

Séminaire Scientifique Seine-Aval
Rouen – 18 & 19 novembre 2025

CArtographie des **F**onctions **E**cologiques des **Z**ones **H**umides de la vallée estuarienne de la Seine **C**AFEZH

Sébastien Rapinel & Clémence Rozo

Laurence Hubert-Moy, Virginie Lafon, Benois Beguet, Edith Parlanti, Arnaud Huguet,
Anniel Laverman, Anis Guelmami, Nicolas Baghdadi, Gwenhael Perrin



Contexte

Zones humides

- Écosystèmes propices à la transformation et au flux de la matière organique
- Fonctions biogéochimiques : stockage de carbone, dénitrification ...



Contexte

Zones humides

- Écosystèmes propices à la transformation et au flux de la matière organique
- Fonctions biogéochimiques : stockage de carbone, dénitrification ...

Estuaire de la Seine

- Gradients écologiques : salinité, humidité ...
- Pressions anthropiques : agricole, artificialisation ...
- Différents niveaux de protection : réserve naturelle, PNR ...
- Diversité des modes de gestion : agricole, hydraulique ...



Contexte

Zones humides

- Écosystèmes propices à la transformation et au flux de la matière organique
- Fonctions biogéochimiques : stockage de carbone, dénitrification ...

Estuaire de la Seine

- Gradients écologiques : salinité, humidité ...
- Pressions anthropiques : agricole, artificialisation ...
- Différents niveaux de protection : réserve naturelle, PNR ...
- Diversité des modes de gestion : agricole, hydraulique ...



Forte dynamique spatio-temporelle des fonctions biogéochimiques

- Dynamique qui reste mal appréhendée
- Approche terrain : contraintes de coût et de temps



Contexte

Zones humides

- Écosystèmes propices à la transformation et au flux de la matière organique
- Fonctions biogéochimiques : stockage de carbone, dénitrification ...

Estuaire de la Seine

- Gradients écologiques : salinité, humidité ...
- Pressions anthropiques : agricole, artificialisation ...
- Différents niveaux de protection : réserve naturelle, PNR ...
- Diversité des modes de gestion : agricole, hydraulique ...



Forte dynamique spatio-temporelle des fonctions biogéochimiques

- Dynamique qui reste mal appréhendée
- Approche terrain : contraintes de coût et de temps

→ **Approche hybride : terrain + télédétection = CAFEZH**



Question scientifique

Comment cartographier les dynamiques spatio-temporelles des fonctions biogéochimiques des zones humides estuariennes ?



Objectifs

1. Délimiter et caractériser les zones humides de l'estuaire de la Seine à échelle fine
2. Suivre les dynamiques intra- et inter-annuelles de la végétation et de l'hydrologie
3. Evaluer les fonctions stockage de carbone et dénitrification

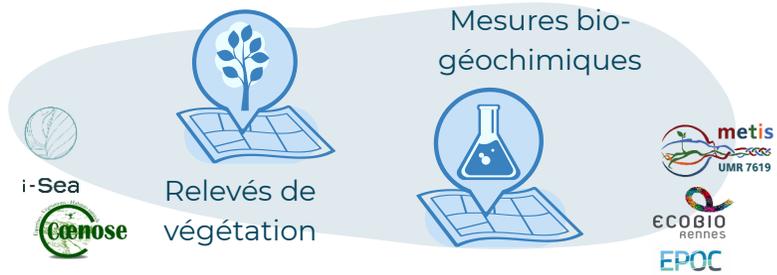


Approche globale

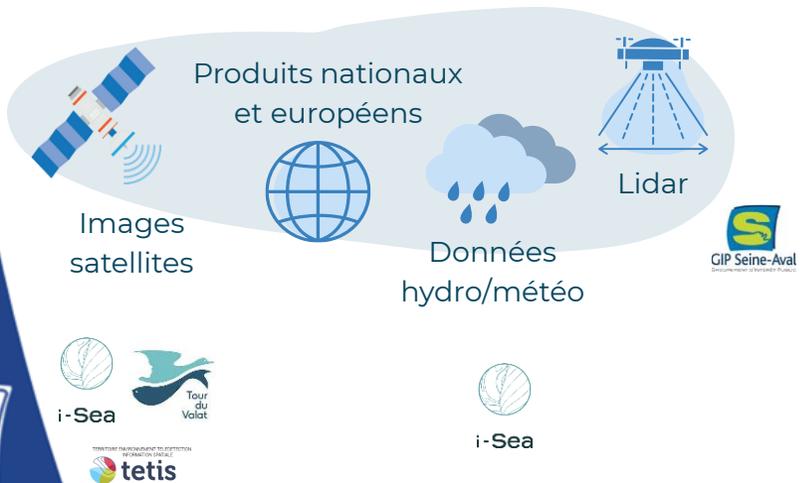
1

Collecte de données
2022 - 2023

Campagnes terrain



Données d'observation de la Terre



Approche globale

1 Collecte de données 2022 - 2023

Campagnes terrain

Mesures bio-géochimiques

Relevés de végétation

Logos: i-Sea, CENOSE, metis UMR 7619, ECOBIO Rennes, EPOC

Données d'observation de la Terre

Produits nationaux et européens

Images satellites

Données hydro/météo

Lidar

Logos: i-Sea, Tour du Valat, GIP Seine-Aval, tetis

2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Cartes d'occupation/usage du sol et pratiques agricoles

Cartes des végétations

Indices fonctionnels (flux de carbone, etc.)

HGMU

Carte d'humidité du sol et fréquence d'inondation

Logos: Tour du Valat, LETG, i-Sea, GIP Seine-Aval, tetis

Approche globale

1 Collecte de données
2022 - 2023

Campagnes terrain

Mesures bio-géochimiques

Relevés de végétation

Logos: i-Sea, Cœnose, metis UMR 7619, ECOBIO Rennes, EPOC

Données d'observation de la Terre

Produits nationaux et européens

Images satellites

Données hydro/météo

Lidar

Logos: GIP Seine-Aval, i-Sea, têtis, Tour du Valat

2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Cartes d'occupation/usage du sol et pratiques agricoles

Cartes des végétations

Logos: Tour du Valat, LETG, i-Sea

Indices fonctionnels (flux de carbone, etc.)

HGMU

Logos: i-Sea

Carte d'humidité du sol et fréquence d'inondation

Logos: têtis, Tour du Valat

3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Evaluation fonctionnelle par HGMU : dénitrification et stockage de carbone

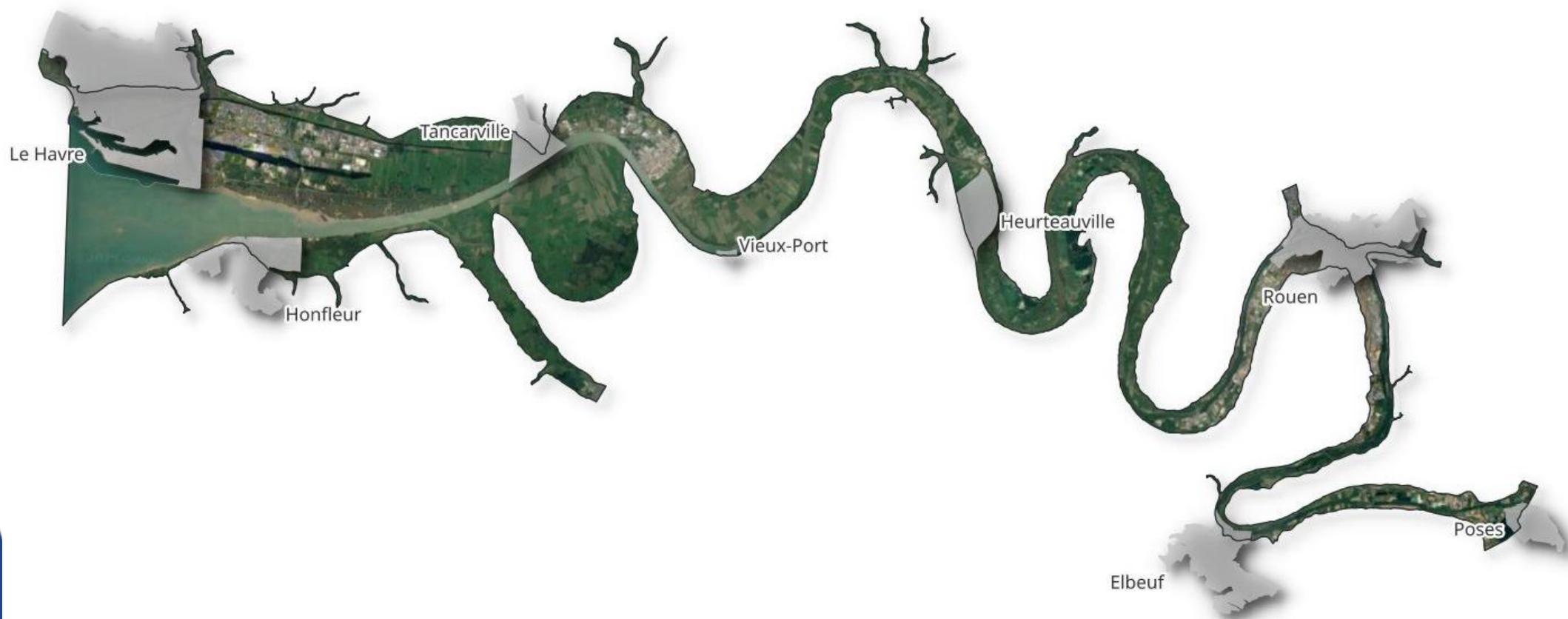
Logos: têtis, ECOBIO Rennes, metis UMR 7619, i-Sea, Tour du Valat, EPOC

Validation

1 Site d'étude & Données

Site d'étude

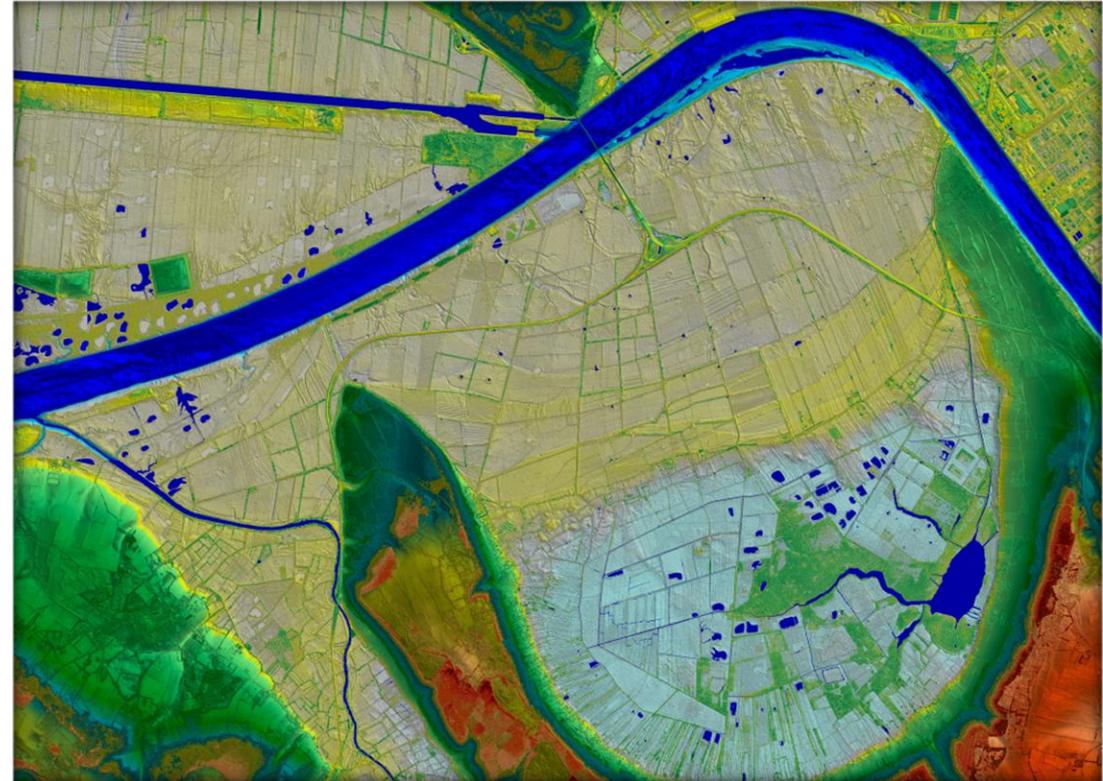
Lit majeur de la Seine (51 421 ha)



1 Site d'étude & Données

Données de télédétection

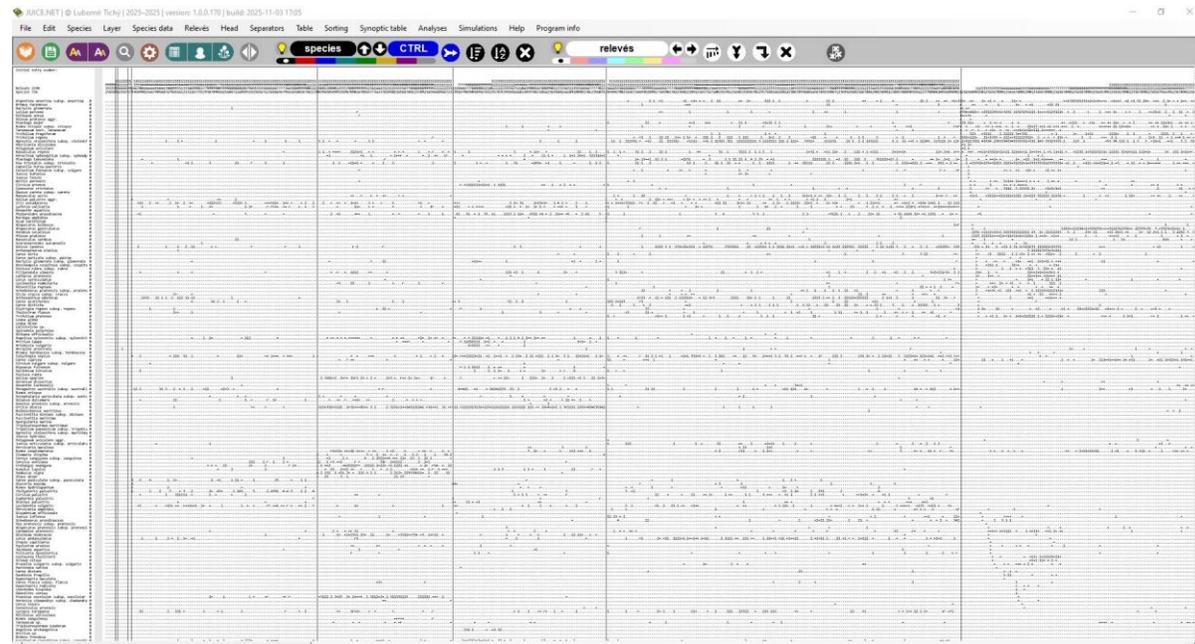
- Série temporelle Sentinel-2 (10m) – Theia
- Images Landsat (30m) – USGS
- Images SPOT-6/7 (1,5 m) – DINAMIS
- Série temporelle Sentinel-1 (10m) – ESA
- Données aéroportées LiDAR (11 – 21 pts/m²) – GIP SA



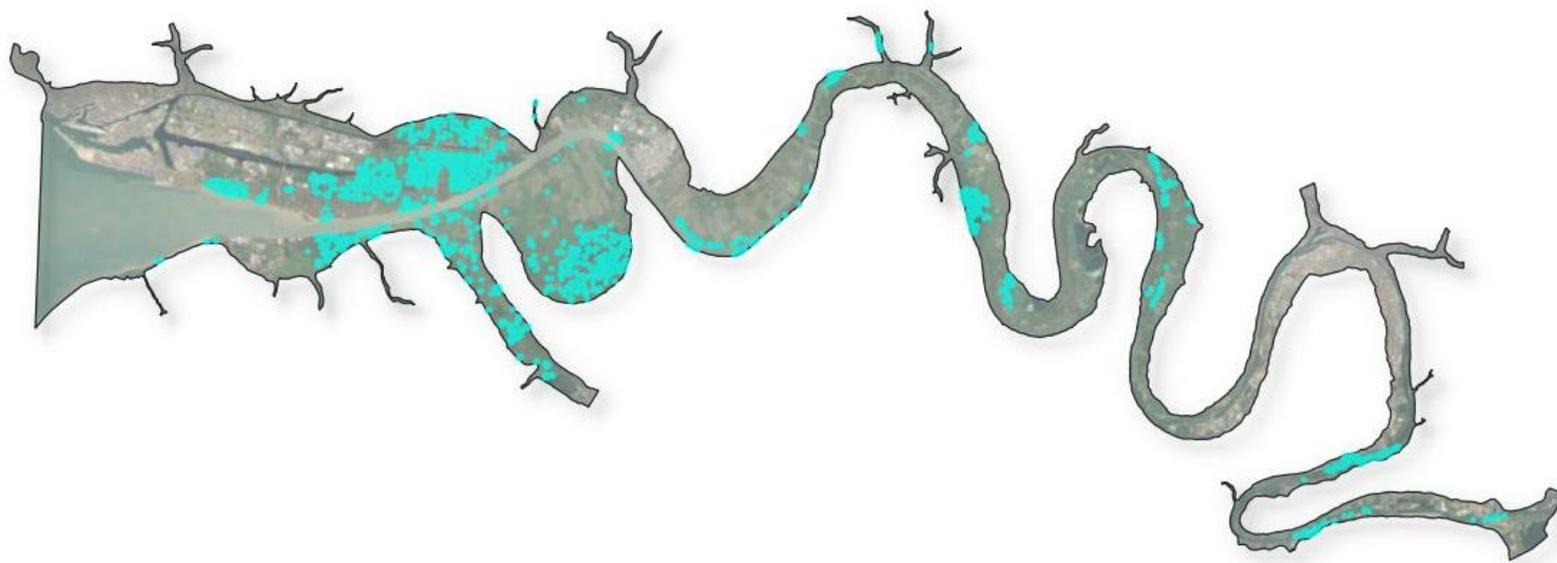
1 Site d'étude & Données

Relevés floristiques

- Archives (RNN, PNR)
- Campagne terrain en 2022
- 1 972 relevés exploitables



The screenshot shows the RICEART software interface. The main window displays a large table with multiple columns. The first column is labeled 'species' and the second column is labeled 'relevés'. The table contains numerous rows of data, likely representing individual floristic surveys. The interface includes a menu bar at the top with options like File, Edit, Species, Layer, Species data, Relevés, Head, Separators, Table, Sorting, Synoptic table, Analyses, Simulations, Help, and Program info. There are also various icons and a toolbar at the top of the window.



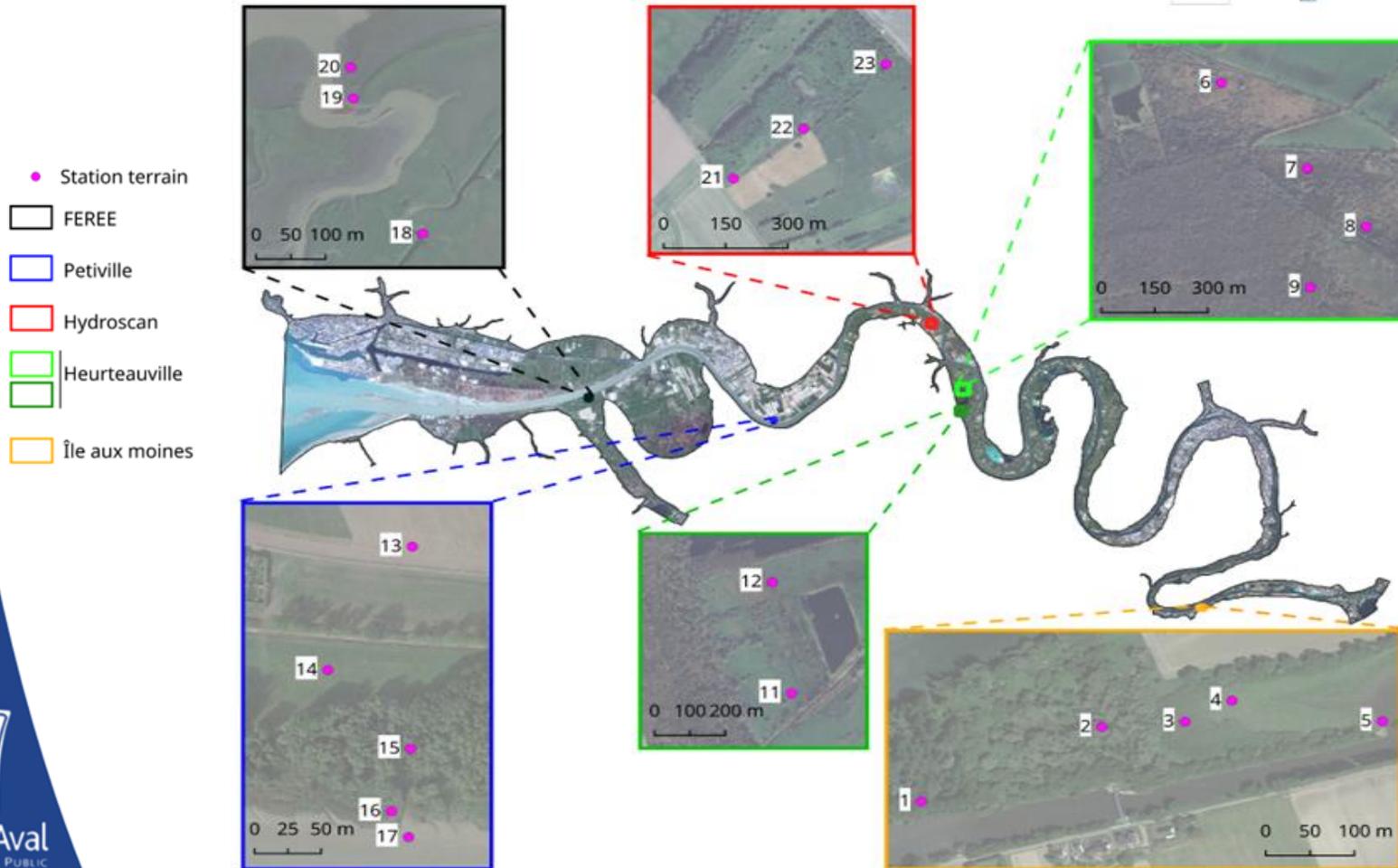
● Relevés



1 Site d'étude & Données

Relevés biogéochimiques

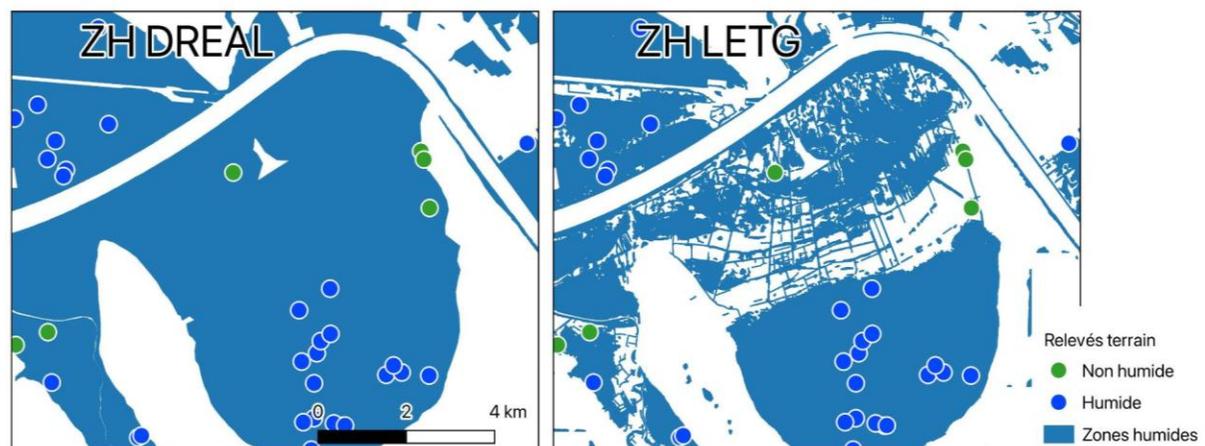
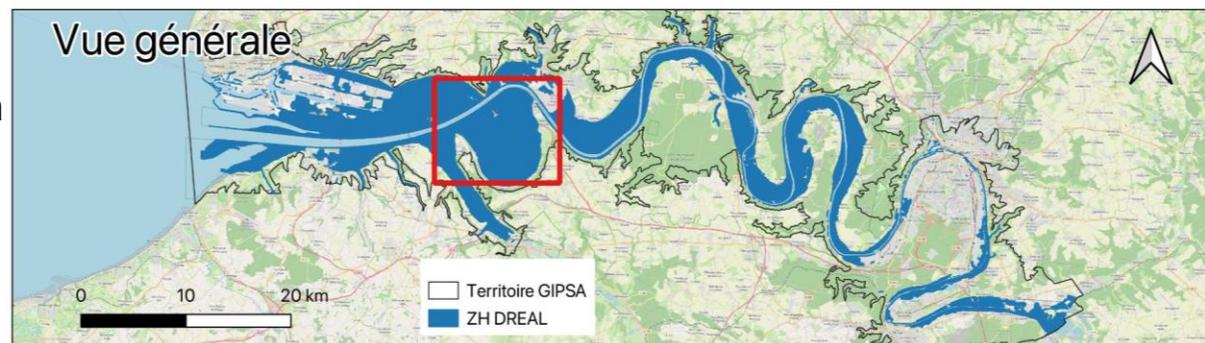
- 5 transects : 22 relevés
- Une vingtaine de paramètres caractérisant :
 - La dégradation du carbone organique
 - Le taux de dénitrification
- Suivi saisonnier : mars, juin, septembre, novembre 2023



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Délimitation des zones humides

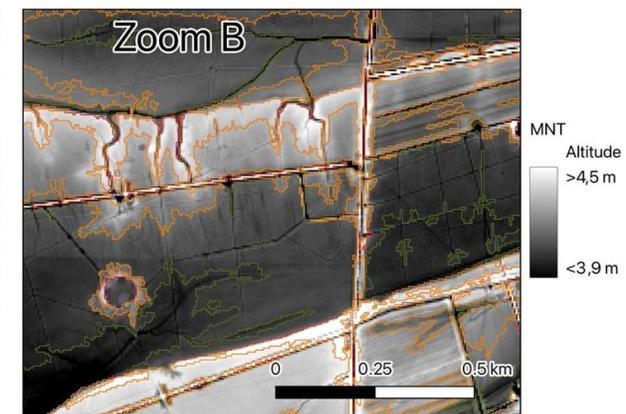
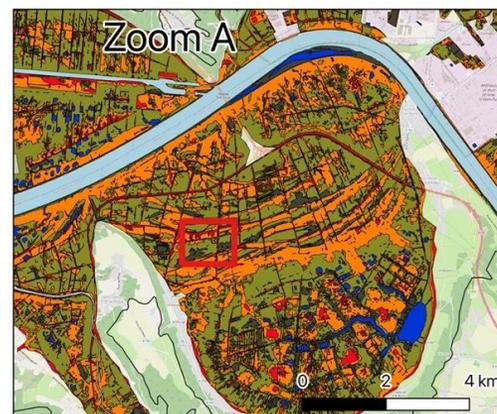
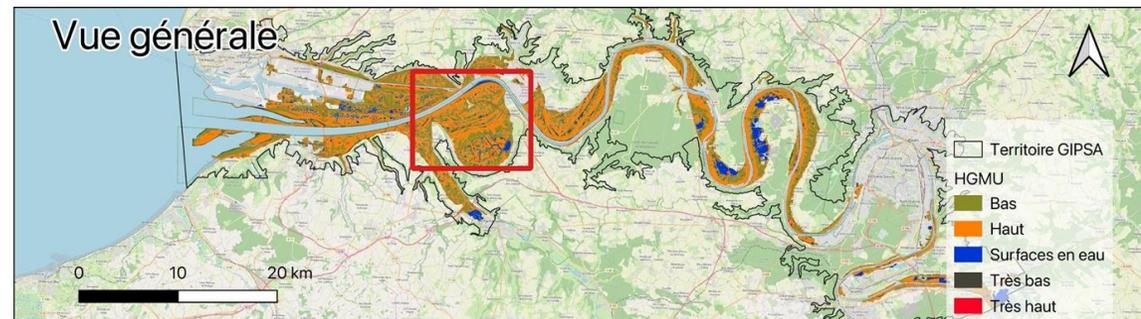
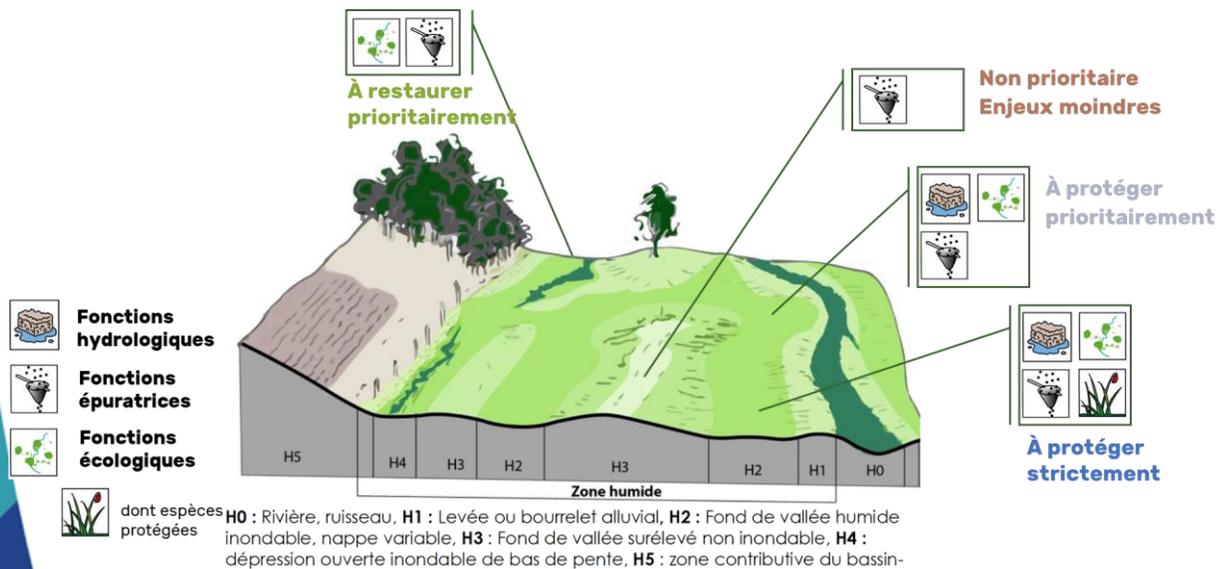
- Issue des données
 - LIDAR
 - relevés floristiques
 - pédologiques
 - Carte en cours d'amélioration
 - 900 points additionnels reçus (oct. 2025)
 - Mise à jour de la carte prévue en 2026
- 573 relevés terrain



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Unités hydro-géomorphologiques (HGMUs)

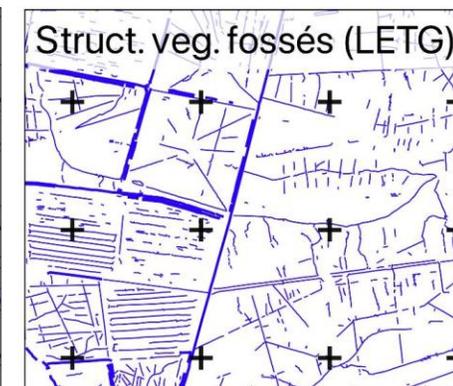
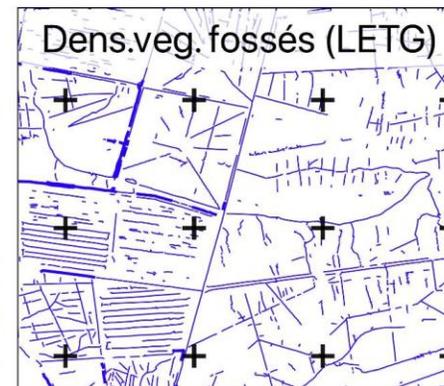
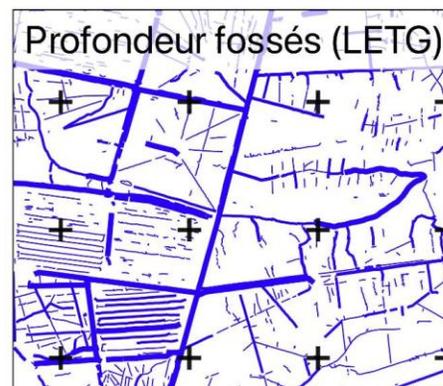
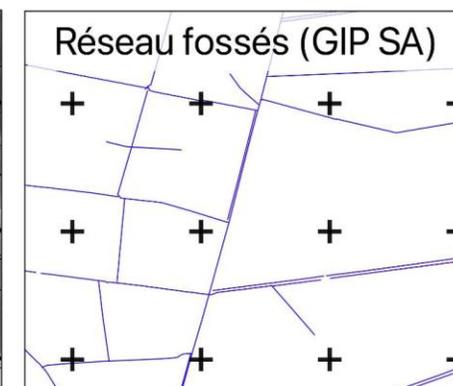
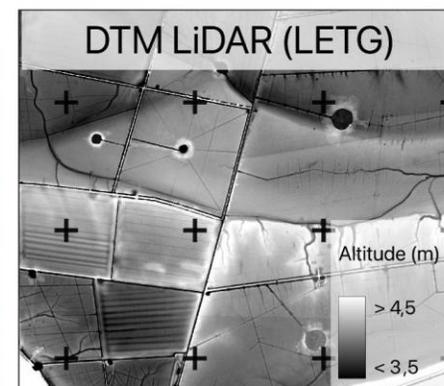
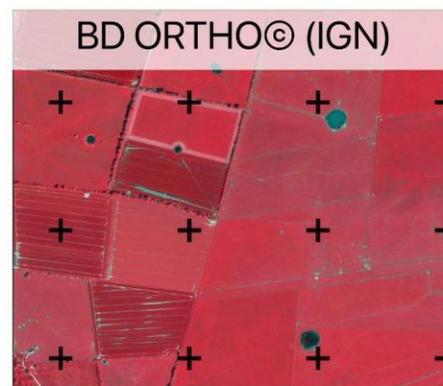
- Unités topographiquement homogènes
- Extraites automatiquement à partir du MNT LiDAR



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Densité de fossés

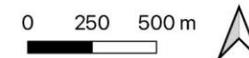
- Définition "large" (éléments creux et linéaires)
- Extraits automatiquement à partir du MNT LiDAR



Profondeur (m)
— 0 - 0,2
— 0,2 - 0,4
— 0,4 - 0,6
— > 0,6

Densité de points LiDAR classés
"sol" ou "végétation basse"
— 0 - 0,83
— 0,83 - 3,18
— 3,18 - 8,43
— > 8,43

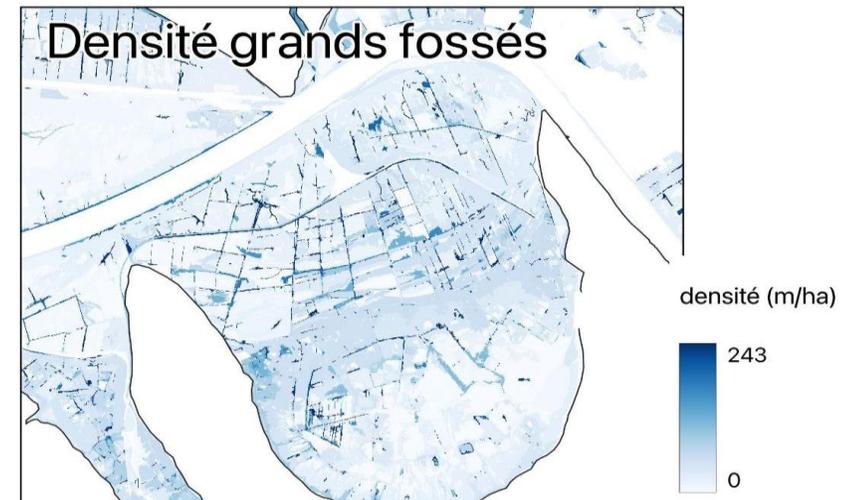
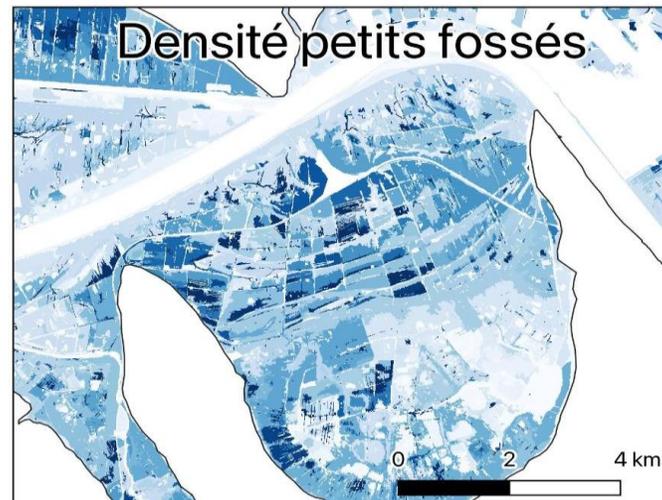
Nombre moyen d'échos LiDAR
— 0 - 1,1
— 1,1 - 2,2
— 2,2 - 3,3
— 3,3 - 4,5



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Densité de fossés

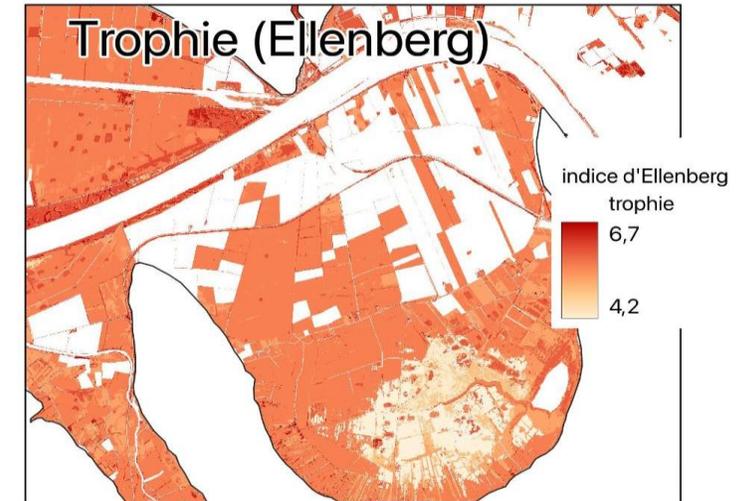
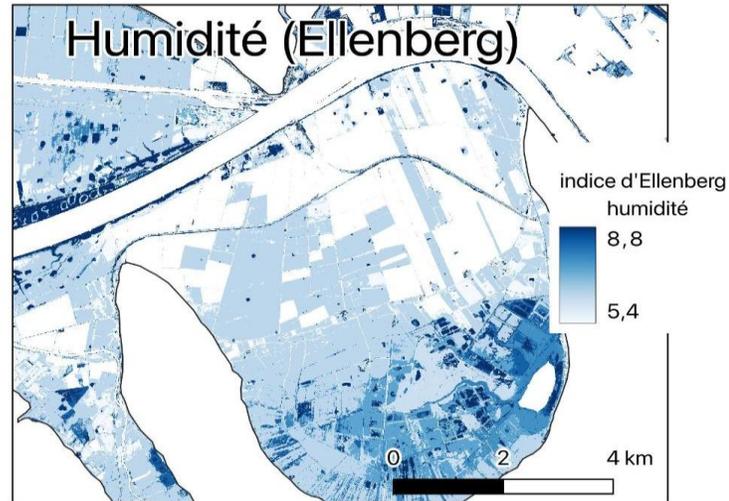
- Petits fossés : profondeur < 40 cm
- Grands fossés : profondeur > 40 cm



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Trophie et humidité du sol

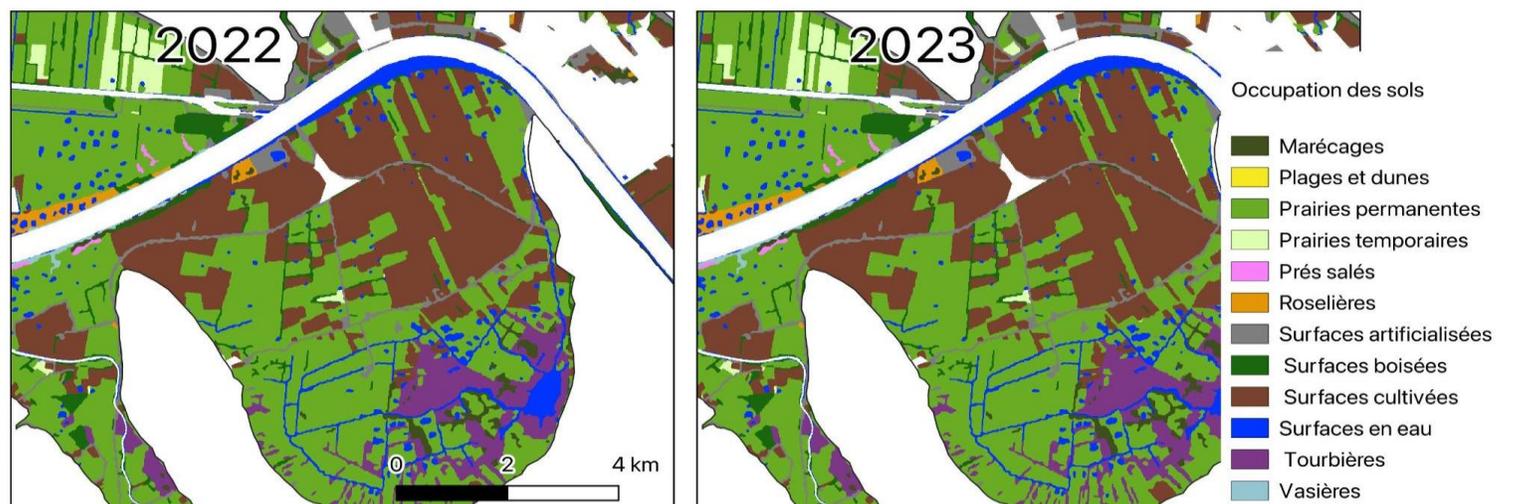
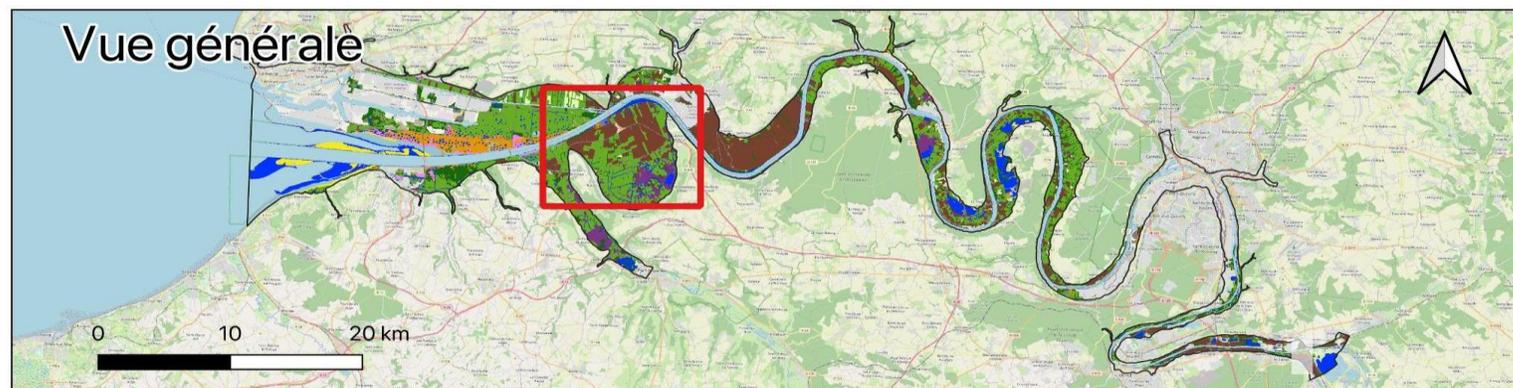
- Carte des végétations :
 - LiDAR,
 - SPOT-6/7,
 - relevés floristiques
- Conversion en humidité et trophie avec les valeurs d'Ellenberg



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Occupation du sol

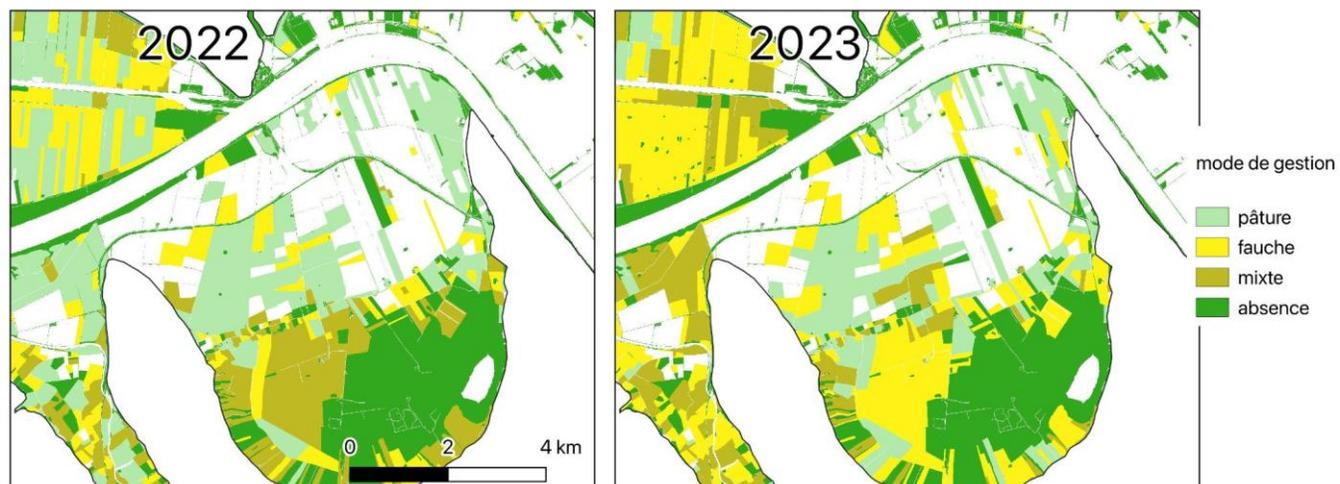
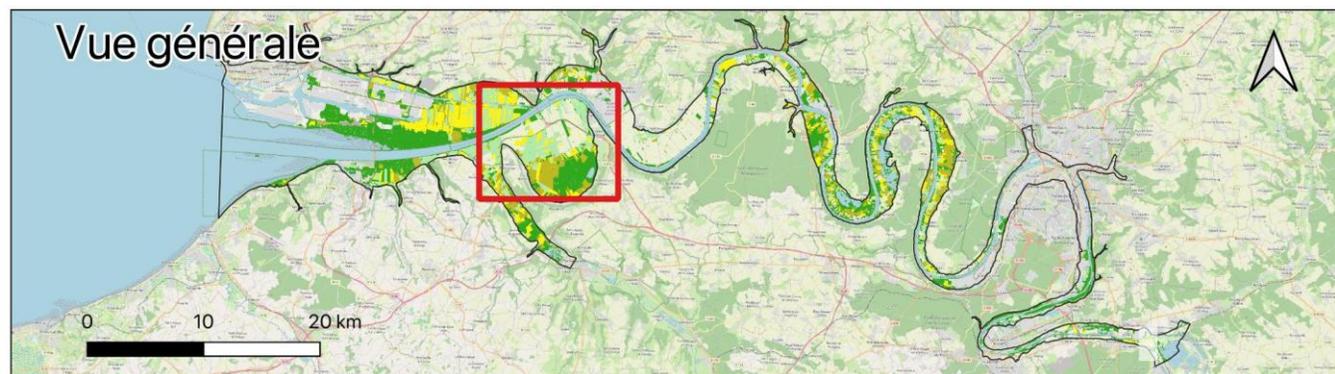
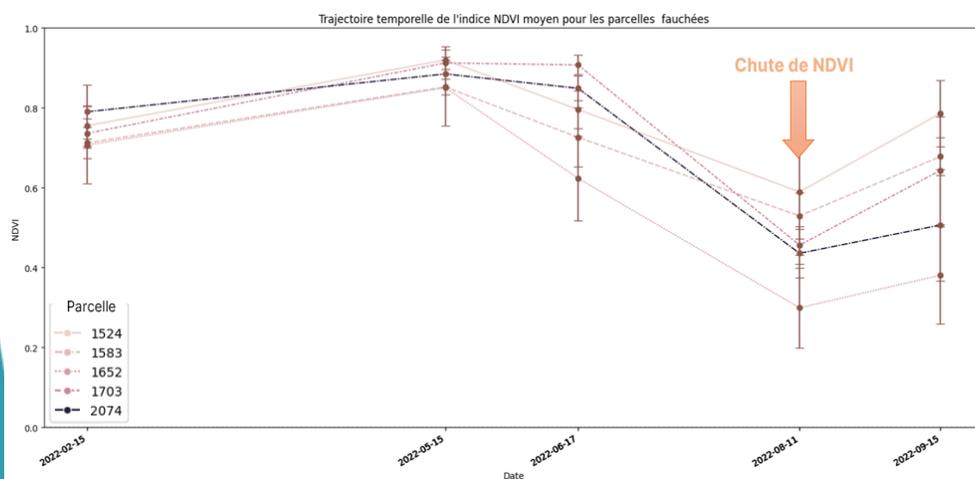
- Sentinel-2 & Landsat-8
- Actualisation 2023 à partir du RPG



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Mode de gestion

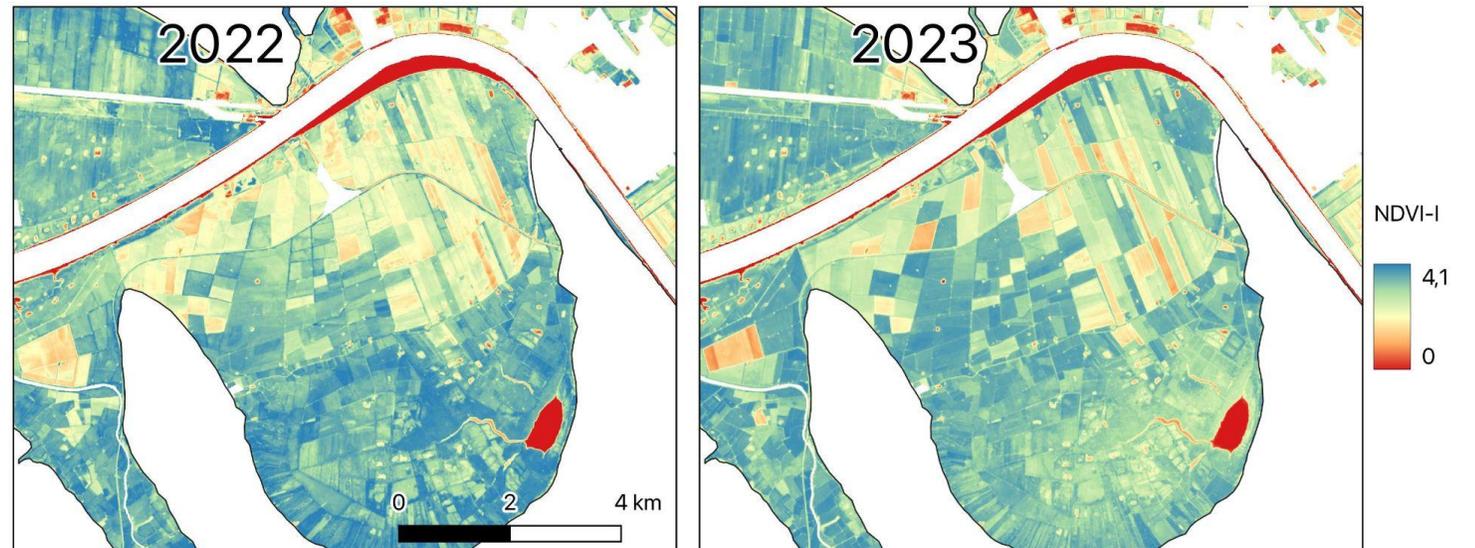
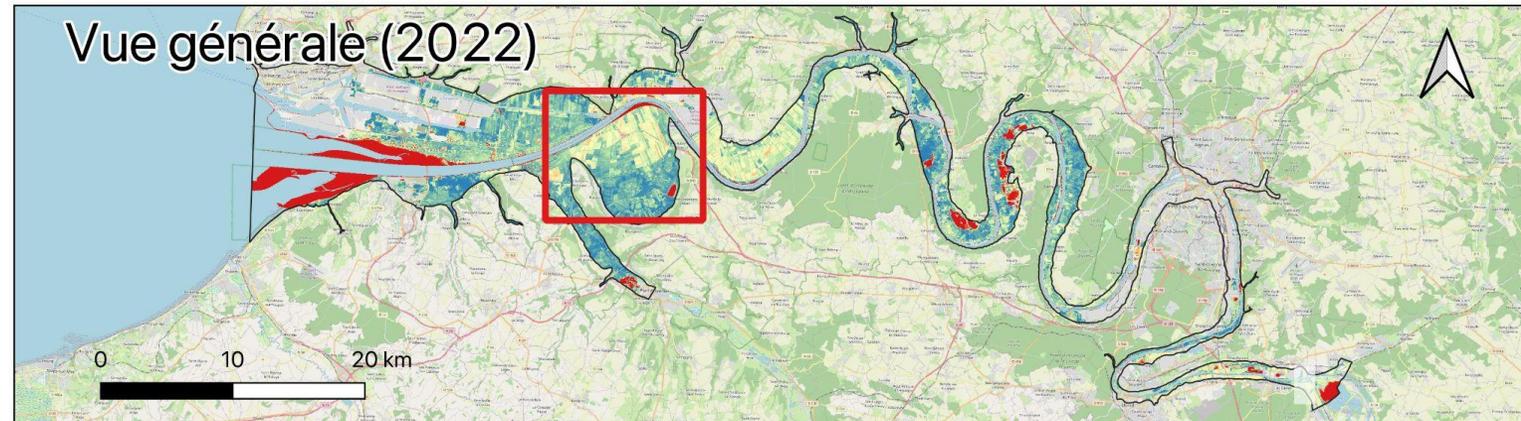
- Série temporelle Sentinel-2
- Variations inter-annuelles



② Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Productivité primaire annuelle nette

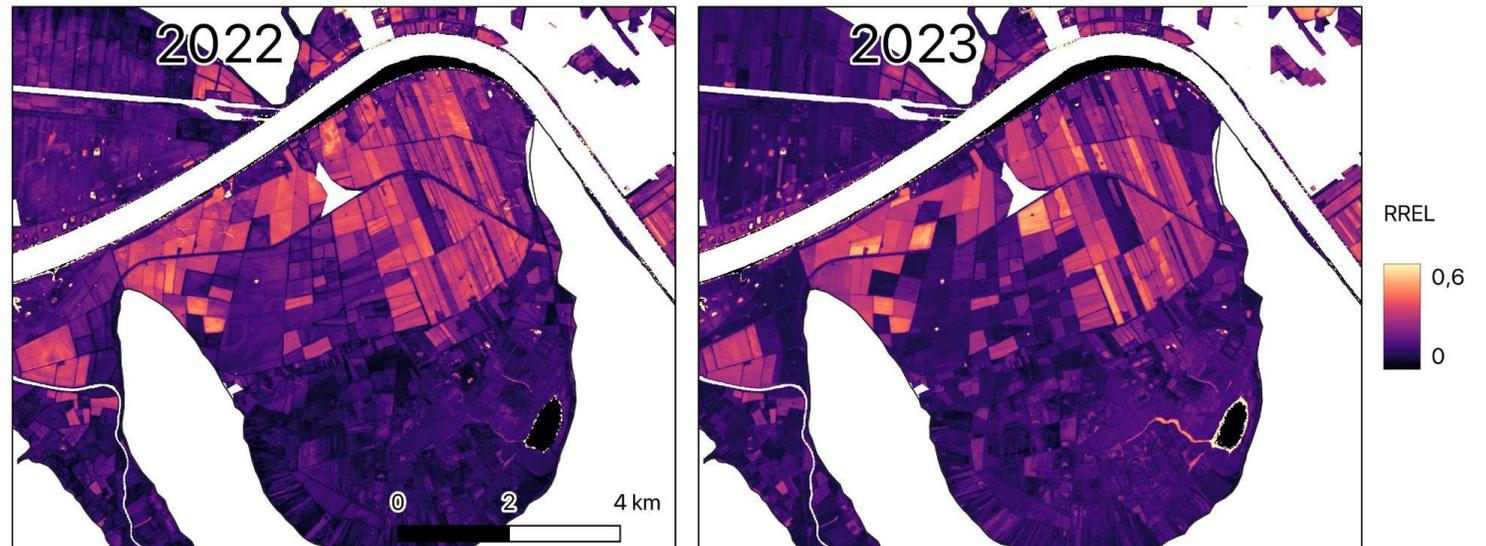
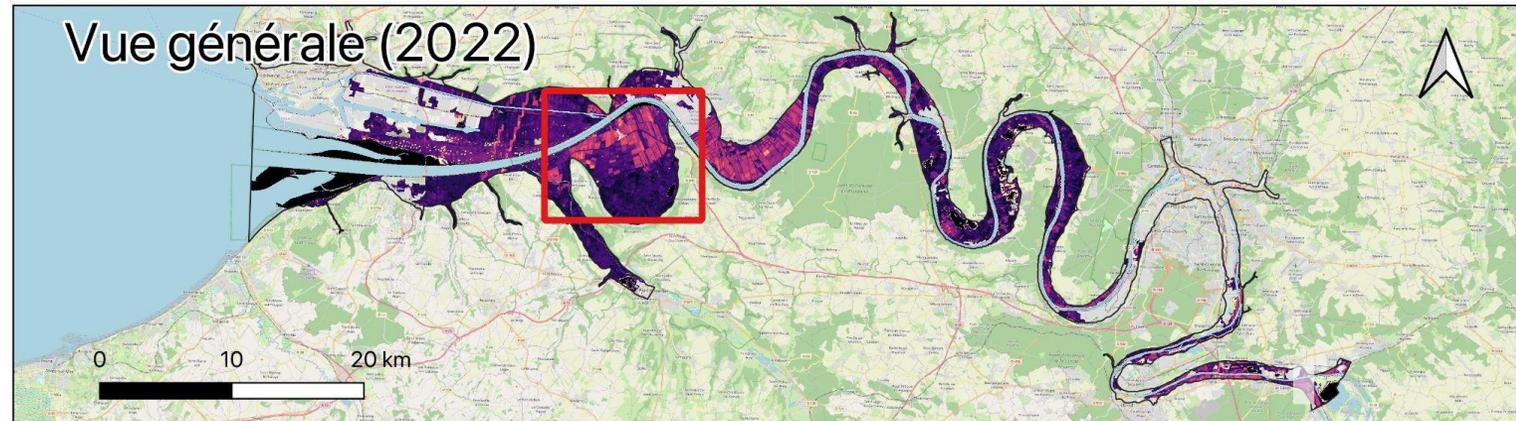
- Série temporelle Sentinel-2
- Somme annuelle du NDVI
- Variations inter-annuelles



② Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Saisonnalité des flux de carbone

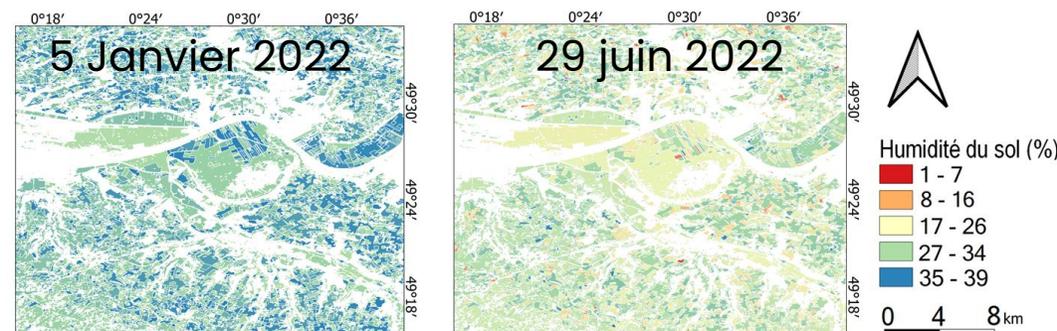
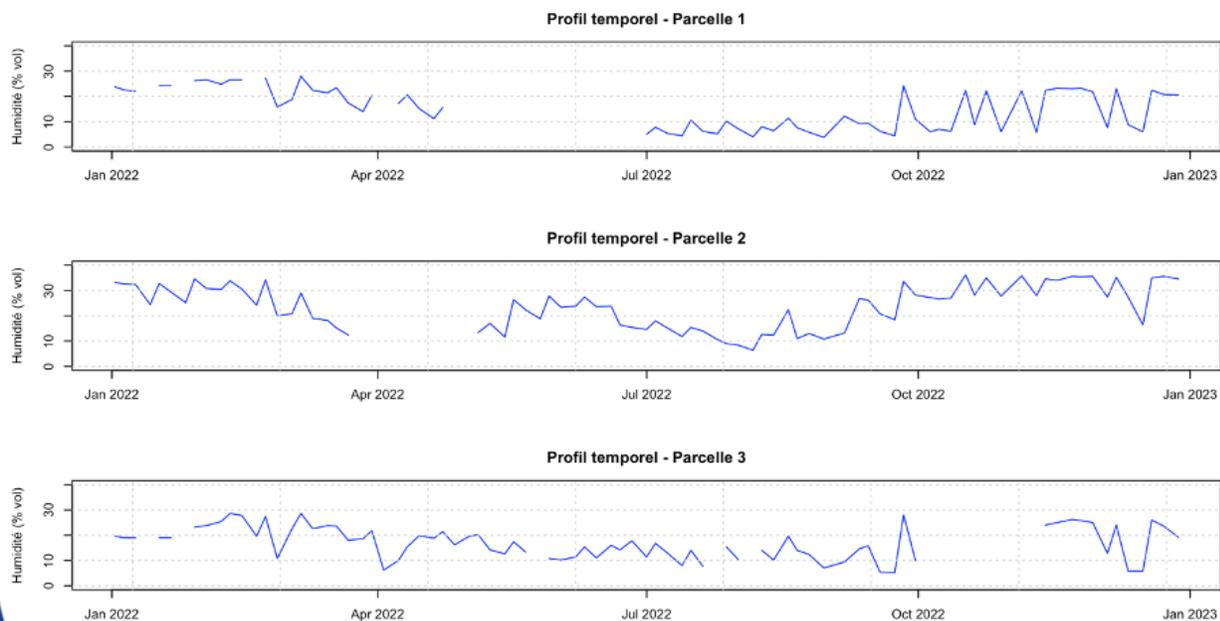
- Série temporelle Sentinel-2
- NDVI max – NDVI min
- Variations inter-annuelles



2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Humidité de surface du sol

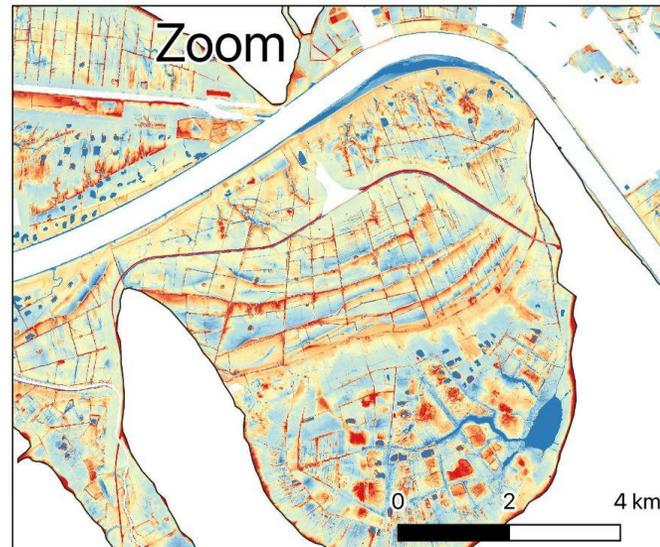
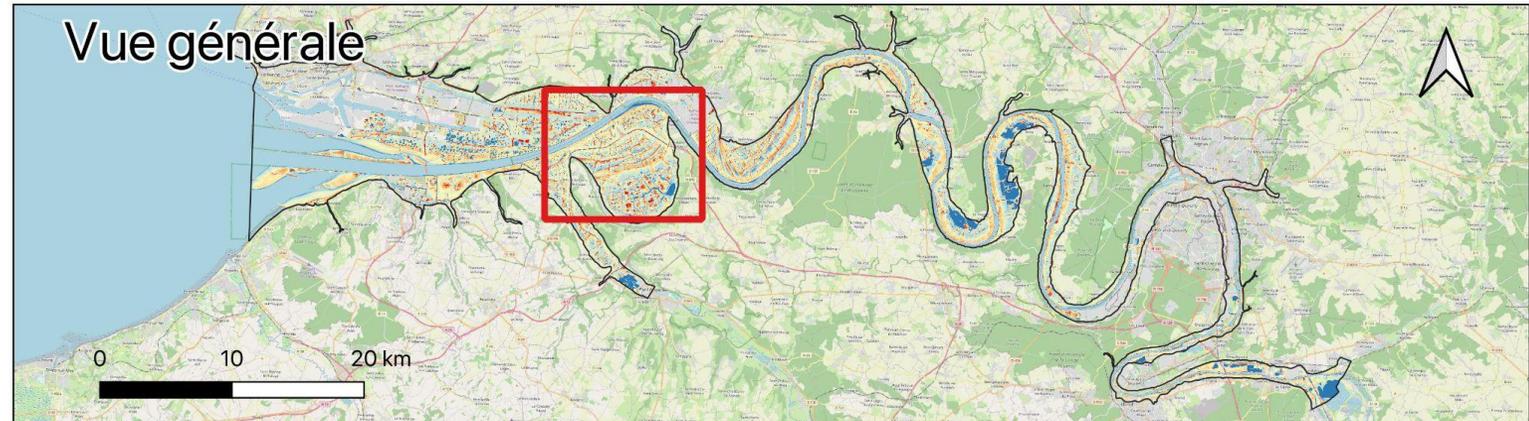
- Série temporelle Sentinel-1
- Résultats biaisés par la couverture végétale
- R&D requise



② Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

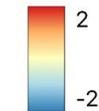
Position topographique

- LiDAR GIP SA
- TPI
- Humidité potentielle sol



position topographique

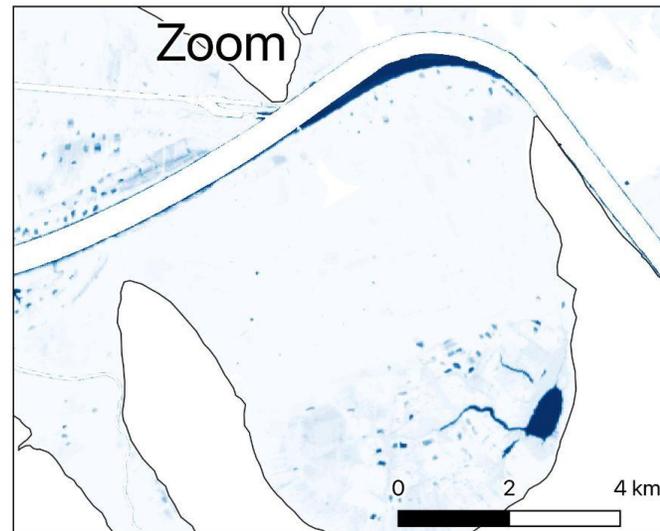
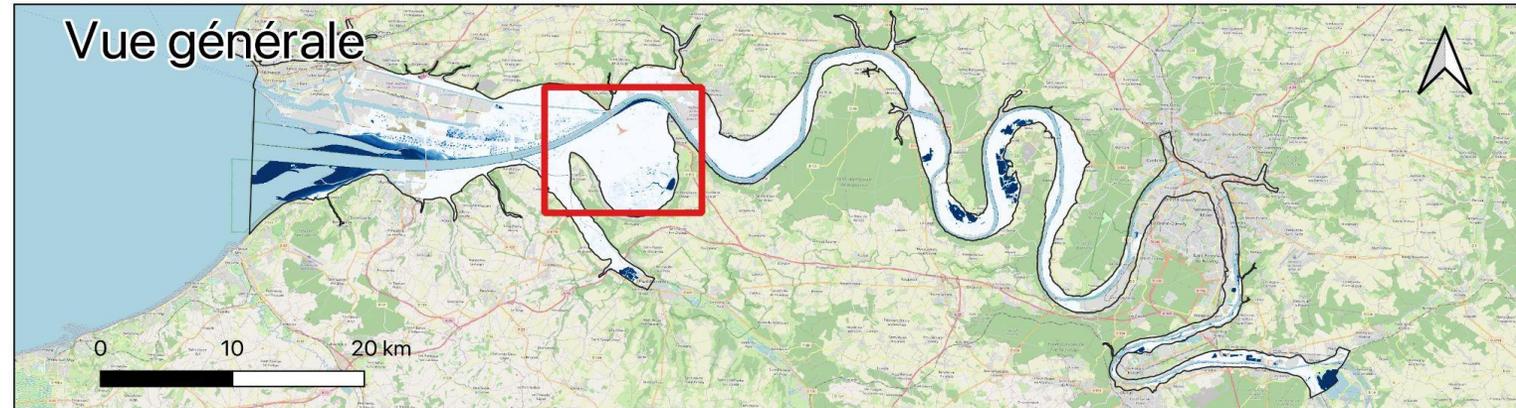
maxDev



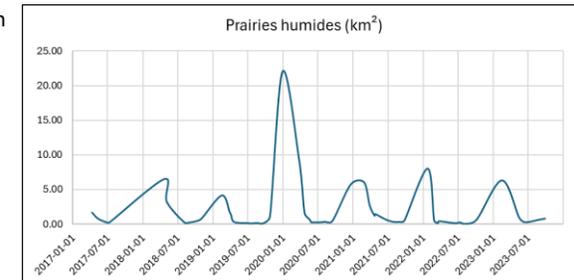
2 Cartographie des déterminants du fonctionnement biogéochimique

Fréquence d'inondation

- Série temporelle Sentinel-2
- Période 2017-2023



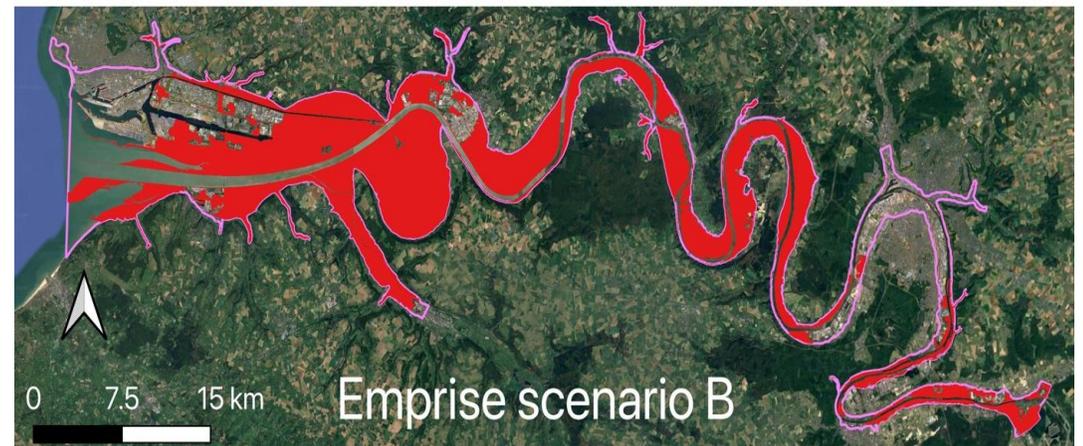
Fréquence inondation
2017-2023



③ Cartographie des fonctions biogéochimiques

Approche multicritère

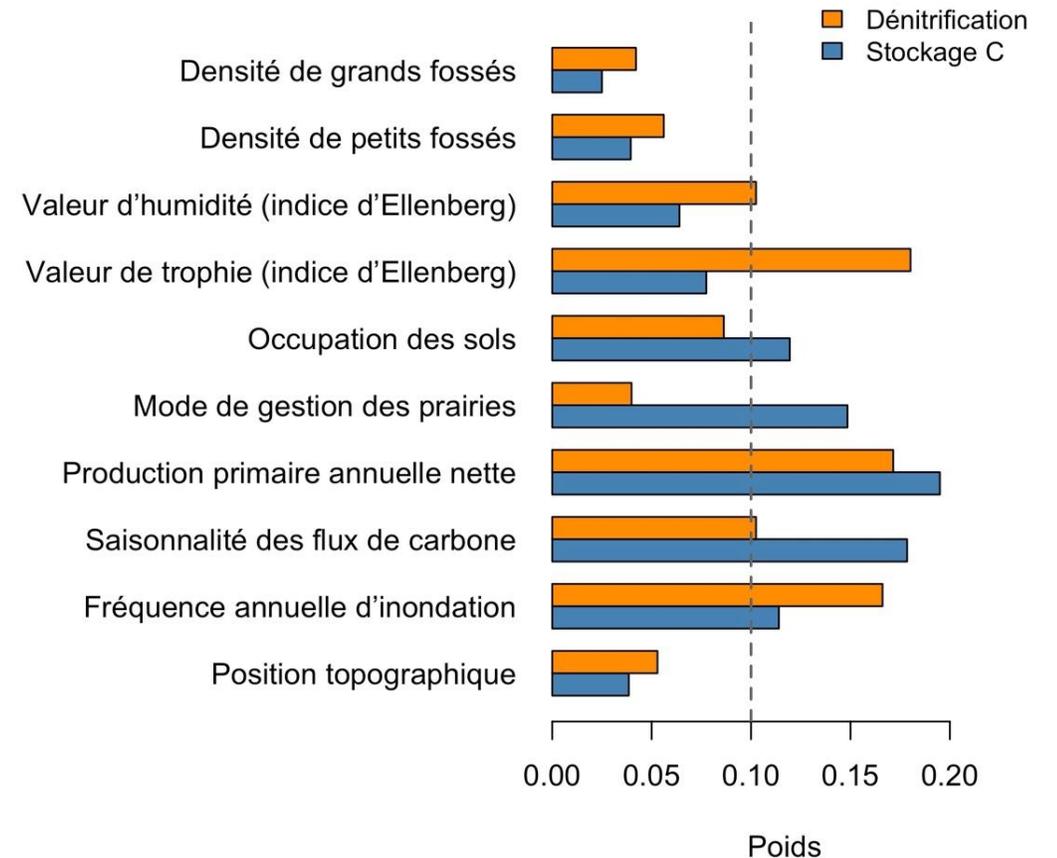
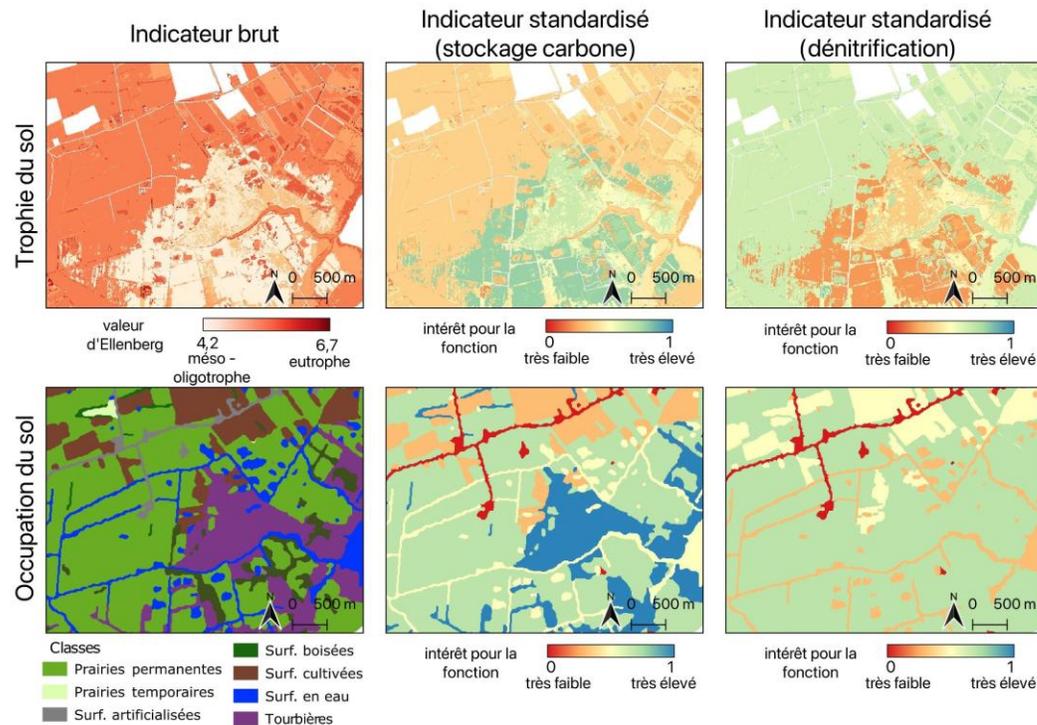
- **2 fonctions** : Stockage de carbone & Dénitrification
- **2 millésimes** : 2022 & 2023
- **2 scénarios** :
 - **Scénario A** : inclut tous les indicateurs
 - **Scénario B** : inclut seulement les indicateurs spatialement exhaustifs



3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

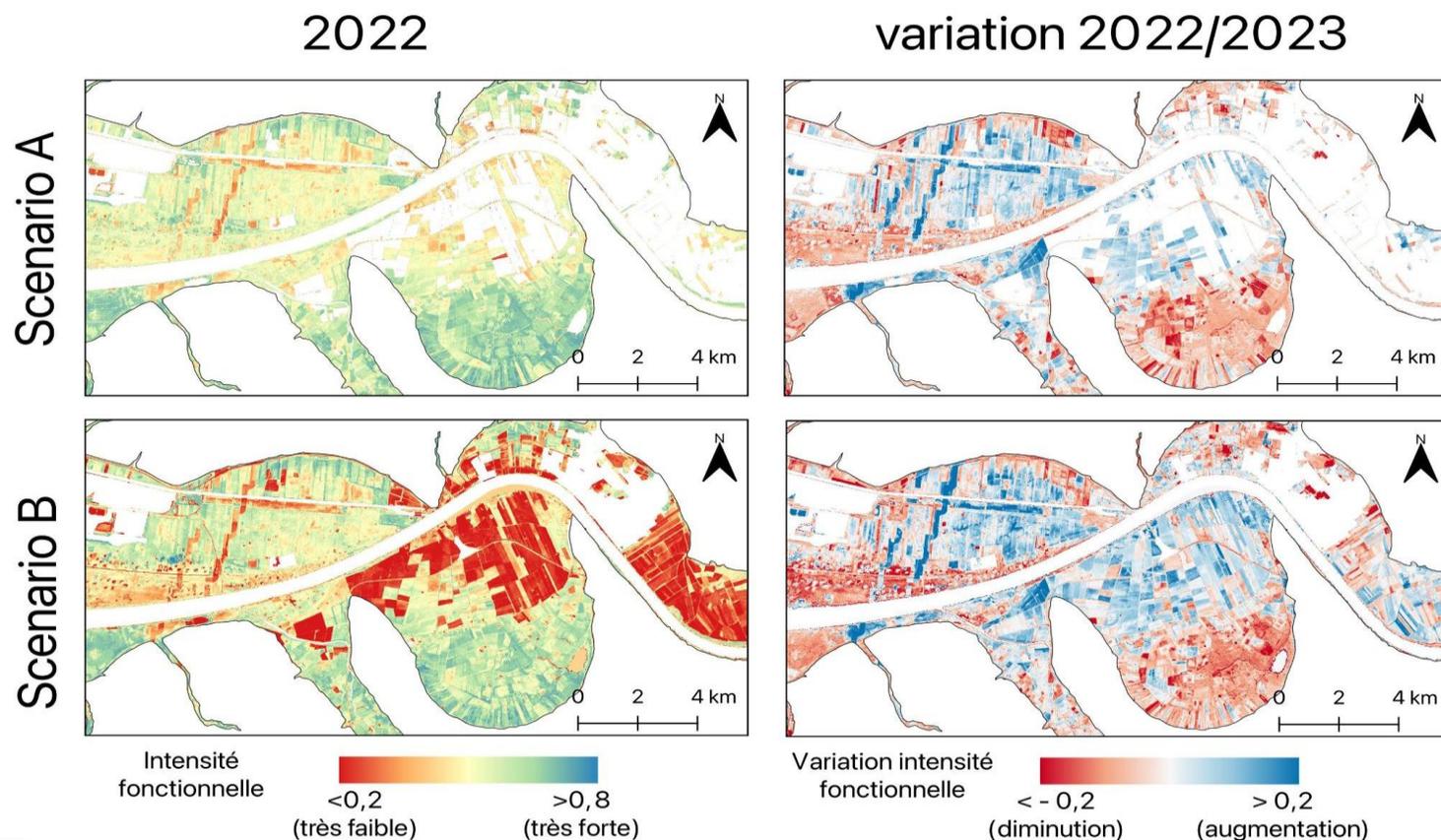
Approche multicritère

- **3 étapes :**
 - Standardisation des indicateurs
 - Pondération des indicateurs
 - Combinaison des indicateurs



3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Stockage de carbone



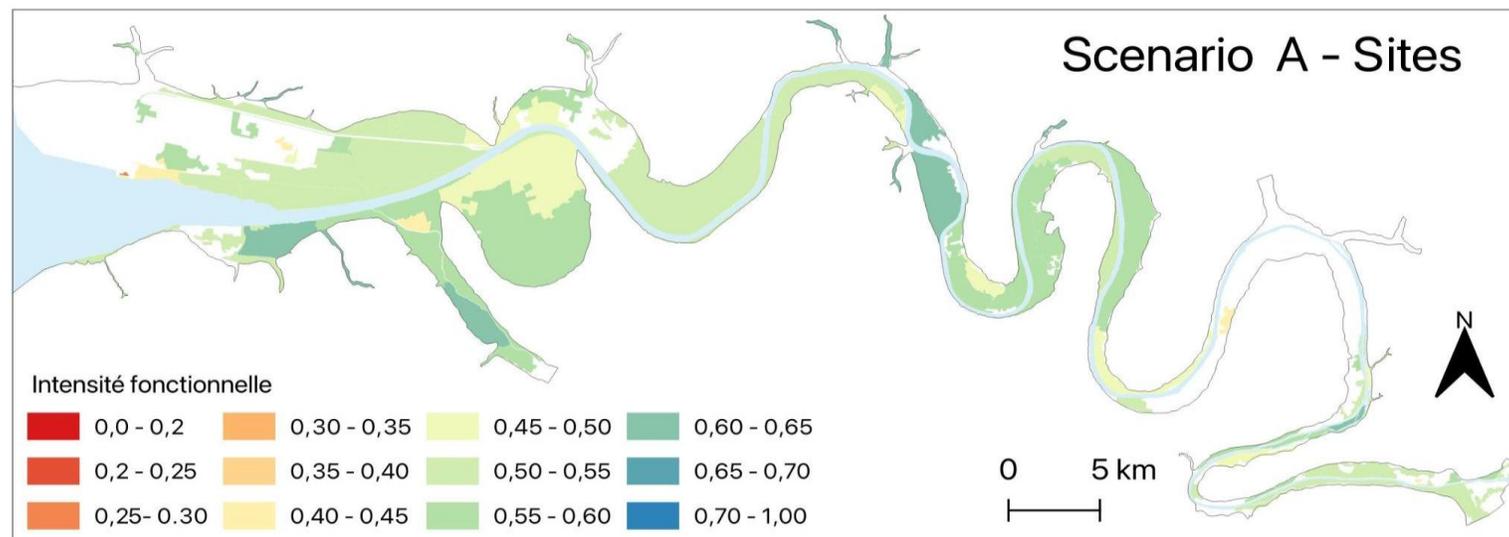
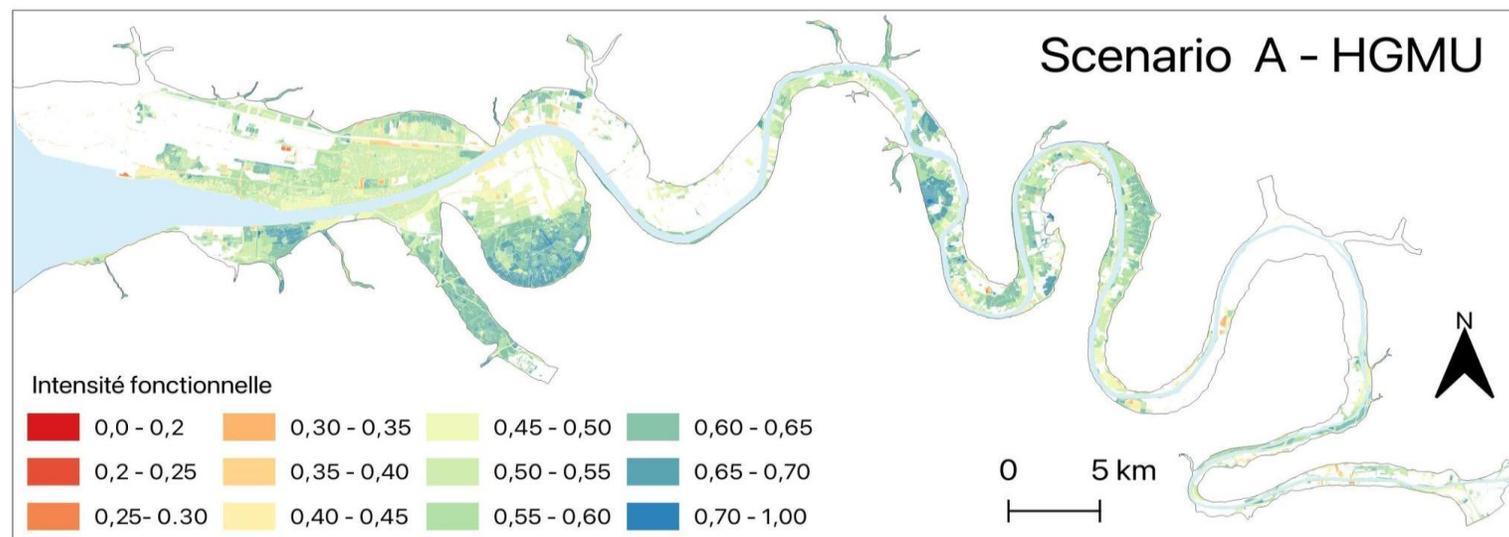
- Intensité + forte pour le scénario A
- Baisse entre 2022 et 2023
- Variations intra-parcellaires

3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Stockage de carbone

Intensité moyenne à élevée

- Rives sud de la Seine (ENS)
- Vallée de la Risle
- Tourbières (marais Vernier et Heurteauville)
- Marais du Trait
- Îles Légarée, Durant et Sainte-Catherine

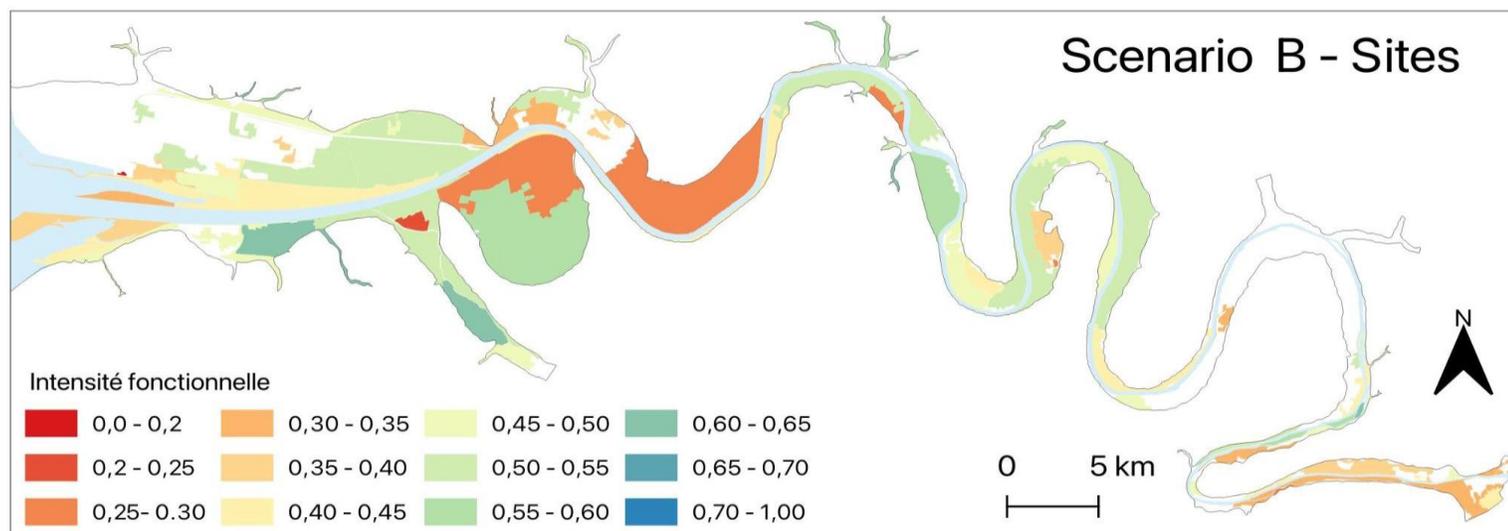
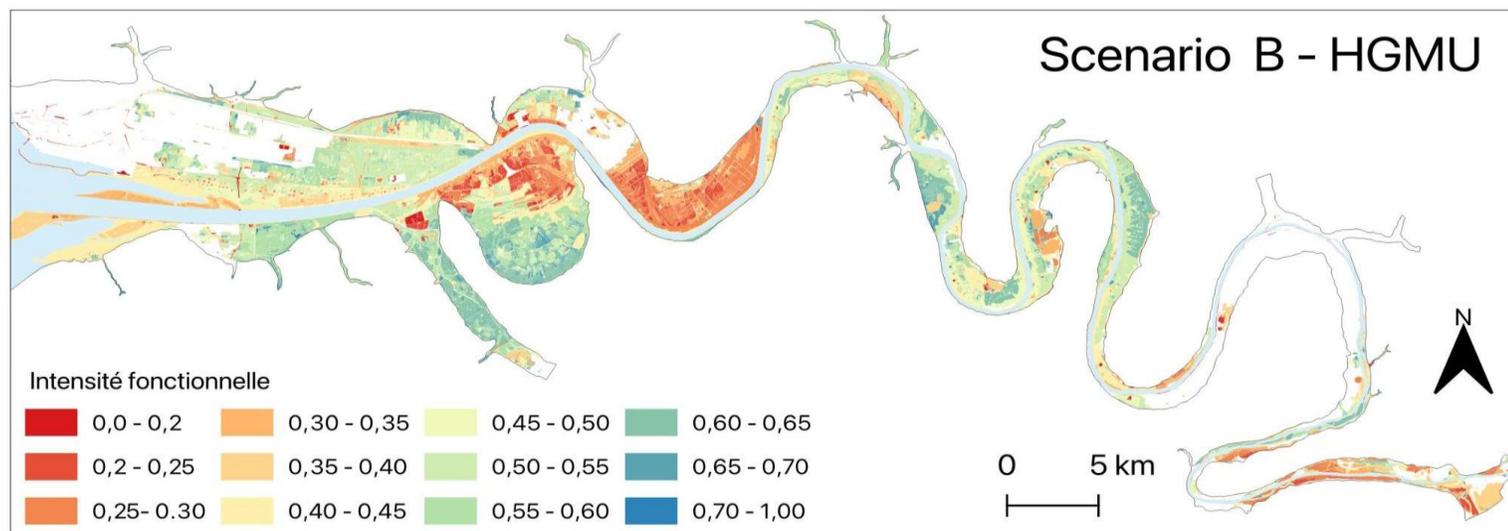


3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Stockage de carbone

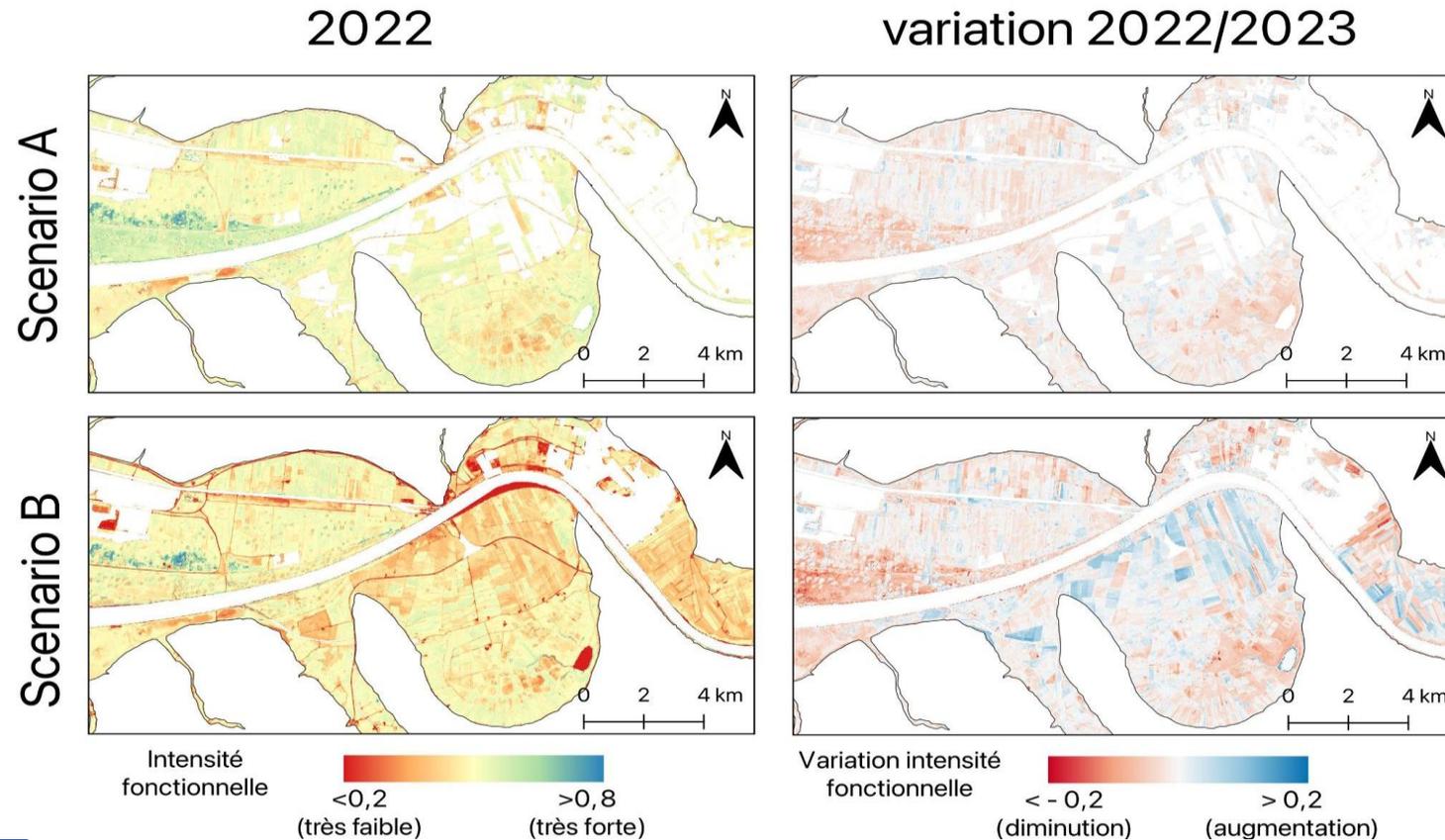
Intensités fonctionnelles plus faibles

- Nord du marais Vernier
- Boucle de Petiville
- Barrage de Poses



3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Dénitrification

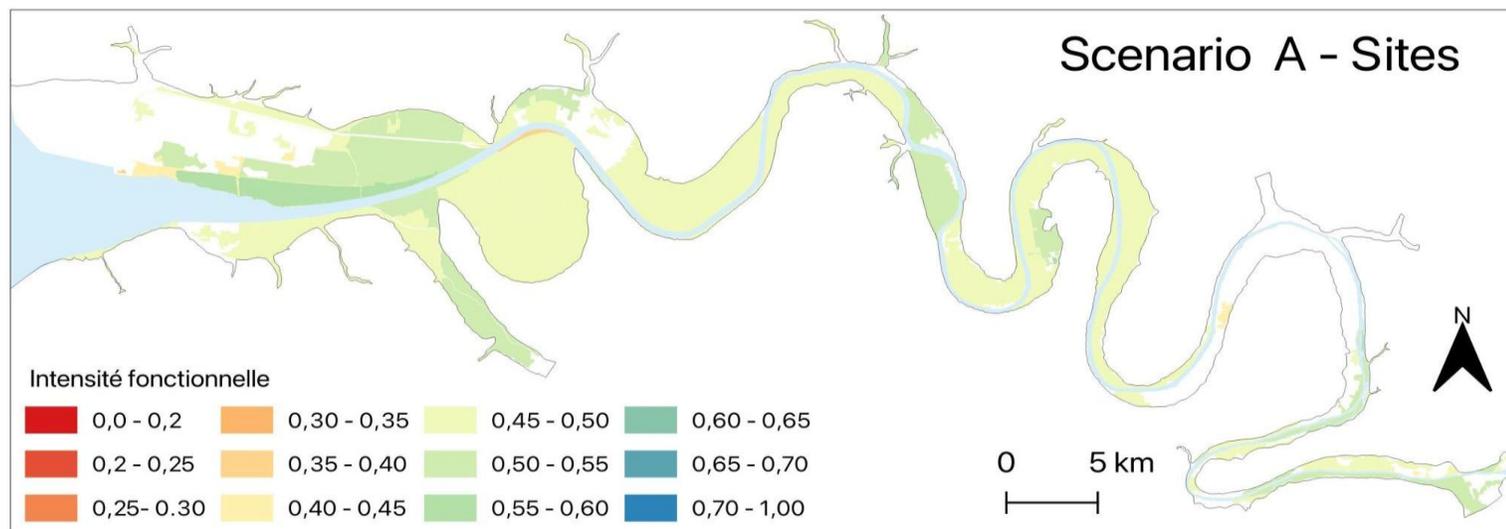
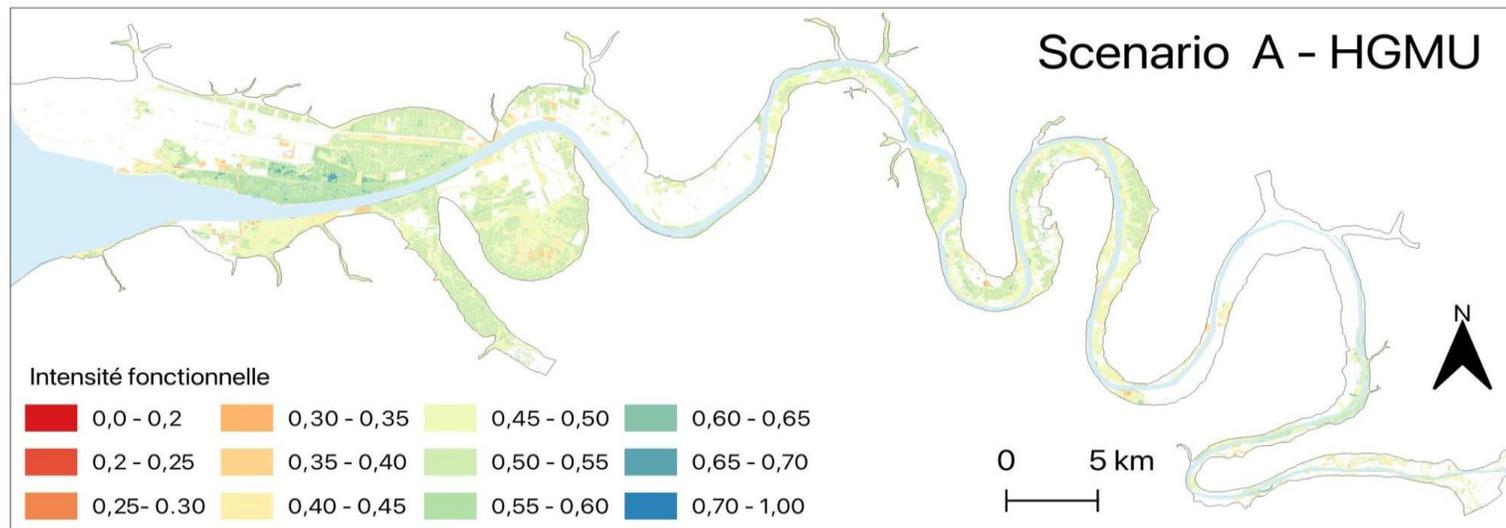


- Intensité + forte pour le scénario A
- Baisse entre 2022 et 2023
- Variations intra-parcellaires

3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Dénitrification

- Intensités moyennes sur la majeure partie de l'estuaire
- Intensités plus élevées au sud de la RNN

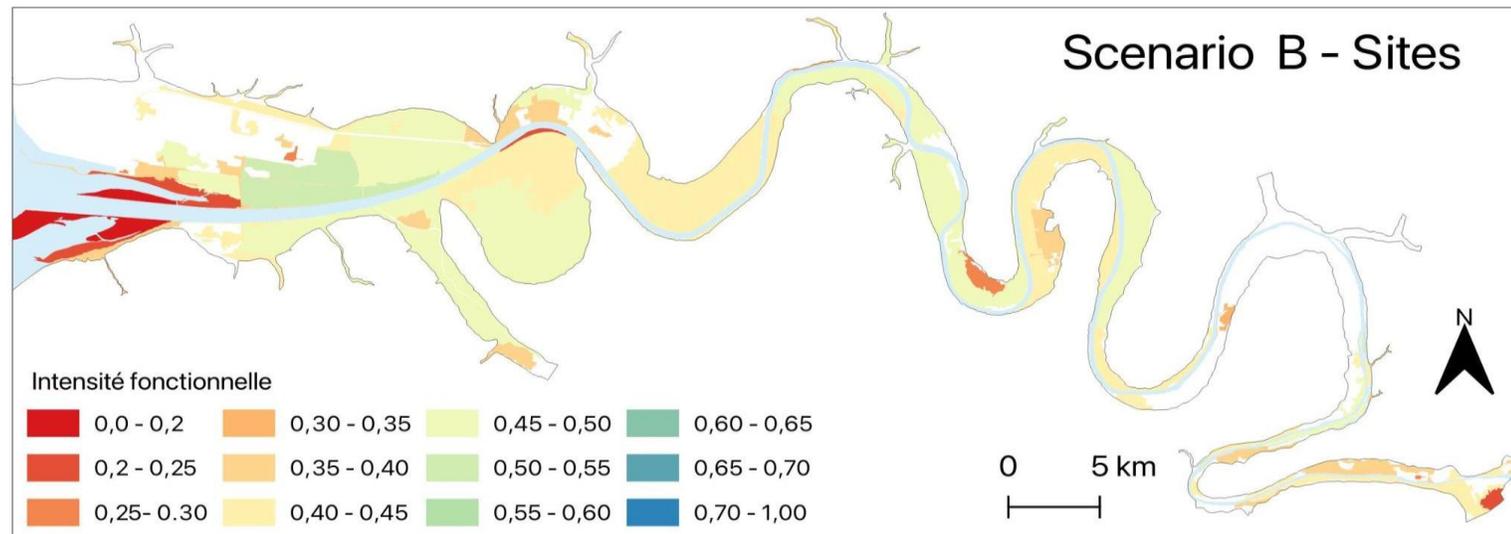
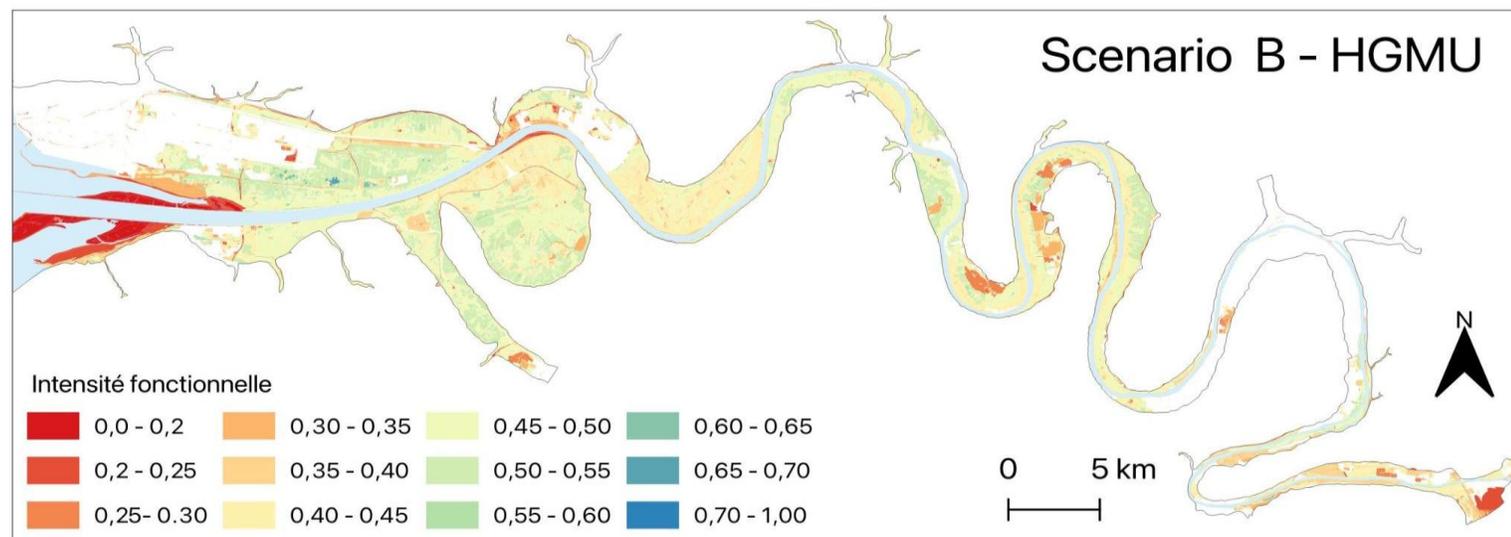


3 Cartographie des fonctions biogéochimiques

Dénitrification

Intensités plus faibles

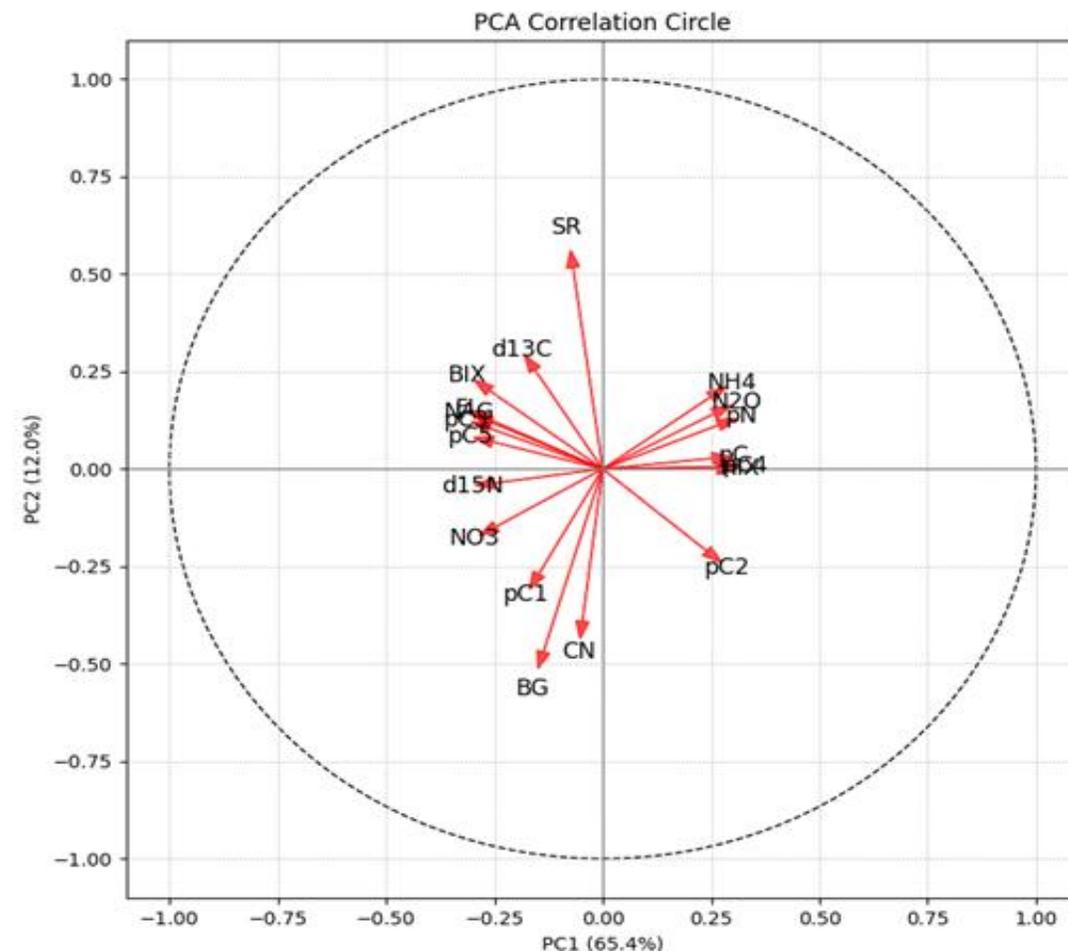
- Secteurs cultivés (nord marais Vernier, boucle de Petiville)
- Gravières (Mesnil-sous-Jumièges, Anneville-sur-Seine)



Validation

Traitement des données terrain

- Mise en évidence des principaux gradients environnementaux et les relations entre variables [carbone, azote, enzymes, minéralisation, propriétés optiques]
- axe PC1 [65,4 % de la variance] = **MO fraîche** [BIX, FI, NAG] VS **MO mature et transformée** [HIX, %C4, %C5, $\delta^{15}\text{N}$]
- axe PC2 [12,0 % de la variance] = composé à **faible poids moléculaire** [SR élevé] VS composé à **poids moléculaire élevé** [C/N élevé, BG, %C1]



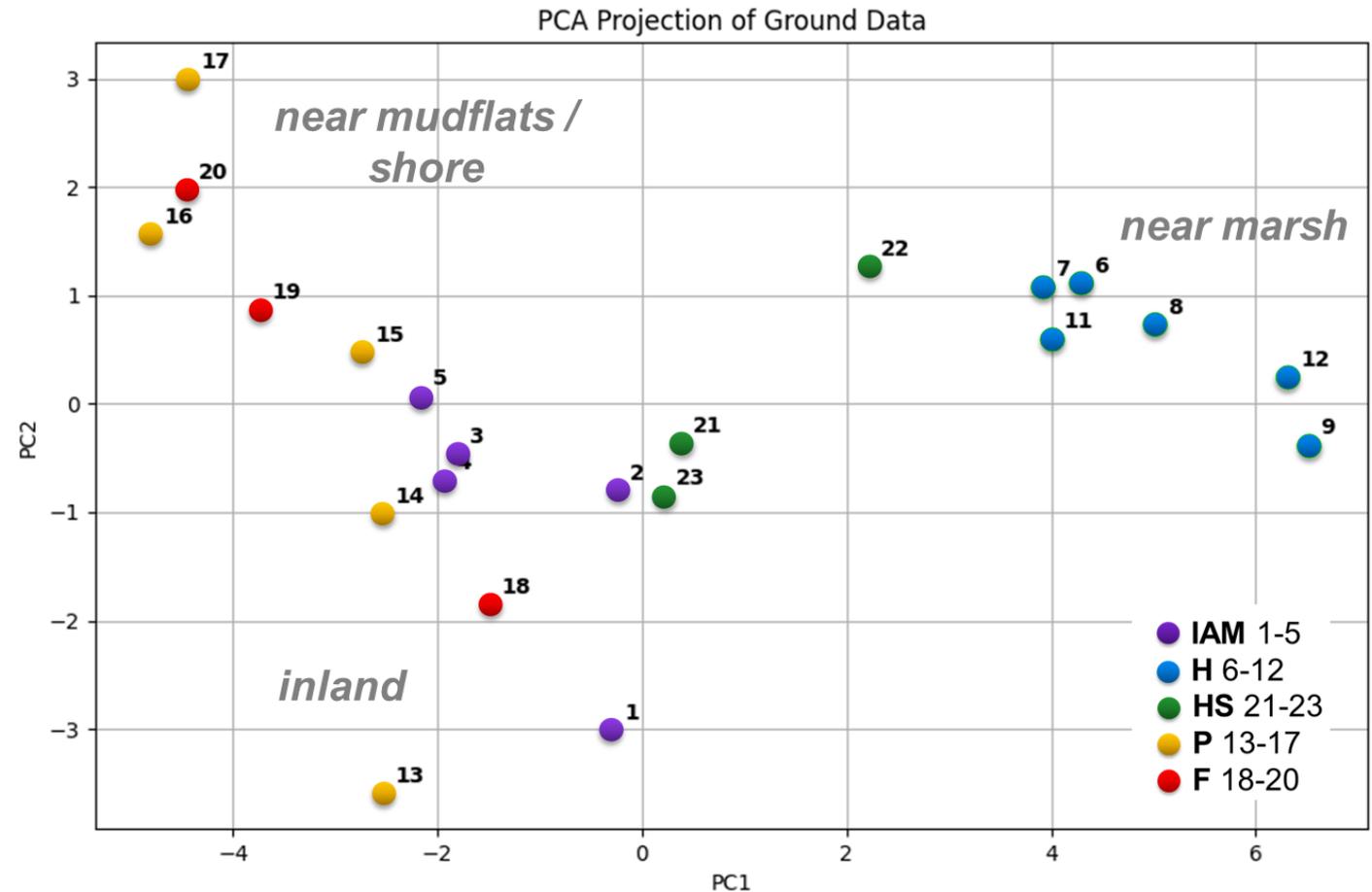
Validation

Traitement des données terrain

- Mise en évidence des types de MO en fonction des sites
- Mise en evidence de gradient

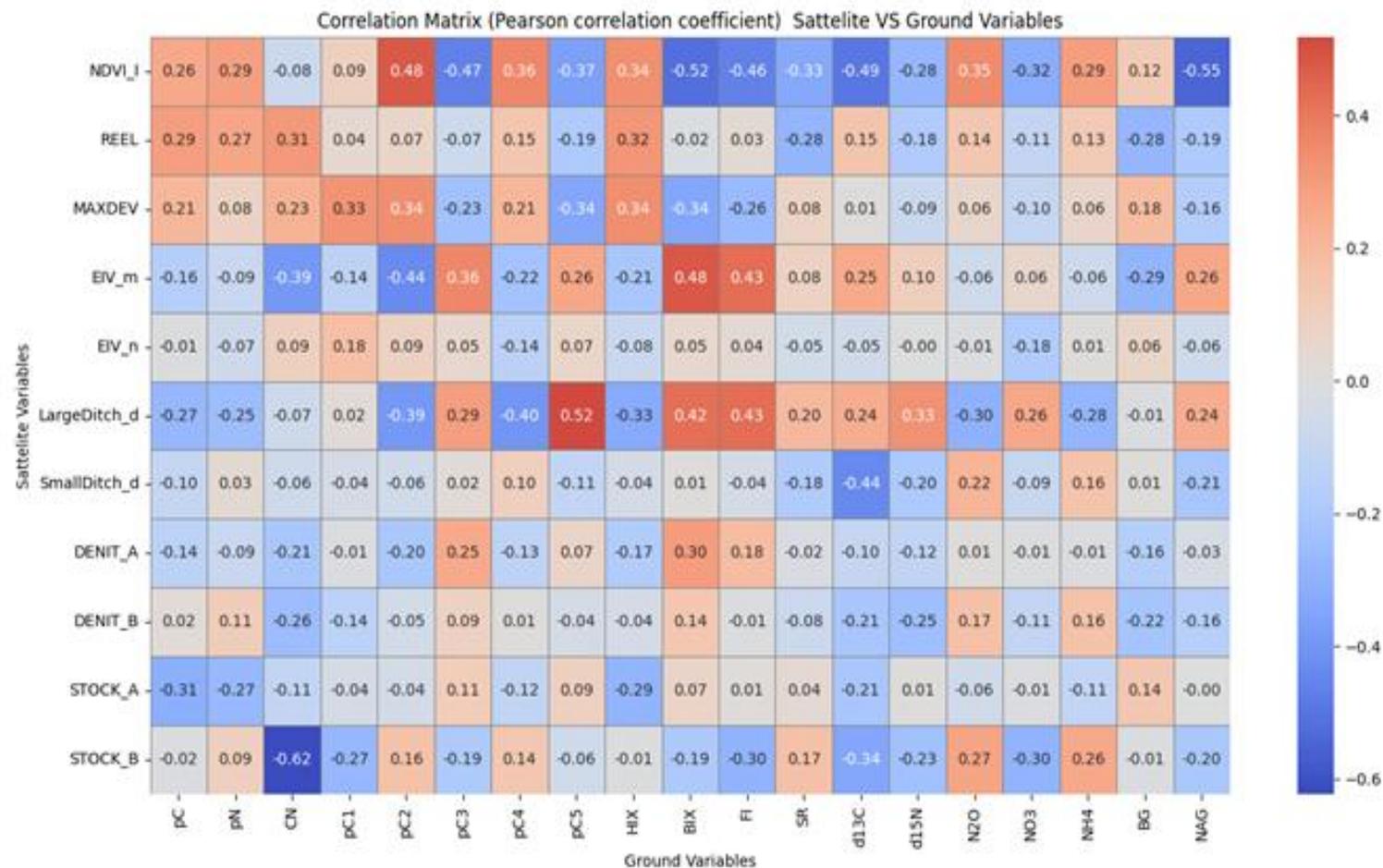
→ Résultats qui confortent :

- le choix des sites en accord avec les relevés de vegetation
- La variabilité des paramètres biogéochimiques mesurés



Validation

Analyse des corrélations



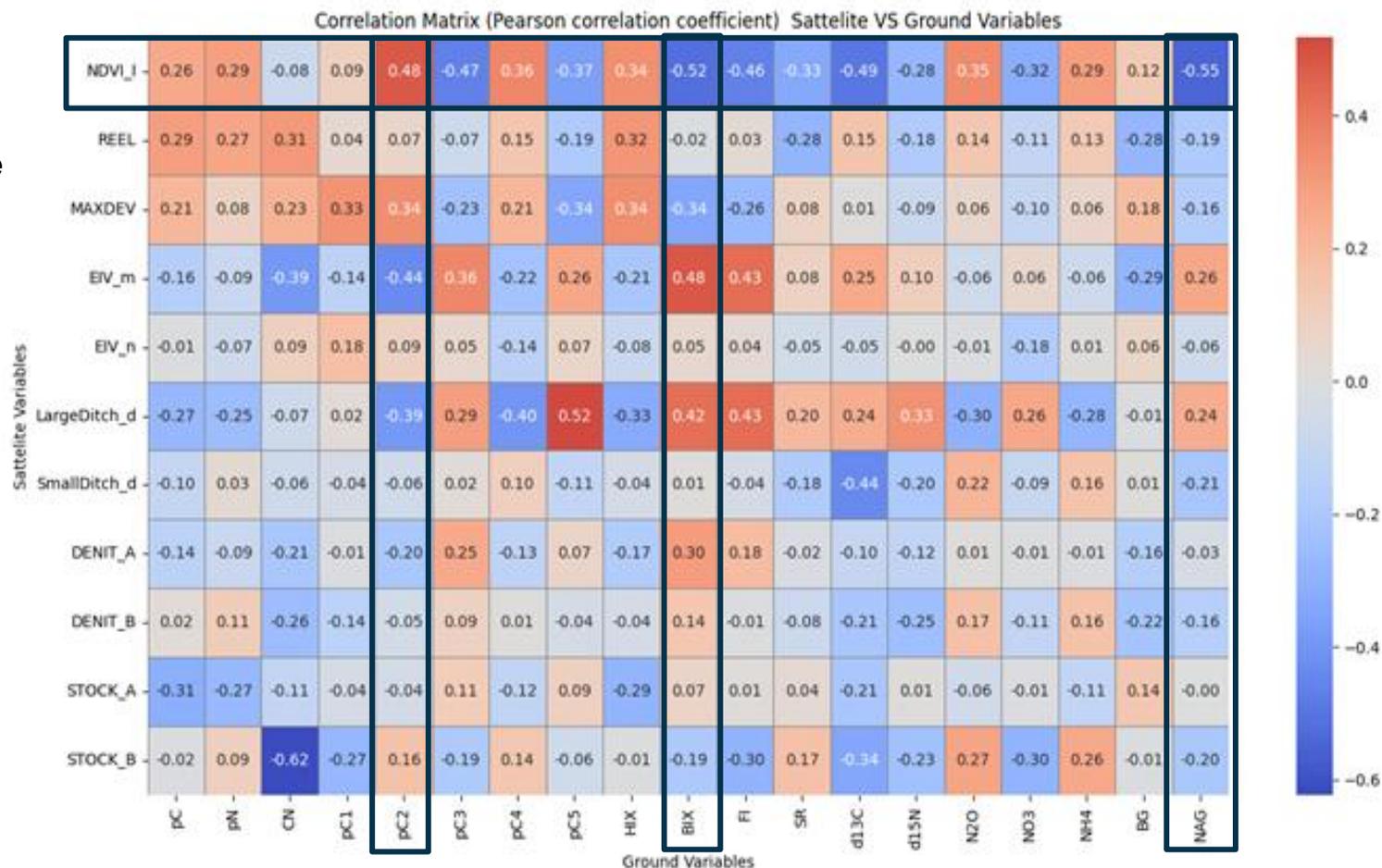
Parlanti, E., Rozo, C., Beguet, B., Hayet, Z., Hervieu, A., Laverman, A., ... & Rapinel, S. (2025, September). Characterization of Organic Matter in Estuarine Wetlands: Mapping Biogeochemical Functions Using Remote Sensing Data. In IMOG 2025 (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-2). European Association of Geoscientists & Engineers.



Validation

Analyse des corrélations

- Exemple de corrélations :**
 NDVI-I positivement corrélé à la fluorescence du composant C2 (0,48) mais négativement corrélé à l'activité enzymatique NAG (-0,55) et à l'indice biologique BIX (-0,52)
 → **Corrélation entre végétation dense et la matière organique terrestre dans les eaux interstitielles (BIX)**



Parlanti, E., Rozo, C., Beguet, B., Hayet, Z., Hervieu, A., Laverman, A., ... & Rapinel, S. (2025, September). Characterization of Organic Matter in Estuarine Wetlands: Mapping Biogeochemical Functions Using Remote Sensing Data. In IMOG 2025 (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-2). European Association of Geoscientists & Engineers.

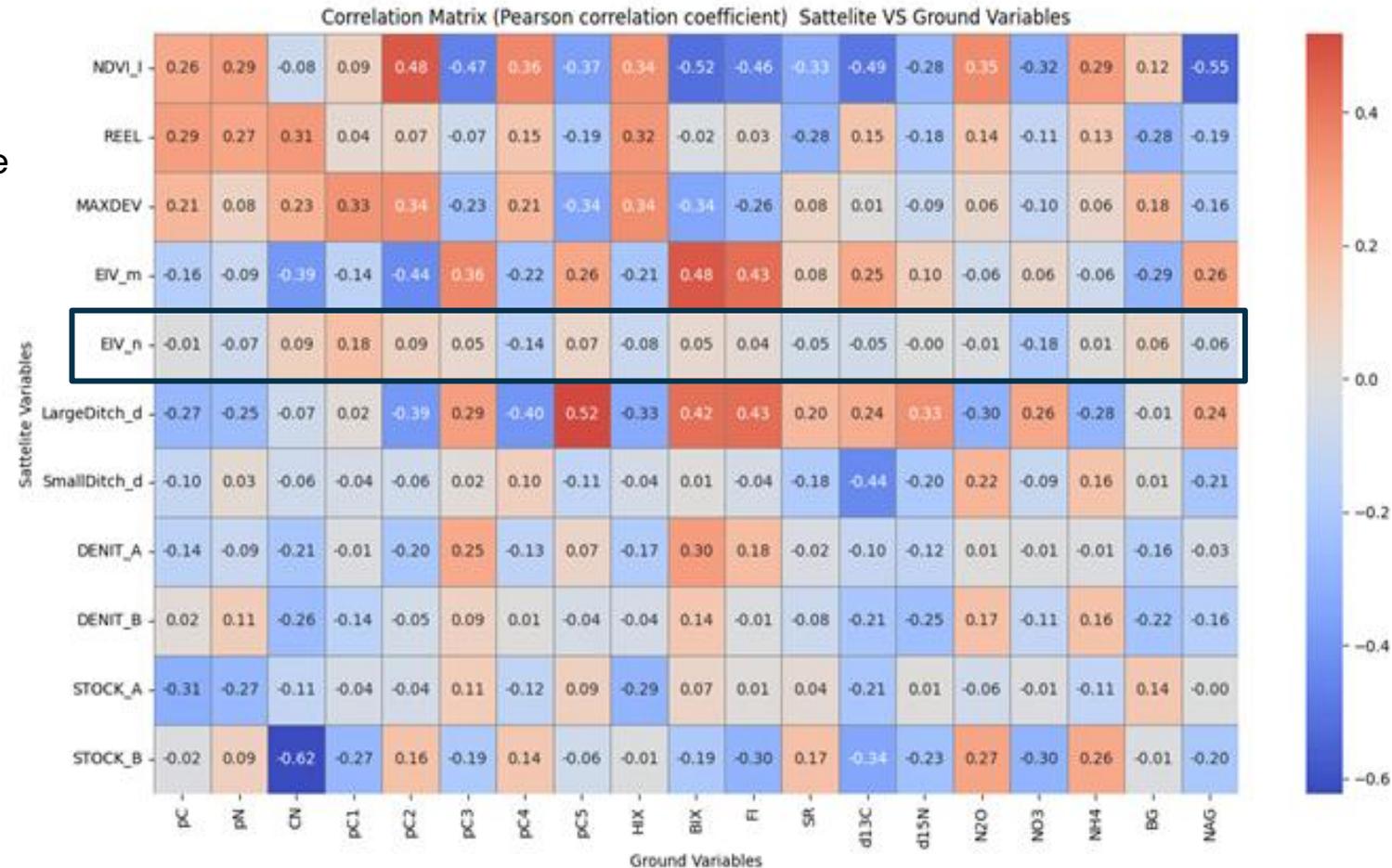
Validation

Analyse des corrélations

- Exemple de corrélations :**
 NDVI-I positivement corrélé à la fluorescence du composant C2 (0,48) mais négativement corrélé à l'activité enzymatique NAG (-0,55) et à l'indice biologique BIX (-0,52)

→ **Corrélation entre végétation dense et la matière organique terrestre dans les eaux interstitielles (BIX)**

- Certaines variables peu corrélées (comme EIV_n = trophie) [analyses complémentaire nécessaires]



Parlanti, E., Rozo, C., Beguet, B., Hayet, Z., Hervieu, A., Laverman, A., ... & Rapinel, S. (2025, September). Characterization of Organic Matter in Estuarine Wetlands: Mapping Biogeochemical Functions Using Remote Sensing Data. In IMOG 2025 (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-2). European Association of Geoscientists & Engineers.

Validation

Analyse des corrélations

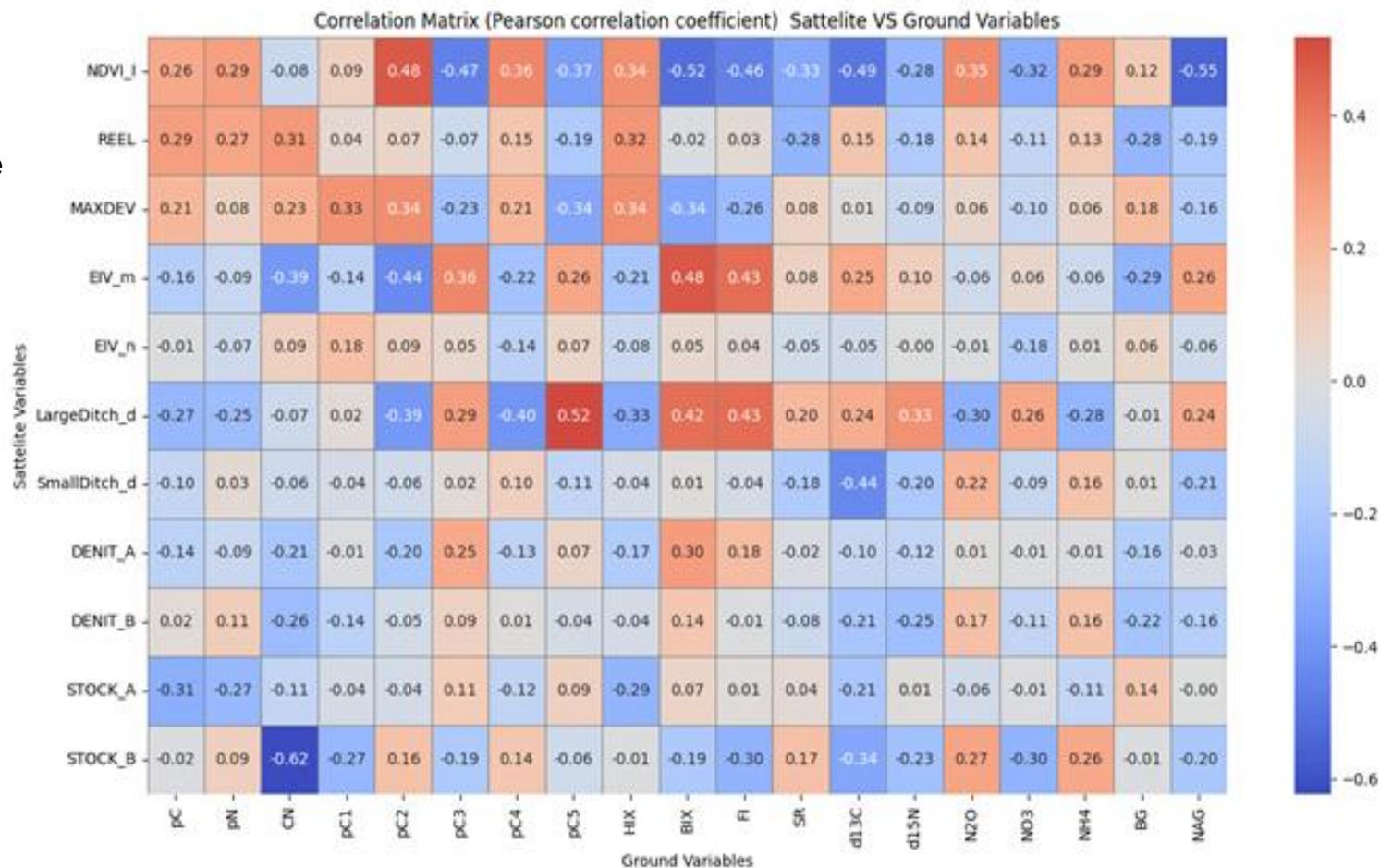
- **Exemple de corrélations :**
NDVI-I positivement corrélé à la fluorescence du composant C2 (0,48) mais négativement corrélé à l'activité enzymatique NAG (-0,55) et à l'indice biologique BIX (-0,52)

→ **Corrélation entre végétation dense et la matière organique terrestre dans les eaux interstitielles (BIX)**

- Certaines variables peu corrélées (comme EIV_n = trophie) [analyses complémentaire nécessaires]

!/ \ Faible nombre de stations terrain

MAIS mise en évidence de relations significatives entre télédétection et biogéochimie



Conclusions & Perspectives

Réponses aux objectifs...

- Délimitation et caractérisation fine des zones humides via **LiDAR et dix indicateurs environnementaux haute résolution (5–20 m)**
- Analyse des dynamiques de la végétation et de l'hydrologie grâce aux séries temporelles Sentinel-1&2, révélant des **variations saisonnières et interannuelles**.
- **Cartographie des fonctions "Stockage de carbone" et "Dénitrification"** à partir d'une approche multicritère combinant télédétection et expertise.



Conclusions & Perspectives

Réponses aux objectifs...

- Délimitation et caractérisation fine des zones humides via **LiDAR et dix indicateurs environnementaux haute résolution (5–20 m)**
- Analyse des dynamiques de la végétation et de l'hydrologie grâce aux séries temporelles Sentinel-1&2, révélant des **variations saisonnières et interannuelles**.
- **Cartographie des fonctions "Stockage de carbone" et "Dénitrification"** à partir d'une approche multicritère combinant télédétection et expertise.

... à travers

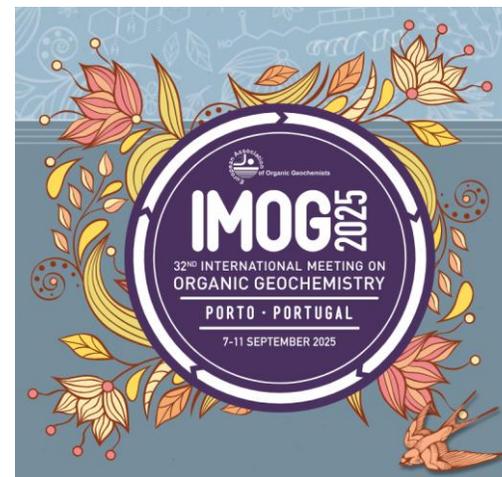
- Production d'un **jeu de données SIG** et en **en libre accès** (données terrain et télédétection, indicateurs, cartes fonctionnelles) **pour le porter à connaissance**
- Collaboration pluridisciplinaire entre laboratoires, bureaux d'études et gestionnaires



Conclusions & Perspectives

Valorisation

- Première version du rapport de recherche livrée
→ actuellement en phase de correction
- **Rapport finalisé attendu décembre 2025** + Atlas des indicateurs et cartes finales
- Ecriture d'articles scientifiques en cours
- Valorisation au cours d'un **congrès international** :
International Meeting on Organic Geochemistry



Parlanti, E., Rozo, C., Beguet, B., Hayet, Z., Hervieu, A., Laverman, A., ... & Rapinel, S. (2025, September). Characterization of Organic Matter in Estuarine Wetlands: Mapping Biogeochemical Functions Using Remote Sensing Data. In IMOG 2025 (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-2). European Association of Geoscientists & Engineers.



Conclusions & Perspectives

Perspectives :

- Ajout d'indicateurs et amélioration des indicateurs existants (nouvelles données, nouvelles méthodes, collaboration renforcée avec les acteurs locaux)
- Evaluation et spatialisation des fonctions par IA
- Suivi sur le temps long (archives Landsat, SPOT World Heritage) du fonctionnement des zones humides face aux changements globaux.



Merci pour votre attention !



Constituants de la MOD

