

PROJET DGA REI 18/10/2010-18/10/2012

# Evaluation des capacités de la télédétection HYPerspectrale et développement de méthodes innovantes de traitement d'images pour des applications Défense en zone LITTorale (HYPLITT)

*Mireille Guillaume\**, *Sylvain Jay\**, *Olivier Eches\**, *Marc Lennon\*\**,  
*Guillaume Sicot\*\**, *Nathalie Vigneau\*\**, *Véronique Serfaty#*,  
*Jacques Blanc-Talon#*

**\* Institut Fresnel/Ecole Centrale Marseille, \*\* SAS Actimar, # DGA**





➤ **Ligne de vol en zone H1**



➤ **Cibles : bâches de couleur**

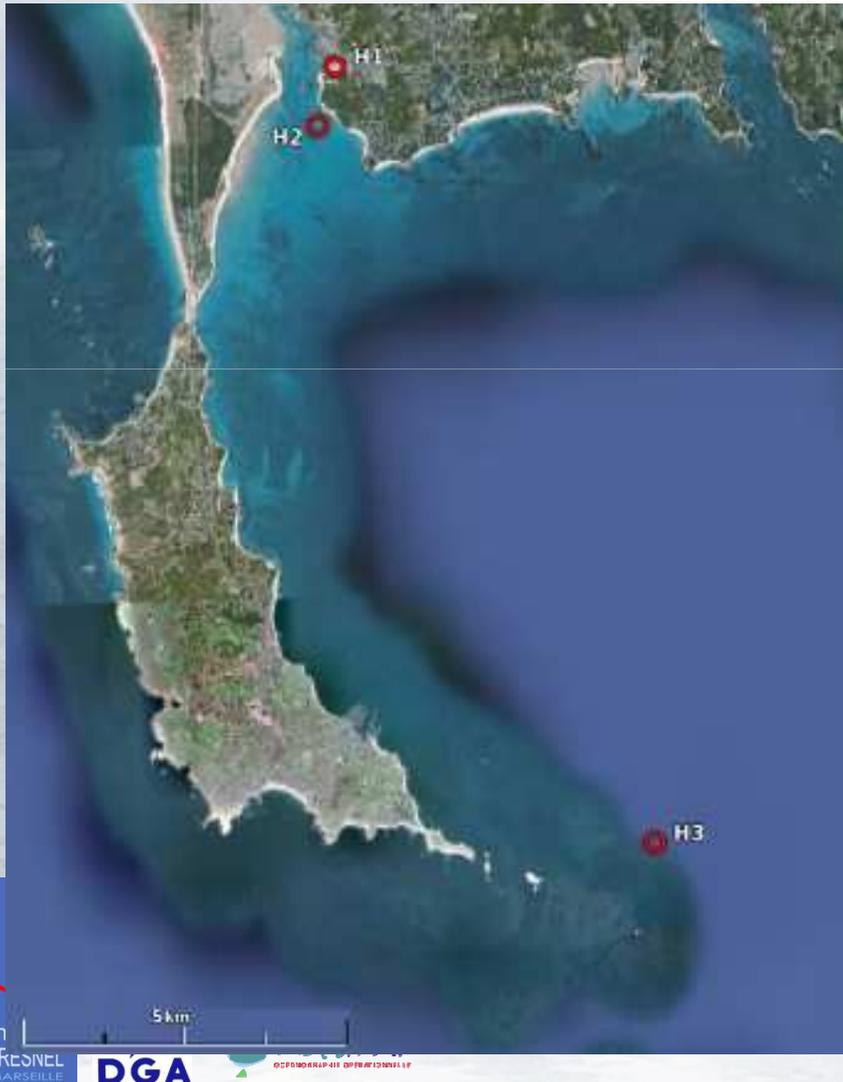
# Projet HypLitt

- Etat de l'art
- Campagne de données
- Développement de méthodes pour la bathymétrie et l'analyse de l'eau
- Développement de méthodes pour la détection d'objets immergés et le dé-mélange spectral du fond marin

# Sommaire

1. Campagne de données
2. Bathymétrie et composition de l'eau
  1. Résultats Méthode Actimar
  2. Résultats Méthodes statistiques
3. Traitements :
  1. Détection
  2. Dé-mélange
4. Conclusions / Perspectives

# Campagne de données



- Site d'étude : Baie de Quiberon

- 3 sites pour couvrir une large gamme bathymétrique découvrant → 20m

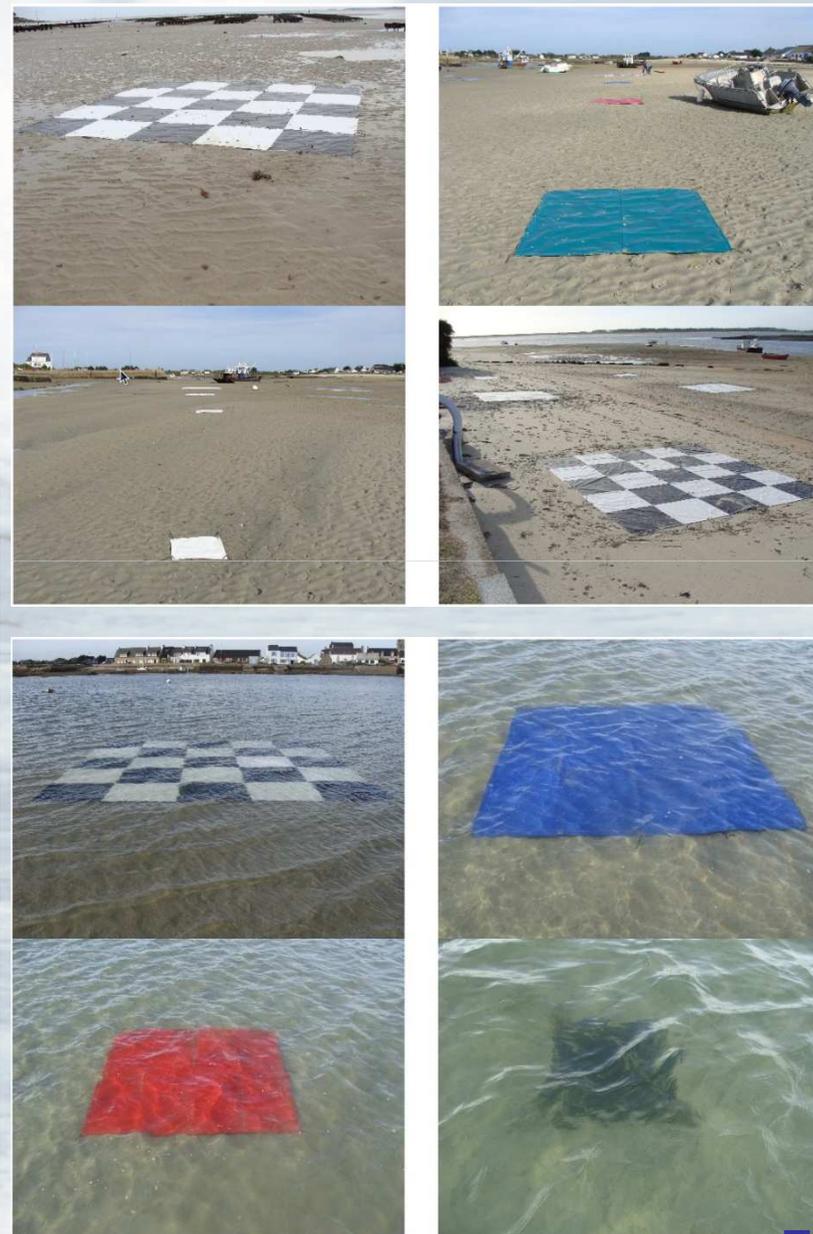
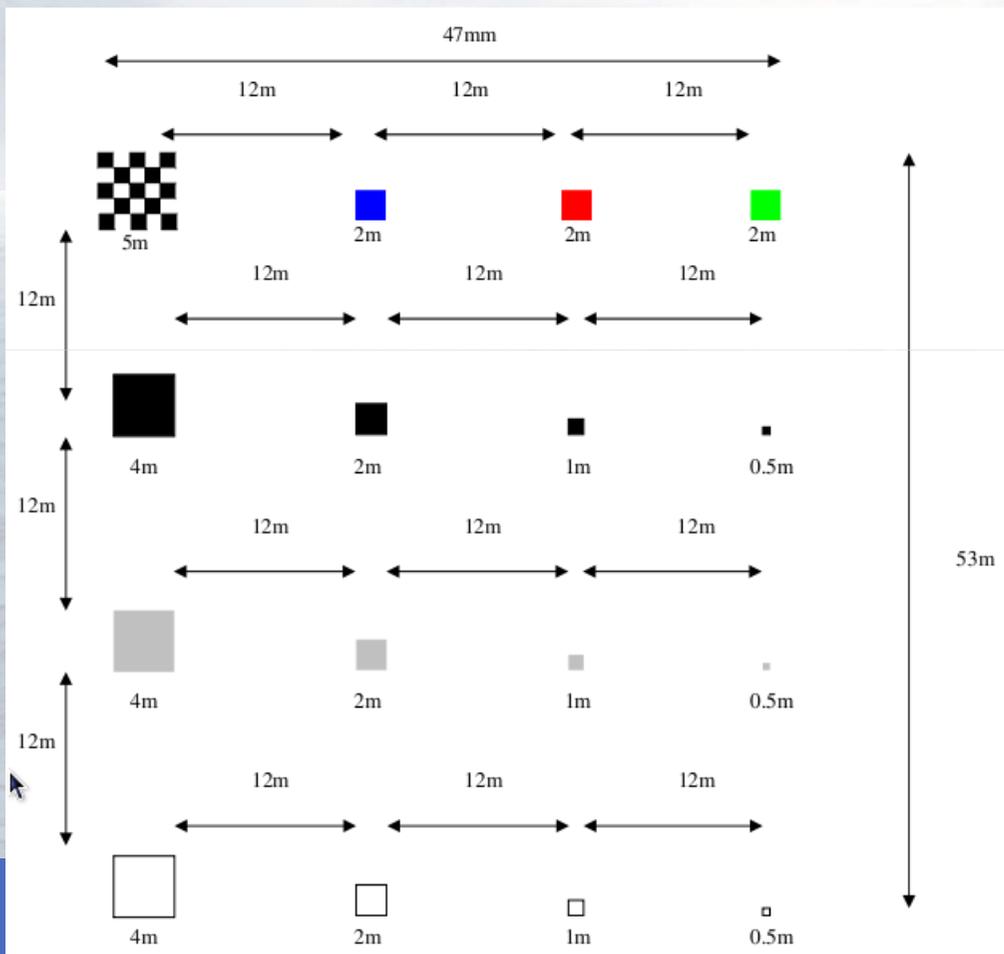
- Variabilité de la qualité de l'eau de la zone intéressante

- Données lidar topographique en baie de Plouharnel acquises en 2004 par ActiMar → validation algos d'estimation de la bathy



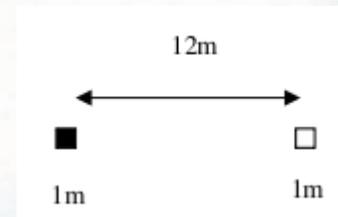
# Installation des cibles

➤ Pour les cibles émergées à marée basse (site H1 et H2):



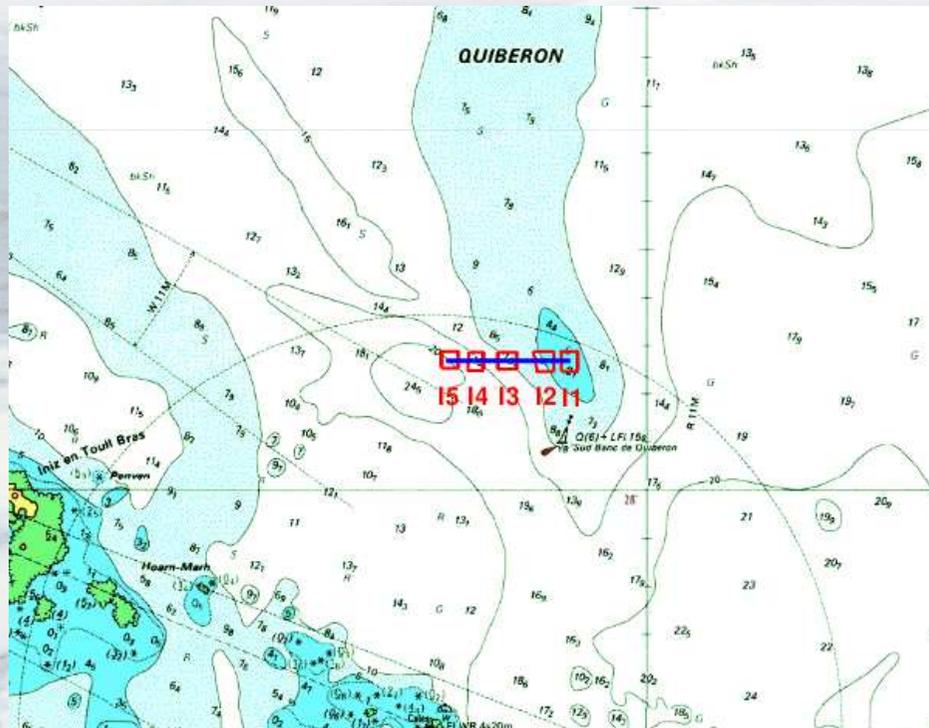
# Installation des cibles

➤ Pour les cibles immergées (site H3) :



➤ Pour 5 profondeurs (par rapport au zéro hydro):

- 3m
- 5m
- 10m
- 15m
- 20m



# Acquisitions aéroportées

- Acquisitions effectuées entre le 14/09/2010 et le 18/09/2010

- Résumé des acquisitions :

Date	Nb. de lignes de vol	Longueur	Largeur moyenne	Superficie
14/09/2010	71	161 km	306 - 1590 m	144 km <sup>2</sup>
17/09/2010	55	215 km	306 - 1590 m	140 km <sup>2</sup>
18/09/2010	7	28 km	397 m	11 km <sup>2</sup>

- Résolutions spatiales des images: 0.4m, 0.5m, 1m et 2m –  
Exemple d'un set d'images sur H1:

➤ 0.4m



➤ 0.5m



➤ 1m



➤ 2m



# Acquisitions aéroportées

-Exemples d'acquisitions sur la zone H1:

<i>Id. Image</i>	H1_0500m_L01_090deg_20100914_11h31mn
<i>Zone</i>	H1
<i>Num. Ligne</i>	L01
<i>Altitude</i>	500m
<i>Cap</i>	90°
<i>Date</i>	14/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	11h31
<i>Res. spatiale [m]</i>	0.4
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	1
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	NON
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	NON
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	12



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références

<i>Id. Image</i>	H1_1300m_L02_270deg_20100914_11h49mn
<i>Zone</i>	H1
<i>Num. Ligne</i>	L02
<i>Altitude</i>	1300m
<i>Cap</i>	270°
<i>Date</i>	14/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	11h49
<i>Res. spatiale [m]</i>	1
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	1
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	OUI
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	NON
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	0



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références

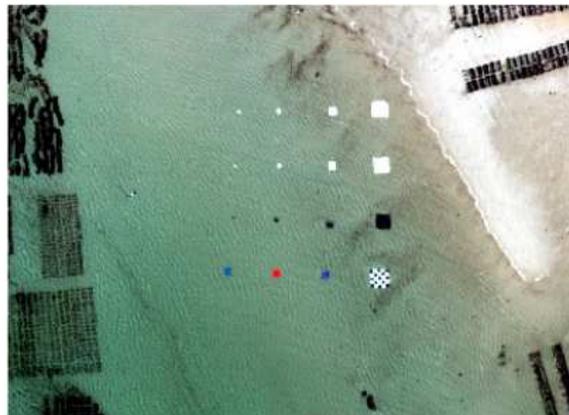
# Acquisitions aéroportées

## -Exemples d'acquisitions sur la zone H2:

<i>Id. Image</i>	H2_0500m_L01_090deg_20100914_15h09mm
<i>Zone</i>	H2
<i>Num. Ligne</i>	L01
<i>Altitude</i>	500m
<i>Cap</i>	90°
<i>Date</i>	14/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	15h09
<i>Res. spatiale [m]</i>	0.4
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	2
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	NON
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	NON
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	43



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références

<i>Id. Image</i>	H2_0650m_L01_000deg_20100918_13h20mm
<i>Zone</i>	H2
<i>Num. Ligne</i>	L01
<i>Altitude</i>	650m
<i>Cap</i>	0°
<i>Date</i>	18/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	13h20
<i>Res. spatiale [m]</i>	0.5
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	2
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	NON
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	OUI
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	283



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références

# Acquisitions aéroportées

## -Exemples d'acquisitions sur la zone H3:

<i>Id. Image</i>	H3_0650m_L03_090deg_20100918_13h30mn
<i>Zone</i>	H3
<i>Num. Ligne</i>	L03
<i>Altitude</i>	650m
<i>Cap</i>	90°
<i>Date</i>	18/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	13h30
<i>Res. spatiale [m]</i>	0.5
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	3
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	NON
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	OUI
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	722 - 2422

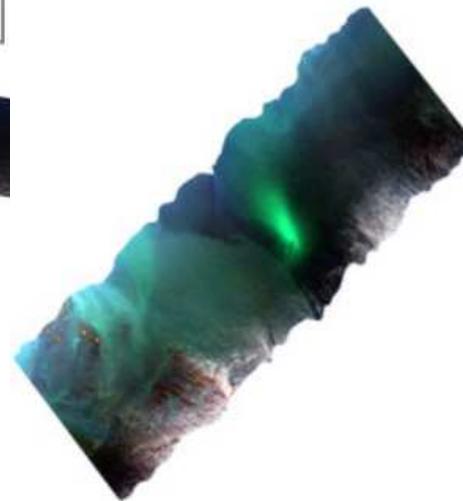
<i>Id. Image</i>	H3_2600m_L03_225deg_20100917_11h32mn
<i>Zone</i>	H3
<i>Num. Ligne</i>	L03
<i>Altitude</i>	2600m
<i>Cap</i>	225°
<i>Date</i>	17/09/2010
<i>Heure [UT]</i>	11h32
<i>Res. spatiale [m]</i>	2
<i>Nb bandes spectrales</i>	160
<i>Nb découpes</i>	1
<i>Présence de nuages</i>	NON
<i>Présence d'ombres portées</i>	NON
<i>Présence de réflexions spéculaires</i>	OUI
<i>Hauteur de la colonne d'eau [cm]</i>	699 - 2399



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références



aperçu de la ligne de vol



zoom sur la zone d'installation des cibles de références

# Acquisitions spectroradiométriques sol

## ➤ Constitution d'une librairie spectrale afin :

-d'ajuster les sorties du modèle  
atmosphérique

-de caractériser les signatures spectrales  
des cibles pour leur détection

1. Calibration des images
2. Correction  
géométrique des  
images
3. Correction  
atmosphérique



# Librairie Spectrale

## ➤ Exemple : bâche rouge



### Target 006

[Previous](#) [Next](#)

#### INFORMATIONS

**Location:**  
- Area : Saint Colomban  
- Site : 01  
- Longitude : -3.101693  
- Latitude : 47.578501

**Time:**  
- Date : 20100924  
- Acquisition Time : from 10:35:31 UT to 10:36:00 UT

**Spectrometry:**  
- Spectrometer Id. : GER1500-2124  
- Surface description : red tarpaulin cleaned  
- Weather conditions : diffuse  
- Number of measurements : 5 (from 28 to 32)  
- Observations :

measured by MLE + LKE

#### PHOTOGRAPHIES

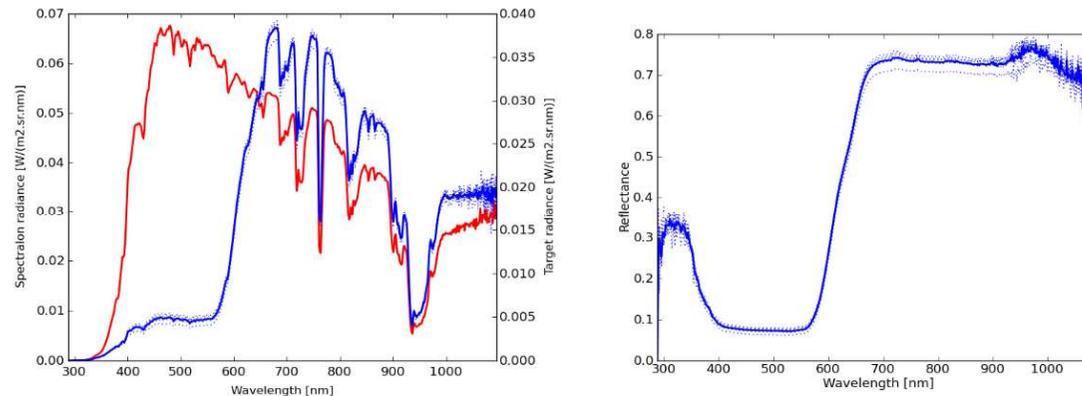


Site view

Target view

Target zoom

#### MEASUREMENTS



[Previous](#) [Next](#)

# Librairie Spectrale

## ➤ Exemple : bâche bleue



### Target 004

[Previous](#) [Next](#)

#### INFORMATIONS

##### Location:

- Area : Saint Colomban  
- Site : 01  
- Longitude : -3.101538  
- Latitude : 47.578520

##### Time:

- Date : 20100924  
- Acquisition Time : from 10:26:55 UT to 10:27:27 UT

##### Spectrometry:

- Spectrometer Id. : GER1500-2124  
- Surface description : blue tarpaulin cleaned  
- Weather conditions : diffuse  
- Number of measurements : 5 (from 18 to 22)  
- Observations :

measured by MLE + LKE

#### PHOTOGRAPHIES

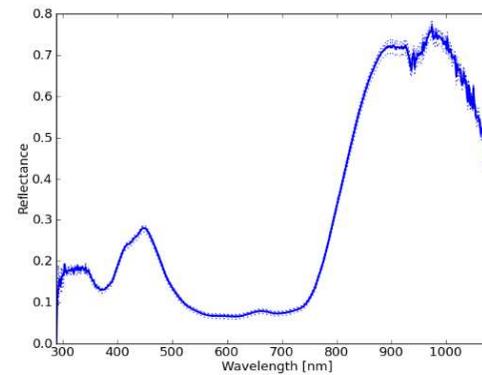
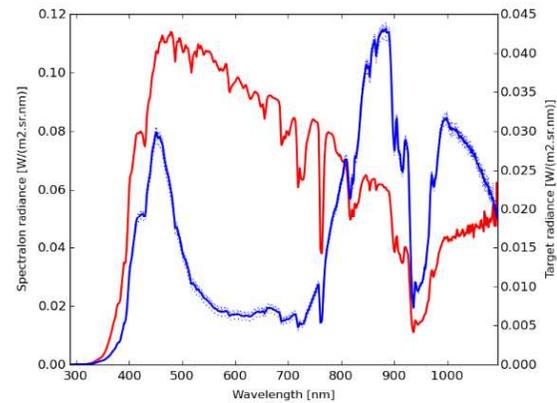


Site view

Target view

Target zoom

#### MEASUREMENTS



[Previous](#) [Next](#)

# Librairie Spectrale

## ➤ Exemple : sable



Target 019

[Previous](#) [Next](#)

### INFORMATIONS

#### Location:

- Area : Saint Colomban  
- Site : 01  
- Longitude : -3.101772  
- Latitude : 47.578449

#### Time:

- Date : 20100924  
- Acquisition Time : from 11:07:24 UT to 11:07:52 UT

#### Spectrometry:

- Spectrometer Id. : GER1500-2124  
- Surface description : wet sand on top of beach  
- Weather conditions : diffuse  
- Number of measurements : 5 (from 114 to 118)  
- Observations :

measured by MLE + LKE

### PHOTOGRAPHIES

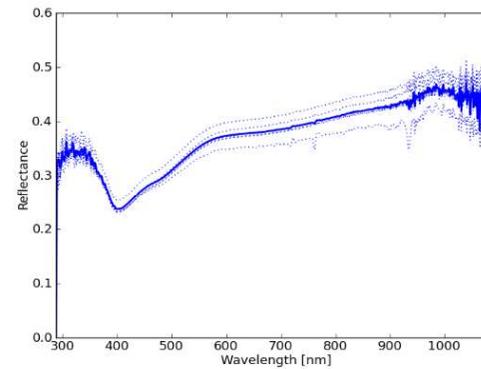
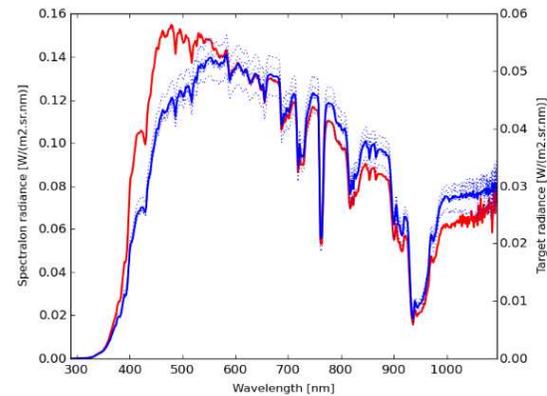


Site view

Target view

Target zoom

### MEASUREMENTS



[Previous](#) [Next](#)

# Caractérisation de la colonne d'eau

## -Objectif:

- Connaître les caractéristique de la colonne d'eau lors des acquisitions

## - Procédure

- Prise d'échantillons à différents endroits par des plongeurs
- Analyse en laboratoire (Idhessa)

## - Elements mesurés :

- Matières en suspension
- Carbone organique dissous
- Chlorophylle A
- Phéopigments (mesure de la quantité de phytoplancton)
- Absorption de la lumière à 254 nm (relation avec le carbone organique dissous)

# Caractérisation de la colonne d'eau

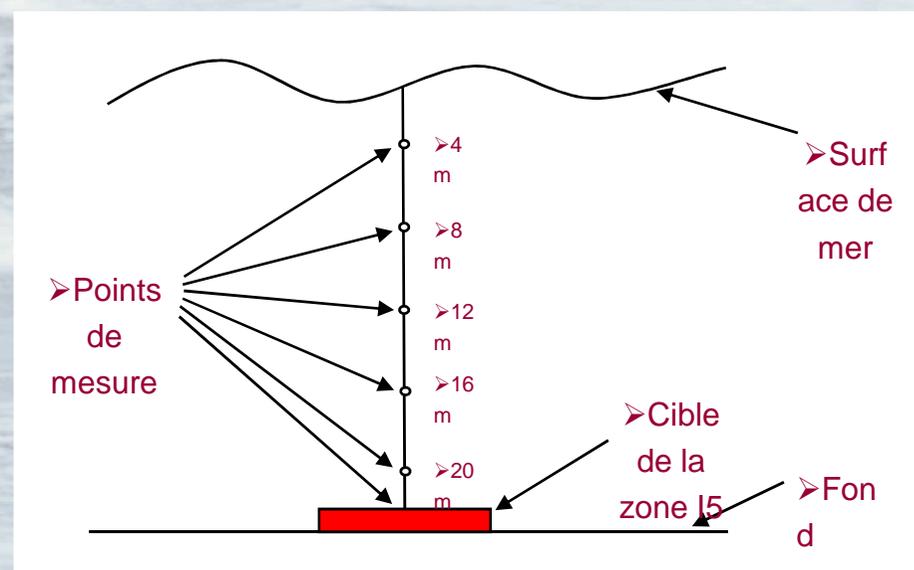
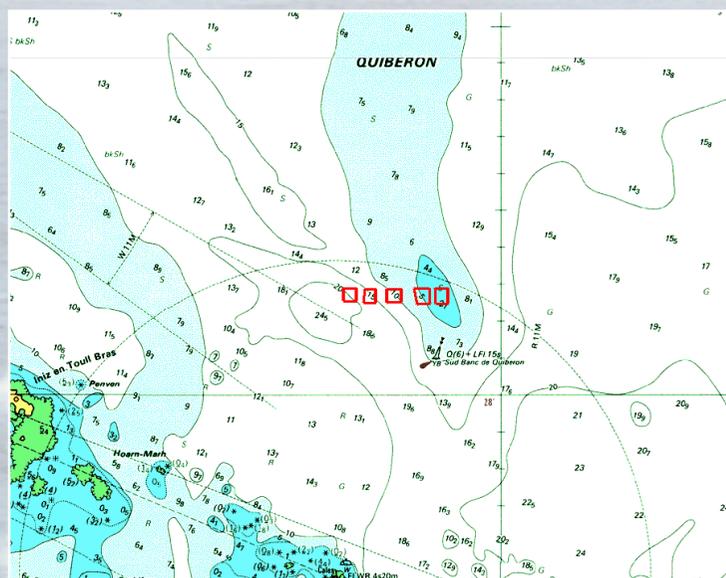
## Prise de mesure

-Chaque zone:

- Mesure en surface et au niveau de la cible

- Zone la plus profonde (E5):

- Mesure sur un transect vertical



# Caractérisation de la colonne d'eau

## ➤ Exemple de résultats

Ech 1 : N.T 018401 - F1 - 12h00  
 Ech 2 : N.T 018402 - F2 - 11h00  
 Ech 3 : N.T 018403 - F3 - 15h00  
 Ech 4 : N.T 018404 - F4 - 14h30  
 Ech 5 : N.T 018405 - F5 - 13h00

Remarque : Prélevé par M.SICOT

Résultats précédés du signe < correspondent aux limites de quantification. Pour déclarer conforme, ou non, aux spécifications, il n'a pas été tenu compte de l'incertitude associée aux résultats (incertitudes communiquées sur demande). Ce rapport annule et remplace tout rapport partiel émis précédemment.

Date de début d'analyse : 21/09/2010

Paramètres analysés	Méthodes	Résultats					Unités
		Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	
<u>Analyses Physico-Chimiques</u>							
% Transmission U.V.		cf graph	cf graph	cf graph	cf graph	cf graph	%
Matières En Suspension	NF EN 872	<2	<2	<2	<2	<2	mg/l
Carbone Organique Dissous	NF EN 1484	0.9	1.7	1.1	0.9	1.0	mg/l
Chlorophylle A	NF T 90-117	0.8	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	µg/l
Phéopigments	NF T 90-117	0.7	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	µg/l

(ec) = en cours d'analyse N/A = non analysé

# L'analyse de cette molécule a été réalisée après décantation, la partie adsorbée sur les matières en suspension n'est pas prise en compte dans le résultat

# Récapitulatif campagne de données

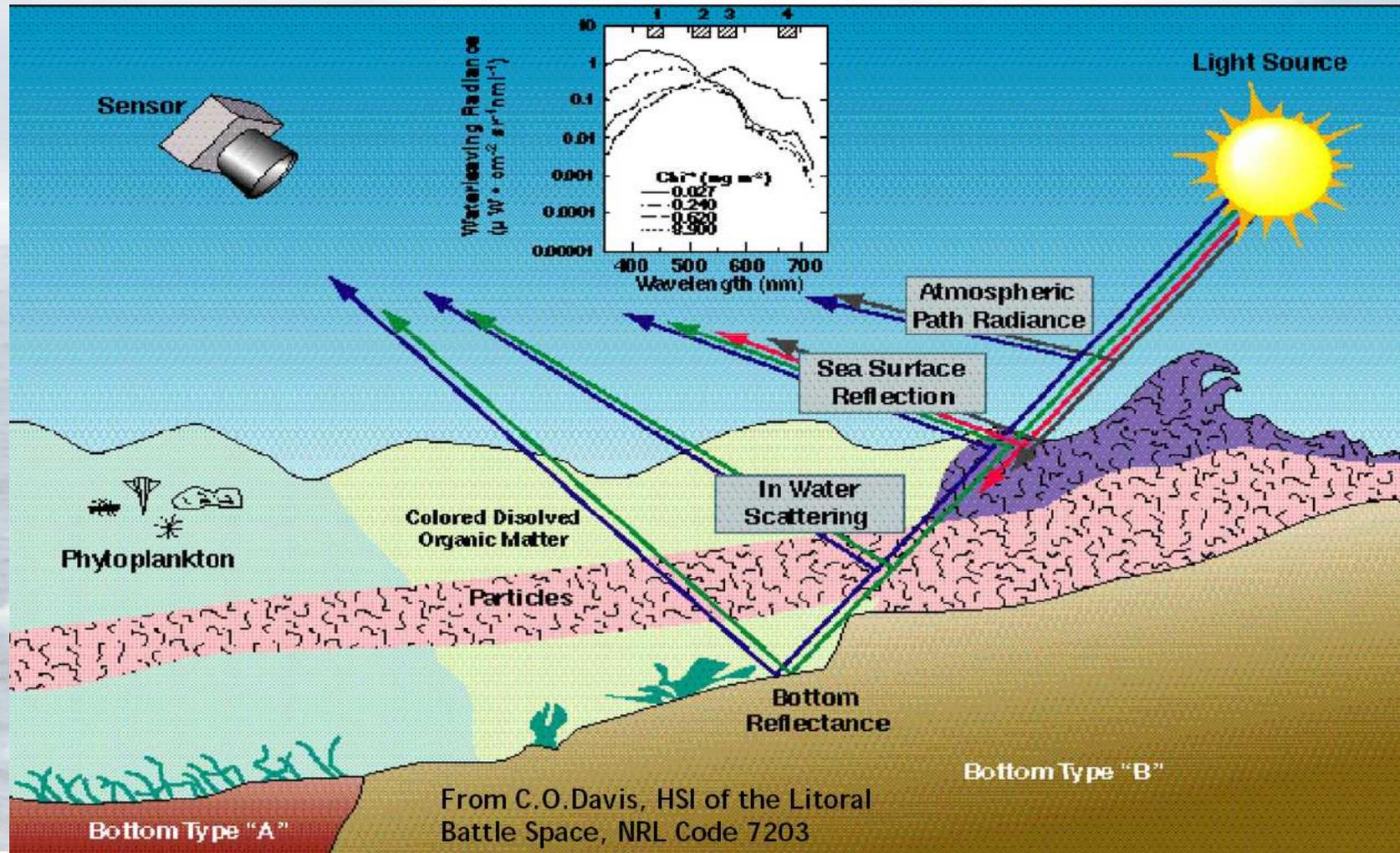
- Caractéristique optique des cibles :
  - librairie spectrale émergée et immergé (in situ)
- Connaissance du milieu
  - librairie spectrale de terrain
    - Spectroradiométrie en émergé et en immergé
- Connaissance de la colonne d'eau
  - Analyse de éléments contenus dans l'eau de mer lors de l'acquisition aéroportée

# Bathymétrie et composition de la colonne d'eau

- Problématique et modèles
- Méthode Actimar
- Méthode statistique

# Problématique

- Signal reçu par le capteur hyperspectral en zone littorale



# Problématique

## ➤ Les sources du signal acquis par le capteur hyperspectral

- **Signal atmosphérique**
  - Diffusion dans l'atmosphère
- **Signal réfléchi par la surface du mer**
  - Réflexion du soleil (sunlint)
  - Réflexion du ciel (skyglint)
- **Signal issu de la colonne d'eau**
  - Diffusion dans la colonne d'eau
  - Réflexion par le fond

# Problématique

## ➤ Les sources du signal acquis par le capteur hyperspectral

→ Signal atmosphérique

→ Diffusion dans l'atmosphère

→ Signal réfléchi par la surface du mer

→ Réflexion du soleil (sunglint)

→ Réflexion du ciel (skyglint)

→ Signal issu de la colonne d'eau

→ Diffusion dans la colonne d'eau

→ Réflexion par le fond

➤ Travaux non présentés

➤ Bathymétrie

➤ Composition de l'eau

➤ Détection et dé mélange

# Modèles

## ➤ Expression générale du modèle de transfert radiatif (M2)

→ 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

- $R_{rs}^\infty$  réflectance en profondeur infinie
- $R_{rs}^B$  réflectance du fond
- $K_d, k_{uW}, k_{uB}$  coefficients d'atténuation diffuse
- $A_1, A_2$  constantes

→ La différence entre les modèles réside dans la paramétrisation des différents paramètres

# Modèles

## ➤ Simplification du modèle de transfert radiatif (M1)

→ **Hypothèse**  $k_u \approx k_{uW} \approx k_{uB}$  **et**  $A_1 \approx A_2 \approx 1$

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

→ **Similaire au modèle de Philpot (1987) avec modèle d'erreur**

# Modèles

➤ Le coefficient d'atténuation diffuse  $K_d + k_u$  dépend des paramètres de la colonne d'eau

→ Atténuation

$$a = a_W + C_\phi a_{\text{phyto}} + C_{\text{CDOM}} a_{\text{CDOM}} (+ C_{\text{NC}} a_{\text{NC}})$$

→ Rétro-diffusion

$$b = b_W + C_p b_p$$

$$K = f(a, b, C_\phi, C_{\text{CDOM}}, C_p)$$

Le modèle décrivant ces paramètres varie suivant les auteurs, nous utiliserons

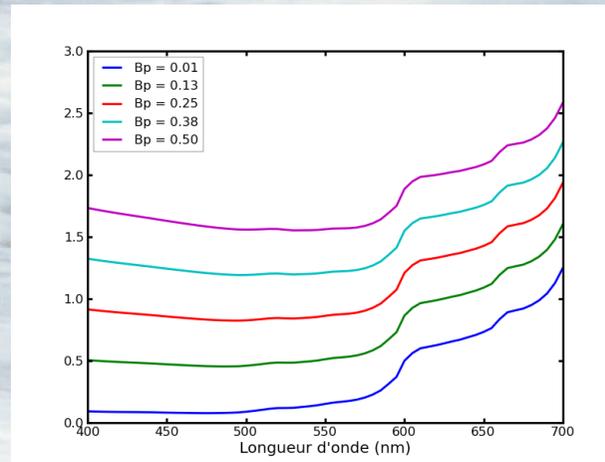
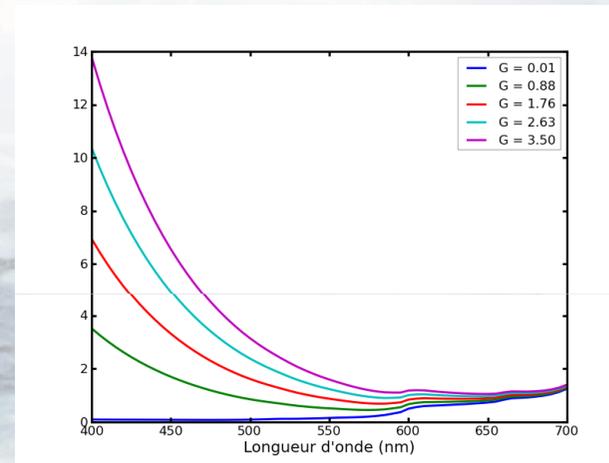
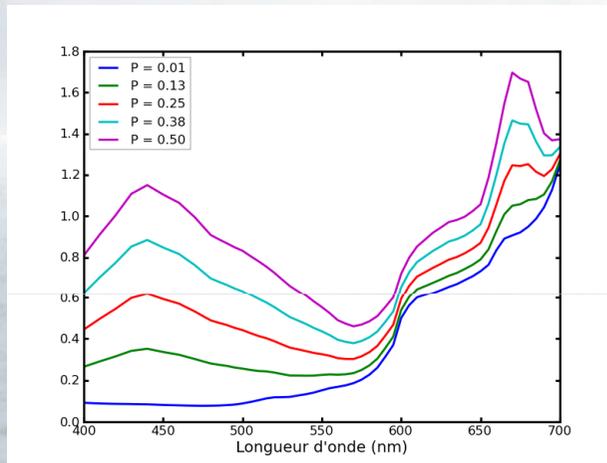
→ le modèle de Lee (1999),

→ ou le modèle de Brando (2009)/Bricaud (1995)

# LE COEFFICIENT D'ATTENUATION DIFFUSE - SIMULATION

➤ **Le coefficient d'atténuation diffuse,  $K_d + k_u$**

→ Paramètres fixes :  $P=0.006 \text{ m}^{-1}$  (phytoplanton),  $G=0.1 \text{ m}^{-1}$  (CDOM),  
 $Bp=0.006 \text{ m}^{-1}$  (particules)



# Bathymétrie – méthodes classiques

## ➤ Inversion directe

- Utilisation de méthodes d'inversion non-linéaire
  - Algorithme de Levenberg-Marquardt
  - Approche utilisée par Lee *et al.* - 1999,
  - Filipi *et al.* - 2008 avec ajout de contraintes spatiales
- Utilisation de spectres de réflectance du fond
  - Wettle *et al.* - 2006, Fearn et *al.* - 2011

## ➤ Look-up table (LUT)

- Louchard *et al.* - 2009
- Hedley *et al.* - 2009
  - LUT adaptative : raffinement itératif de la LUT

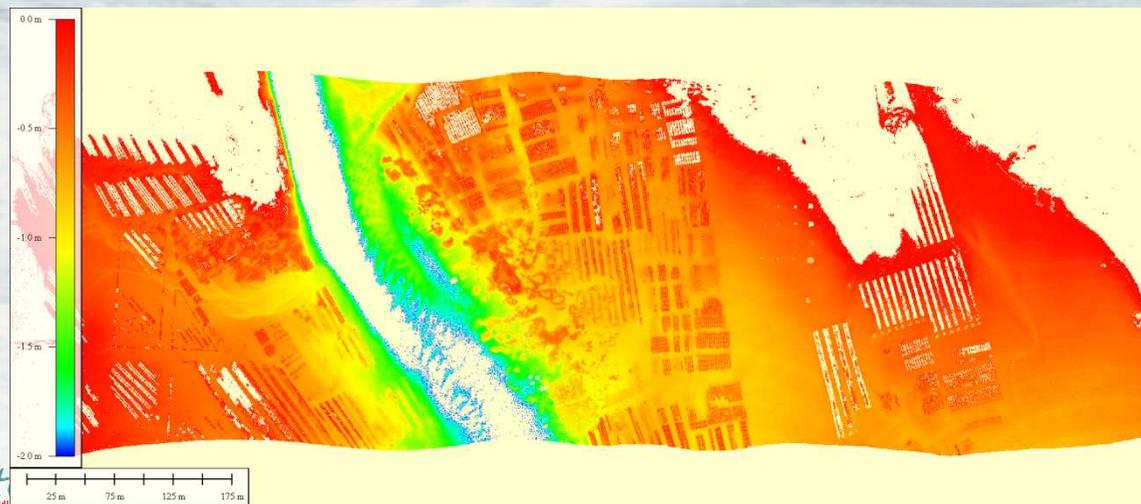
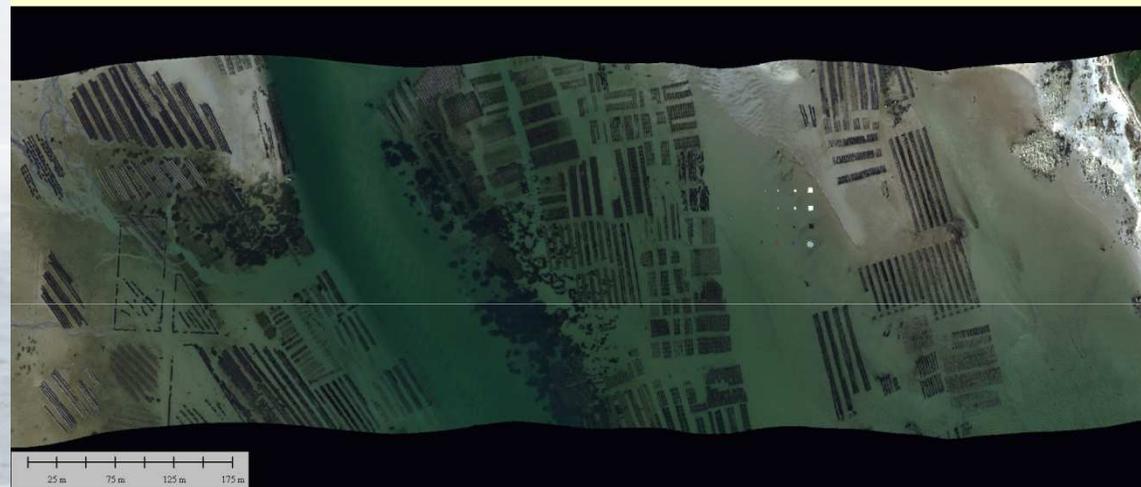
## ➤ Réseau de neurones

- Sandidge *et al.* - 1998
- Filippi *et al.* - 2006

# Bathymétrie - Exploitation fine des propriétés physiques + inversion

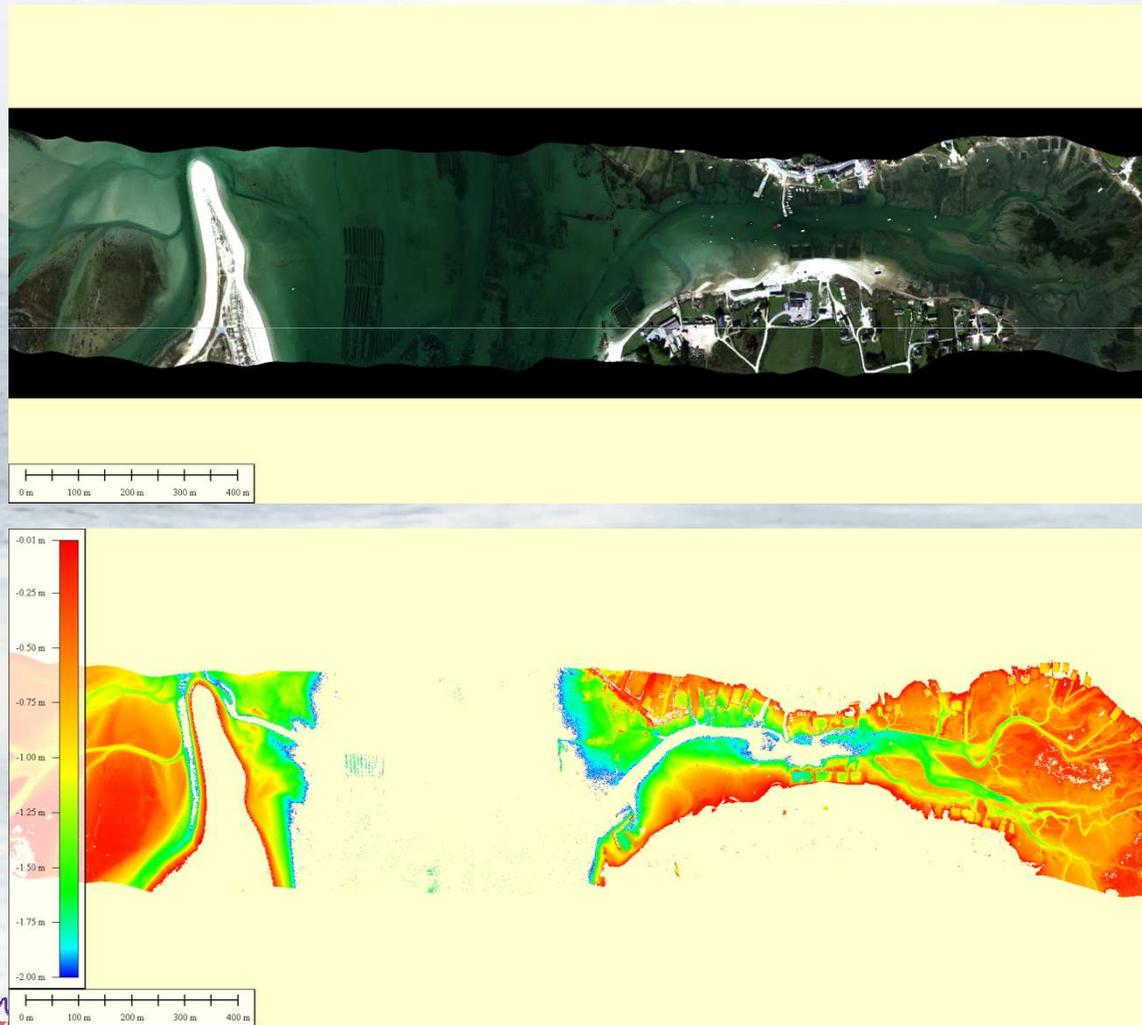
➤ **Sur la zone H2**

→ Résolution spatiale 0.4 m

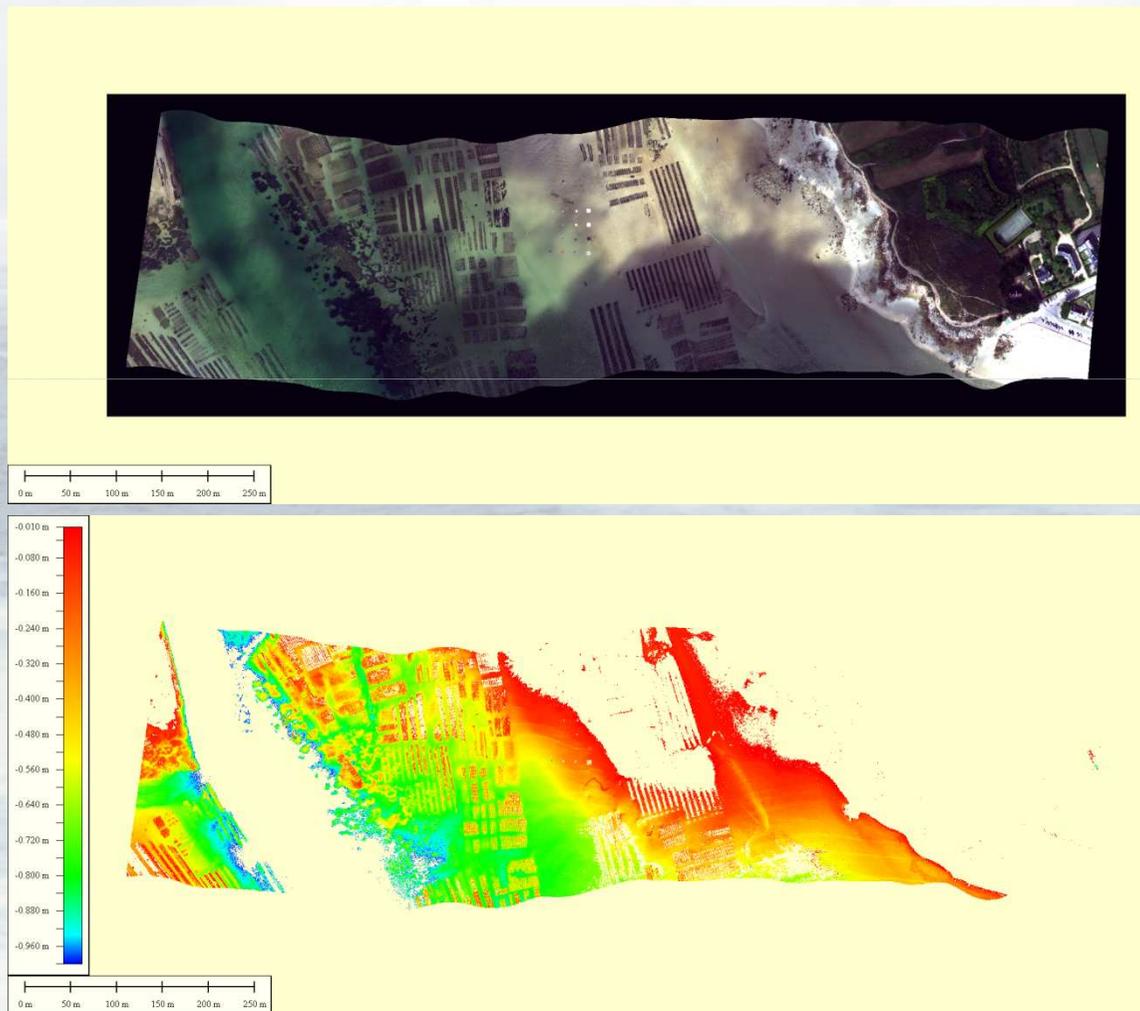


➤ **Sur la zone H1**

→ Résolution spatiale 0.5 m



➤ Impact des ombres portées des nuages

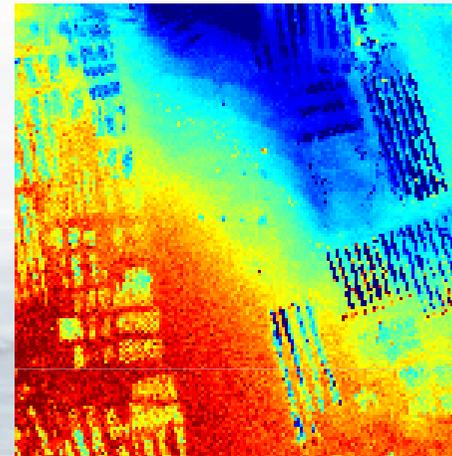


# ESTIMATION DE LA HAUTEUR DE LA COLONNE D'EAU

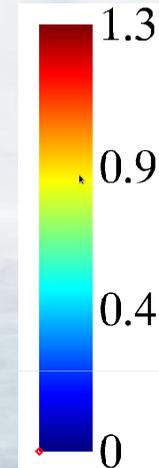
## ➤ Exemple sur la zone H2



Image pseudo-couleur  
des spectres de réflectance  
sur la zone H2

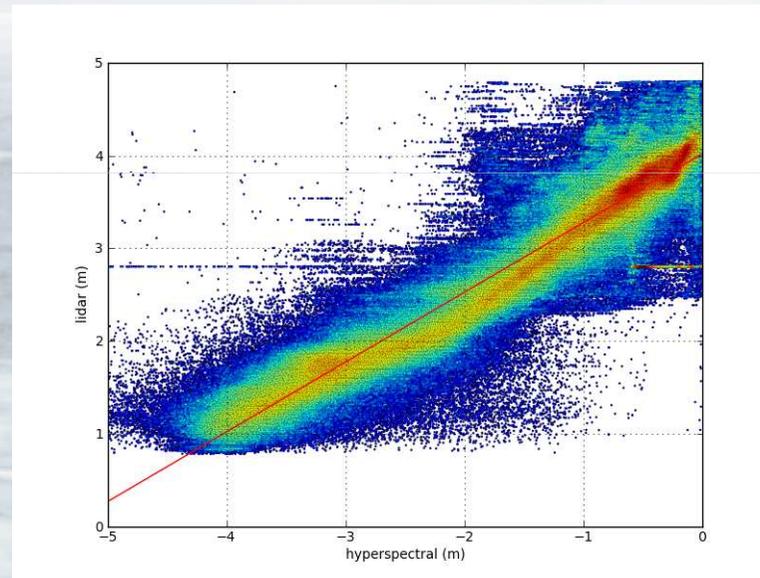


Hauteur de la colonne d'eau



➤ **Comparaison avec le lidar topo sur la zone H1**

- Résolution spatiale,
  - lidar topo : 2m
  - hyperspectrale : 0.5 m



- Forte corrélation : 95.9 %
- Sous-estimation de la hauteur de la colonne d'eau

### ➤ Estimation de la hauteur de la colonne d'eau

- Les résultats sont très encourageants
  - Forte corrélation avec le lidar topo
  - Sous estimation de la hauteur de la colonne d'eau
    - Modèle du spectre de réflectance du fond trop simpliste
    - Mauvaise estimation sur les bâches
  - Influence faible des ombres portées des nuages

### ➤ Transparence de l'eau

- Les paramètres de la colonne d'eau sont également estimés
- Comparaison en cours sur les paramètres de la colonne d'eau au endroit où il n'y a pas de fond (zone H3) avec les données faites in situ

# Bathymétrie

## Méthodes d'estimation Statistique

Approche statistique:

$$\mathbf{r}_{rs} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_b; \boldsymbol{\Gamma}) \text{ où } \boldsymbol{\mu}_b = \boldsymbol{\mu}_b(\boldsymbol{\Theta}), \text{ et } \boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\Theta}).$$

Supposant que l'on dispose d'un échantillon d'apprentissage  $\mathcal{X} = \{\mathbf{r}_{rs,1}; \dots; \mathbf{r}_{rs,N}\}$ , on maximise la fonction de vraisemblance associée:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\mathbf{r}_{rs}, \mathcal{X}; \boldsymbol{\Theta}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^L |\boldsymbol{\Gamma}|}^N} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_{rs,i} - \boldsymbol{\mu}_b)^t \boldsymbol{\Gamma}^{-1} (\mathbf{r}_{rs,i} - \boldsymbol{\mu}_b) \right\}} \\ \hat{\boldsymbol{\Theta}}_{MLE} = \underset{\boldsymbol{\Theta}}{\operatorname{argmax}} P(\mathbf{r}_{rs}, \mathcal{X}; \boldsymbol{\Theta}) \end{array} \right.$$

# 1<sup>er</sup> modèle (M1)

$$\mathbf{r}_{rs} = \mathbf{r}_{rs,\infty} + \mathbf{K}(\mathbf{r}_{0,b} - \mathbf{r}_{rs,\infty})$$

- $\mathbf{r}_{rs}$  : réflectance subsurface d'une hauteur d'eau H.
- $\mathbf{r}_{rs,\infty}$  : réflectance subsurface d'une colonne d'eau infinie.
- $\mathbf{r}_{0,b}$  : réflectance du fond.
- $\mathbf{K} = \text{diag}(e^{-2k(\lambda_1)H}, \dots, e^{-2k(\lambda_L)H})$  : matrice d'atténuation de l'eau.

## 2<sup>e</sup> modèle (M2)

$$\mathbf{r}_{rs} = \mathbf{r}_{rs,\infty} + \mathbf{K}_B \mathbf{r}_{0,B} - \mathbf{K}_C \mathbf{r}_{rs,\infty}$$

Ici, on distingue les photons interagissant ( $\mathbf{K}_B$ ) ou non ( $\mathbf{K}_C$ ) avec le fond. Le coefficient d'atténuation est également différent dans le sens de la montée et de la descente.

- $\mathbf{K}_B = \text{diag}(e^{-(k_d(\lambda_1)+k_{u,B}(\lambda_1))H}, \dots, e^{-(k_d(\lambda_L)+k_{u,B}(\lambda_L))H})$
- $\mathbf{K}_C = \text{diag}(e^{-(k_d(\lambda_1)+k_{u,C}(\lambda_1))H}, \dots, e^{-(k_d(\lambda_L)+k_{u,C}(\lambda_L))H})$

# Les paramètres des modèles

Généralement, le milieu aquatique étudié est caractérisé par 4 paramètres physiques: la profondeur et les concentrations en phytoplancton, en matière organique dissoute colorée et en particules non algales.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{rs,\infty} = r_{rs,\infty}(C_{phy}, C_{cdom}, C_p) \\ K = K(H, C_{phy}, C_{cdom}, C_p) \quad (\text{ou } \mathbf{K}_B \text{ et } \mathbf{K}_C) \end{array} \right.$$

Ceux-ci peuvent être connus *a priori*. Le cas échéant, ils devront être estimés.

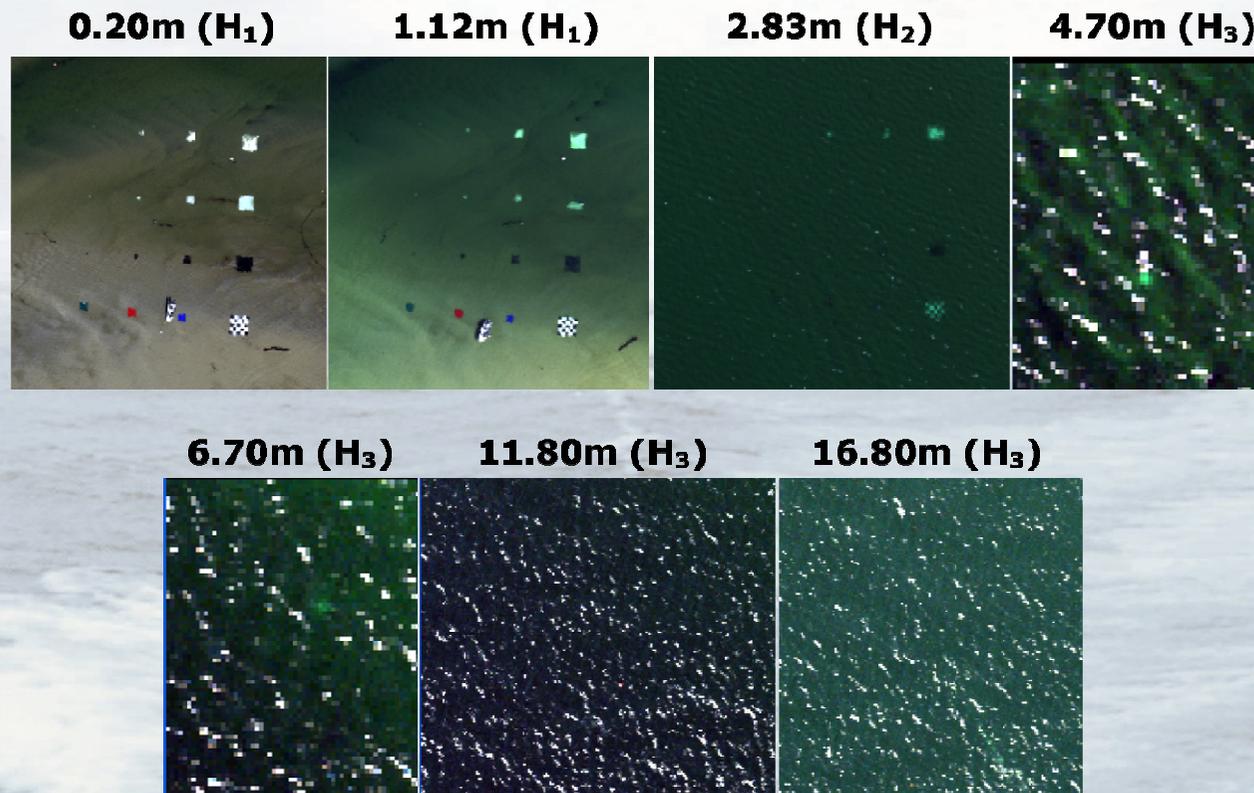
# Quelques résultats d'estimation

## ➤ Images simulées : bathymétrie et paramètres de l'eau

	H=0.1m	H=5m	H=10m	H=20m	H=30m
H	1.18	0.33	0.50	1.62	26.81
$C_{phy}$	32.53	2.95	6.66	18.76	19.02
$C_{cdom}$	9.93	1.24	3.87	10.69	10.66
$C_{nap}$	34.94	2.97	3.56	3.77	3.35

➤ **Tableau: Racine de l'erreur quadratique moyenne (en %) en fonction de la profondeur (covariance,  $H$ ,  $C_{phy}$ ,  $C_{cdom}$  et  $C_{nap}$  inconnus) -  $C_{phy}=0.7\mu g.L^{-1}$ ,  $C_{cdom}=0.08m^{-1}$ ,  $C_{nap}=2.8mg.L^{-1}$**

# Images réelles : données HYPLITT utilisées



➤ **Figure:** *Images hyperspectrales utilisées pour l'estimation et la détection.*

# Quelques résultats d'estimation

## ➤ Images réelles : bathymétrie

	H=0.20m		H=1.12m		H=2.83m		H=4.70m	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
MLE	22.3	7.4	25.6	16.9	22.4	9.0	30.8	15.6
LEV	27.9	24.9	37.5	27.2	40.5	29.0	50.2	51.0
	H=6.70m		H=11.80m		H=16.80m			
	M1	M2	M1	M2	M1	M2		
MLE	31.3	26.7	10.3	17.8	528.1	122.7		
LEV	16.3	23.4	368.1	276.7	314.5	161.0		

➤ **Tableau:** Racine de l'erreur quadratique moyenne sur l'estimation de  $H$  (en %) en fonction de la profondeur – Comparaison des méthodes MLE et LEVMAR pour les 2 modèles.

➤ **Limitation :** La profondeur est supposée constante

# Modèle de fond à une (ou deux) pente(s)

- Insertion d'un modèle de fond variable
- Modèle à une pente ou modèle à deux pentes

Données simulées :

Pente	H <sub>0</sub> =0,10m			H <sub>0</sub> =3m			H <sub>0</sub> =7m		
	SSP	ACP	ACP/SSP	SSP	ACP	ACP/SSP	SSP	ACP	ACP/SSP
0%	0,56	0,72	1,29	0,13	0,14	1,08	0,29	0,3	1,03
5%	68,46	25,01	0,37	3,96	1,83	0,46	1,79	1,06	0,59
10%	115	63,4	0,55	7,47	5,47	0,73	3,44	2,66	0,77
20%	274	221	0,81	13,44	11,58	0,86	6,51	5,99	0,92
30%	385	333	0,86	18,4	16,98	0,92	9,3	8,92	0,96

Tableau: RMSE (en %) sur l'estimation de la hauteur en fonction de la pente.  
Dans le cas ACP, on estime cette pente tandis que le fond est supposé plat dans le cas SSP.

# Bathymétrie avec fond variable

## Images HYPLITT

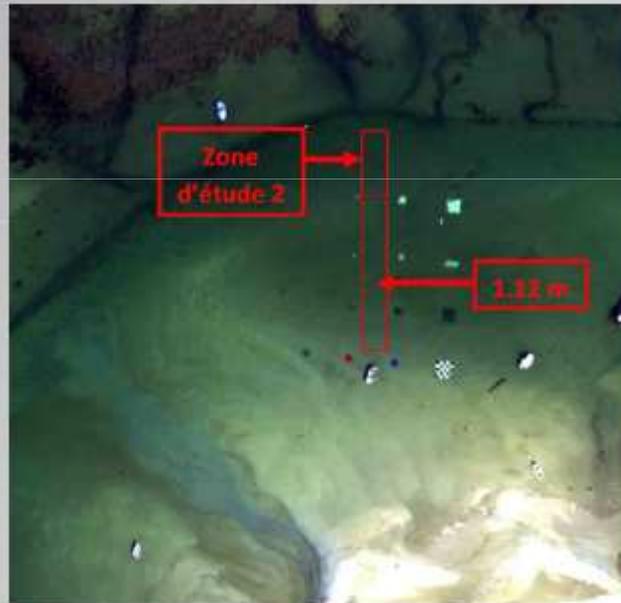


Figure: H1\_0500m\_L01\_090deg\_20100  
917\_10h20mn\_atm

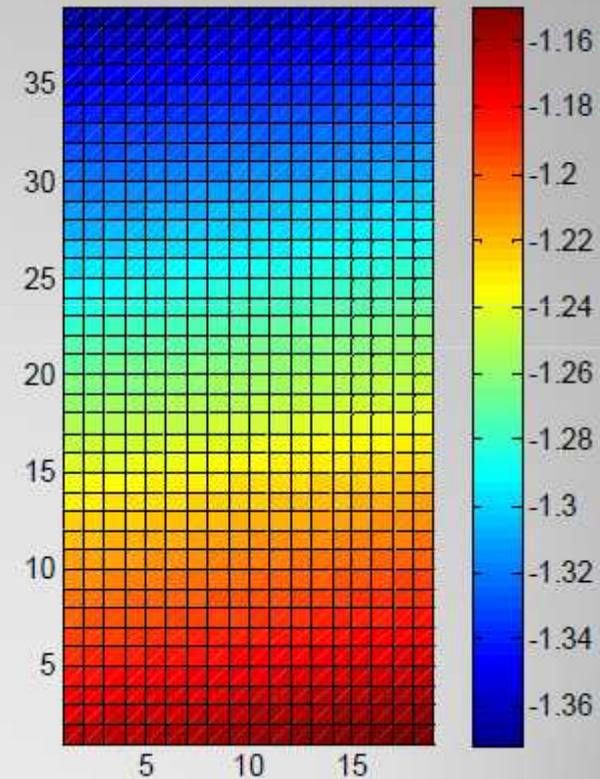


Figure: Relief estimé

# Bathymétrie avec fond variable

Images HYPLITT

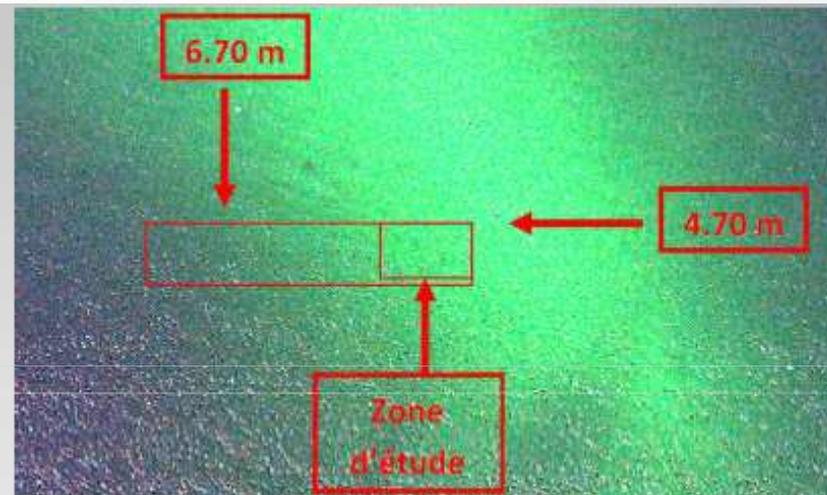


Figure ci-dessous: *Relief estimé*

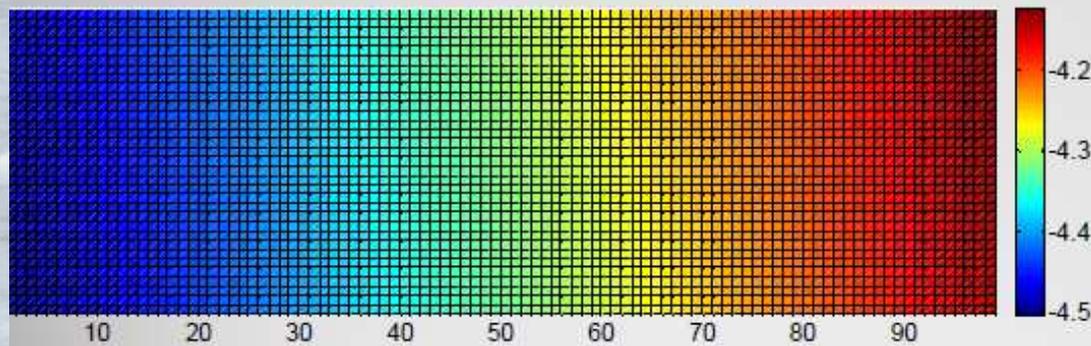


Figure ci-dessus:  
H3\_0500m\_L01\_270de  
g\_20100914\_13h15mn  
\_atm\_1\_deglintage\_sho  
reline

# Bathymétrie avec fond variable

## Images HYPLITT

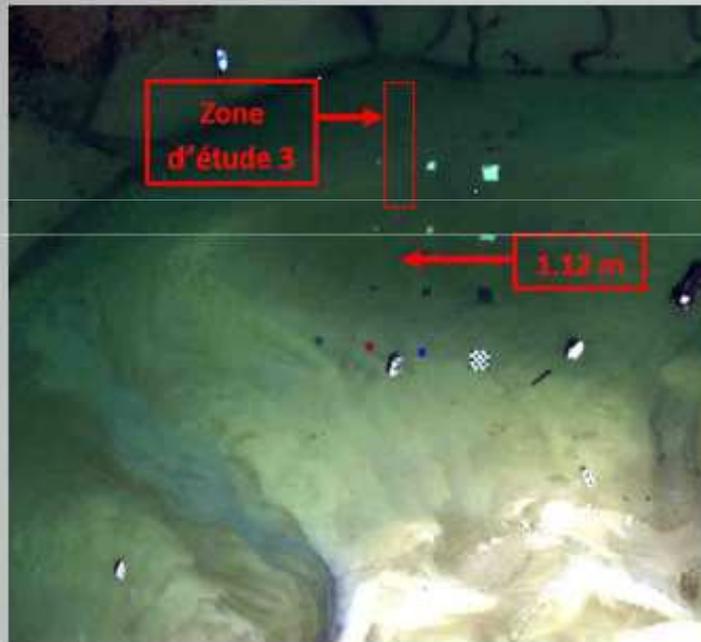


Figure:

H1\_0500m\_L01\_090deg\_201009

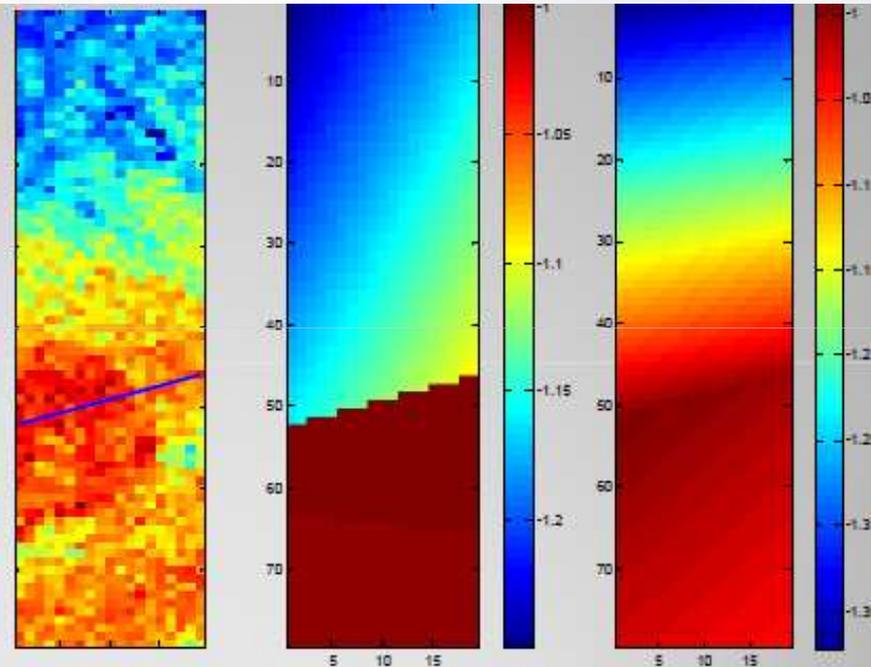


Figure: de gauche à droite, (1) localisation de la rupture de pente, (2) relief estimé sans la contrainte de continuité, (3) relief estimé avec la contrainte de continuité.

# Bathymétrie avec fond variable

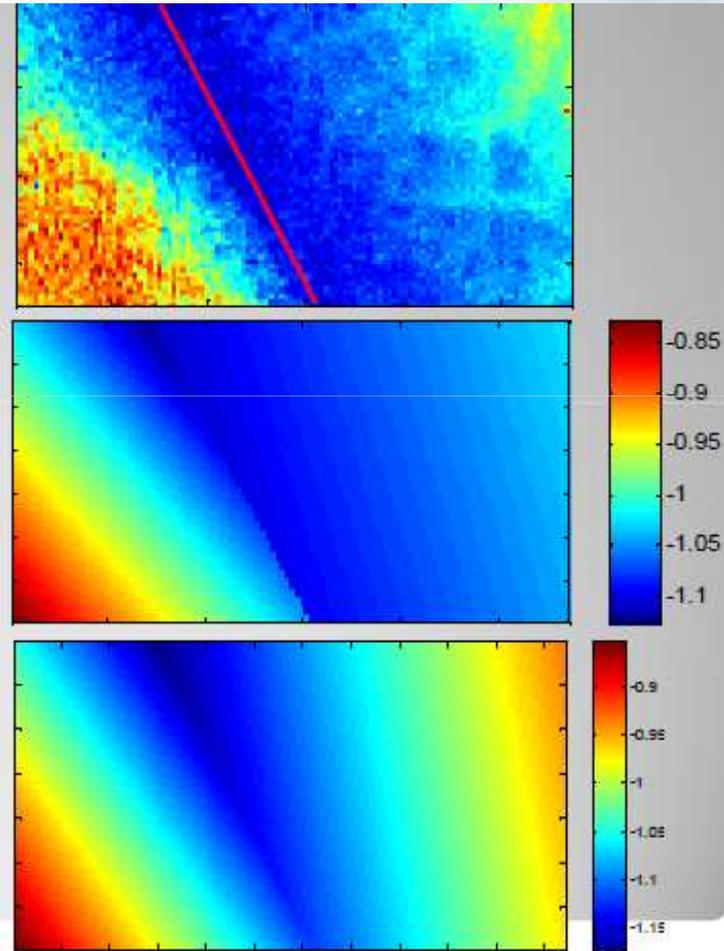
## Images HYPLITT



Figure ci-dessus:

H2\_0500m\_L01\_090deg\_20100914\_1  
5h09mn\_atm

Figure ci-contre: de haut en bas, (1)  
localisation de la rupture de pente, (2) relief  
estimé sans la contrainte de continuité, (3)  
relief estimé avec la contrainte de continuité.



# Bathymétrie avec fond variable

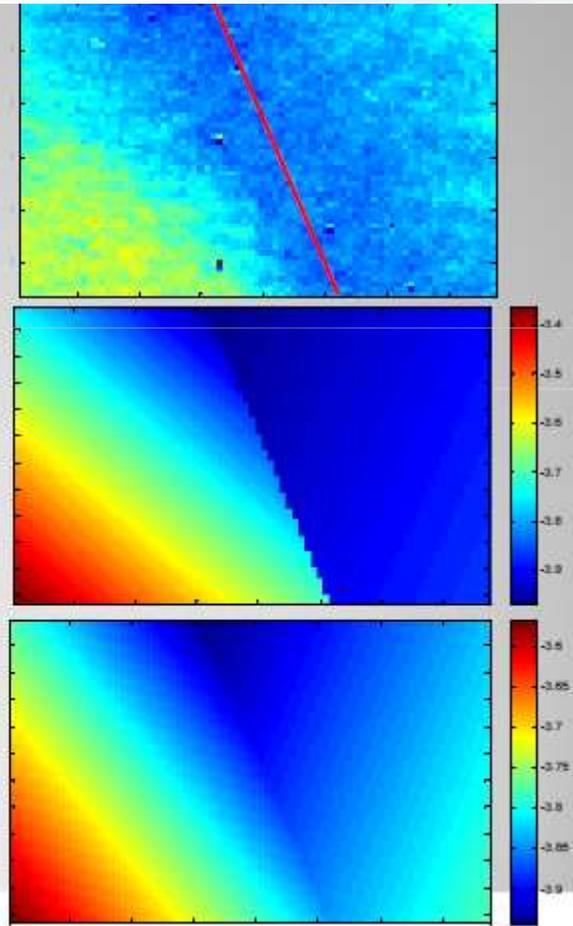
## Images HYPLITT



Figure ci-dessus:

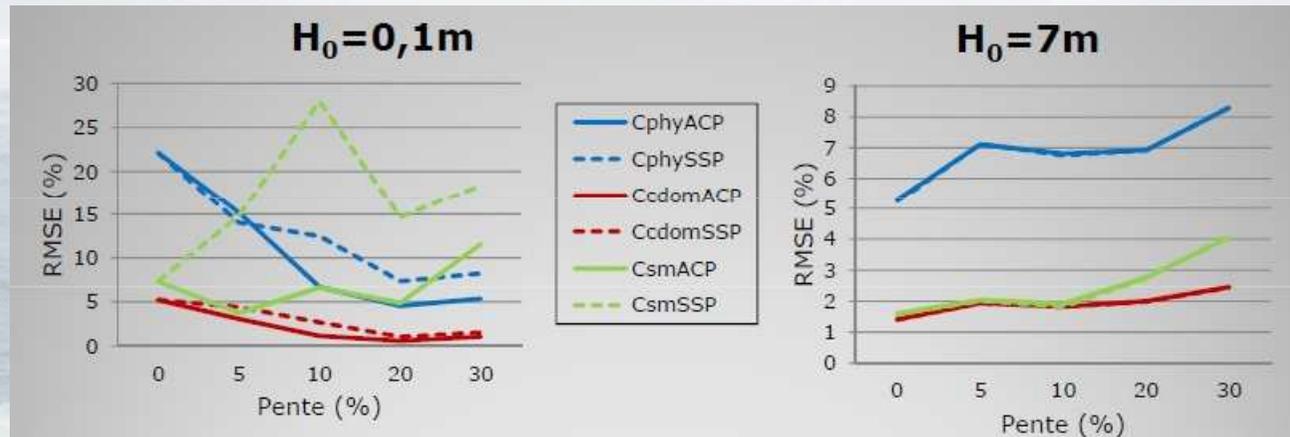
H2\_0650m\_L02\_090deg\_20100918\_1  
3h23mn\_atm\_1\_deglintage\_shoreline

Figure ci-contre: de haut en bas, (1)  
localisation de la rupture de pente, (2) relief  
estimé sans la contrainte de continuité, (3)  
relief estimé avec la contrainte de continuité.



# Fond à une ou deux pentes

## ➤ Estimation des concentrations des constituants de l'eau

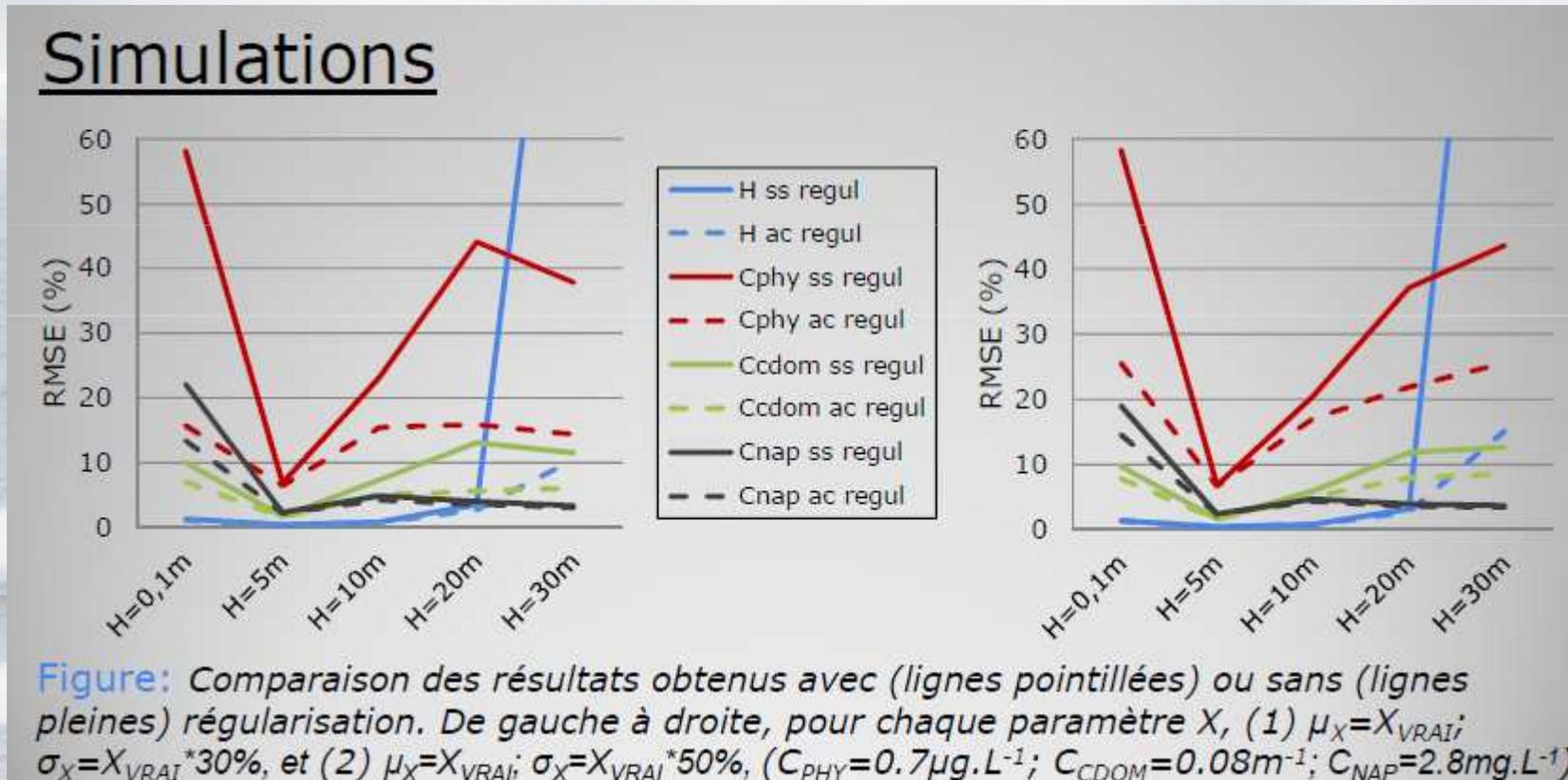


**Figure:** Racine de l'erreur quadratique moyenne sur l'estimation des concentrations (en %) en fonction de la pente (ACP: AveC Pente, la pente est prise en compte; SSP: SanS Pente, le fond est supposé plat).  
A gauche, le point le moins profond se situe à 0.10m, tandis qu'à droite, il se situe à 7m.

## ➤ Amélioration à faible fond

# Ajout de connaissance *a priori*

- **Estimateur du MAP (maximum *a posteriori*) : lois *a priori* sur les distributions des paramètres**



# Estimation de la bathymétrie

## ➤ Calcul des bornes de Cramér-Rao

Selon certaines hypothèses sur la structure de la matrice de covariance, on peut calculer les bornes de Cramér-Rao pour l'estimation des paramètres de la colonne d'eau.

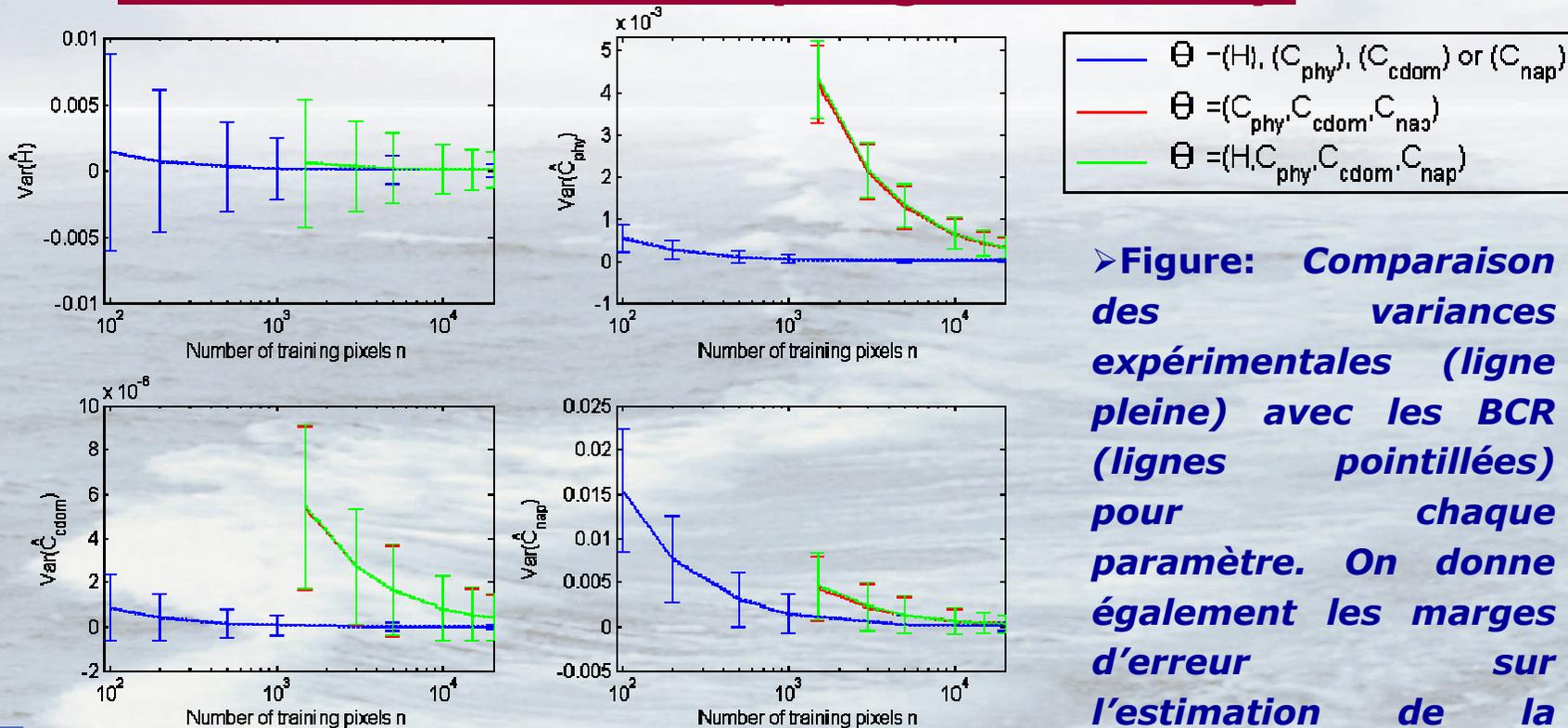
Pour un estimateur sans biais, on a:

$$\text{BCR} = I(\Theta)^{-1}$$

Où  $I(\Theta)$  est la matrice d'information de Fisher.

# Quelques résultats d'estimation

## ➤ Bornes de Cramér-Rao (images simulées):



➤ **Figure: Comparaison des variances expérimentales (ligne pleine) avec les BCR (lignes pointillées) pour chaque paramètre. On donne également les marges d'erreur sur l'estimation de la variance ( $H=10m$ ,  $C_{phy}=0.7\mu g.L^{-1}$ ,  $C_{cdom}=0.08m^{-1}$ ,  $C_{nap}=2.8mg.L^{-1}$ )**

# Conclusion estimation statistique

- **Amélioration / inversion classique**
- **Dépend du modèle radiatif**
- **Résolution spatiale ?**
- **Modulaire : intégration de connaissances a priori et de modèles physiques**

# Développement de méthodes pour la détection et le dé-mélange

# Développement de méthodes de détection

Peu de méthodes de détection de cibles immergées existent dans la littérature:

## ➔ Méthodes de détection classiques

- Supprimer l'effet de la colonne d'eau avec des techniques d'inversion couramment utilisées (ex: inversion par moindres carrés, minimisation de la fonction d'erreur avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt),
- Utiliser les détecteurs classiques sur les données de fond obtenues.

# Méthodes de détection Fresnel

- Soit le problème de détection suivant:

- $H_0$ : Cible absente  $\Rightarrow \mathbf{r}_{rs} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_b; \boldsymbol{\Gamma}_b)$

- $H_1$ : Cible présente  $\Rightarrow \mathbf{r}_{rs} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_t; \boldsymbol{\Gamma}_t)$

- Test du rapport de vraisemblance:

$$D(\mathbf{r}_{rs}) = \frac{P(\mathbf{r}_{rs}|H_1)}{P(\mathbf{r}_{rs}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrsim}} \mu$$

- Test du rapport de vraisemblance généralisé:

$$D(\mathbf{r}_{rs}) = \frac{\max_{\Theta} P(\mathbf{r}_{rs}, \chi; \Theta|H_1)}{\max_{\Theta} P(\mathbf{r}_{rs}, \chi; \Theta|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrsim}} \mu$$

# Méthodes de détection Fresnel

Quelques exemples:  $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}_{rs} - \mathbf{r}_{rs,\infty}$

- Tous paramètres connus:

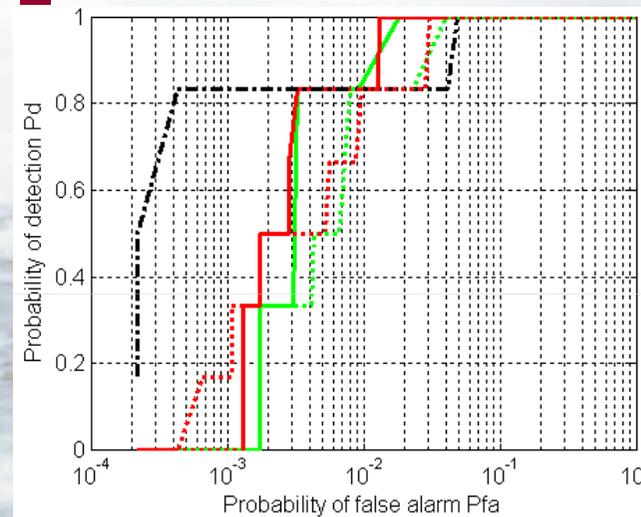
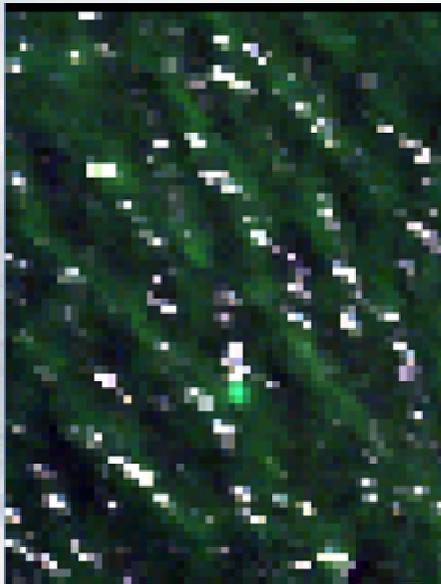
$$d_{\text{BMF}}(\boldsymbol{\rho}) = (\boldsymbol{\mu}_t - \boldsymbol{\mu}_b)^t \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\rho}$$

- Covariance et  $\boldsymbol{\Theta} = (\mathbf{H}, \mathbf{C}_{\text{phy}}, \mathbf{C}_{\text{cdom}}, \mathbf{C}_{\text{nap}})$  inconnus

$$d_{\text{GBF}}(\boldsymbol{\rho}) = \frac{1 + (\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\mu}_b(\hat{\boldsymbol{\Theta}}))^t \mathbf{S}(\hat{\boldsymbol{\Theta}})^{-1} (\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\mu}_b(\hat{\boldsymbol{\Theta}}))}{1 + (\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\mu}_t(\hat{\boldsymbol{\Theta}}))^t \mathbf{S}(\hat{\boldsymbol{\Theta}})^{-1} (\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\mu}_t(\hat{\boldsymbol{\Theta}}))}$$

# Résultats de détection

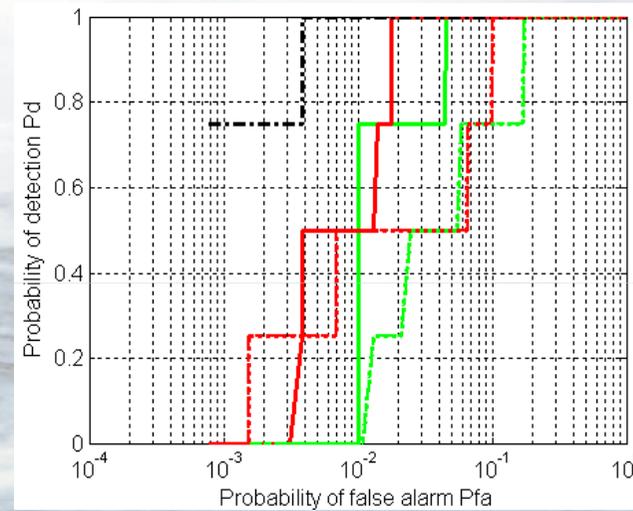
## ➤ Images réelles (site H<sub>3</sub>)



➤ **Figure: Courbes ROC obtenues lors de la détection de bâches noires. (I1):  $H=4.70m$ ,  $C_{phy}=1,5\mu g.L^{-1}$ ,  $C_{cdom}\approx 0.09m^{-1}$ ,  $C_{nap}=3mg.L^{-1}$ .**

# Résultats de détection

## ➤ Images réelles (site H<sub>3</sub>)



➤ **Figure:** Courbes ROC obtenues lors de la détection de bâches noires. (I2):  $H=6,70\text{m}$ ,  $C_{phy}=2,4\mu\text{g.L}^{-1}$ ,  $C_{cdom} \approx 0.09\text{m}^{-1}$ ,  $C_{nap} < 2\text{mg.L}^{-1}$ .

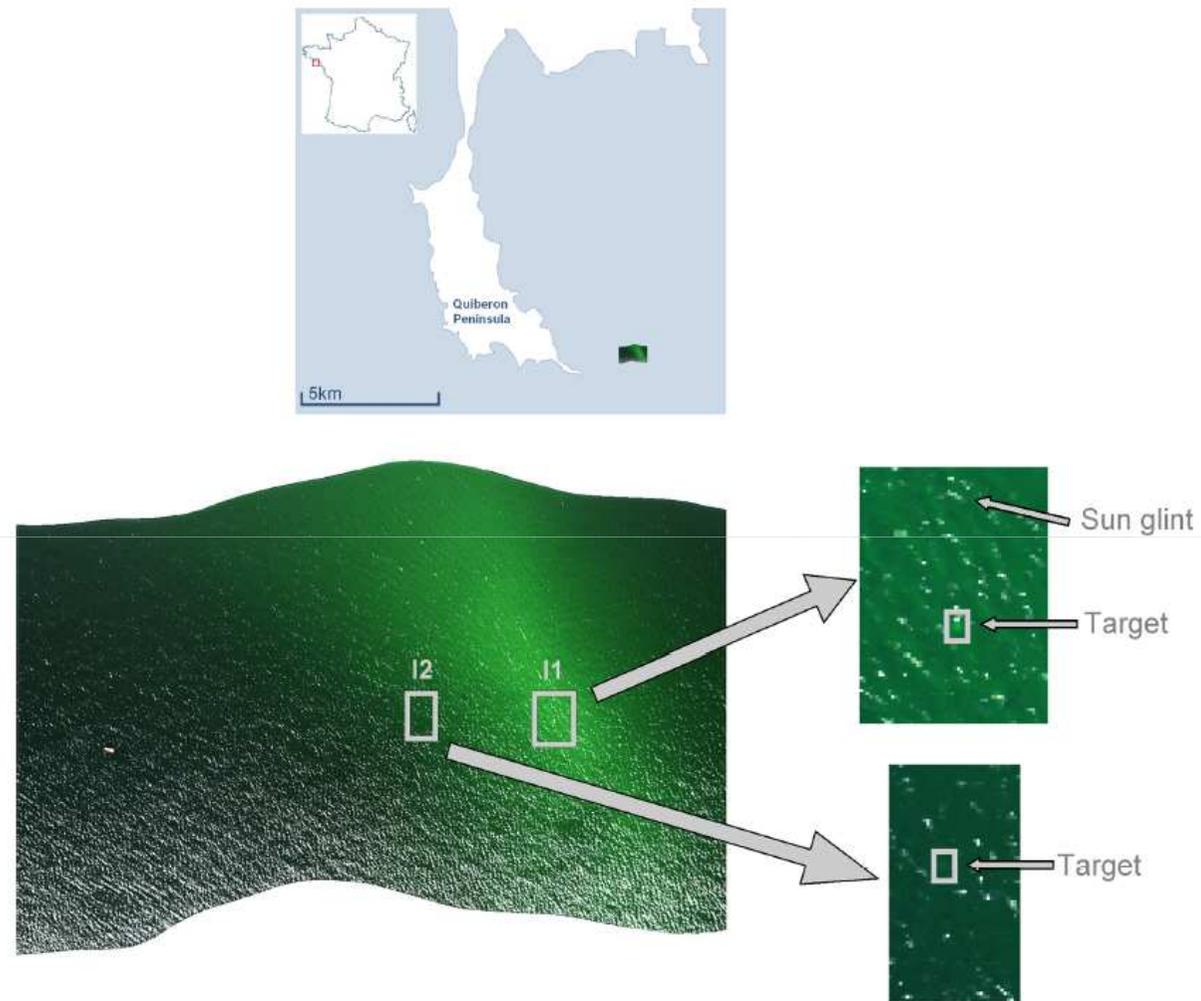


Fig. 2. HYPLITT true colour composite image. Two black tarpaulins and two white tarpaulins were placed in I1 and I2. The depth is 4.70m for I1 and 6.70m for I2.

# Conclusion détection

- Développement de détecteurs ‘autonomes’
- Amélioration des la détection/méthodes classiques
- Sensibilité / à la pertinence des modèles radiatifs
- Peu perturbé par le ‘glint’

# Dé-mélange du fond marin

## Modèle

- Modèle sub-surface simplifié

$$R = K(R_f - r_{\text{inf}} \mathbf{1}_{1L}) + r_{\text{inf}} \mathbf{1}_{1L}$$

- Triple NMF

$$R - r_{\text{inf}} \mathbf{1}_{1L} = K(S - r_{\text{inf}} \mathbf{1}_{1L})A$$

On commence par enlever  $r_{\text{inf}}$  aux données, puis

$$\rho = K \rho_0 A$$

# Algorithme 3-NMF

- Gradient projeté alterné + contraintes

$$A \leftarrow A - \text{grad}_A(f)$$

$$K \leftarrow K - \text{grad}_K(f)$$

$$\rho_0 \leftarrow \rho_0 - \text{grad}_{\rho_0}(f)$$

- Initialisation : vca pour  $K\rho_0$ , puis A avec pseudo inverse.
- Régularisations :
  - Somme à l'unité abondances
  - Dispersion min spectres
  - Variations 'douces' de K

# Résultats en fonction du bruit

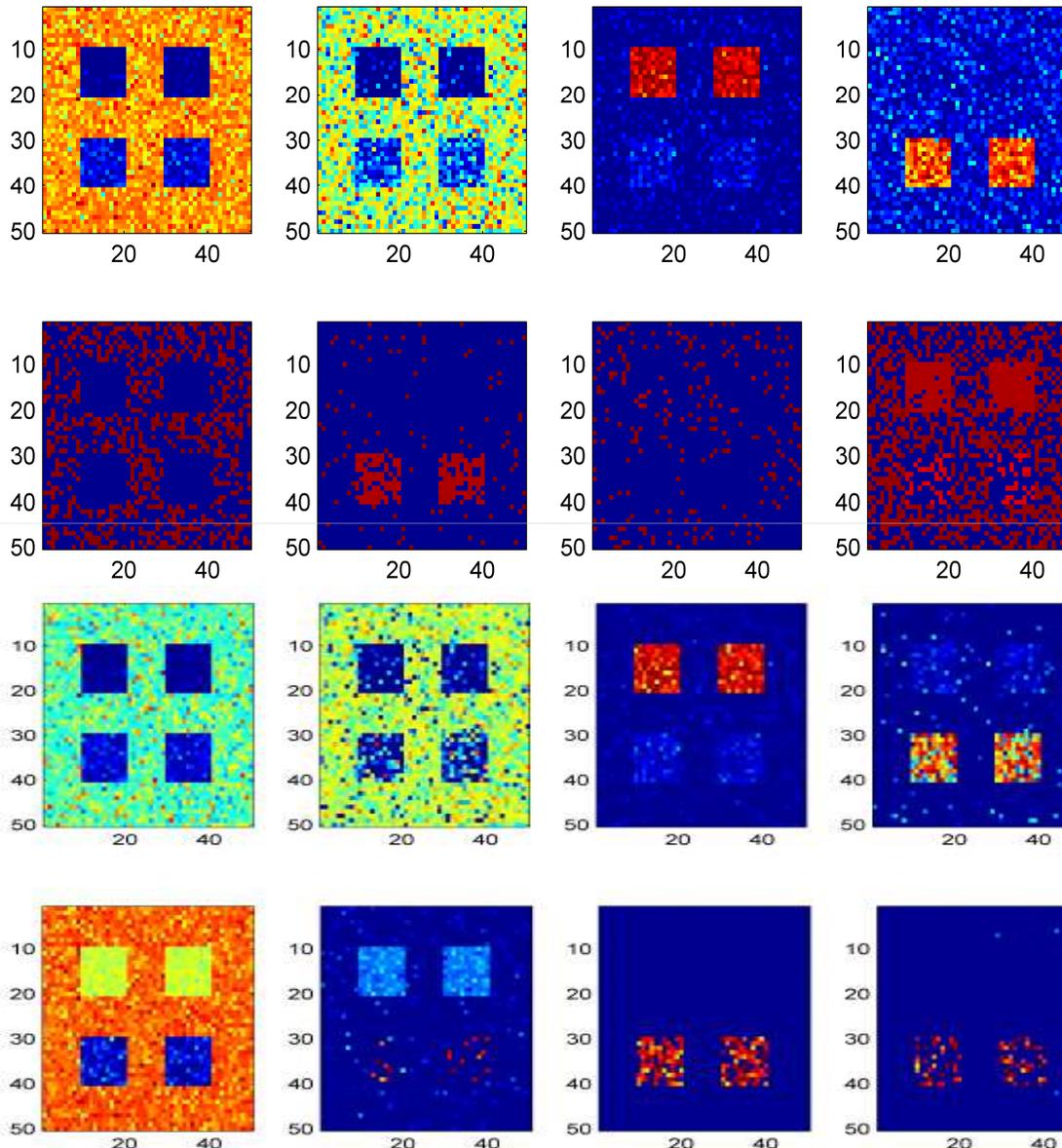
## ➤ Comparaison images simulées en fonction du bruit

Avec une profondeur fixée  $H = 10\text{m}$  et SNR variable.

	SNR = 40dB	SNR = 60dB	SNR = 80dB	SNR = $\infty$
$SME_{ML+HALS}$	0.25	0.24	0.4	$4.6 \times 10^{-2}$
$AME_{ML+HALS}$	$1.8 \times 10^5$	$7.6 \times 10^5$	71.2	$7.8 \times 10^{-2}$
$SME_{Tri-NMF}$	<b>0.13</b>	<b>0.19</b>	<b>0.17</b>	0.12
$AME_{Tri-NMF}$	$7.2 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-2}$

## ➤ Robuste pour l'estimation des abondances

lée  $H=10m$



➤ **Vraies**

➤ **Estimées NMF**

➤ **Sans correction**

➤ **Estimées 3-NMF**

➤ **Sans correction**

➤ **Estimées NMF-HALS**

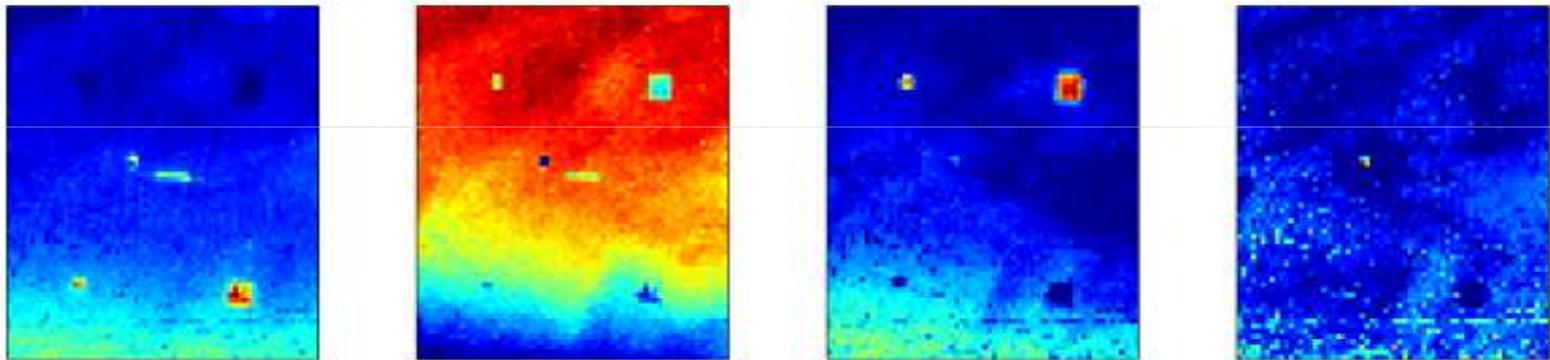
➤ **avec correction**

# Cartes d'abondances



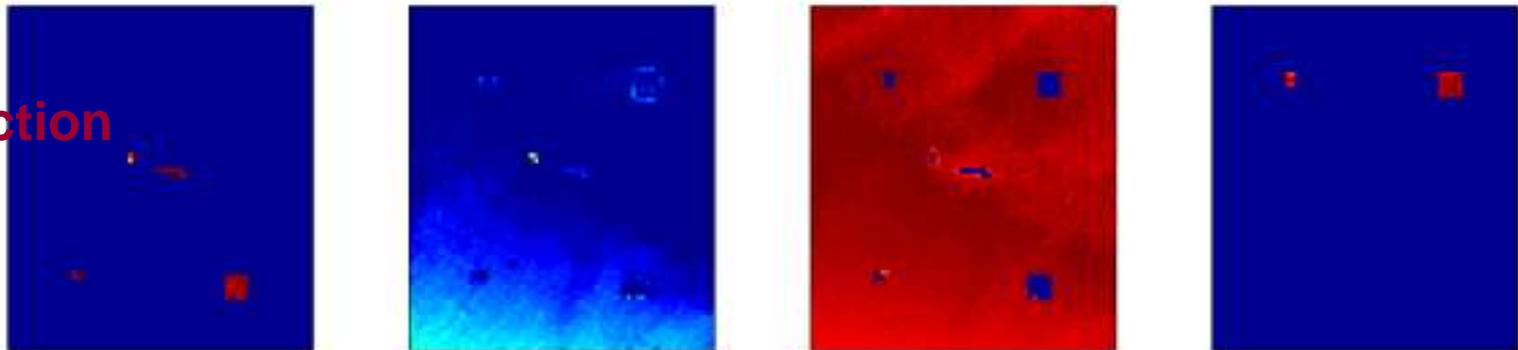
➤ **3-NMF**

➤ **sans correction**



➤ **NMF-HALS**

➤ **avec correction**



# Conclusion dé-mélange

- **3-NMF s'affranchit de l'estimation préalable de l'atténuation par la colonne d'eau**
- **Robuste pour l'estimation des abondances**
- **Médiocre pour l'estimation des endmembers → ne permet pas l'identification des matériaux**

# Conclusion générale

- Bases de données complète et fiable
- Développement de méthodes d'estimation de la bathymétrie
  - Exploitant les propriétés physiques
  - Exploitant les propriétés statistiques
  - Test sur les données HYPLITT,
    - Intérêt d'utiliser un modèle de transfert radiatif réaliste, particulièrement pour les méthodes statistiques
    - Calcul des bornes de Cramér-Rao,
- Développement de détecteurs 'autonomes', test sur les données HYPLITT.
- Développement d'une méthode de dé-mélange 'autonome', robuste pour l'estimation des cartes d'abondance

# Perspectives

- Amélioration des modèles physiques
  - Pour l'estimation de la colonne d'eau (inversion et estimation statistique)
  - Pour le dé-mélange (non linéaire)
- Surface de la mer
  - Passage à la surface
  - Pentes des vagues
  - Skyglint

## PASSAGE DE LA REFLECTANCE AU DESSUS DE LA SURFACE A LA REFLECTANCE EN DESSOUS DE LA SURFACE

➤ L'utilisation des lois de Fresnel fournies le résultat suivant

$$R_{rs}^+ = \frac{(1-\sigma)(1-\sigma_l^-)}{n_w^2} \cdot \frac{R_{rs}^-}{1-\sigma^-QR_{rs}^-} + R_{rs}^{surf}$$

avec

→  $\sigma, \sigma_l^-, \sigma^-$  des coefficients de réflexion

→  $Q$  facteur d'anisotropie

→ Sans réflexion de la surface, on obtient

$$R_{rs}^+ = \frac{aR_{rs}^-}{1-bR_{rs}^-}$$

→ Le paramétrage de ces paramètres varient suivant les auteurs surtout pour le paramètre  $b$

- **Dans la littérature, l'atténuation de la réflexion du ciel est peu traité ou demande des moyens de mesure importants**
- **Approche de l'atténuation des réflexions du soleil**
  - Estimation de l'intensité des réflexions du soleil de la surface dans le proche infra-rouge
    - Absorption importante par l'eau du signal provenant de la colonne d'eau
  - Estimation de l'intensité des réflexions du soleil par la surface pour les autres longueurs d'onde par différentes méthodes
    - Estimation d'une droite de régression (Lyzena *et al.* - 2006, Hedley *et al.* - 2005)
    - En réflectance la pente de la droite est proche de 1, ce qui revient à soustraire une constante (Lee *et al.* - 1999)
  - Autre approche
    - Estimation de l'intensité des réflexions du soleil par la surface en utilisant la bande d'absorption de l'oxygène (Kutser *et al.* - 2009)