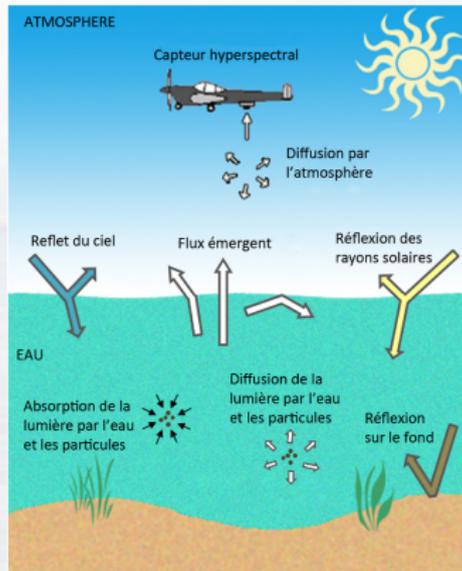
$$(M1) : \mathbf{r} = \mathbf{r}_\infty + \mathbf{K}(\mathbf{r}_{0,B} - \mathbf{r}_\infty)$$

$$(M2) : \mathbf{r} = \mathbf{r}_\infty + \mathbf{K}_B \mathbf{r}_{0,B} - \mathbf{K}_C \mathbf{r}_\infty$$

$r_{0,B}$: réflectance du fond,

\mathbf{K} , \mathbf{K}_B , et \mathbf{K}_C : matrices d'atténuation de l'eau.

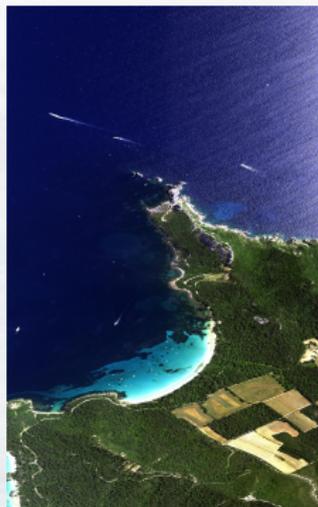
$$\mathbf{K} = \text{diag} \left[e^{-2k(\theta, \lambda_l)H} \right]_{l=1 \dots L}$$



Atténuation par la colonne d'eau

Estimation du fond marin - Projet TOSCA HypMed

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Environnement
- ▷ Collaboration Institut Fresnel/LSIS, implication du Parc National de Port Cros



Estimation du fond marin - Projet TOSCA HypMed

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Environnement
- ▷ Collaboration Institut Fresnel/LSIS, implication du Parc National de Port Cros
- ▷ Opportunité : mise à disposition d'images hyperspectrales, acquises en 2013 par l'ONERA



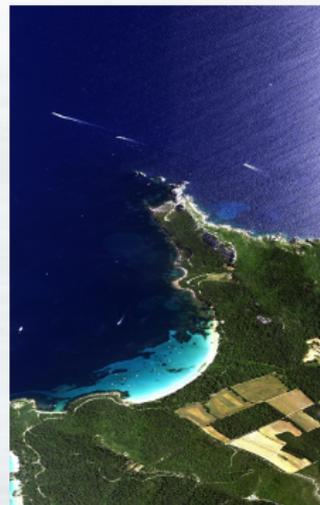
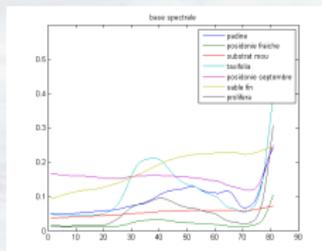
Estimation du fond marin - Projet TOSCA HypMed

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Environnement
- ▷ Collaboration Institut Fresnel/LSIS, implication du Parc National de Port Cros
- ▷ Opportunité : mise à disposition d'images hyperspectrales, acquises en 2013 par l'ONERA
- ▷ Projet CNES 2015
 - ▶ Contribution à l'achat d'un spectromètre de terrain
 - ▶ Campagnes de données, test de méthodes



Estimation du fond marin - Projet TOSCA HypMed

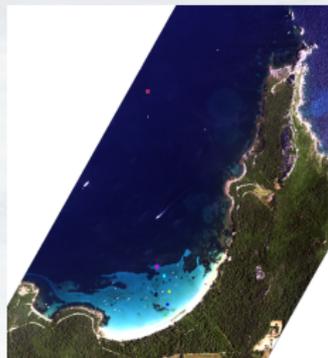
- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Environnement
- ▷ Collaboration Institut Fresnel/LSIS, implication du Parc National de Port Cros



Méthode 1 : inversion semi-supervisée

Atténuation de l'eau → bathymétrie → inversion de la colonne d'eau
→ classification

- ▶ Méthode développée au LSIS
- ▶ Inversion du modèle de transfert radiatif
- ▶ Cartographie antérieure des fonds sur ce site réalisée en 2000 par le CSM



Méthode 2 : estimation 'directe'

Estimation simultanée des paramètres de l'eau et des coefficients des fonds

La réflectance du fond est développée sur une base spectrale obtenue par la campagne de données : $\mathbf{r} = \sum_i f_i \mathbf{s}_i$

→ Estimer l'ensemble de paramètres

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2] = [H, C_{phy}, C_{cdom}, C_{sm}, f_1, \dots, f_J],$$

Méthode 2 : estimation 'directe'

Estimation simultanée des paramètres de l'eau et des coefficients des fonds

La réflectance du fond est développée sur une base spectrale obtenue par la campagne de données : $\mathbf{r} = \sum_i f_i \mathbf{s}_i$

→ Estimer l'ensemble de paramètres

$$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [H, C_{phy}, C_{cdom}, C_{sm}, f_1, \dots, f_J],$$

▶ **Moindres Carrés** (classique)

$$\hat{\theta}_{MC} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{r} - \mu(\theta)\|^2, \mu(\theta) \text{ modèle paramétrique}$$

Méthode 2 : estimation 'directe'

Estimation simultanée des paramètres de l'eau et des coefficients des fonds

La réflectance du fond est développée sur une base spectrale obtenue par la campagne de données : $\mathbf{r} = \sum_i f_i \mathbf{s}_i$

→ **Estimer l'ensemble de paramètres**

$$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [H, C_{phy}, C_{cdom}, C_{sm}, f_1, \dots, f_J],$$

- ▶ **Moindres Carrés** (classique)

$$\hat{\theta}_{MC} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{r} - \mu(\theta)\|^2, \mu(\theta) \text{ modèle paramétrique}$$

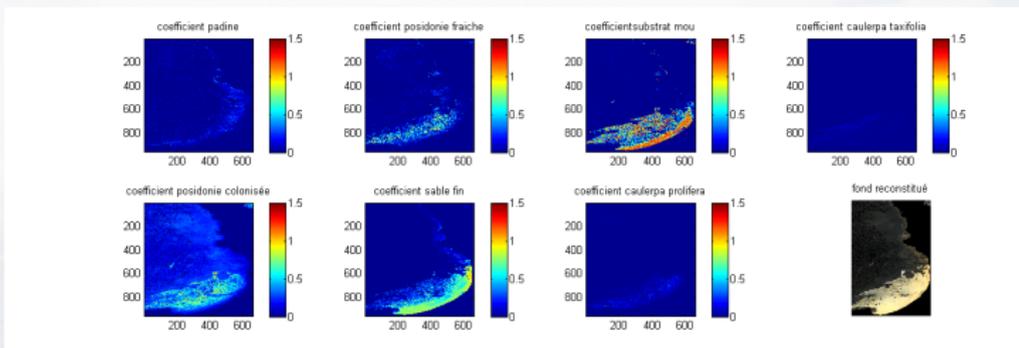
- ▶ **Maximum de Vraisemblance**

$$\hat{\theta}_{MV}(\chi_N) = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} P(\chi_N | \theta), \chi_N = \{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N\} \text{ échantillon de pixels i.i.d., } \mu(\theta) \text{ moyenne de la loi gaussienne}$$

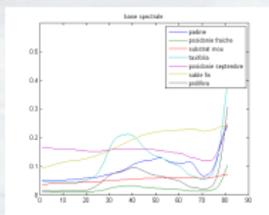
Moindres Carrés



Image sub-surface

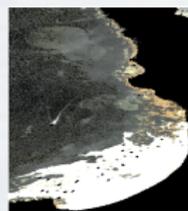


Coefficients f_i estimés



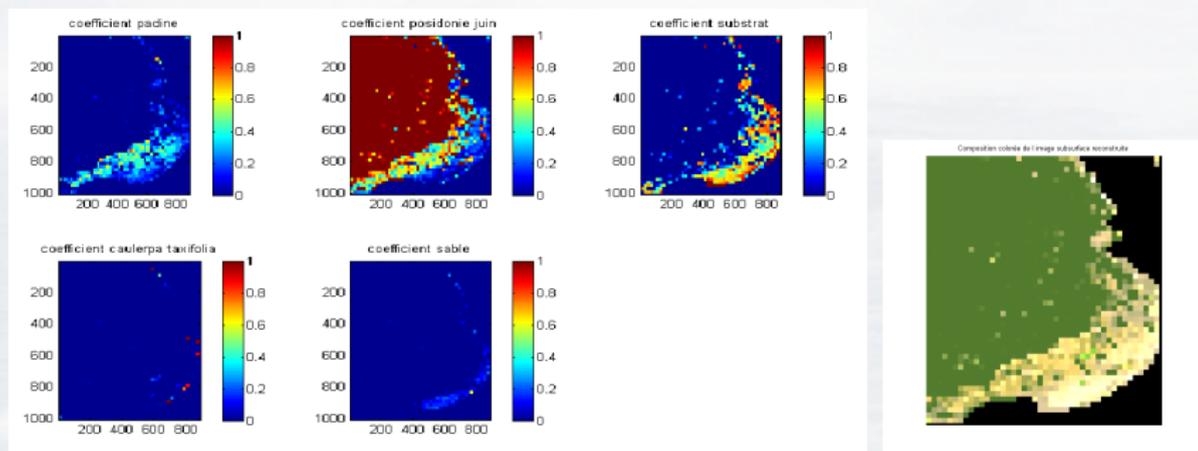
Base spectrale $\{s_i\}$

Fond reconstruit $r = \sum_i f_i s_i$



→ Bonne reconstruction visuelle, mais les coefficients ne correspondent pas aux abondances réelles des habitats benthiques

Maximum de Vraisemblance



Coefficients estimés

Fond reconstruit $\mathbf{r} = \sum_i f_i \mathbf{s}_i$

→ perte de résolution, mais estimation plus fiable
(sous ensemble homogène de l'échantillon)

Méthode 3 : Estimation/Dé-mélange

Estimation séparée et itérative des paramètres de l'eau et des coefficients des fonds

La réflectance du fond est développée sur une base spectrale :

$$\mathbf{r} = \sum_j f_j \mathbf{s}_j$$

→ Estimer séparément les paramètres

$$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [H, C_{phy}, C_{cdom}, C_{sm}, f_1, \dots, f_J]$$

Itérativement : Estimation/dé-mélange

- ▶ estimation des paramètres de l'eau θ_1 par **MV**
- ▶ dé-mélange pour obtenir θ_2 (supervisé ou non supervisé)

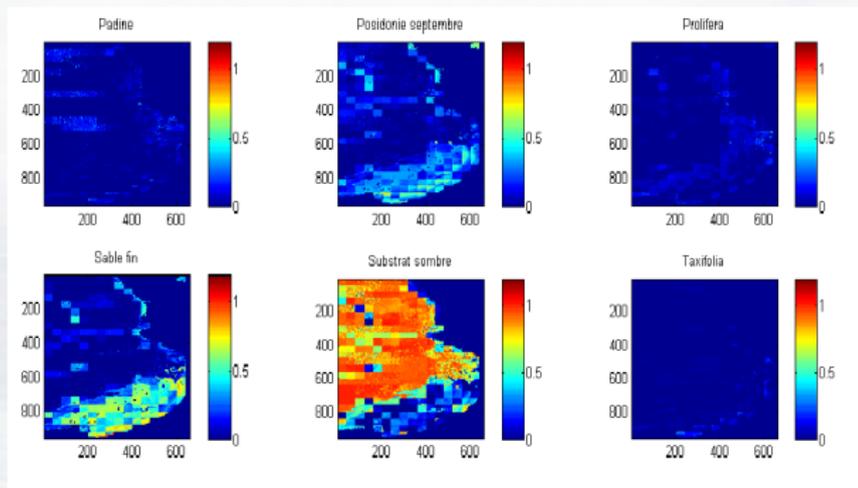
Méthode 3 : Estimation/Dé-mélange

→ Estimer séparément les paramètres

$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [H, C_{phy}, C_{cdom}, C_{sm}, f_1, \dots, f_J]$, **Itérativement : Estimation/dé-mélange**

- ▶ Estimation des paramètres de l'eau θ_1 par **MV**
 - MV non i.i.d. : fond inhomogène et H variable
 - première estimation de $\mathbf{K}(\theta_1)$
- ▶ Dé-mélange pour obtenir θ_2
 - inversion + dé-mélange supervisé (base spectrale + fcls)
 - ou triple NMF sous modèle M1, optimise $RQE(\mathbf{K}, \tilde{\mathbf{S}}, \mathbf{A}) = \|\tilde{\mathbf{R}} - \mathbf{K}\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{A}\|_{Fro}$ (contraintes sur \mathbf{K} et sur \mathbf{S})

Estimation/dé-mélange



Fond reconstruit



Détails



HypMed

- ▷ Test de trois méthodes pour l'étude des zones côtières
 - ▷ Résultats mitigés : avantages et inconvénients des trois méthodes
 - ▷ Dépendance à la taille et au choix de la base spectrale, estimation ↘ pour > 2 spectres
 - ▷ Dépendance à l'initialisation pour l'estimation
-
- Nouveau projet ASTRID/ANR
 - **Modélisation plus précise des transferts radiatifs**
 - **Modèles de mélange plus fins**
 - Stratégie ?
 - Evaluer les besoins en termes de capteur(Hypex ?)

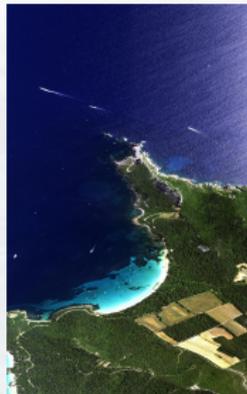
Projet HypFoM (ANR-15-ASTR-0019)

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Défense / Environnement
- ▷ Collaboration Physiciens modélisateurs, traiteurs des signaux et entreprise, implication du Parc National de Port Cros



Projet HypFoM (ANR-15-ASTR-0019)

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Défense / Environnement
- ▷ Collaboration Physiciens modélisateurs, traiteurs des signaux et entreprise, implication du Parc National de Port Cros
 - ▶ Complémentarité
 - ▶ Synergie



Projet HypFoM (ANR-15-ASTR-0019)

- ▷ Etude de la qualité de l'eau et **des fonds** en zone côtière méditerranéenne pour des applications Défense / Environnement
- ▷ Collaboration Physiciens modélisateurs, traiteurs des signaux et entreprise, implication du Parc National de Port Cros
 - ▶ Complémentarité
 - ▶ Synergie
- ▷ Développement de méthodes originales de de-mélange des fonds marins



Présentation des partenaires

Malik CHAMI	LOV (OOV) / Univ. P& M Curie Villefranche-s
Yannick DEVILLE	IRAP (OMP) / Univ. P. Sabatier Toulouse 3
Mireille GUILLAUME	Institut Fresnel / EC Marseille (coordinatrice)
Sylvain JAY	Institut Fresnel /EC Marseille (post-doctorant)
Bruno LAFRANCE	CS-SI Toulouse
Audrey MINGHELLI	LSIS / Seatech, Univ. Toulon

- Campagne de données : ONERA (vol aéroporté en septembre 2016) et Ifremer (robot Vortex imagerie des fonds)
- Expertise de Xavier BRIOTTET

Entreprise CS-SI

- ▷ 1790 collaborateurs (France et étranger)
- ▷ 4 secteurs stratégiques :
Défense et sécurité,
Espace, Aéronautique,
Energie
- ▷ Europe : implication dans de nombreux programmes spatiaux
- ▷ Activité 'transfert radiatif et mesures'

RADIATIVE TRANSFER: MODELING, SIMULATION

→ Description

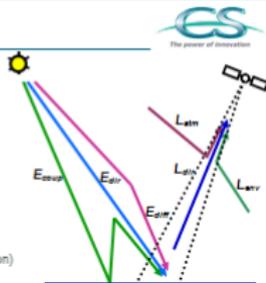
- ▷ Reflective domain : simulation of radiance, including polarization
- ▷ Thermic domain : simulation of brightness temperature
- ▷ Development of radiative transfer codes (SOS, OSOAA)
- ▷ Use and adaptation of scientist codes (6S, MODTRAN)

→ Major references

- ▷ Radiative transfer code implementation
 - SOS : Successive Order of Scattering (including gaseous absorption)
 - OSOAA : Ocean Successive Orders with Atmosphere - Advanced
- ▷ Radiative transfer code inter-comparison
 - Literature overview for 12 codes in the reflective and infrared spectral range
 - Comparison of MODTRAN, 6S, RTTOV and 4A (simulations on a common parameters base, spectral radiance or brightness temperature, gap analysis)

→ Services

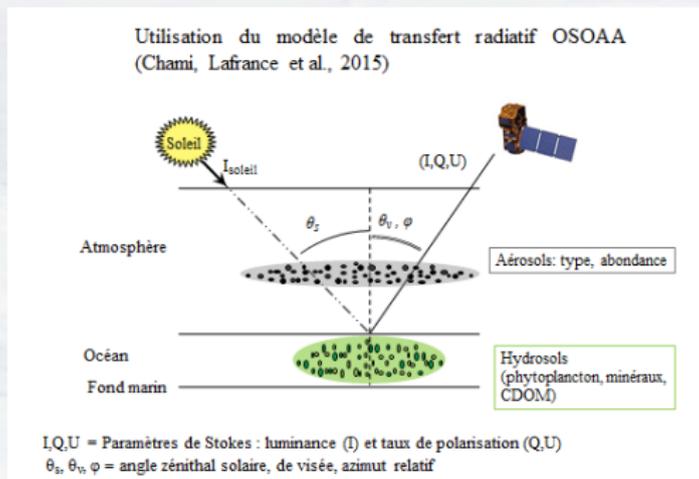
- ▷ Calibration (Look-Up Tables of reference simulations)
- ▷ Atmospheric corrections
- ▷ Research studies (modeling observations)
- ▷ Sensor definition (spectral bands sensitivity)



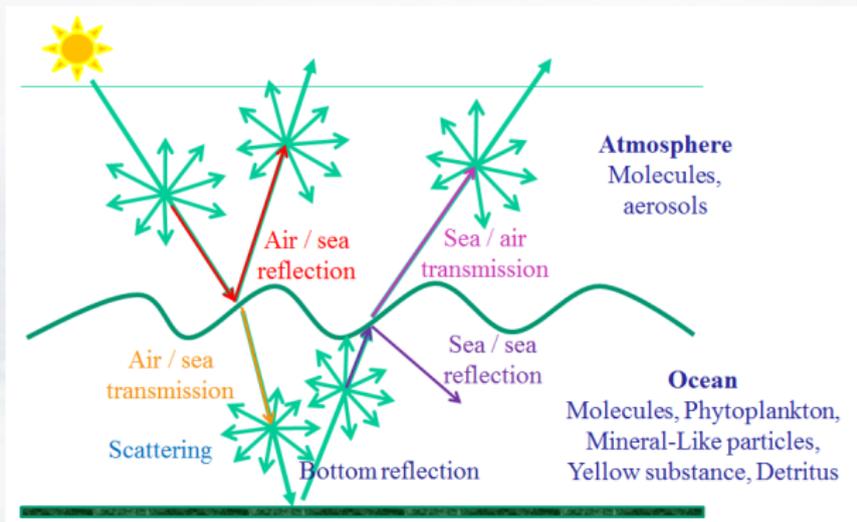
Laboratoire d'Océanographie de Villefranche

Le LOV développe des études théoriques, algorithmiques et expérimentales en océan ouvert et eaux côtières.

Le code de transfert radiatif OSOAA a été développé en collaboration avec CS-SI.



Code OSOAA



Fonctionnement du code OSOAA : prise en compte de la polarisation et de surfaces agitées

Travaux du LOV & CS-SI

→ Améliorer les modèles approchés de transfert radiatif dans le but de prendre en compte les effets de réflexion multiple par les hydrosols dans la colonne d'eau.

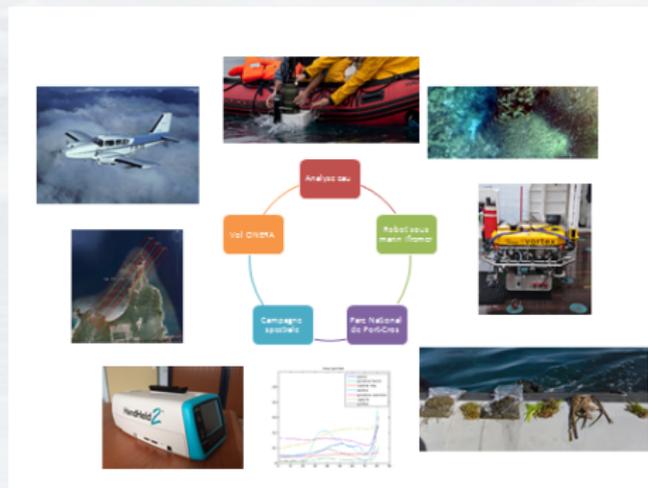
- ▶ Génération de tables de pré-calculs OSOAA des réflectances de surface et de fond pour différentes conditions marines
- ▶ Formulation analytique des écarts de réflectance surface/fond pour servir d'entrée aux méthodes de démixage spectral

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

Les activités de Recherche du laboratoire recouvrent des domaines de l'Automatique, de l'Image et de l'Informatique

Travaux du LSIS :

- ▶ Campagne de données
- ▶ Inversion semi-supervisée
- ▶ Participer à l'évaluation des performances en fonction des caractéristiques des capteurs (avec l'IF)



Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

Travaux antérieurs

- ▶ Développement rigoureux de modèle de mélange linéaire quadratique en environnement urbain (collaboration ONERA)
- ▶ Développement d'algorithmes de dé-mélange par NMF pour le modèle linéaire-quadratique

$$\mathbf{x} = \sum_{j=1}^J \mathbf{a}_j \mathbf{s}_j + \sum_{j=1}^J \sum_{l=j}^J \mathbf{a}_{l,j} \mathbf{s}_l \odot \mathbf{s}_j,$$

s.t. $\mathbf{s}_j \geq 0$, $\sum_{l=j}^J \mathbf{a}_{l,j} = 1$, $\mathbf{a}_j \geq 0$, $0 \leq \mathbf{a}_{l,j} \leq 0.5$

Formulation matricielle

$$\mathbf{X} = \mathbf{AS} = \mathbf{A}_a \mathbf{S}_a + \mathbf{A}_b \mathbf{S}_b$$

Meganem *et al*, IEEE TGRS, 52(1) : 544-558 (2014); Meganem *et al*, IEEE TSP 62(7) : 1822-1833 (2014)

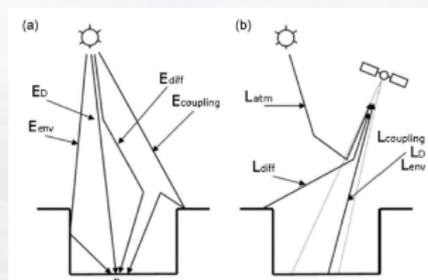


Fig. 3. Description of the different modeled radiative contributors. (a) Irradiances at the ground level. (b) Radiances at the sensor level.

$$\mathbf{X} = [x_1 \cdots x_P]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_a & \mathbf{A}_b \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} a_1(1) & \cdots & a_M(1) \\ \vdots & & \vdots \\ a_1(P) & \cdots & a_M(P) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} a_{1,1}(1) & a_{1,2}(1) & \cdots & a_{M,M}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1,1}(P) & a_{1,2}(P) & \cdots & a_{M,M}(P) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_a \\ \mathbf{S}_b \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}_a = [s_1 \cdots s_M]^T$$

$$\mathbf{S}_b = [s_1 \odot s_1 \quad s_1 \odot s_2 \quad \cdots \quad s_M \odot s_M]^T.$$

Institut Fresnel

Travaux antérieurs

- ▶ Estimation des paramètres de l'eau et détection de cibles immergées (Projet REI/DGA HypLitt, IF + Actimar)
- ▶ Dé-mélange linéaire du fond sous la colonne d'eau (triple NMF)
- ▶ Algorithme de dé-mélange par NMF doublement bi-linéaire suivant le modèle de Fan

$$\mathbf{x} = \sum_{l=1}^J a_l \mathbf{s}_l + \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i+1}^J a_i a_j \mathbf{s}_i \odot \mathbf{s}_j,$$

\mathbf{x} : pixel, a_l fraction d'abondance correspondant au endmember l , \odot produit de Hadamard.

Fan *et al*, IJRS 2009; Echès & Guillaume, IEEE GRSL, 11(4) : 778-782 (2014)

Travaux de l'IRAP & l'IF

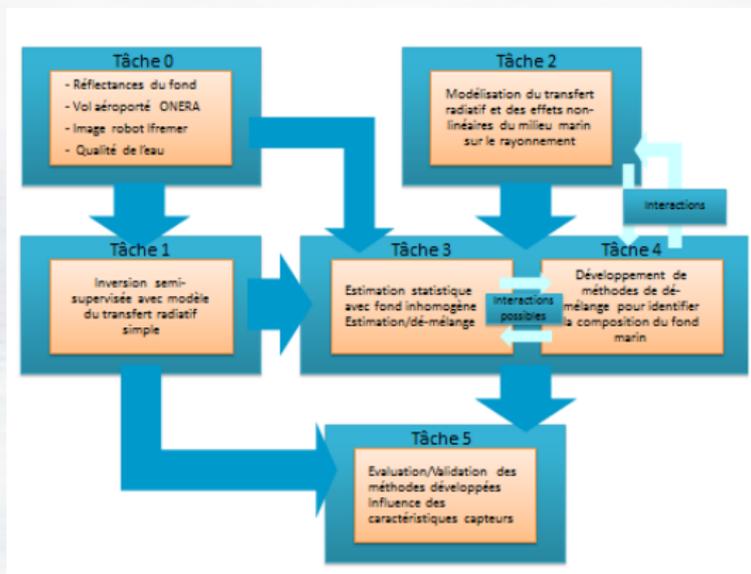
IRAP

- ▶ Itérer avec le LOV/CS-SI pour la formulation des modèles 'fins'
- ▶ Développer des méthodes de dé-mélange non-linéaires adaptées aux modèles 'fins'

Institut Fresnel

- ▶ Participer aux itérations avec le LOV/CS pour la formulation des modèles et au développement de méthodes de dé-mélange adaptés aux modèles (avec IRAP)
- ▶ Améliorer les méthodes d'estimation et estimation/dé-mélange
- ▶ Evaluer les performances en fonction des caractéristiques capteurs et comparaison de méthodes (avec LSIS)

Déroulement du projet

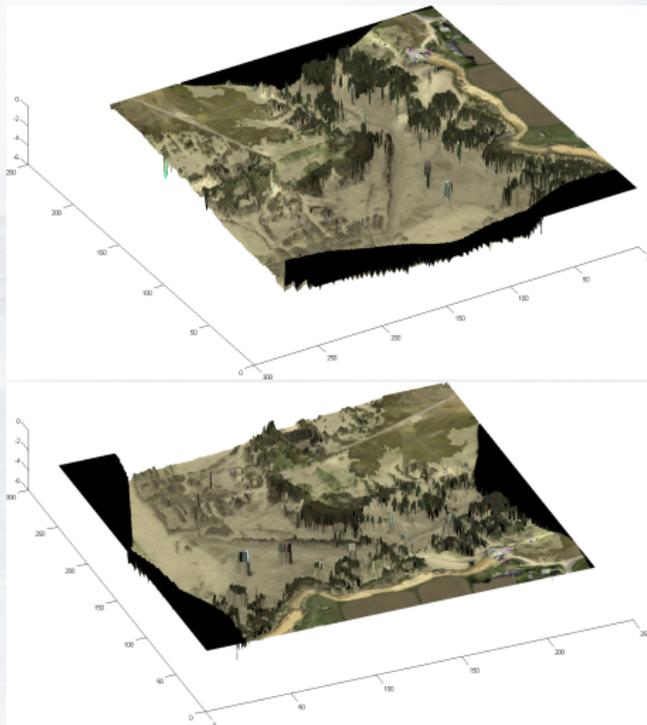
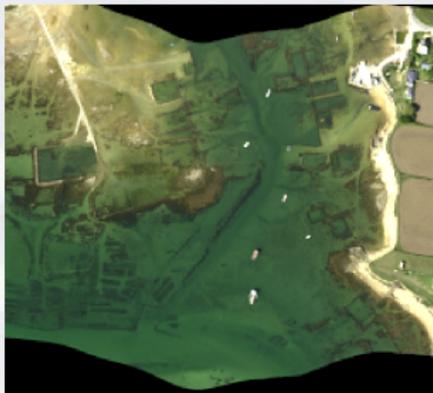


Estimation des paramètres

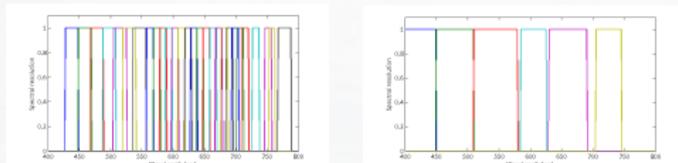
- Maximum de Vraisemblance 'un pixel'
- Importance de l'initialisation
- Protocole d'estimation du fond par 'paires'

Image 'Quiberon' (HypLitt, bas) et reconstruction 3D du fond (droite)

Remerciements à Actimar , www.actimar.fr



Estimation : simulations Casi-2 et Worldview-3



Bandes spectrales Casi-2 (gauche) et Worldview-3 droite)

- ▶ Résolutions spatiales resp. 4 m et 1 m
- ▶ Données spectrales à la résolution du capteur (spectres spécifiques et coeff d'absorption de l'eau)
- ▶ Pour une profondeur donnée, on simule la réflectance de surface (modèle eau + interface eau/air)
- ▶ Tirage 150 vecteurs aléatoires gaussiens avec la matrice de covariance estimée sur une zone profonde aux résolutions spatiale et spectrale du capteur
- ▶ Estimation pour les 150 spectres et calcul moyenne et variance pour chaque paramètre/profondeur.

Précision de l'estimation : bornes de Cramer-Rao

- ▶ Précision théorique maximale d'un estimateur

$$[bcr(\theta)]_{i,j}^{-1} = [I(\theta)]_{i,j} = \mathbb{E} \left[\frac{\partial \ln(P(x|\theta))}{\partial \theta_i} \frac{\partial \ln(P(x|\theta))}{\partial \theta_j} \right]$$

- ▶ Dépend du modèle de transfert radiatif et du bruit
- ▶ Ecart-types des estimations pour les deux configurations :
Casi-2 (haut, 28 b.s., 4m) et
Worldview-3 (bas, 6 b.s., 1m)
- ▶ $fond = A * R_{sable} + (1-A) * R_{algue}$,
 $A = 0.8$, $C_{phy} = 1.5 \mu g/L$, $C_{cdom} = 0.03 m^{-1}$, $C_{nap} = 2 mg/L$.

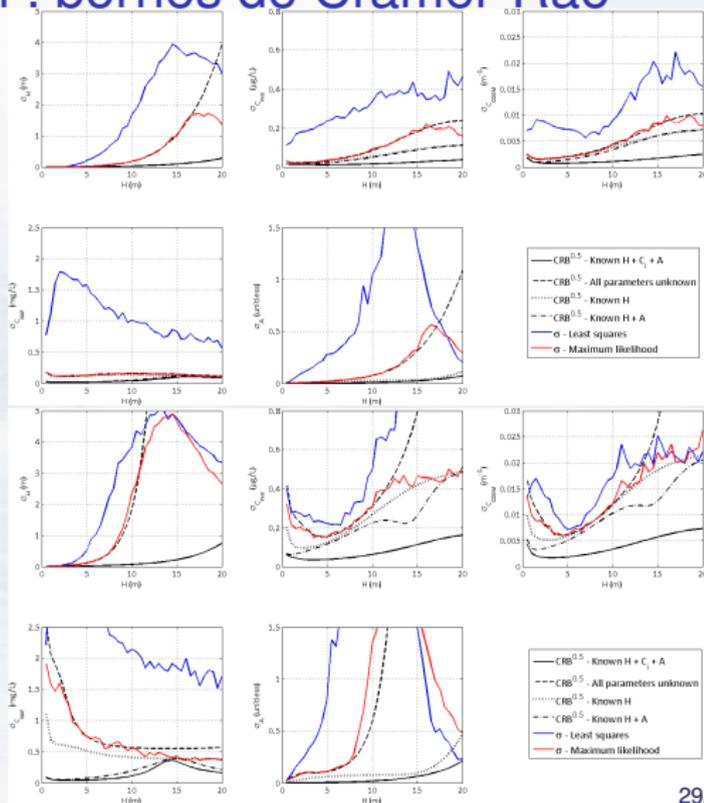
Précision de l'estimation : bornes de Cramer-Rao

- Précision théorique maximale d'un estimateur

$$[bcr(\theta)]_{i,j}^{-1} = [I(\theta)]_{i,j} = \mathbb{E} \left[\frac{\partial \ln(P(\chi|\theta))}{\partial \theta_i} \frac{\partial \ln(P(\chi|\theta))}{\partial \theta_j} \right]$$

- Dépend du modèle de transfert radiatif et du bruit
- Ecart-types des estimations pour les deux configurations : Casi-2 (haut, 28 b.s., 4m) et Worldview-3 (bas, 6 b.s., 1m)

- fond=A*Rsable + (1-A)*Ralgue,
 $A = 0.8$, $C_{phy} = 1.5 \mu\text{g/L}$, $C_{cdom} = 0.03 \text{m}^{-1}$, $C_{nap} = 2 \text{mg/L}$.



Précision de l'estimation : bornes de Cramer-Rao

- Précision théorique maximale d'un estimateur

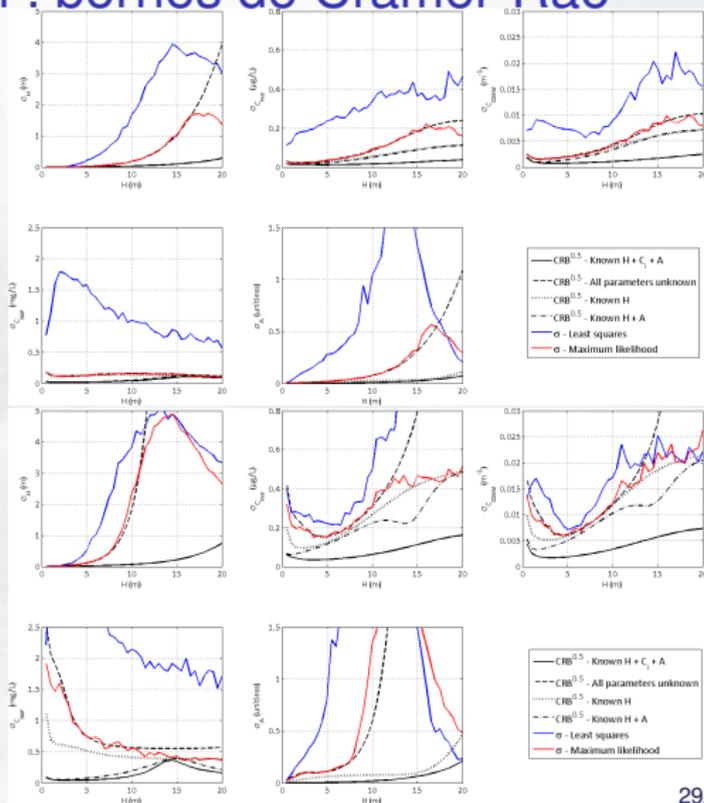
$$[bcr(\theta)]_{i,j}^{-1} = [I(\theta)]_{i,j} = \mathbb{E} \left[\frac{\partial \ln(P(X|\theta))}{\partial \theta_i} \frac{\partial \ln(P(X|\theta))}{\partial \theta_j} \right]$$

- Dépend du modèle de transfert radiatif et du bruit
- Ecart-types des estimations pour les deux configurations : Casi-2 (haut, 28 b.s., 4m) et Worldview-3 (bas, 6 b.s., 1m)

- fond = $A * R_{sable} + (1-A) * R_{algue}$,

$$A = 0.8, C_{phy} = 1.5 \mu g/L, C_{cdom} = 0.03 m^{-1}, C_{nap} = 2 mg/L.$$

- MV \equiv BCR**



Conclusion

- ▶ HypFoM : améliorer l'estimation du fond marin en zone côtière
- ▶ Premiers résultats encourageants en mélange linéaire
- ▶ Campagne de données complète
- ▶ Elaborer des modèles de transfert radiatif plus précis
- ▶ Réaliser de nouvelles méthodes de dé-mélange