

Alexandre Guyot<sup>1,2</sup>, Marc Lennon<sup>1</sup>, Thierry Lorho<sup>4</sup>, Nicolas Thomas<sup>1</sup>,  
Tristan Petit<sup>1</sup>, Simon Guéguen<sup>1</sup>, Guillaume Sicot<sup>3</sup>, Serge Cassen<sup>5</sup>,  
Laurence Hubert-Moy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hytech-imaging, Brest, France

<sup>2</sup>Université Rennes 2, Laboratoire LETG - UMR6554, Rennes, France

<sup>3</sup>ENSTA-Bretagne, Brest, France

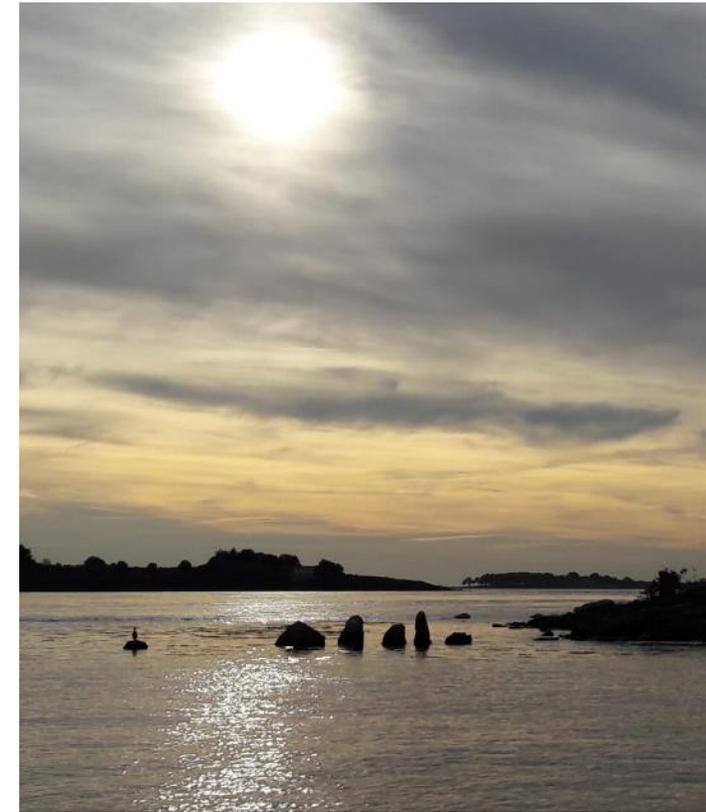
<sup>4</sup>Service régional de l'archéologie / Drac Bretagne, Rennes, France

<sup>5</sup>Université de Nantes, Laboratoire LARA - UMR6566, Nantes, France



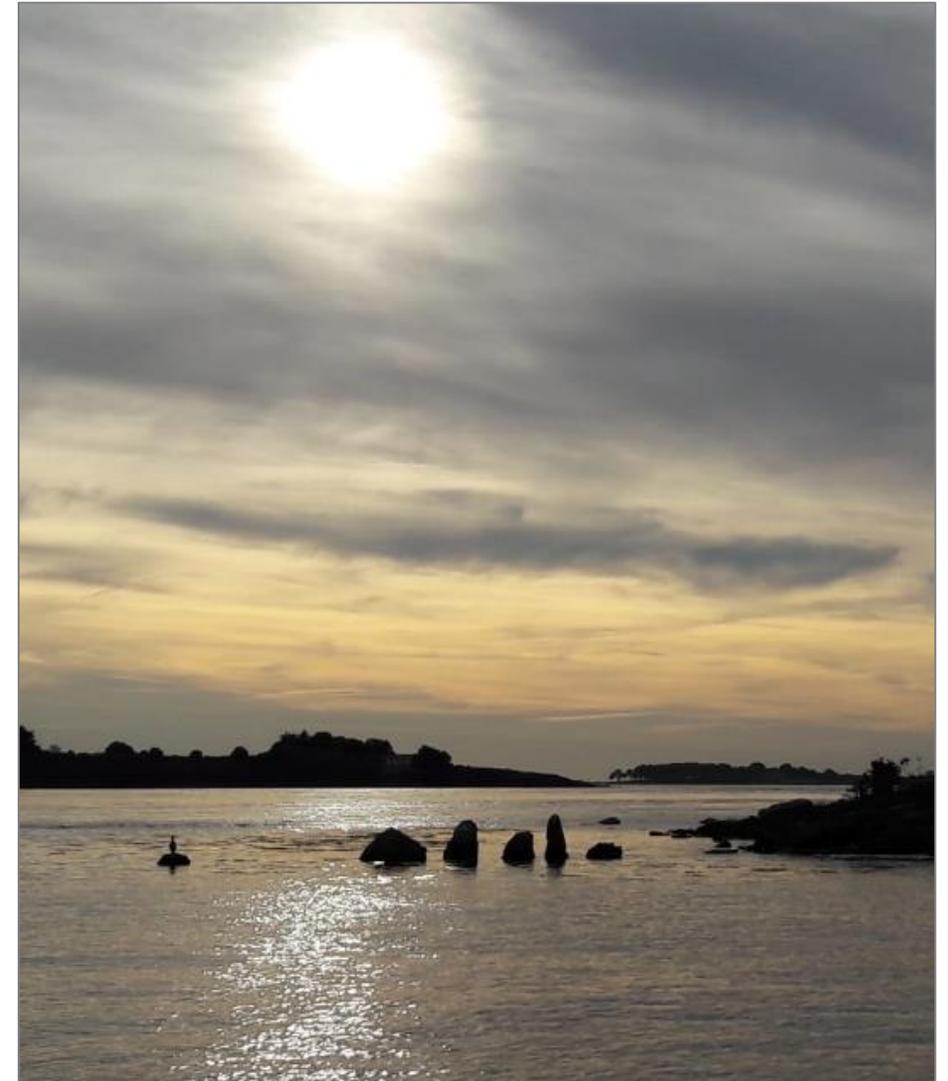
## Cartographie de vestiges archéologiques immergés à partir d'images hyperspectrales

Application au site mégalithique d'Er Lannic  
(Bretagne)



# Le patrimoine archéologique : cartographier pour mieux protéger

- Un marqueur de l'histoire de l'homme
  - Trace de l'existence de l'humanité
  - Richesse (pré)historique
  - Marqueur des variations du climat / du niveau marin
- Une richesse menacée
  - Agressions naturelles : érosion, montée des eaux, évènements climatiques exceptionnels ...
  - Agressions anthropiques : urbanisation, agriculture, pollution, ...



# Cartographie archéologique en environnement immergé

Méthodes actuelles :

- Plongée (relevé sous-marin, photo, vidéo)
- Sondeur multi-faisceaux
- (Lidar bathy / topobathy)

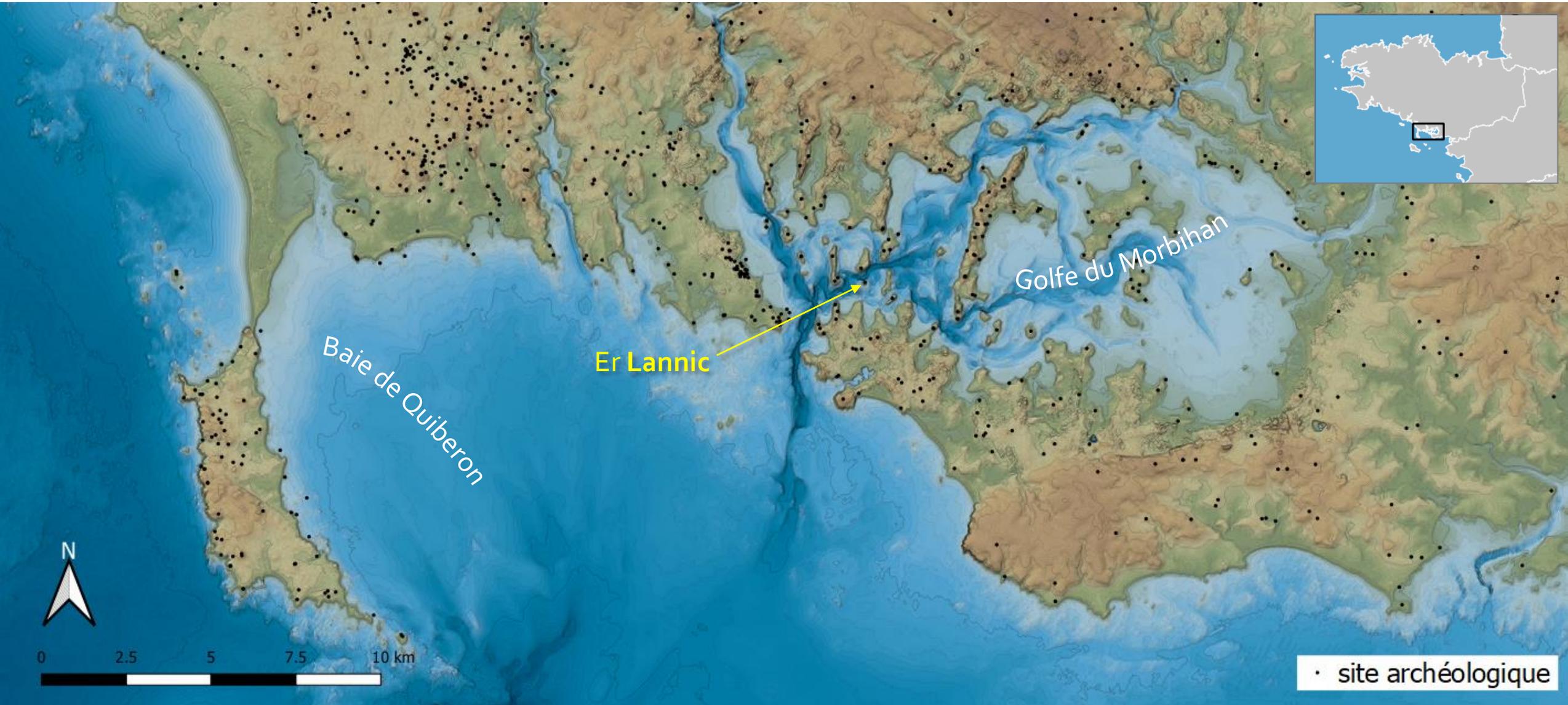


© DRASSM

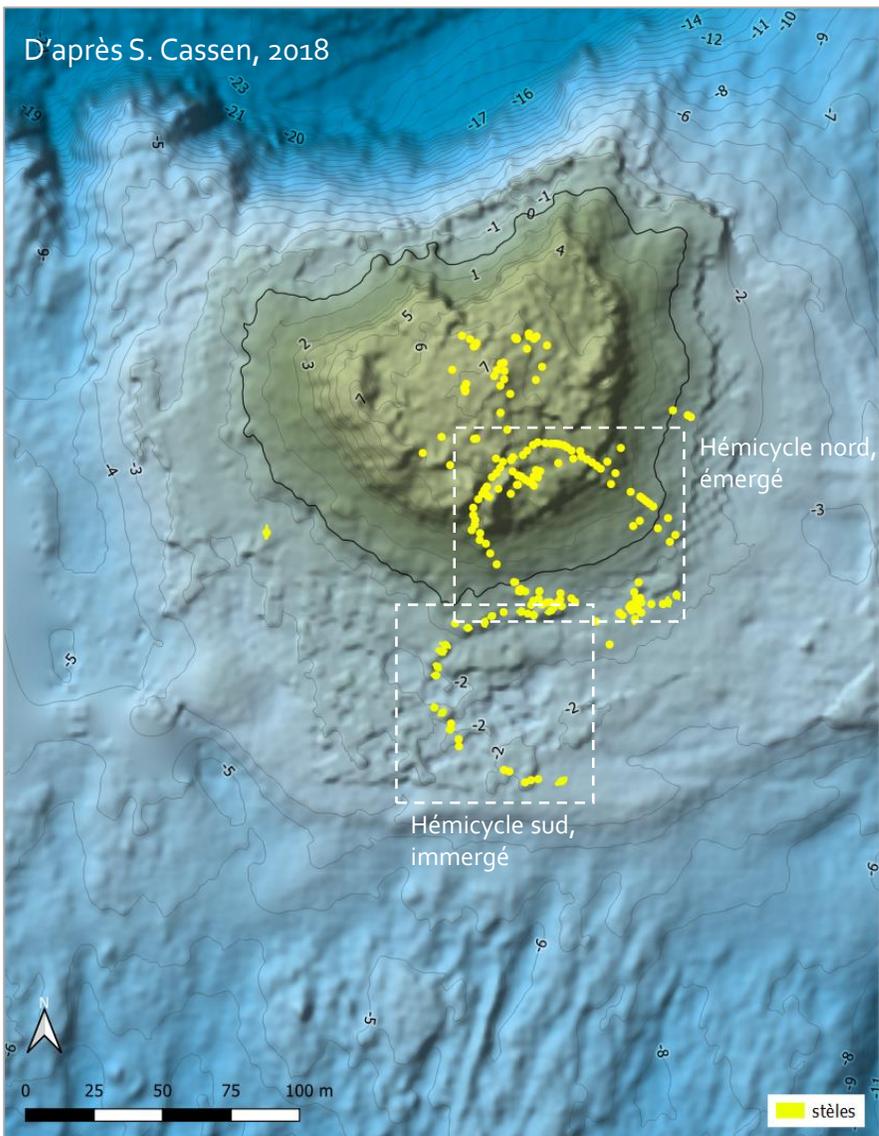
Quel potentiel pour la télédétection hyperspectrale en archéologie immergée ?

- Méthode non-destructive
- Richesse de l'information spatiale et spectrale
- Capacité à « voir » dans l'eau

# Zone d'étude (1)



# Zone d'étude (2)

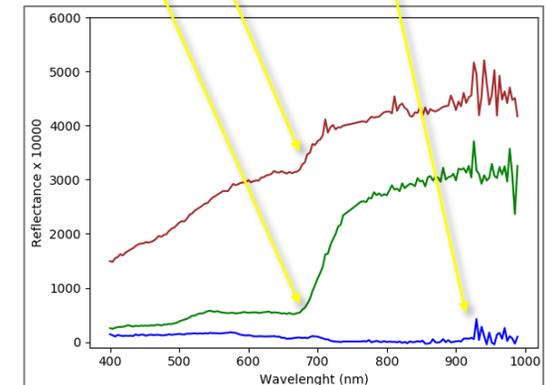
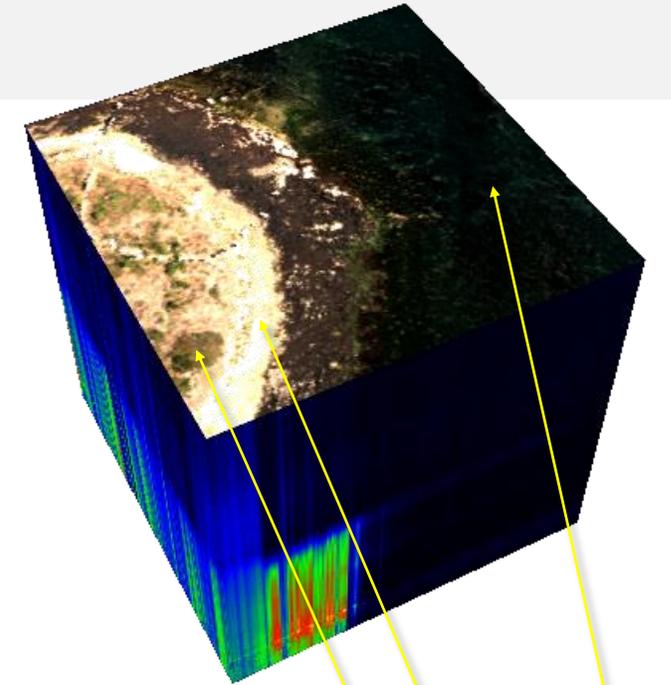


- Réserve archéologique et naturelle
- Site mégalithique (Néolithique, ~3500 av. J.-C)
  - Ouvrage de stèles : double hémicycle (~200 stèles au total)
  - Site en grande partie immergé : hémicycle sud (profondeur -2m / -3 m NGF-IGN69)
  - Estimation de la ligne de rivage au Néolithique : -3m à -5m NGF-IGN69
- Sur la liste d'inscription au patrimoine mondial UNESCO (Mégalithes de Carnac et des rives du Morbihan)

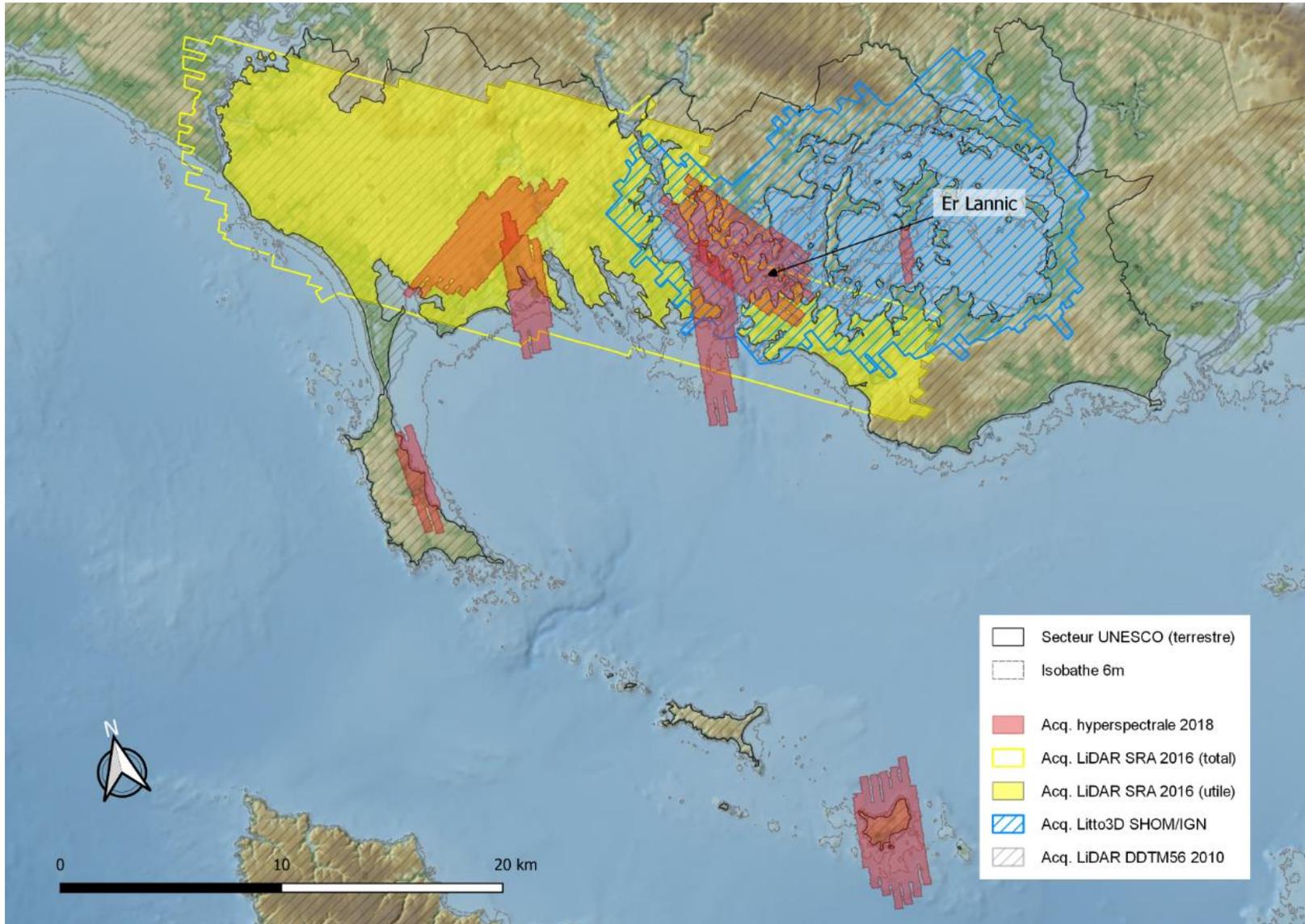
# Données hyperspectrales



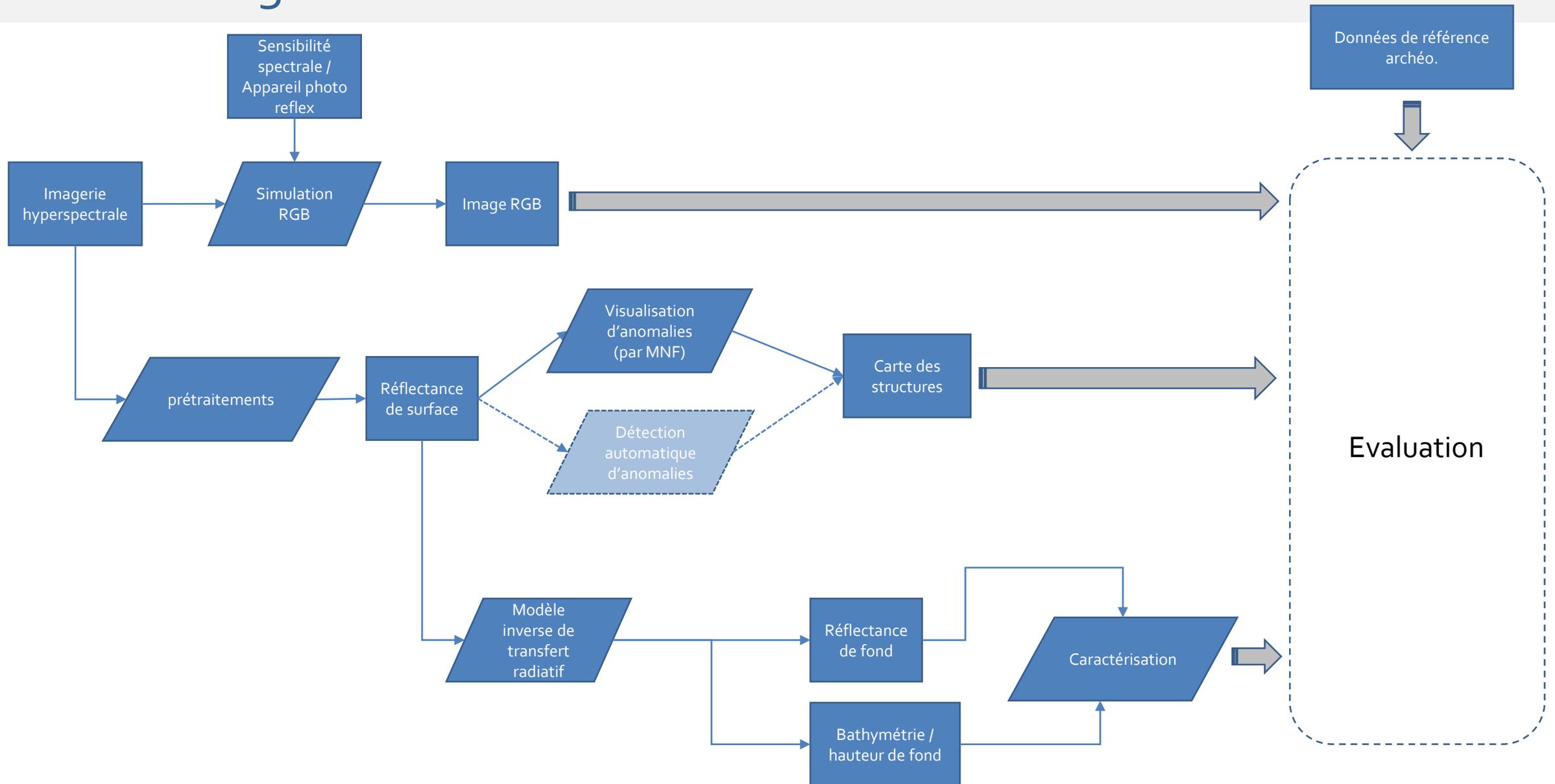
- Contexte environnemental
  - Date : 14 Sept. 2018
  - Coefficient de marée : 85
  - Ciel dégagé / visibilité 60km / mer calme
  - Angle solaire :  $46^\circ$
- Paramètres d'acquisition :
  - Capteur : Hyspex 1600
  - Gamme spectrale : 400-1000nm
  - Nombre de bandes : 160
  - Résolution spatiale : 50cm
  - Résolution spectrale : 4,5 nm
- Post-traitement HYPIP :
  - Calibration radiométrique
  - Corrections atmosphériques (ATCOR, maritime)
  - Post-corrections empiriques (cibles / spectrométrie)



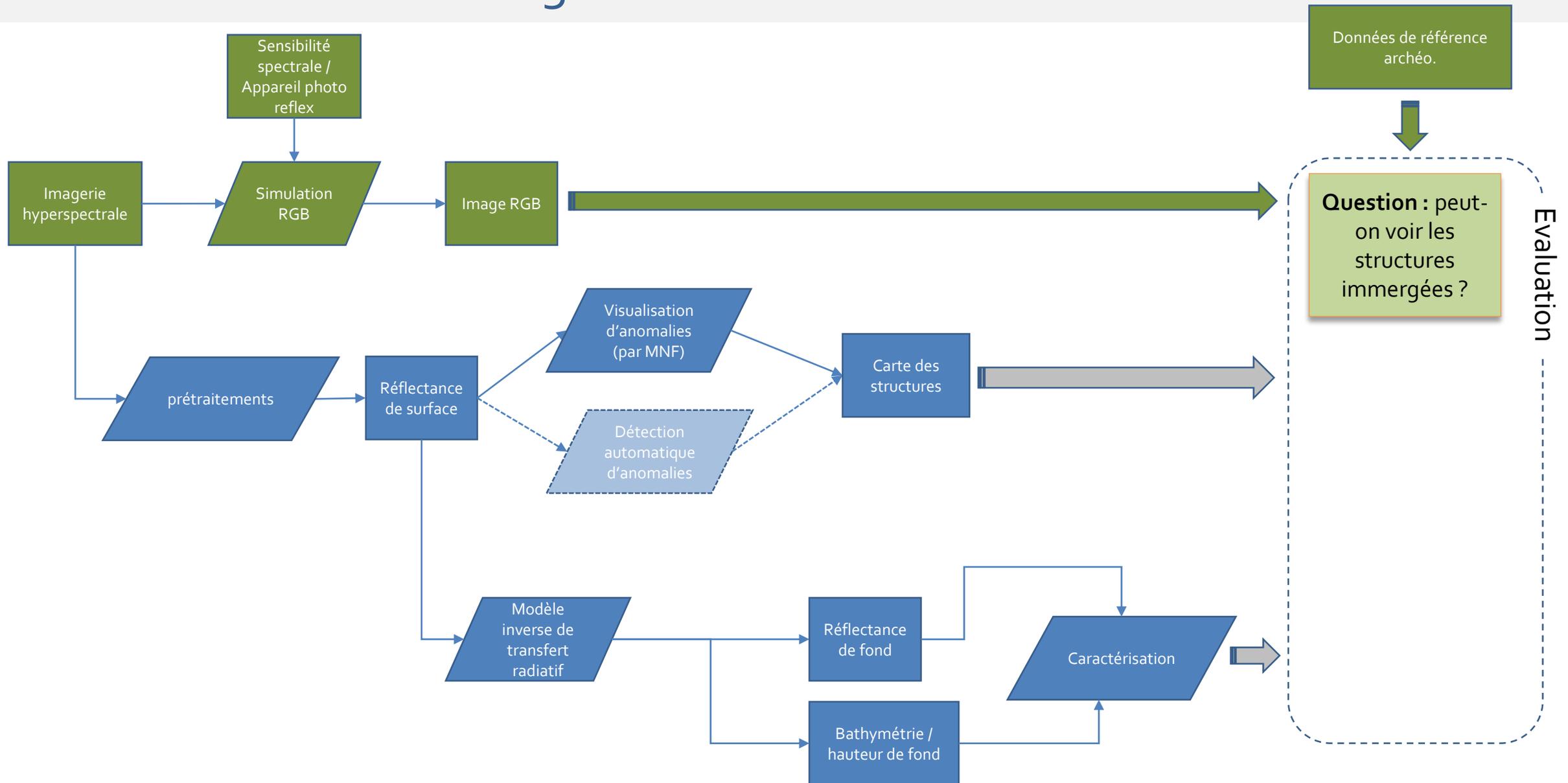
# Ensemble des données hyperspectrales et lidar



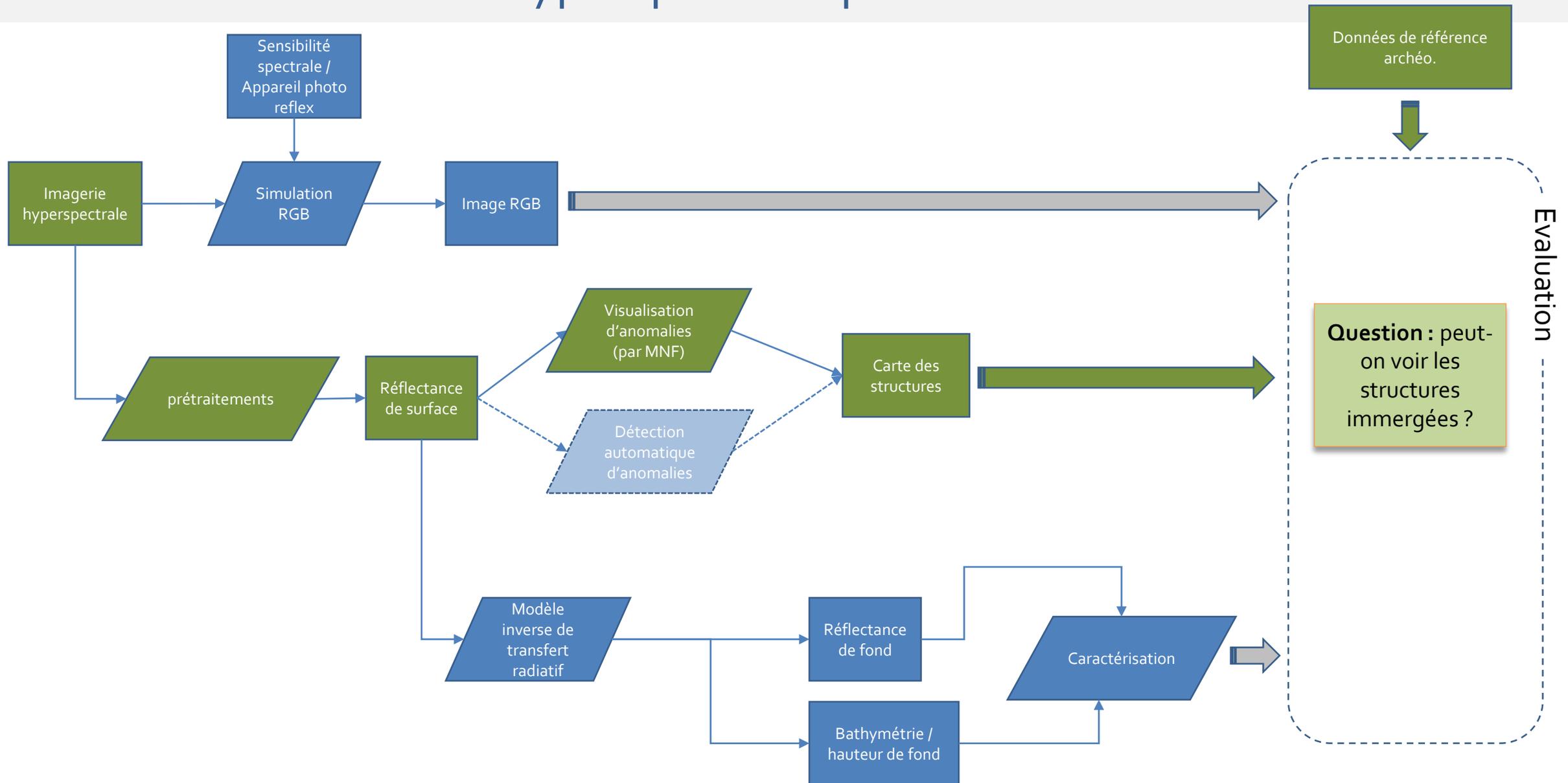
# Méthodologie



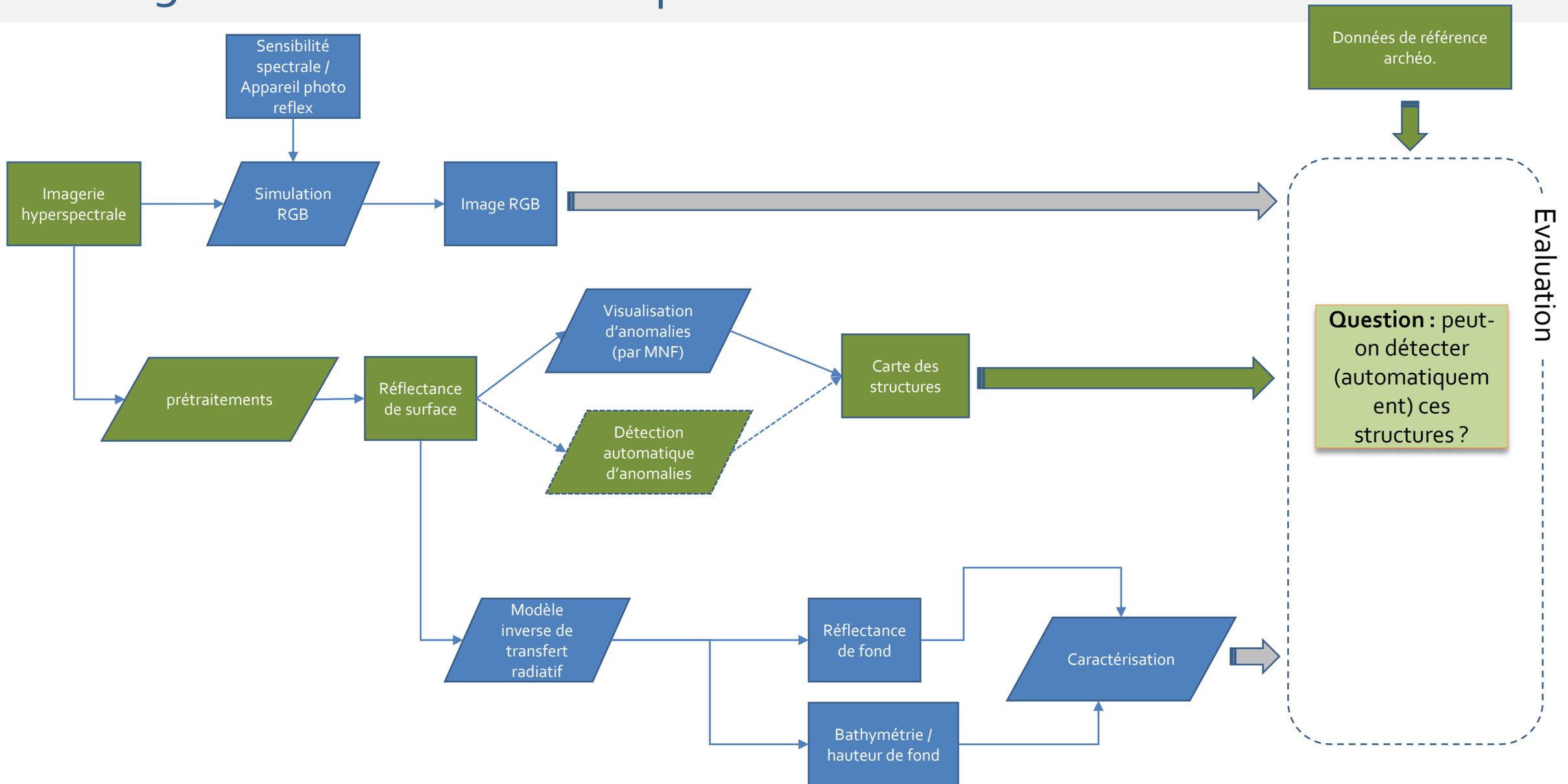
# Phase 1 : simulation imagerie RGB



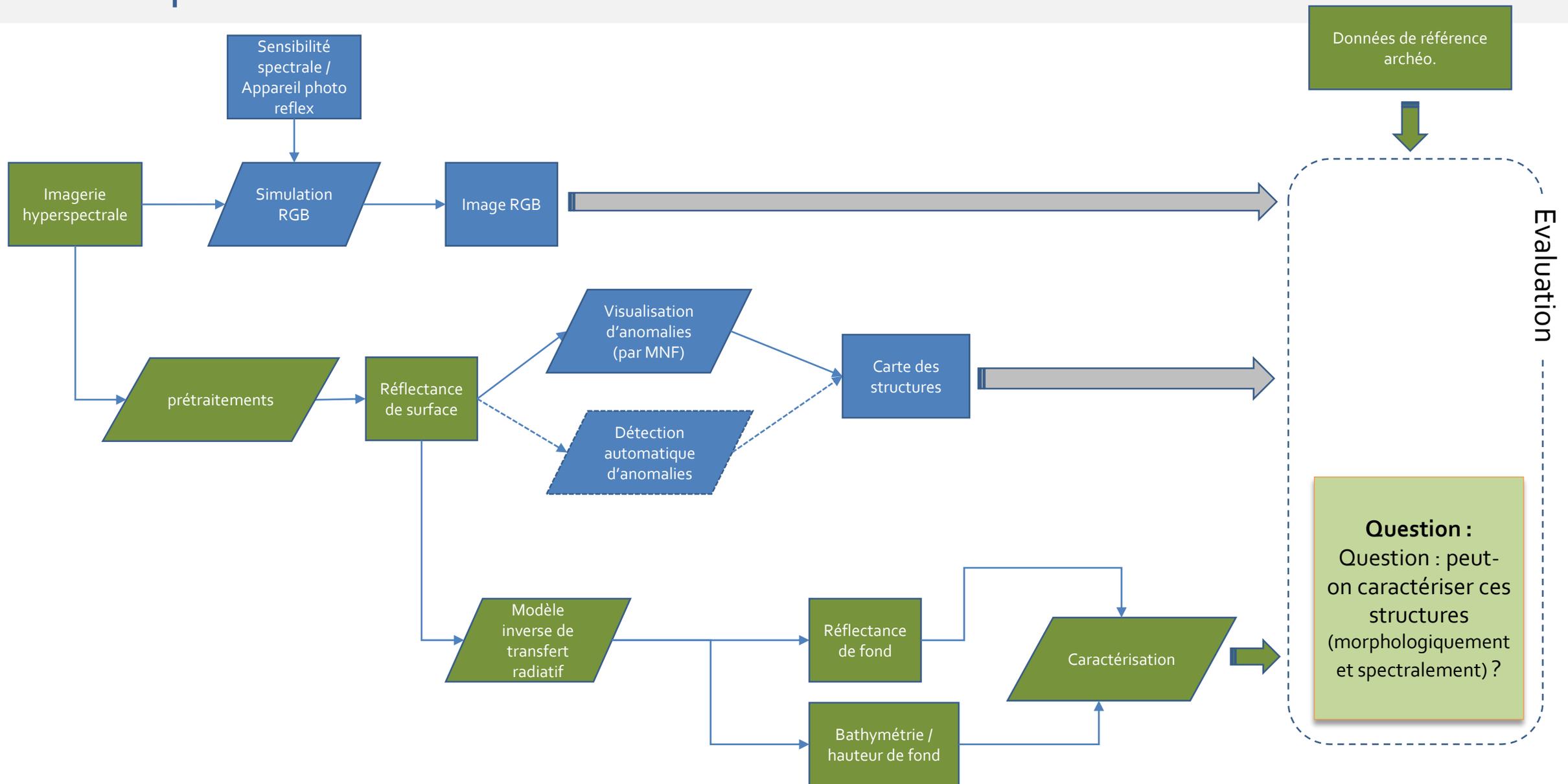
# Phase 2 : visualisation hyperspectrale par MNF



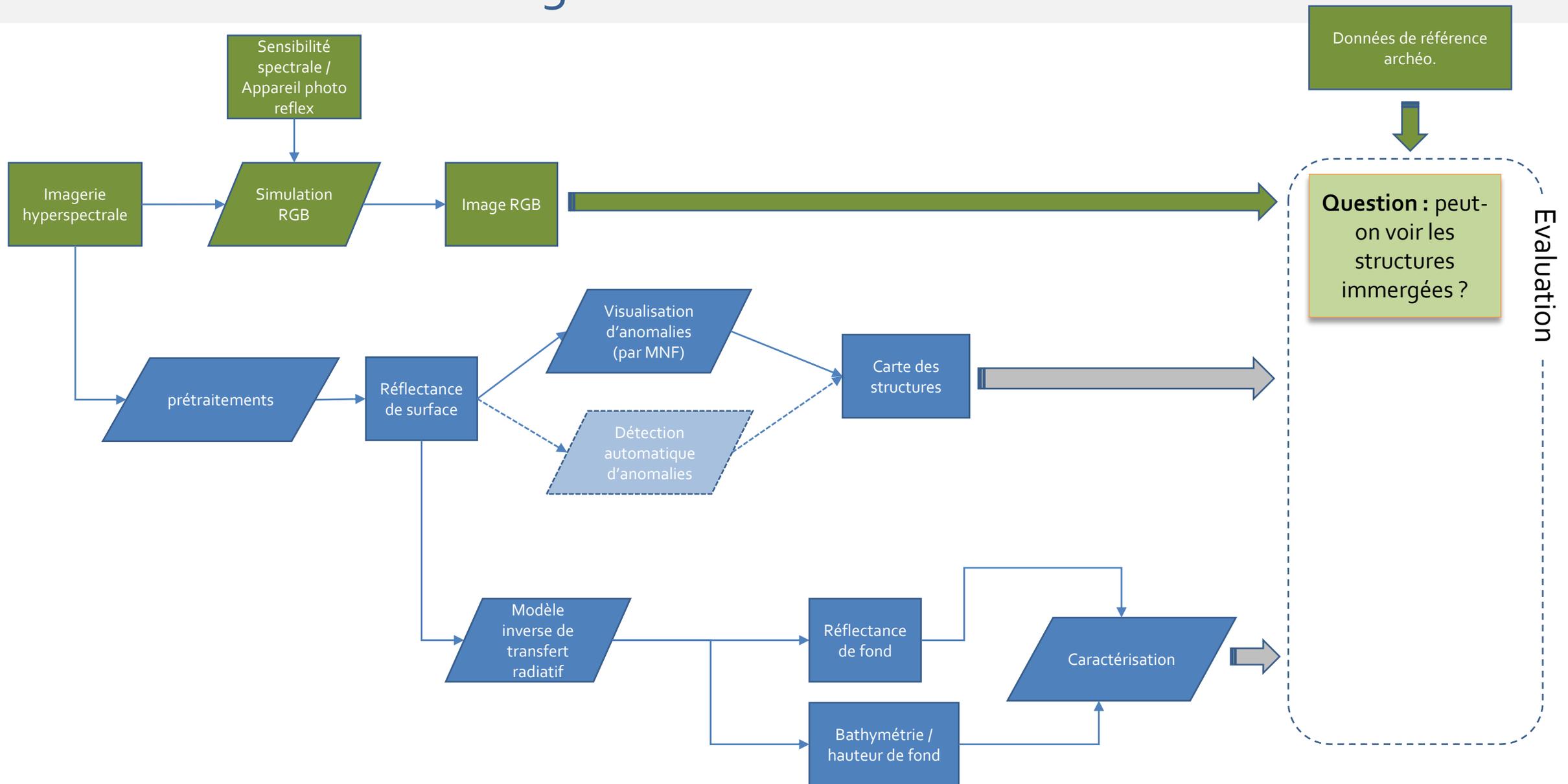
# Phase 3 : détection automatique



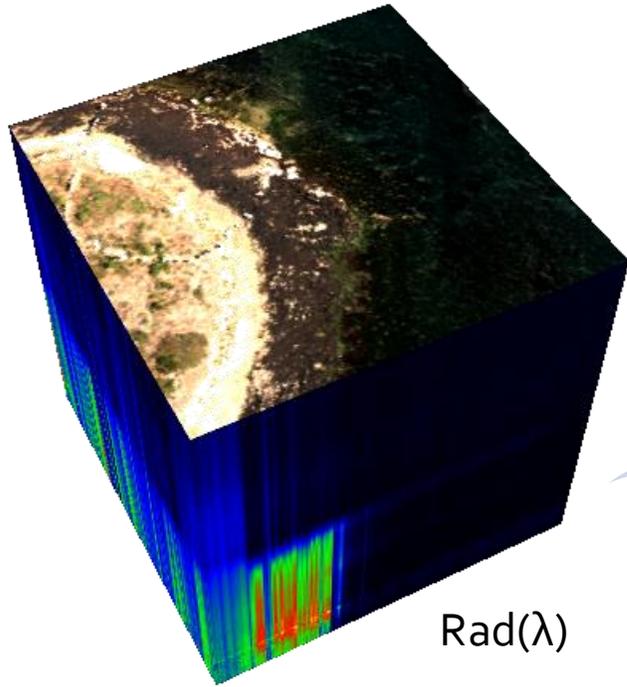
# Phase 4 : caractérisation des structures



# Phase 1 : simulation imagerie RGB

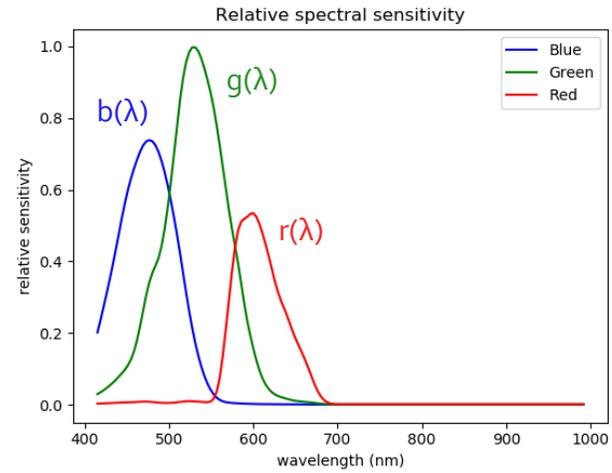


# Simulation RGB



Cube hyperspectral (luminance)

Rad( $\lambda$ )

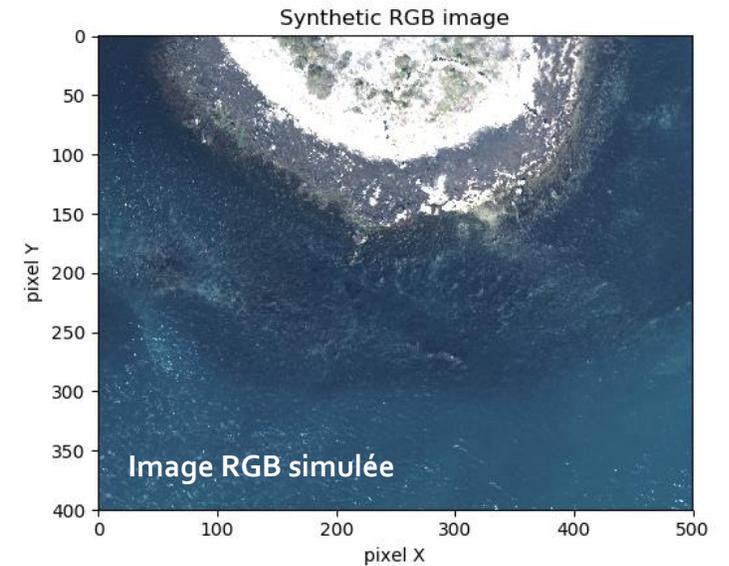


Courbes de sensibilité spectrale (ex. Canon EOS10)

$$R_{sim} = \sum_{\lambda_{400}}^{\lambda_{700}} r(\lambda) * Rad(\lambda)$$

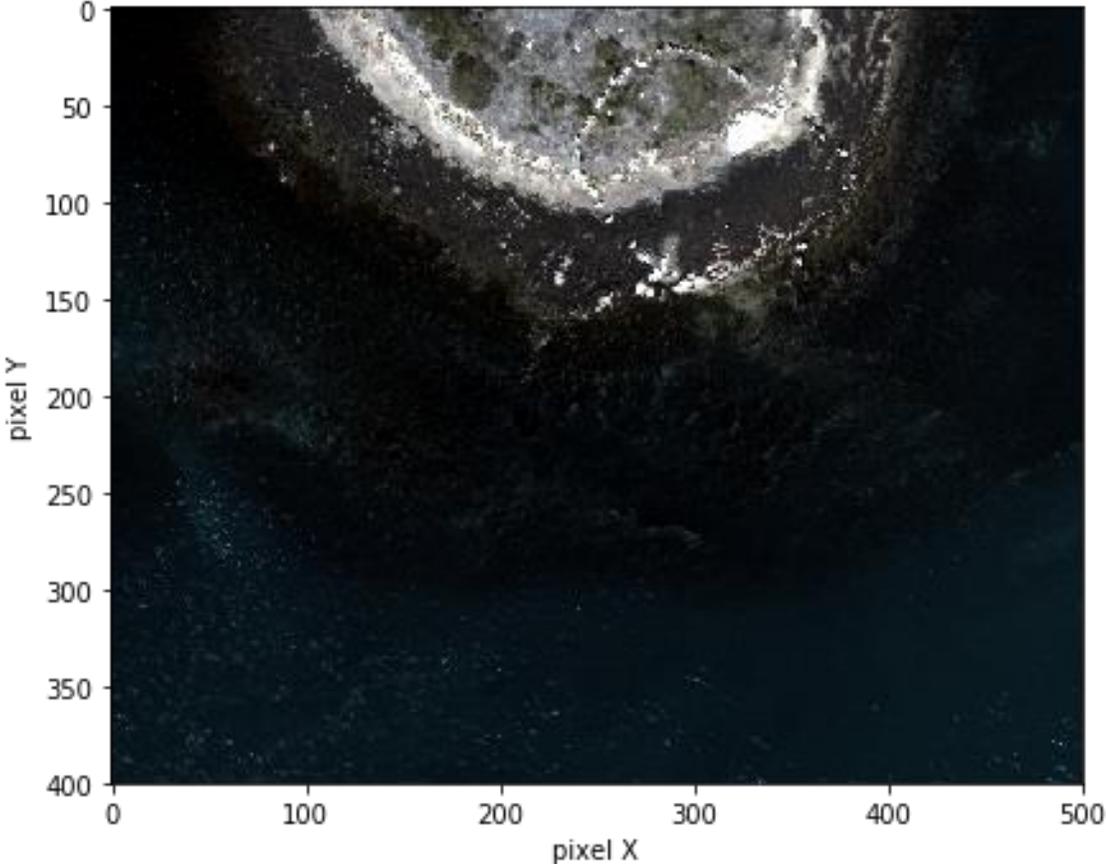
$$G_{sim} = \sum_{\lambda_{400}}^{\lambda_{700}} g(\lambda) * Rad(\lambda)$$

$$B_{sim} = \sum_{\lambda_{400}}^{\lambda_{700}} b(\lambda) * Rad(\lambda)$$

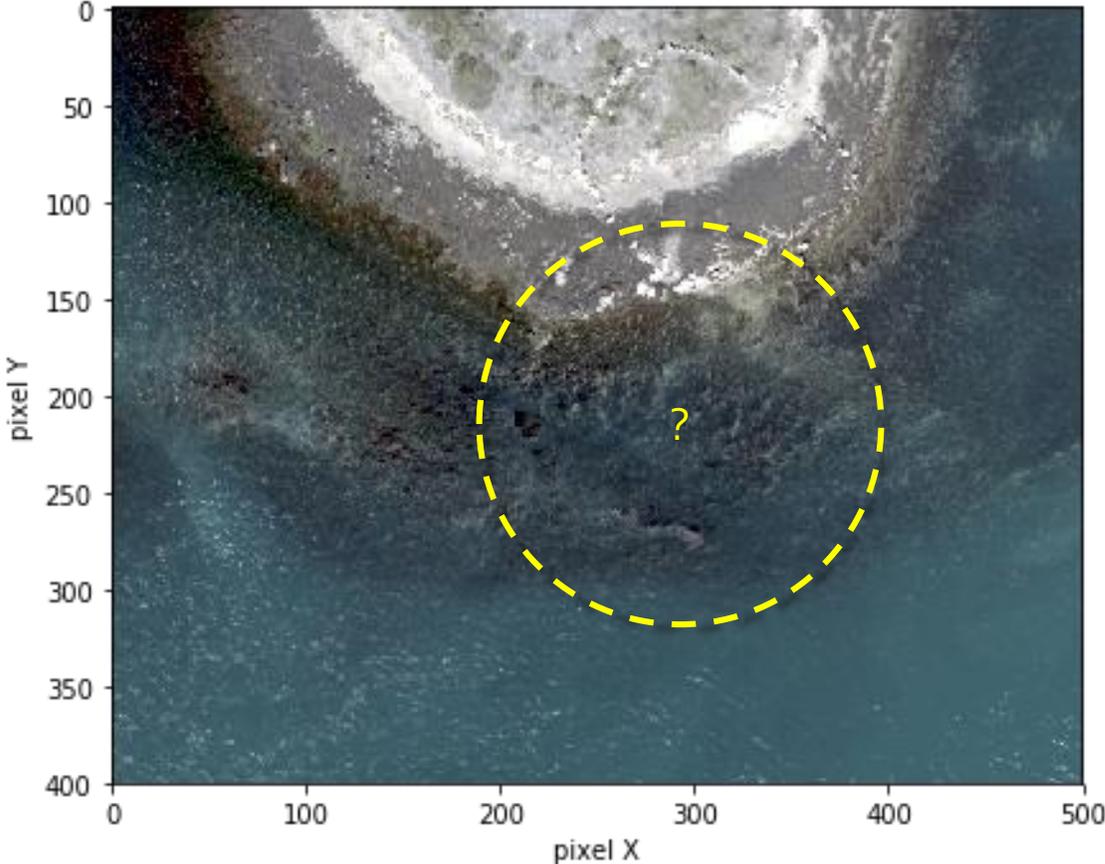


# Simulation RGB

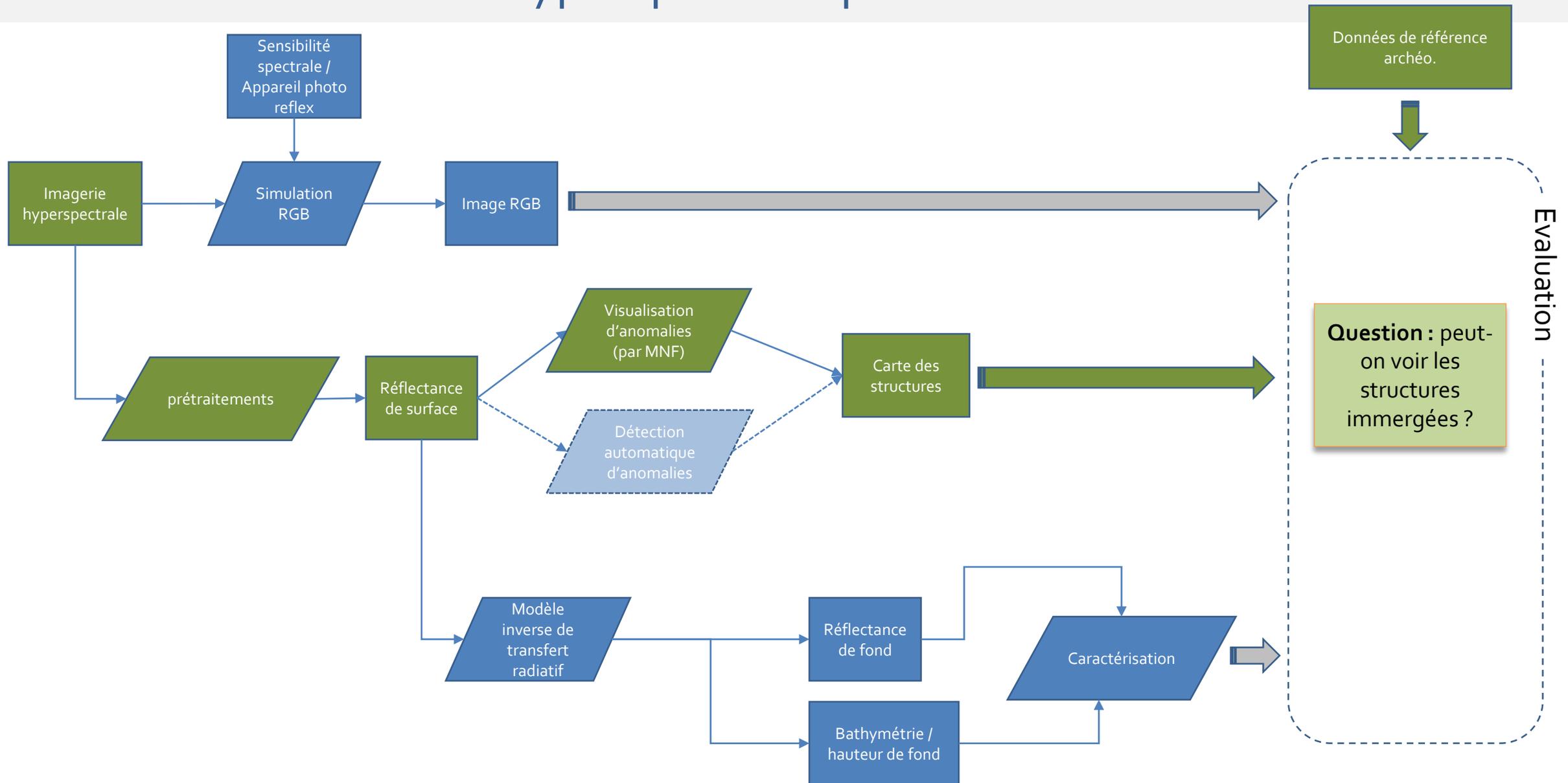
Simulation RGB



Simulation RGB  
(contrast/brightness / gamma correction)

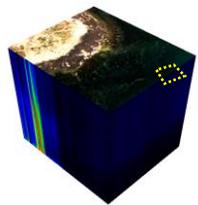


# Phase 2 : visualisation hyperspectrale par MNF



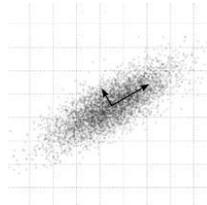
# Visualisation par MNF : Minimum Noise Fraction

- Visualisation vs extraction automatique
  - Cibles peu nombreuses
  - Structures de faible emprise (0.2 à 10 m<sup>2</sup>)
  - Hauteur d'eau variable
  - Réflectances très faibles (<1%)
- Minimum Noise Fraction
  - Séparer le bruit du signal
  - Conserver les composantes les moins bruitées



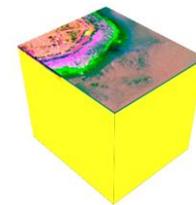
Etape 1

- Estimation du bruit
  - Identification d'une zone homogène (signal constant spatialement) par fenêtre glissante (variance minimum)
  - Estimation du bruit par Shift Diff (différence entre 2 pixel adjacents)



Etape 2

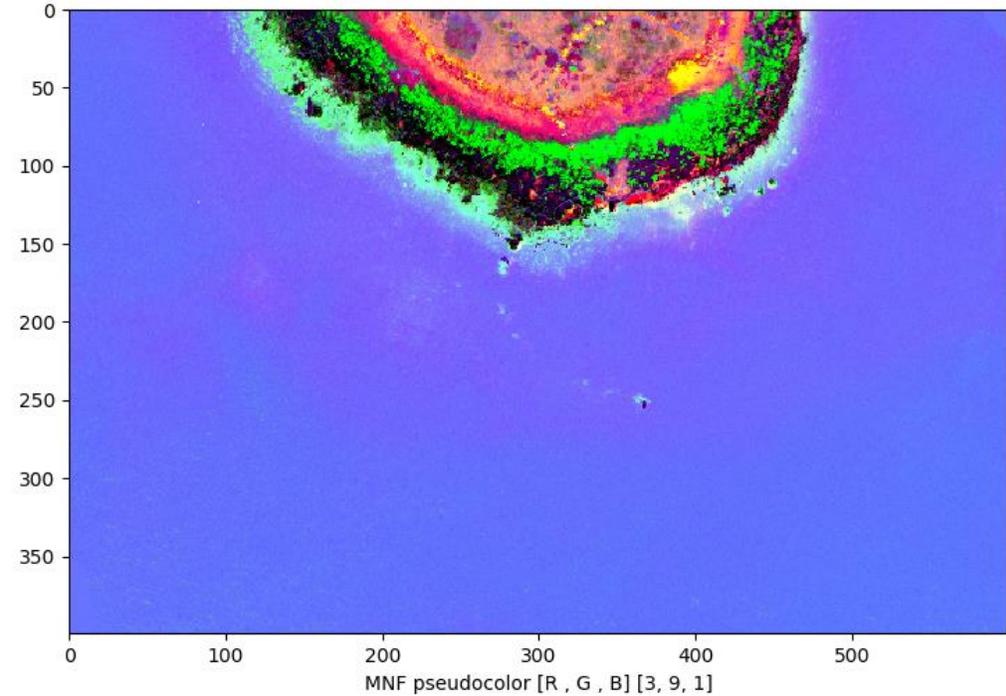
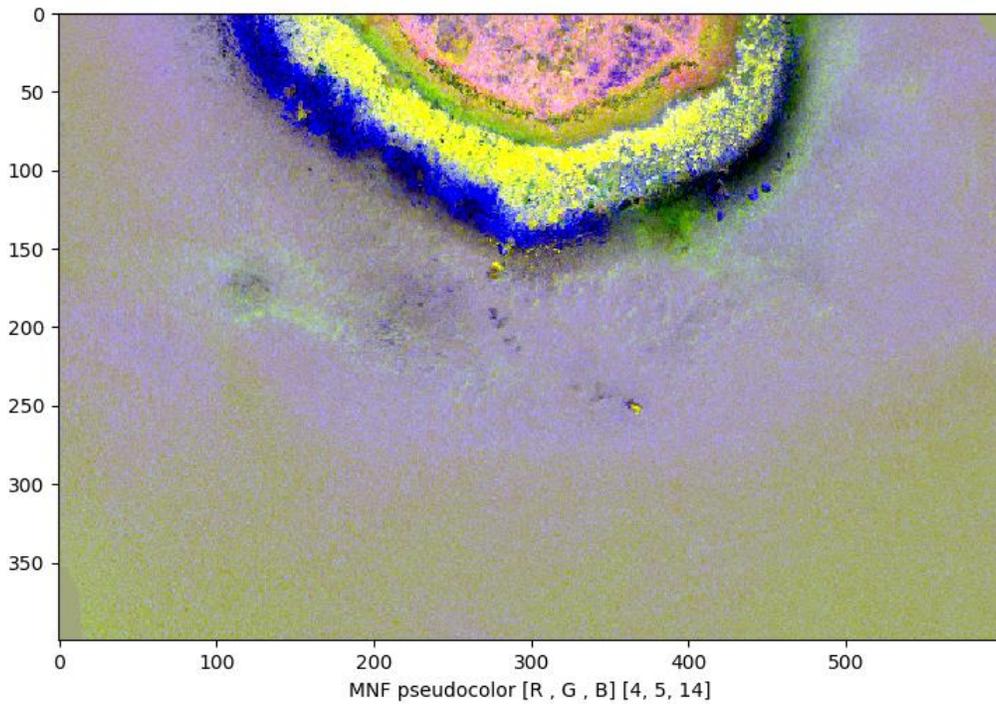
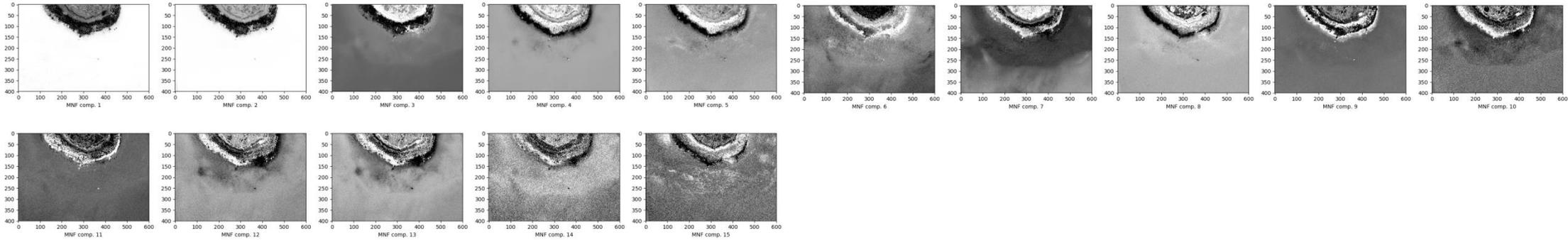
- Calcul MNF
  - PCA 1 : décorrelation du bruit (noise whitening)
  - PCA 2 : classement des composantes en fonction du rapport signal/bruit



Etape 3

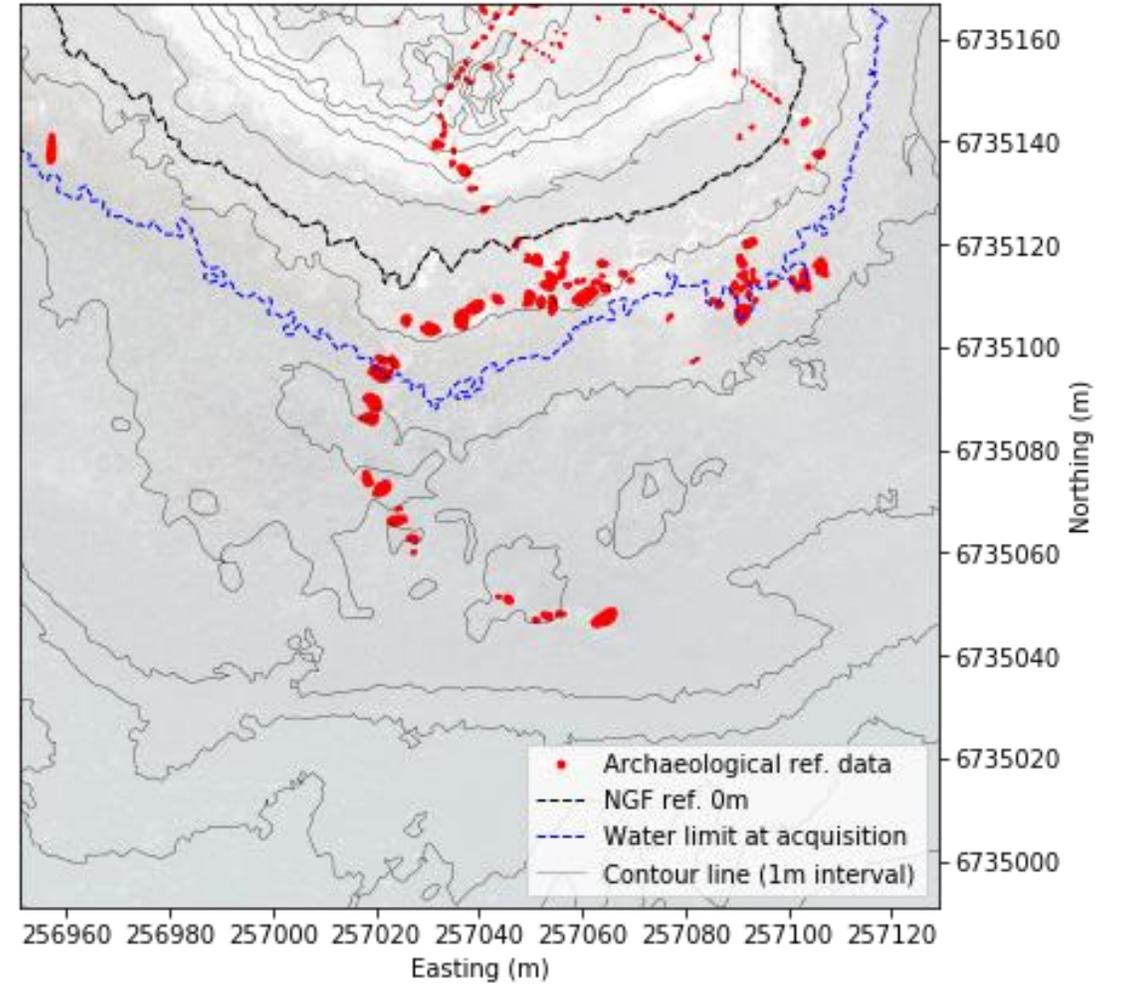
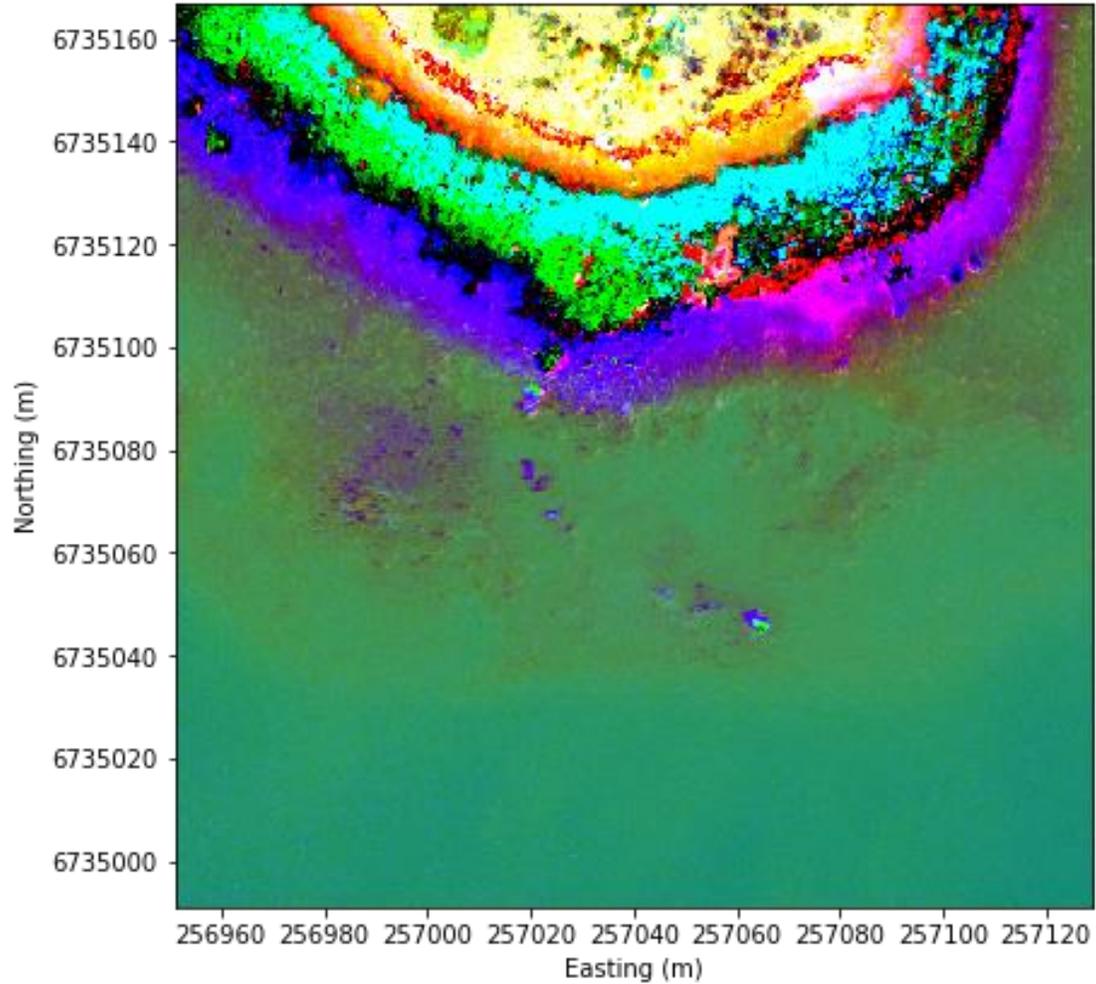
- Visualisation des composantes

# Minimum noise fraction : 15 premières composantes

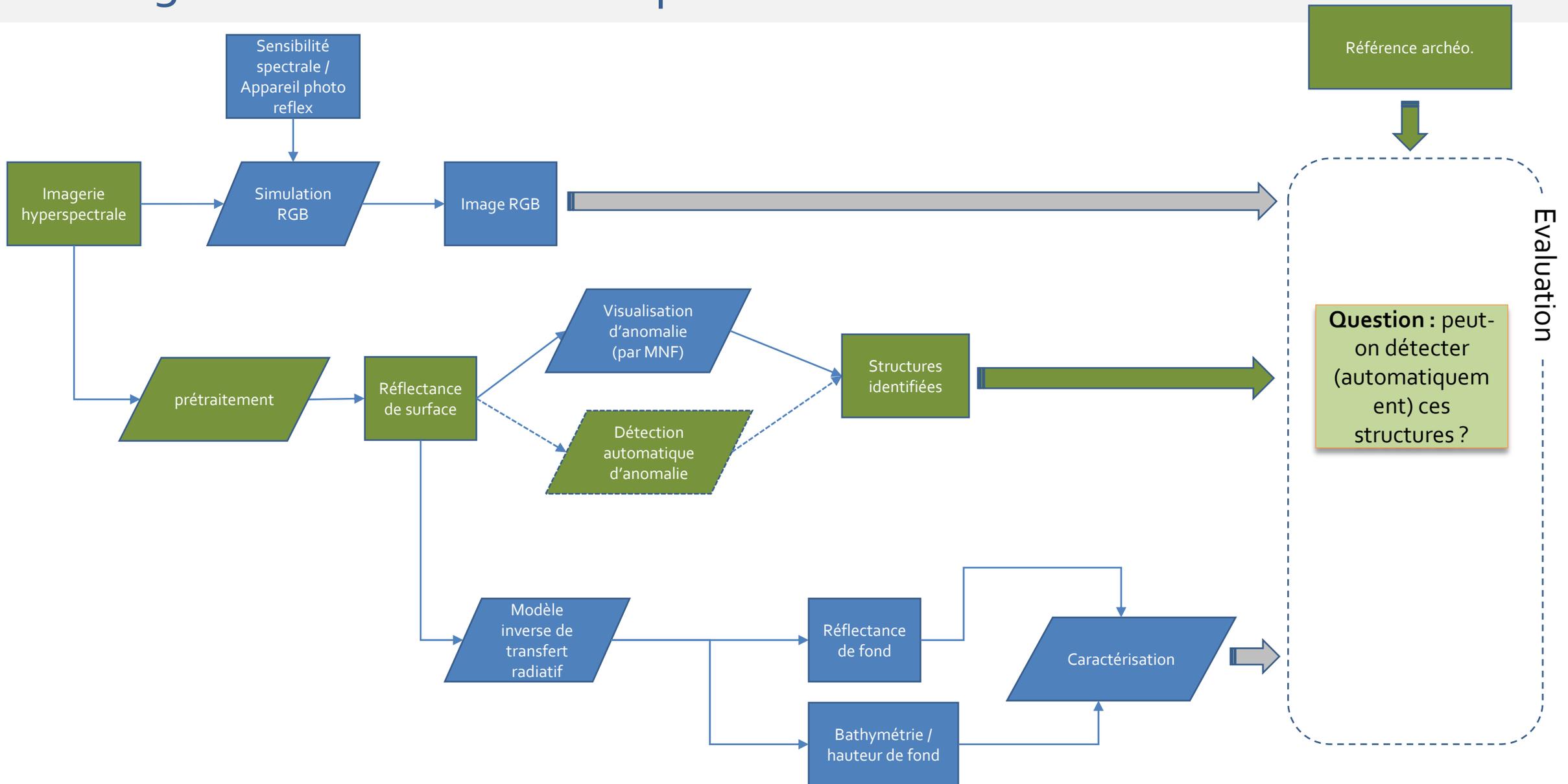


# Minimum noise fraction : résultats

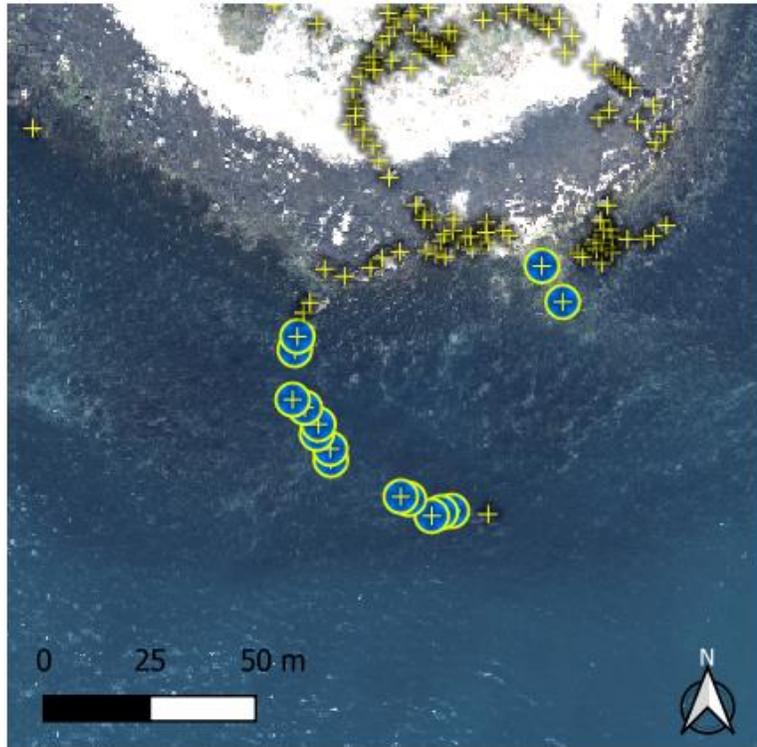
MNF pseudo-color RGB : 3,4,9



# Phase 3 : détection automatique

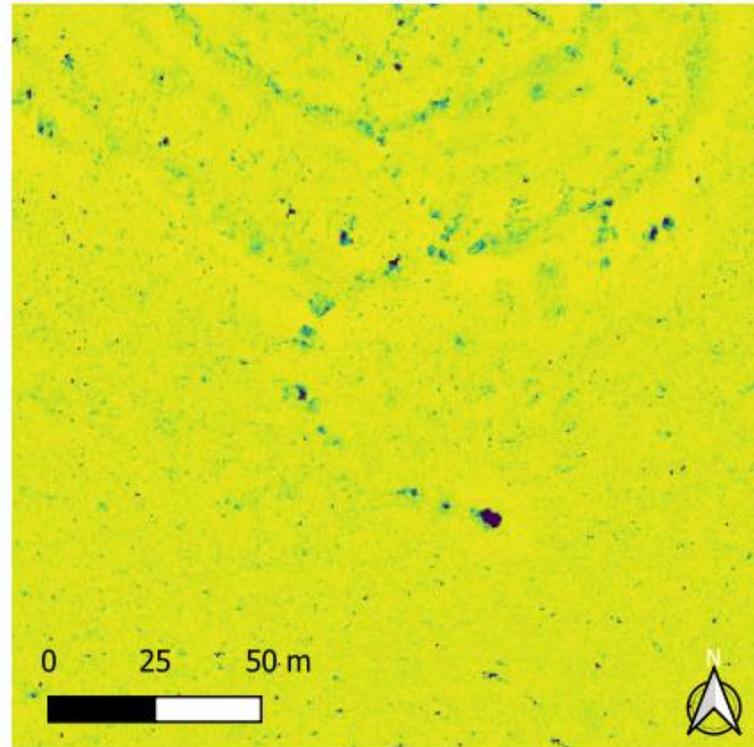


# Détection d'anomalie : résultats RX avec MNF (15 comp.)

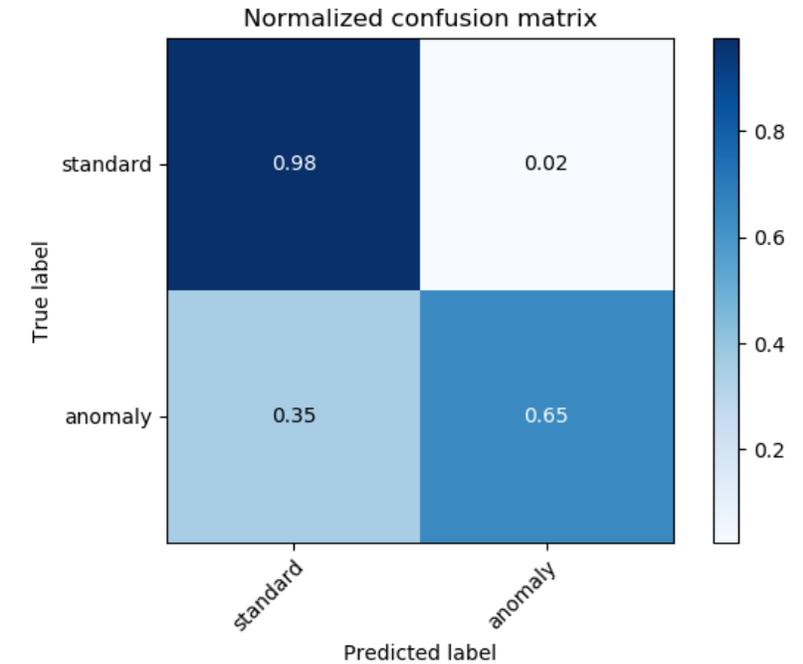
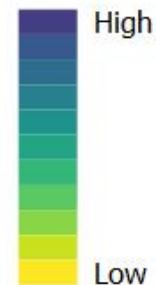


Référence archéologique

- ⊕ Stèle émergée
- ⊕ Stèle immergée



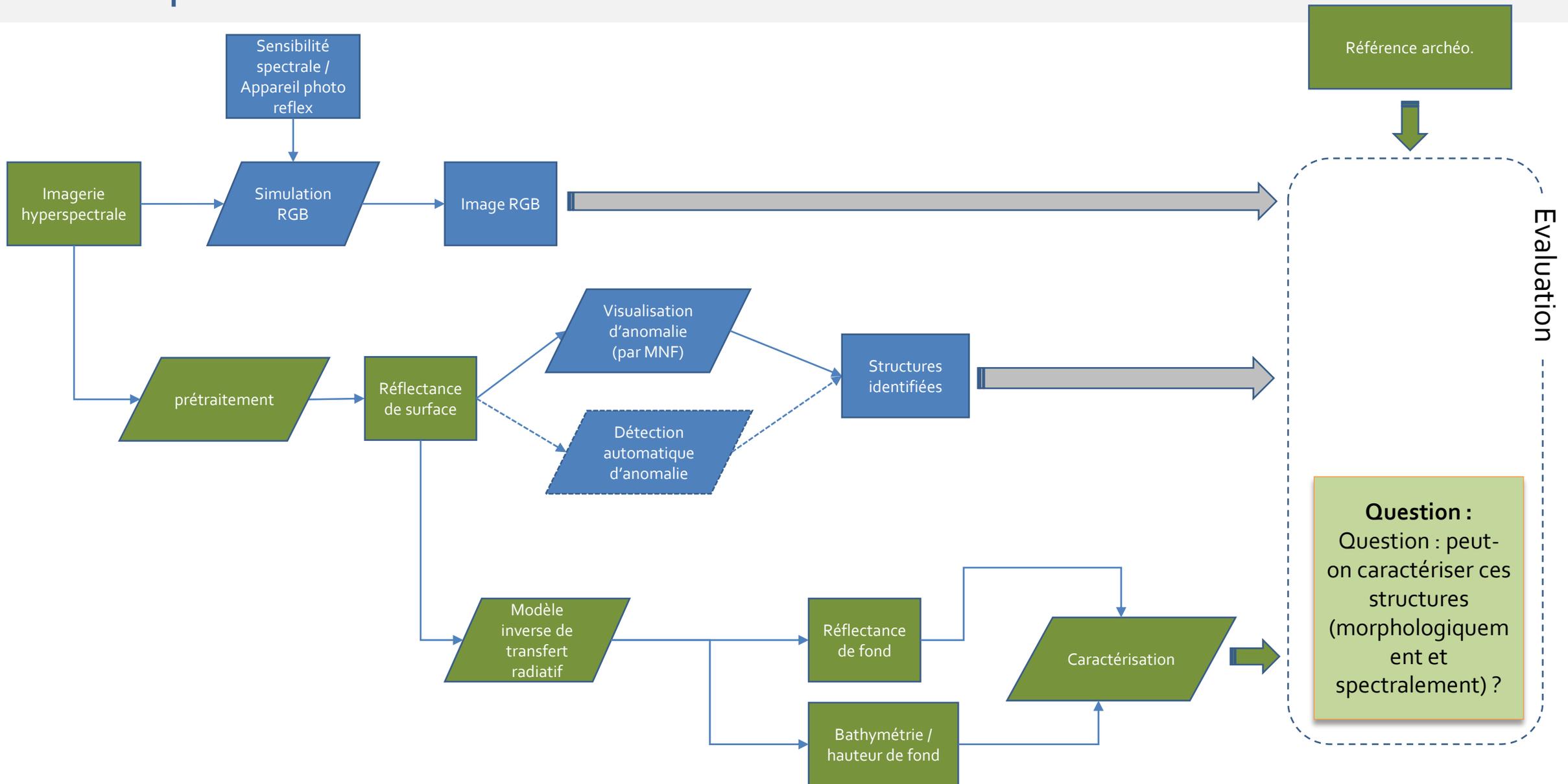
Anomalie (score)



- **Local RX**

- Distance de mahalanobis entre observation et arrière plan
- Arrière plan excluant voisinage directe (fenêtre glissante interne/externe)
- Choix de la fenêtre (inner : 15x15px., outer: 30x30px)

# Phase 4 : caractérisation des structures



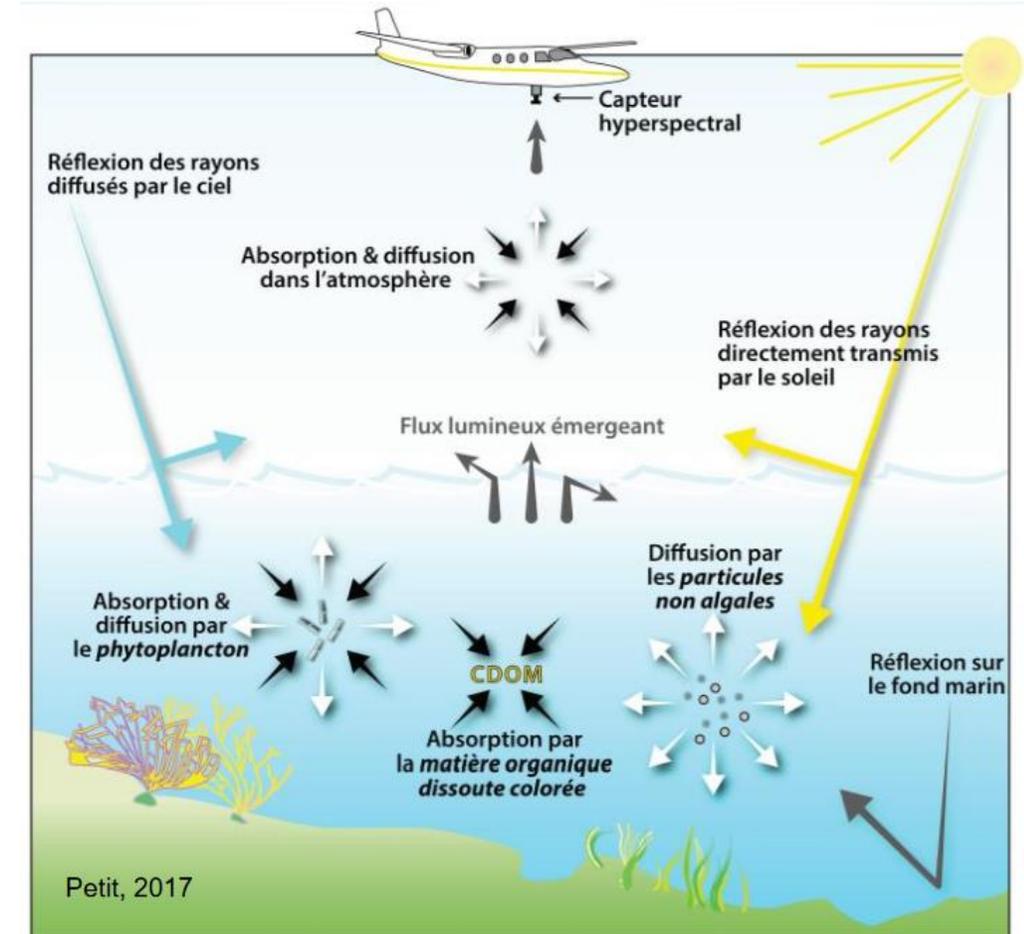
# Modèle de transfert radiatif

- Réflectance sous-surface

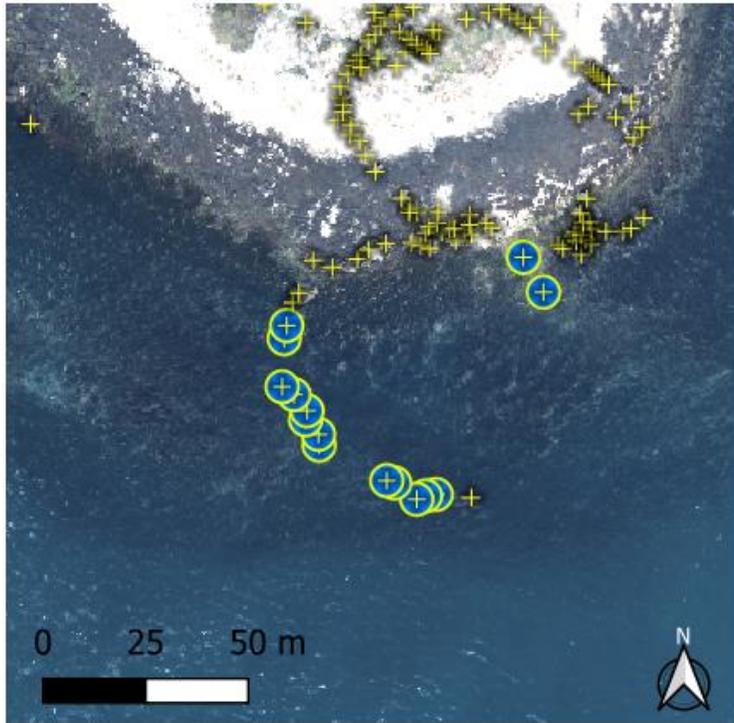
$$R_{rs}^- = R_{rs}^\infty (1 - A_1 e^{-(K_d + k_{uW})Z}) + A_2 R_{rs}^B e^{-(K_d + k_{uB})Z}$$

- avec :

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

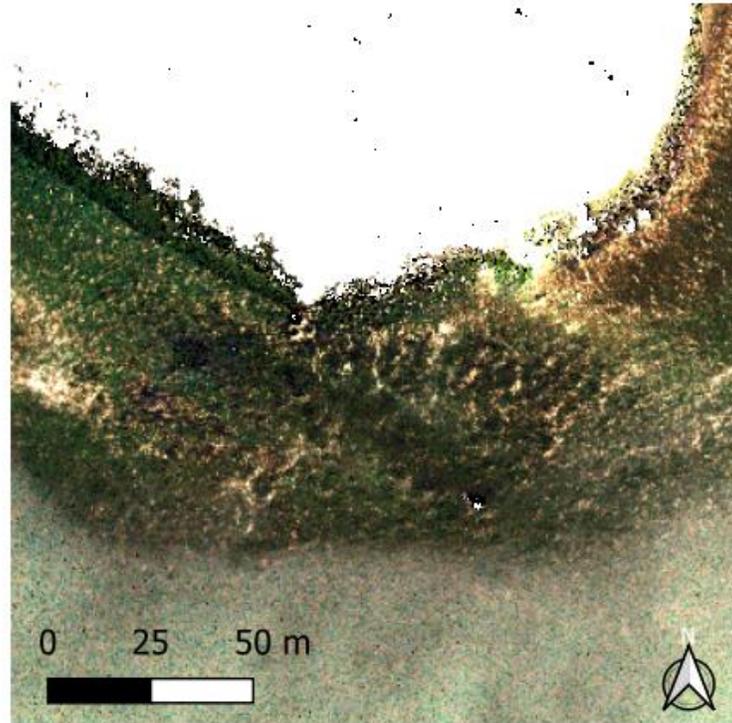


# Inversion du MTR SWIM<sup>®</sup>: Réflectance fond et hauteur d'eau

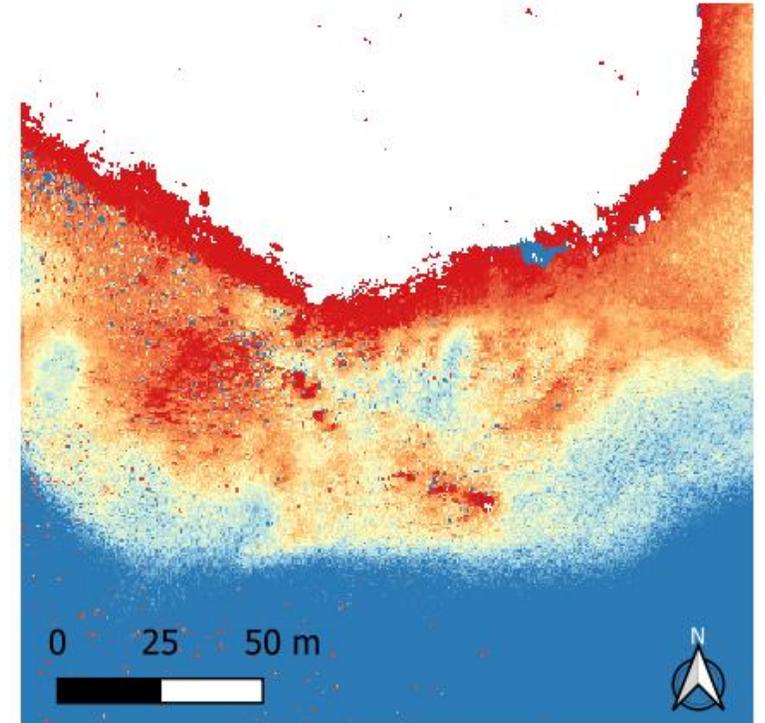


Référence archéologique

- + Stèle émergée
- + Stèle immergée



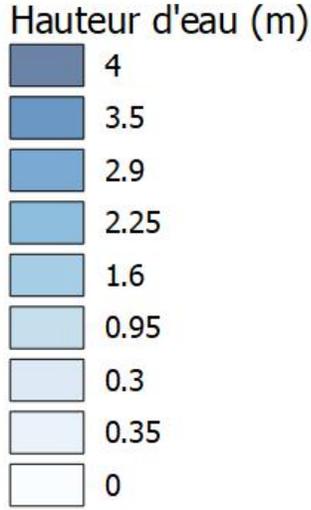
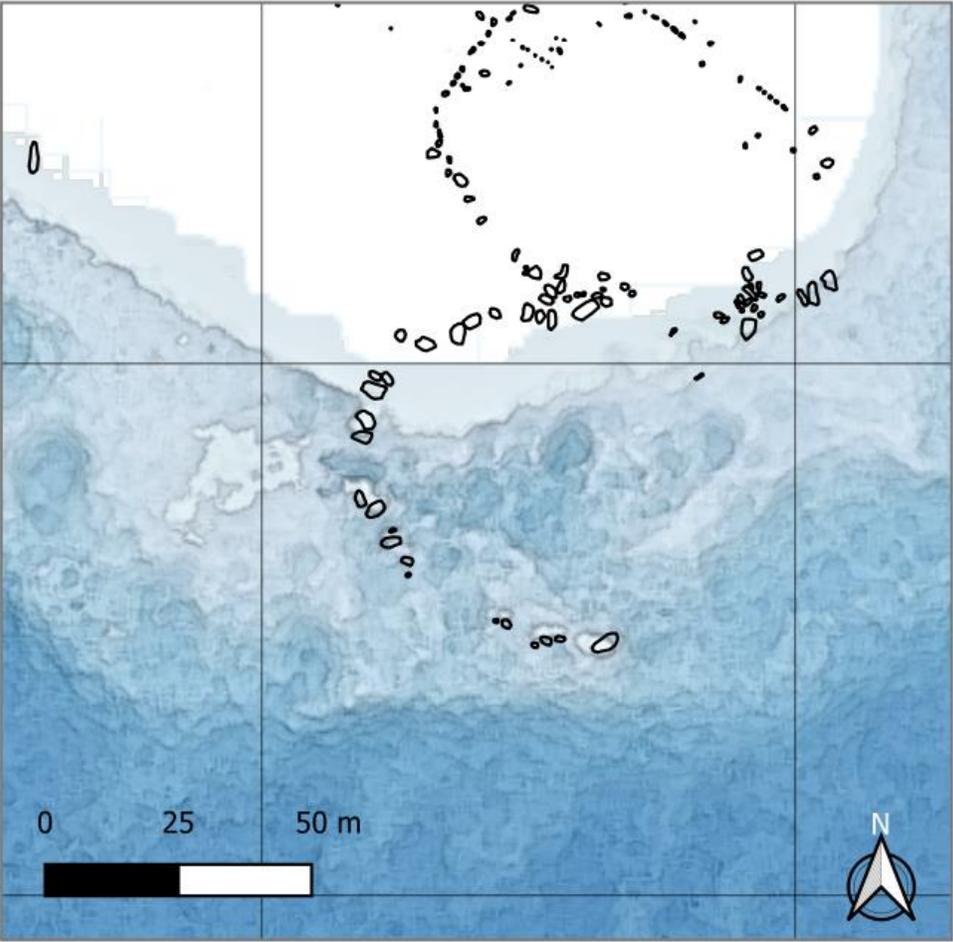
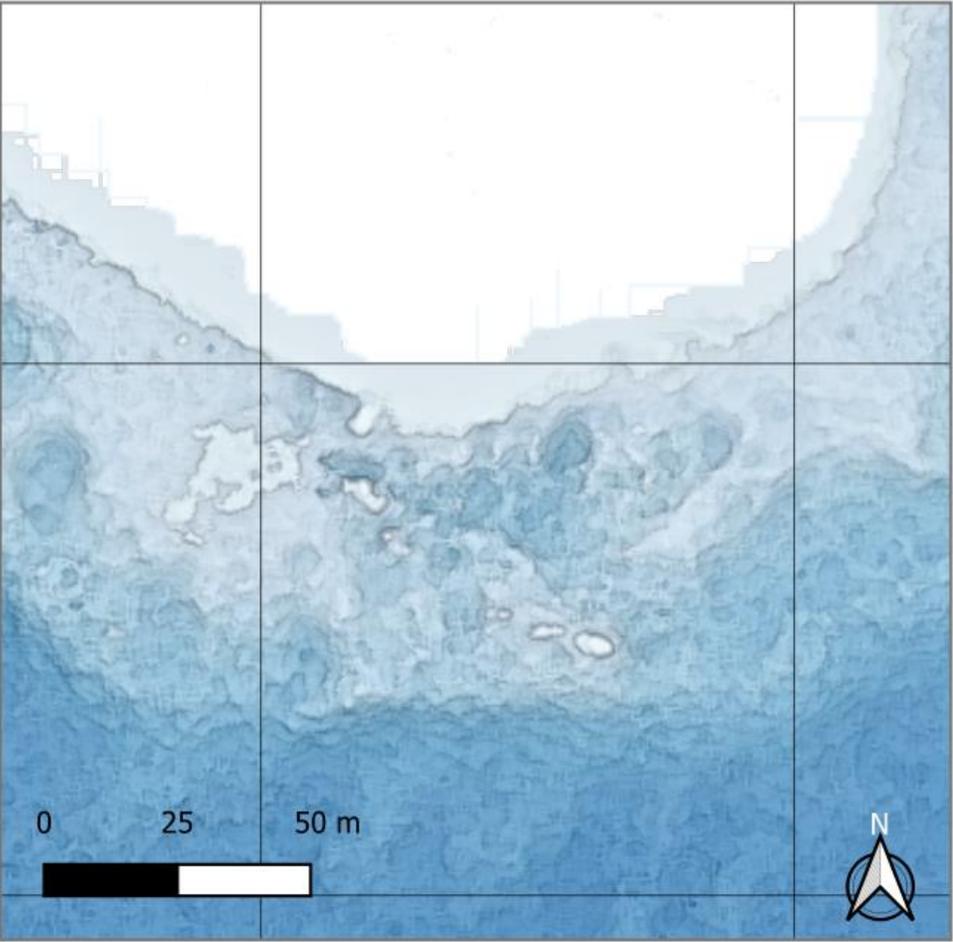
Réflectance fond



Hauteur d'eau (m)

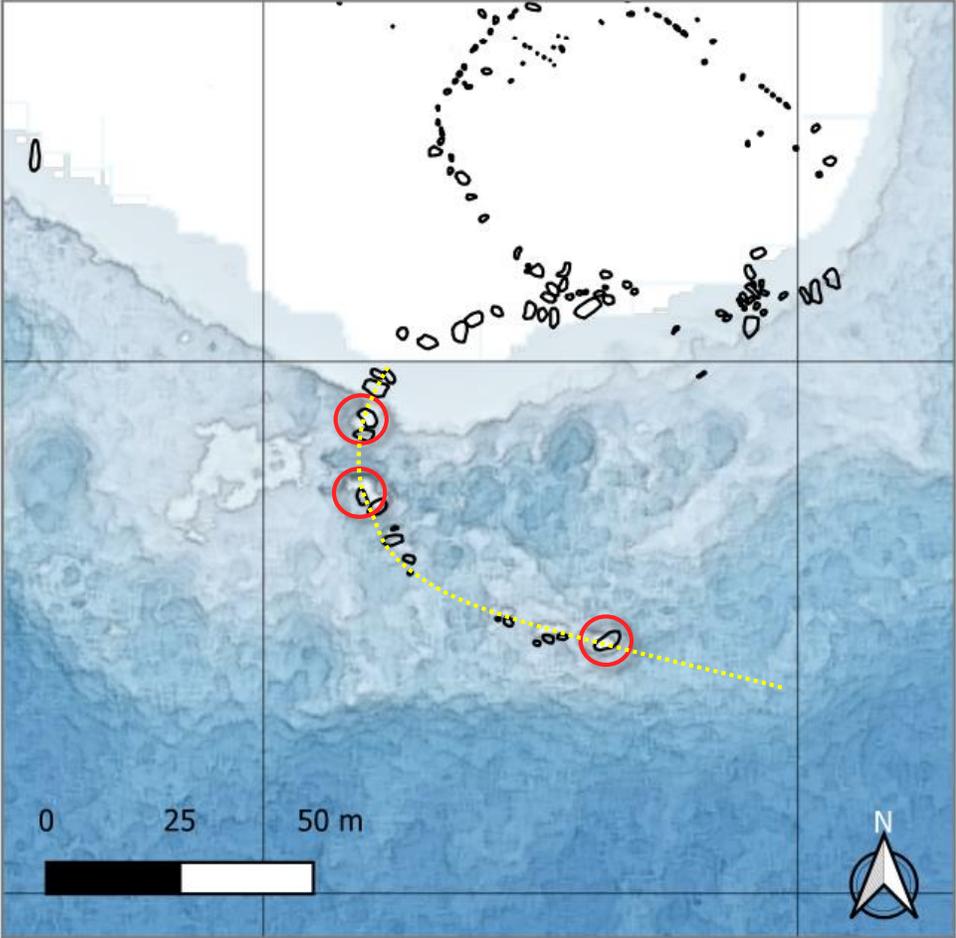
- < 0.5
- 0.501
- 1
- 1.5
- > 2

# Caractérisation des structures : morphologie

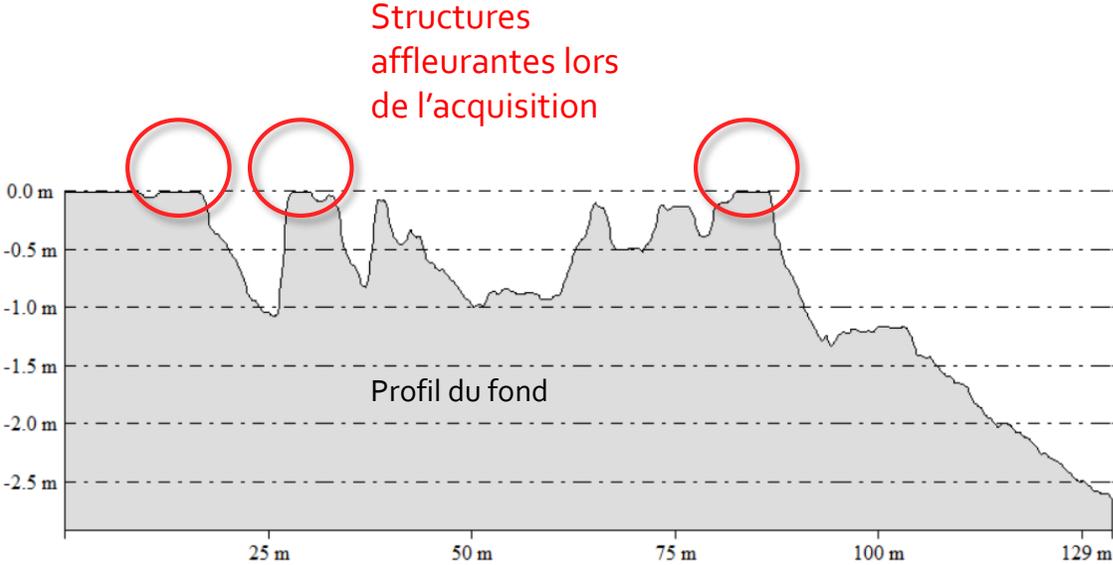


□ Référence archéologique

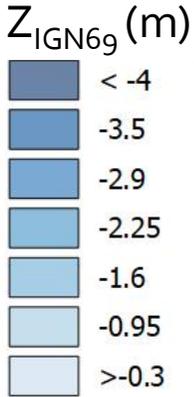
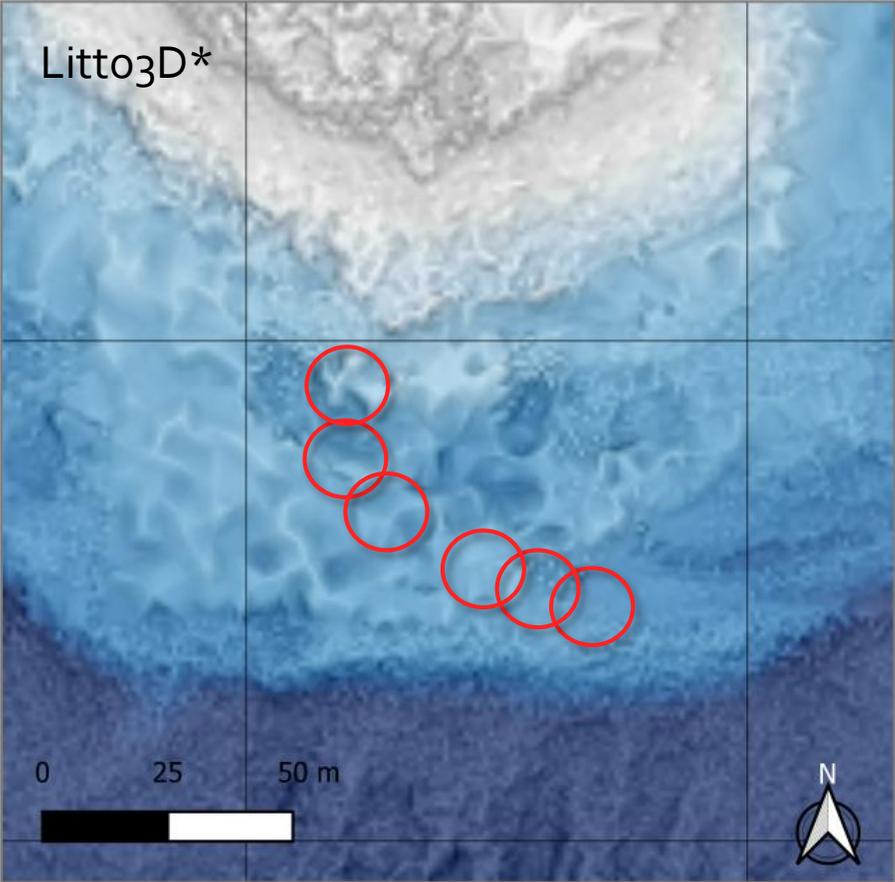
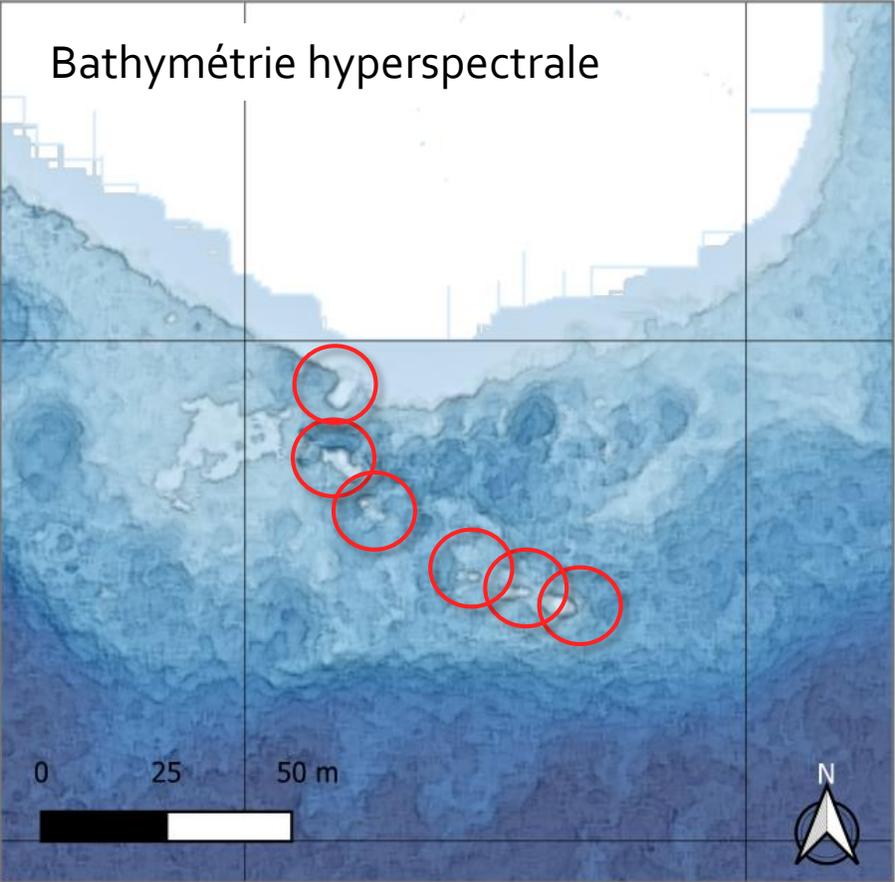
# Caractérisation des structures : morphologie



□ Référence archéologique



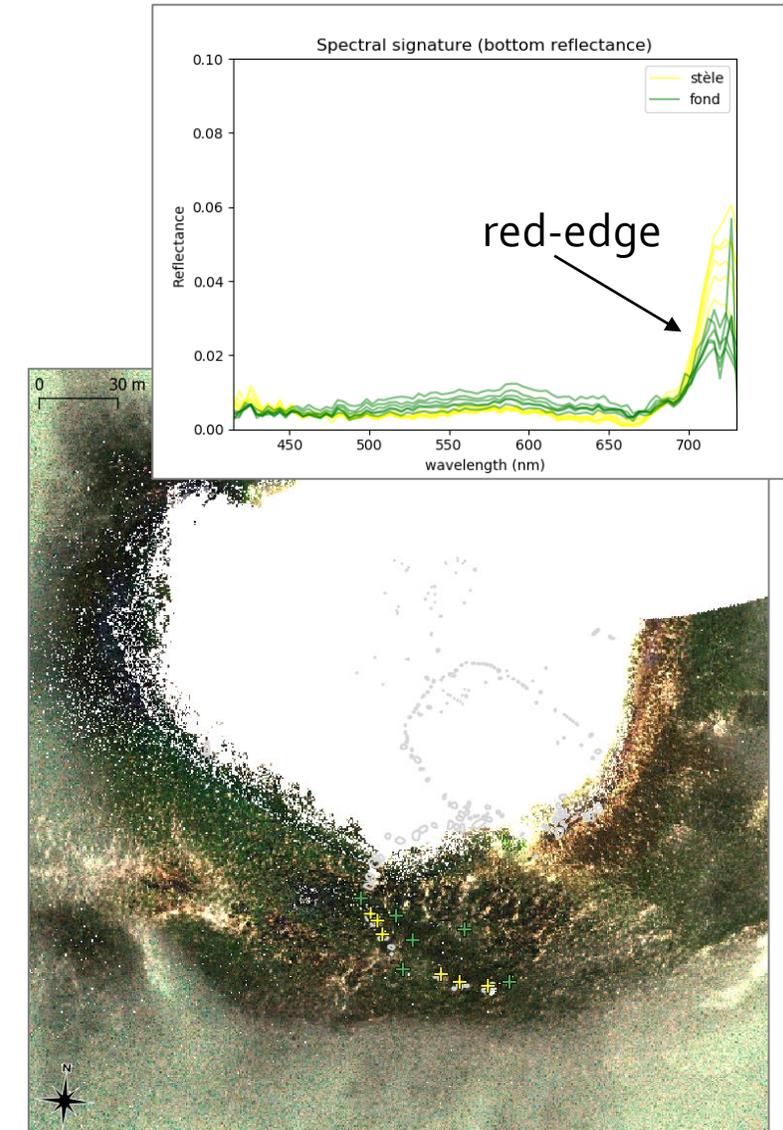
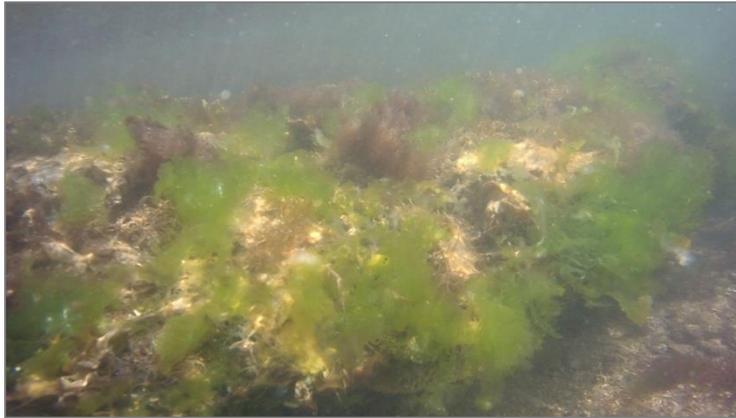
# Comparaison bathy HSI / Litto3D



\* Acquisition SHOM 2005, LiDAR bathy + sondeur multifaisceaux (résolution 1m)

# Caractérisation des structures : spectre de réflectance du fond

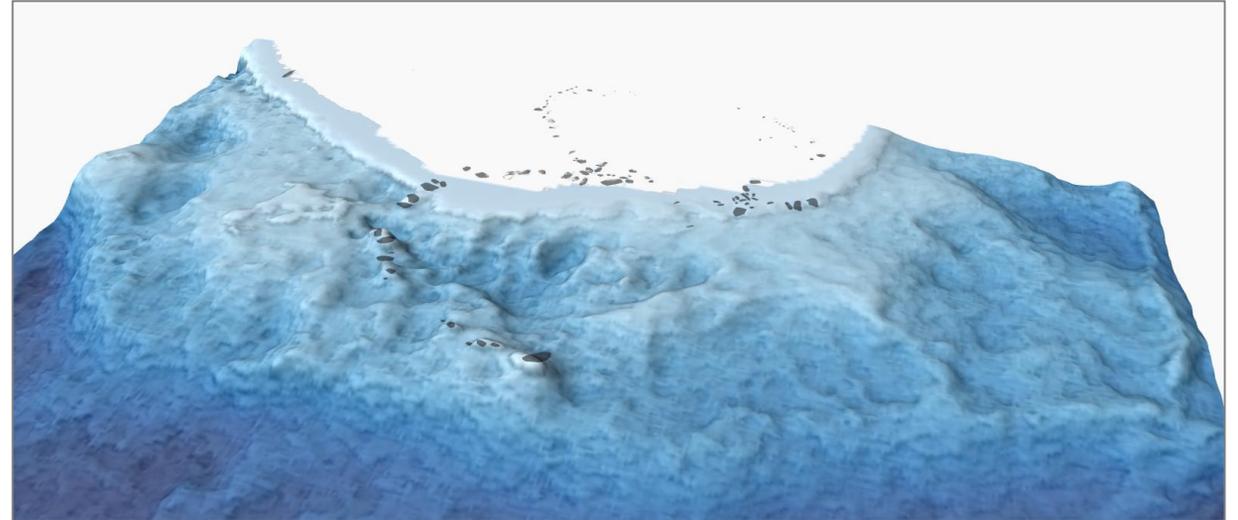
- Réflectance fond très faible (~1%)
- Pic du Red-Edge
- Colonisation de la structure :
  - Couverture algale (Ulvaes , Fucales, Cladophorales, Laminariales, ...) / biofilm chlorophyllien
  - Autre organismes : balanes, mollusques, ...



# Conclusion

L'imagerie aérienne hyperspectrale pour la cartographie archéologique en contexte de petits-fonds :

- Un potentiel important dans un milieu difficile d'accès et peu documenté
  - Aide à la prospection archéologique
  - Monitoring de sites archéologiques sensibles
- Avantages :
  - Visualisation des structures immergées
  - Possibilités de détection automatique
  - Caractérisation morphologique (indice sur la taille, forme, hauteur) des anomalies
- Limites :
  - Complexité de la caractérisation spectrale
  - Contexte environnemental d'acquisition (éclairage, profondeur, turbidité, conditions météocéaniques)
- Importance de croiser les compétences en traitement de l'information spatiale et en archéologie (de la détection à l'interprétation)



Alexandre Guyot<sup>1,2</sup>, Marc Lennon<sup>1</sup>, Thierry Lorho<sup>4</sup>, Nicolas Thomas<sup>1</sup>,  
Tristan Petit<sup>1</sup>, Simon Guéguen<sup>1</sup>, Guillaume Sicot<sup>3</sup>, Serge Cassen<sup>5</sup>,  
Laurence Hubert-Moy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hytech-imaging, Brest, France, alexandre.guyot@hytech-imaging.fr

<sup>2</sup>Université Rennes 2, Laboratoire LETG - UMR6554, Rennes, France

<sup>3</sup>ENSTA-Bretagne, Brest, France

<sup>4</sup>Service régional de l'archéologie / Drac Bretagne, Rennes, France

<sup>5</sup>Université de Nantes, Laboratoire LARA - UMR6566, Nantes, France

*Merci de  
votre attention*

