ANR-15-ASTR-0019 HypFoM - Analyse du fond marin par imagerie hyperspectrale : une approche sub-pixel ; prise en compte de modèles du transfert radiatif précis de la colonne d'eau et du fond

M. Guillaume[1], S. Jay[1], A. Minghelli[2], M. Chami[3], B. Lafrance[4], Y. Deville[5], V. Serfaty[6]

[1] Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13013 Marseille, France ; [2] Univ. de Toulon, Seatech, LSIS UMR 7296, 83041 Toulon, France; [3] LATMOS, Univ. Pierre et Marie Curie - UMR CNRS 8190, OCA de Nice, Boulevard de l'Observatoire CS 34229 06304 Nice Cedex 4, France, [4] C-S SI, rue brindejonc des moulinais 31500 Toulouse, [5] IRAP, OMP, Univ. Paul Sabatier Toulouse 3, 14 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, 6 DGA, MRIS, 60 boulevard Martial Valin - CS 21623 75509 PARIS Cedex 15

Objectifs

- Développer un modèle avancé de transfert radiatif de la colonne d'eau
- Développer des méthodes d'estimation et de dé-mélange des fonds
- Faire une cartographie des habitats benthiques de la zone de Porquerolles
- Evaluer théoriquement et expérimentalement la qualité des résultats

Estimation des paramètres et variabilité

Modèle de transfert radiatif : modèle classique de Lee (1)

$$r(\boldsymbol{\lambda};\boldsymbol{\Theta}) = r_\infty(\boldsymbol{\lambda})\left(1 - e^{-\left(k_d(\boldsymbol{\lambda})+k_u^c(\boldsymbol{\lambda})\right)H}\right) + \frac{\rho_b}{\pi} e^{-\left(k_d(\boldsymbol{\lambda})+k_u^b(\boldsymbol{\lambda})\right)H}$$

Paramètres bio-optiques

$$r_\infty(\lambda) = \left(0.084+0.17\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}\right)\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}$$

$$k_d(\lambda) = \frac{a(\lambda)+b_b(\lambda)}{\cos\theta_s}$$

$$k_u^b(\lambda) = 1.04(a(\lambda) + b_b(\lambda))\left(1+5.4\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}\right)^{0.5}$$

$$k_u^c(\lambda) = 1.03(a(\lambda) + b_b(\lambda))\left(1+2.4\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}\right)^{0.5}$$

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + [a_0(\lambda)+a_1(\lambda)\ln P]P + Ge^{-0.015(\lambda-440)}$$

$$b_b(\lambda) = b_{b,w}(\lambda) + X\left(\frac{550}{\lambda}\right)^{0.5}$$

$$\rho_b(\lambda) = B_1\rho_{b,1}(\lambda) + B_2\rho_{b,2}(\lambda)$$

Paramètres à estimer

$$\Delta = [\boldsymbol{H},\boldsymbol{P},\boldsymbol{G},\boldsymbol{X},\boldsymbol{B_1},\boldsymbol{B_2}]$$

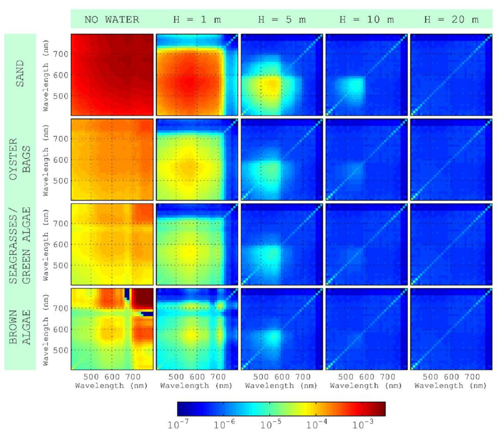
Modèle de variabilité : prise en compte du bruit et de la variabilité intrinsèque

$$\boldsymbol{r} = [(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K_c})\boldsymbol{r_\infty} + \boldsymbol{K_b}(\boldsymbol{B_1\mu_{b,1}} + \boldsymbol{B_2\mu_{b,2}})] + \underbrace{[\boldsymbol{n_{surf}} + \boldsymbol{K_b}(\boldsymbol{B_1 n_{b,1}} + \boldsymbol{B_2 n_{b,2}})]}_{\text{Bruit et variabilité intrinsèque}}$$

K_b, K_c : matrices d'atténuation

Estimation du maximum de vraisemblance : MILE ou MILEBI (2)

- Loi gaussienne multivariée : $\boldsymbol{\mu}(\Delta) = \boldsymbol{r}$; $\boldsymbol{\Gamma_S}$ ou $\boldsymbol{\Gamma}(\Delta)$
- Matrices de covariance du bruit et des espèces benthiques



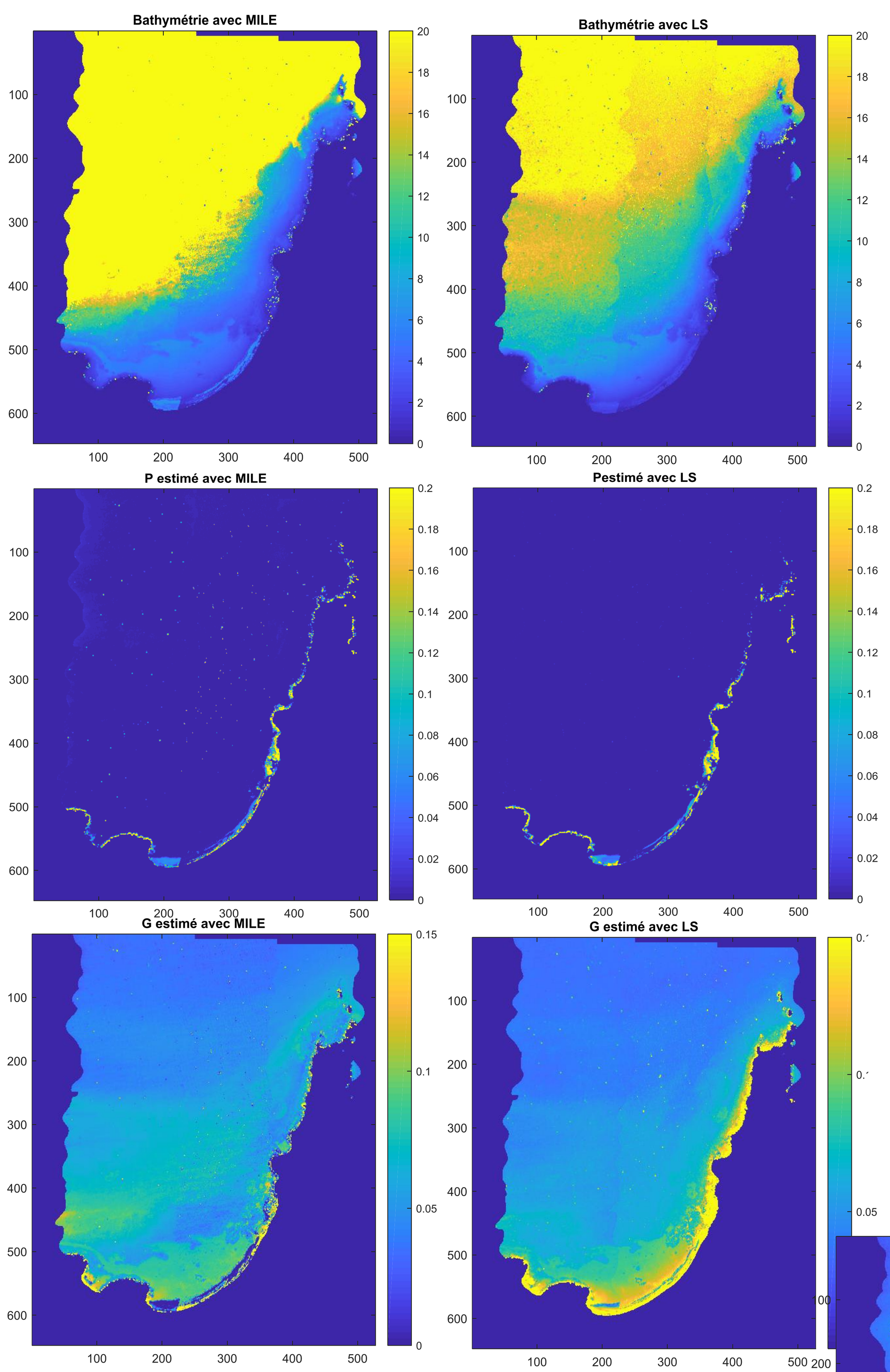
$$\hat{\Delta}_{MILE}(\boldsymbol{r}) = \underset{\Delta}{\operatorname{argmax}}\left(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{\mu}(\Delta)\right)^t\boldsymbol{\Gamma}_s^{-1}\left(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{\mu}(\Delta)\right)$$

$$\hat{\Delta}_{MILEBI}(\boldsymbol{r}) = \underset{\Delta}{\operatorname{argmax}}\left\{|\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\Delta})|^{-1/2}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{\mu}(\Delta))^t\boldsymbol{\Gamma}(\Delta)^{-1}(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{\mu}(\Delta))}\right\}$$

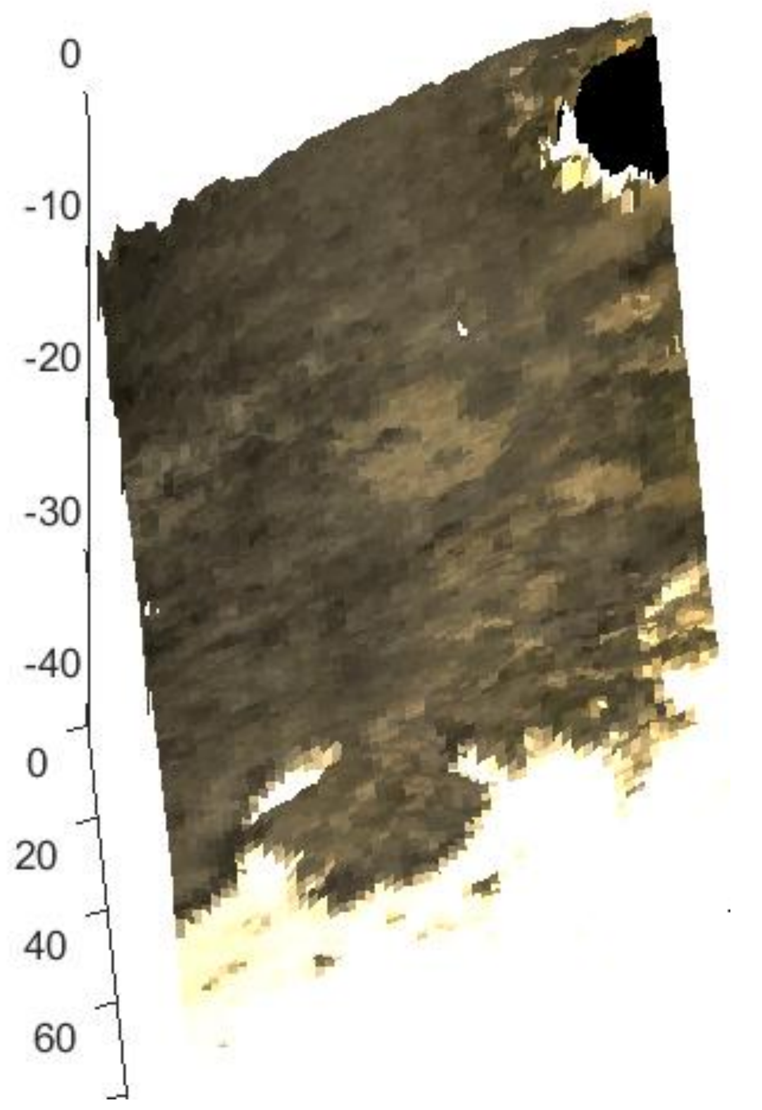
Résultats d'estimation

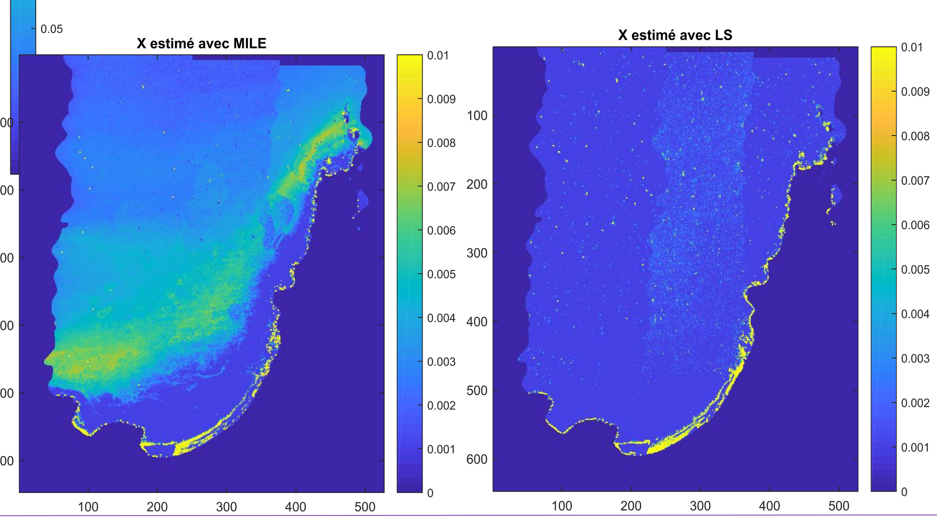
Cartographie des paramètres $\Delta = [\boldsymbol{H},\boldsymbol{P},\boldsymbol{G},\boldsymbol{X}]$ à Porquerolles

Algorithme MILE

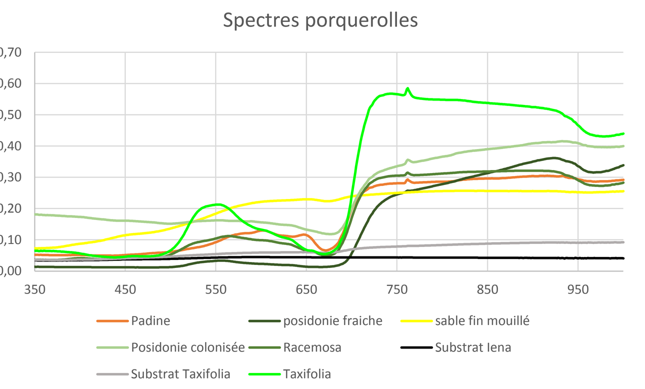


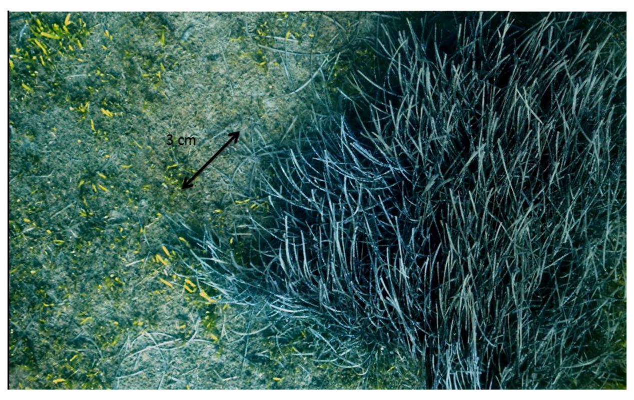
Zoom sur le fond reconstitué

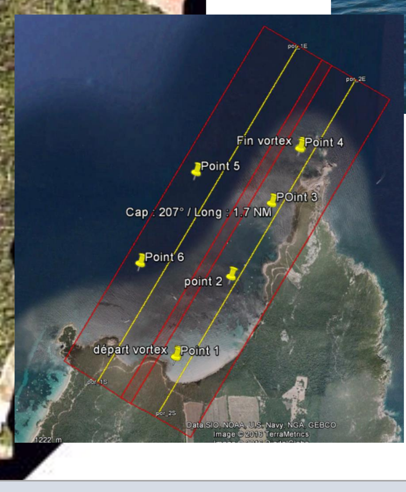


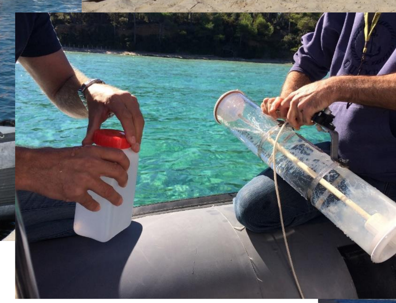


Campagne de données









Zone côtière de Porquerolles

- Images aéroportées (Hytech Imaging)
- Relevés de qualité de l'eau ; bibliothèque spectrale
- Image des fonds robot Vortex (Ifremer)

Précision de l'estimation

Estimation théorique de la précision : bornes de Frechet-Darmois-Cramer-Rao

Les BCR donnent une borne inférieure pour la variance d'estimation à partir de l'inverse de la matrice d'information (3)

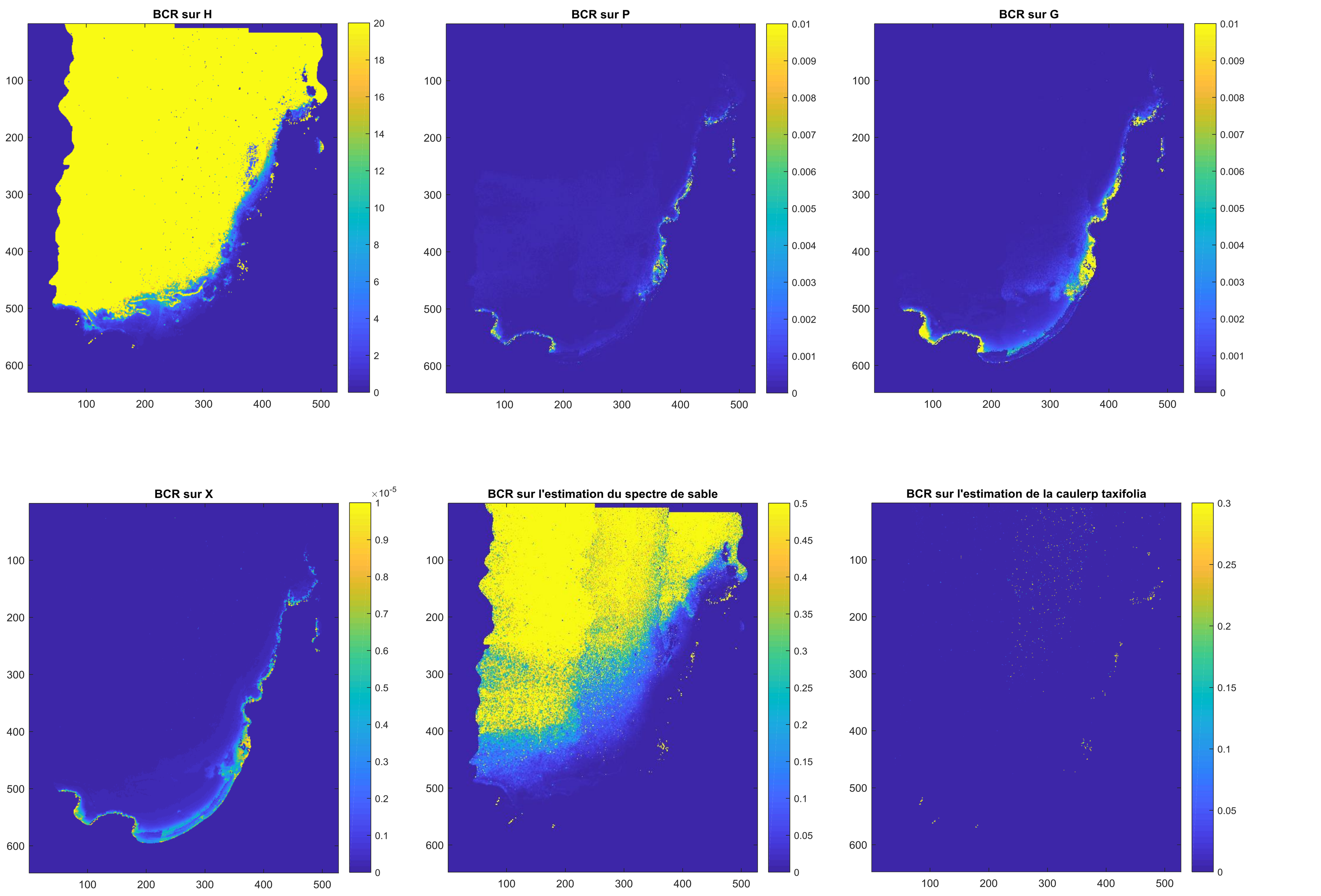
$$\mathbb{E}\left[\left(\widehat{\Delta}_i(\boldsymbol{r_{rs}}) - \Delta_i\right)^2\right] \geq [\boldsymbol{CRB}(\boldsymbol{\Delta})]_{i,i} \qquad [\boldsymbol{I_F}(\boldsymbol{\Delta})]_{i,j} = \mathbb{E}\left[\frac{\partial\ln(\mathrm{P}(\boldsymbol{r_{rs}}|\boldsymbol{\Delta}))}{\partial\Delta_i}\frac{\partial\ln(\mathrm{P}(\boldsymbol{r_{rs}}|\boldsymbol{\Delta}))}{\partial\Delta_j}\right]$$

Expression générale de l'information de Fisher :

$$[\boldsymbol{I_F}(\boldsymbol{\Delta})]_{i,j} = \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{\Gamma}_s^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{\Gamma}_s}{\partial\Delta_i}\boldsymbol{\Gamma}_s^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{\Gamma}_s}{\partial\Delta_j}\right) + \frac{\partial\boldsymbol{\mu}}{\partial\Delta_i}\boldsymbol{\Gamma}_s^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{\mu}}{\partial\Delta_j}$$

Cartographie des BCR dans la zone de Porquerolles

- Estimation de la qualité de l'eau et des coefficients de fonds avec LS, MILE ou MILEBI
- Calcul des BCR correspondant à ces paramètres (-> BCR estimées)



Conclusion

- Campagne de données Porquerolles 2017
- Estimation robuste des fonds à partir d'une bibliothèque spectrale
- Calcul des bornes minimales d'erreur
- Résultats partiels du projet (autres travaux : modèle de transfert radiatif avancé + démélange)
- Perspectives : Comparaison avec une vérité terrain

(1) Z. Lee, K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Stewerad, and J. S. Patch, « Hyperspectral remote sensing for shallow waters : 2, deriving bottom depths and water porperpties by optimization », Appl. Opt. 38, 3831-3843 (1999)
(2) S. Jay, M. Guillaume, A. Minghelli, Y. Deville, M. Chami, et al.. Hyperspectral remote sensing of shallow waters: Considering environmental noise and bottom intra-class variability for modeling and inversion of water reflectance. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, 2017, 200, pp.352 - 367. 〈10.1016/j.rse.2017.08.020〉. 〈insu-01584930〉
(3) S. Jay, M. Guillaume, M. Chami, A. Minghelli, Y. Deville, B. Lafrance, and V. Serfaty, "Predicting minimum uncertainties in the inversion of ocean color geophysical parameters based on Cramer-Rao bounds," Opt. Express **26**, A1-A18 (2018)