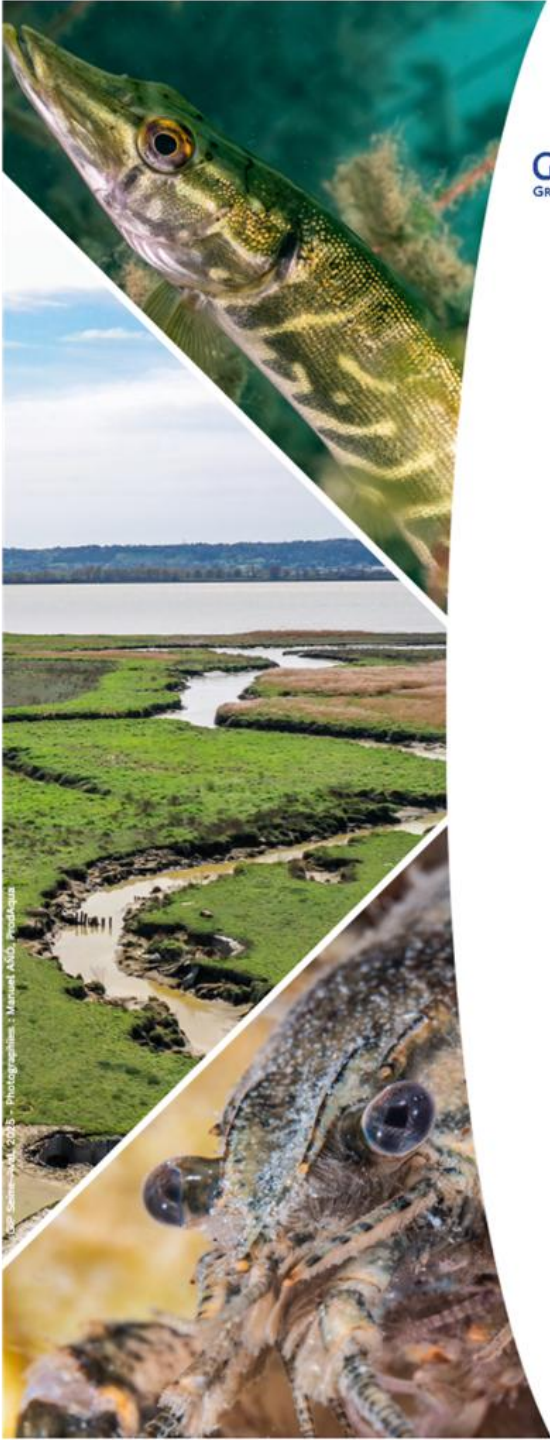




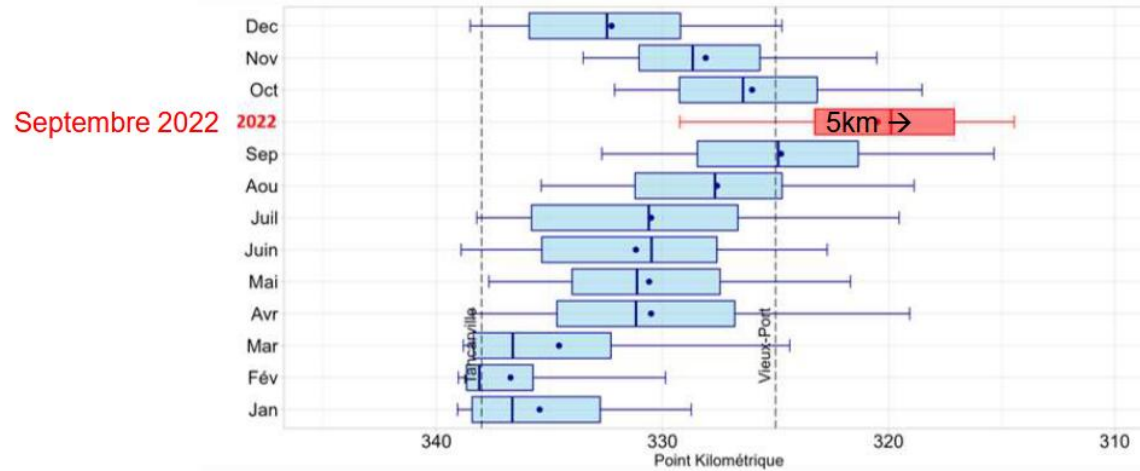
Salinisation des aquifères de l'estuaire de la Seine : **SALIN'AQUISEINE**

E.IDEE (BRGM), L.CARY (BRGM) A.JARDANI (U.ROUEN – M2C)

1 -Contexte

Une dynamique déjà suivie dans les eaux de la Seine

(GIP Seine-Aval, 2023)



statistiques mensuelles des positions du front de salinité



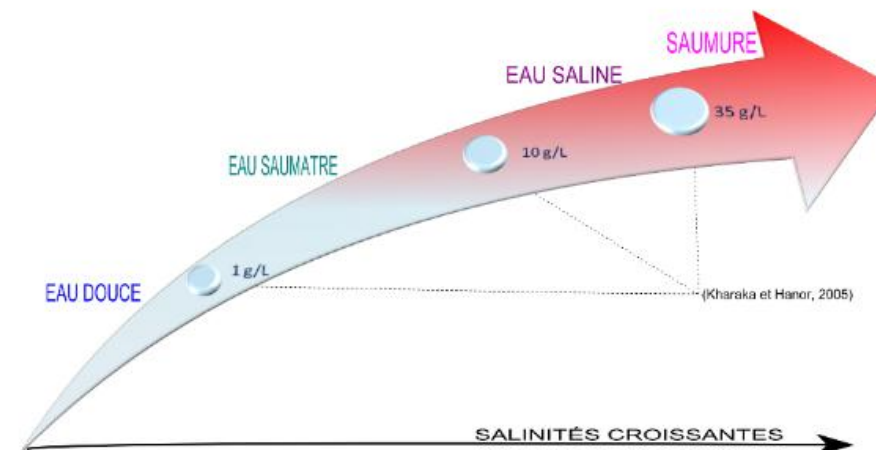
Eté 2022 : 3 PSU mesuré sur la station **SYNAPSES** de Vatteville (nouvelle station)
La limite de 1 PSU* (lim. eau douce/eau saumâtre), habituellement située à Vieux Port

***Repères :**

1 PSU = 1 g de sel (Na+Cl-) par kg d'eau de mer

Salinité moyenne des océans est de 35 PSU

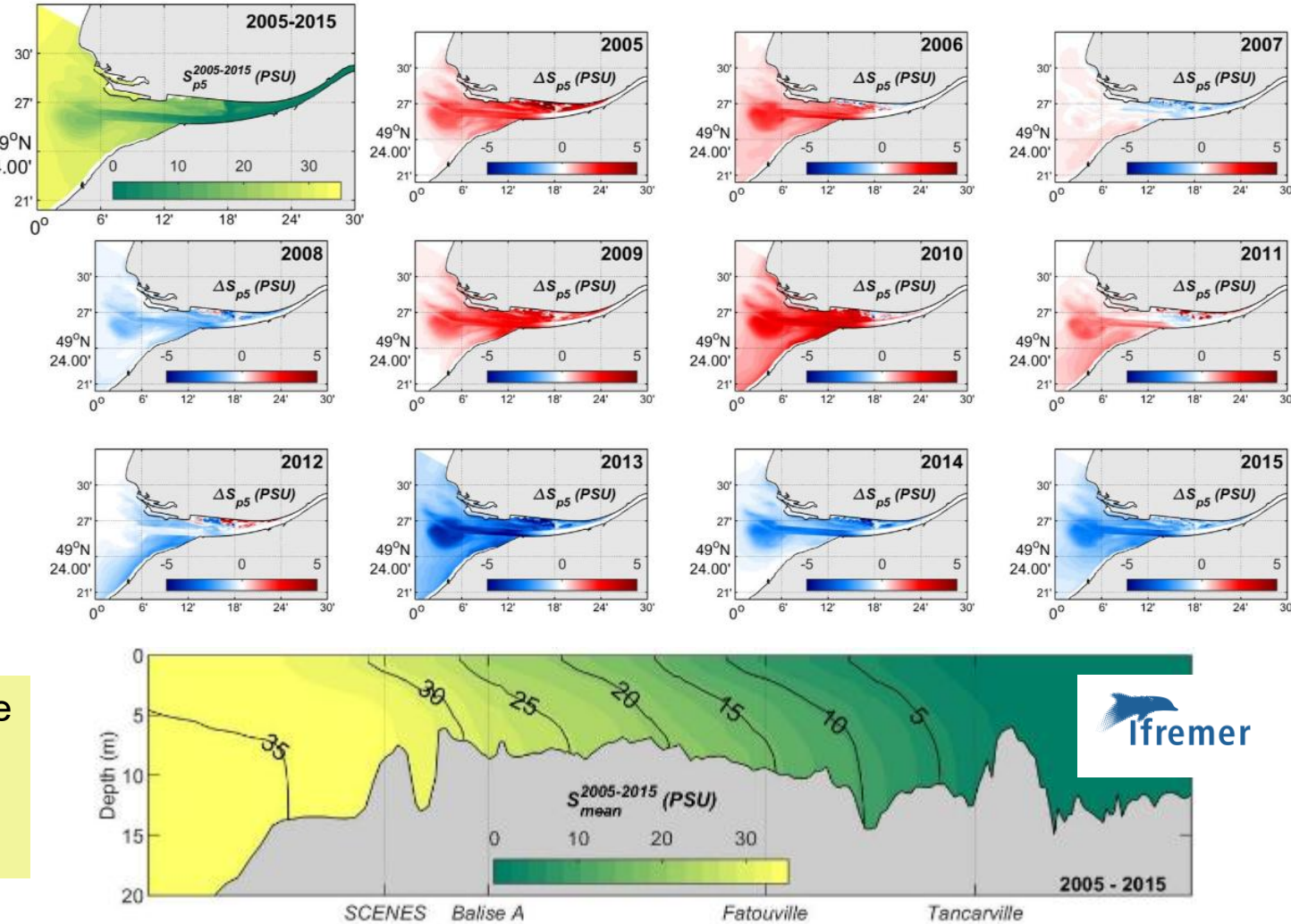
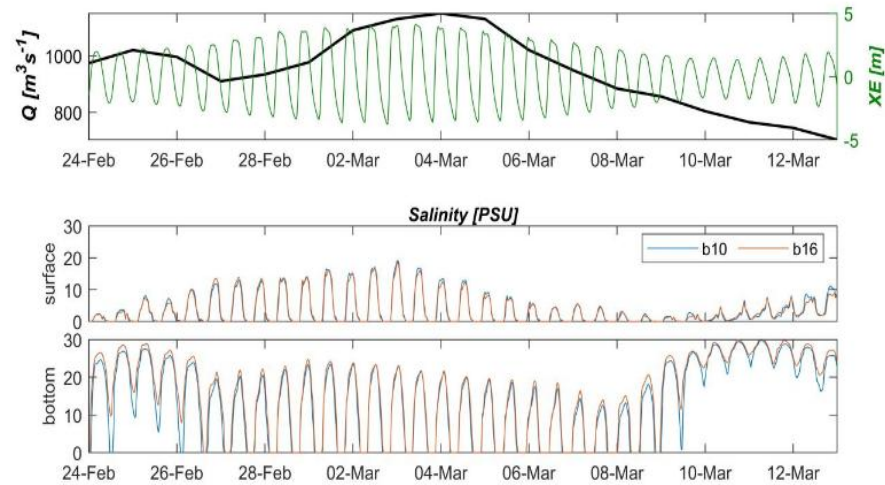
Conductivité environ 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 15°C pour 1 PSU



D'après Kharaka
et Hanor, 2005



1 -Contexte



La modélisation hydro-sédimentaire a démontré le rôle primordial assuré par les forçages :
1) le **débit moyen du fleuve** en entrée du système et 2) le **niveau marin**.

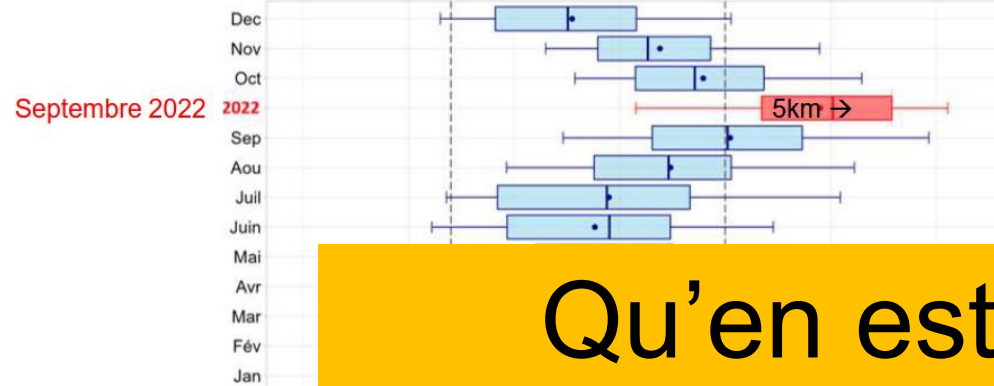
Anomalies annuelles (de 2005 à 2015) du percentile 5 de la salinité moyennée sur la colonne d'eau, par rapport à la climatologie 2005-2015 -
Projet ARES (Prog. Seine Aval 6)



1 -Contexte

Une dynamique observée dans l'estuaire de la Seine

(GIP Seine-Aval, 2023)



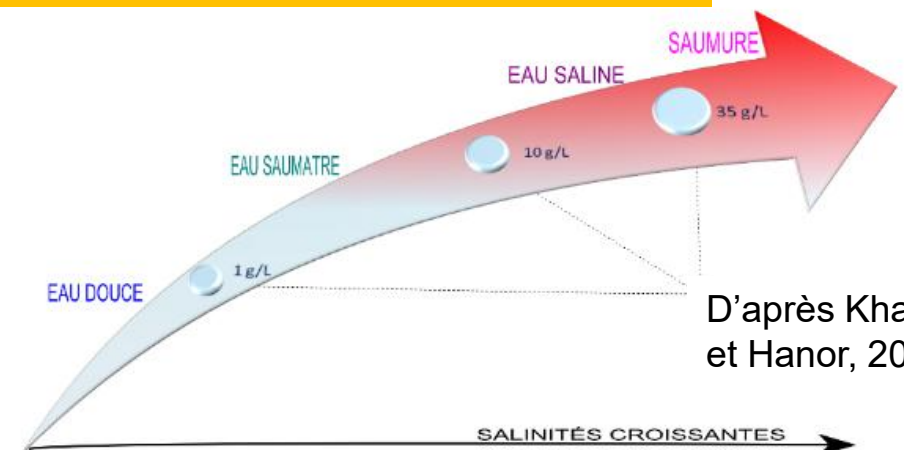
Qu'en est-il dans les
eaux souterraines
de l'estuaire ?

***Repères :**

1 PSU = 1 g de sel (Na+Cl-) par kg d'eau de mer

Salinité moyenne des océans est de 35 PSU

Conductivité environ 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 15°C pour 1 PSU



D'après Kharaka
et Hanor, 2005



1 -Contexte

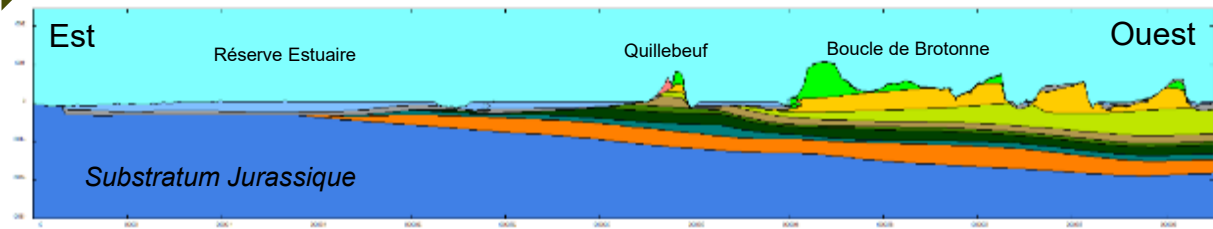
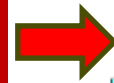


L'estuaire de la Seine est formé d'un **système géologique multicouches** :

- les **alluvions**, distinguées en unité sableuse à la base (anciennes) et limon-argilo-tourbeux au sommet (récentes) ;
- les **formations crayeuses** +/- altérées, distinguées en plusieurs unités lithostratigraphiques.
- des **formations plus anciennes** sables argileux de la base du Crétacé (Albien) et marnes du Jurassique supérieur

La **géométrie** des aquifères et leurs **caractéristiques intrinsèques** (perméabilité, fissuration, karstification) ainsi que la nature des **échanges entre les rivières et les nappes** (berges/colmatages) sont des paramètres clés qui vont influencer la possibilité de pénétration de la salinisation dans les eaux souterraines.

Influences
marines à
l'embouchure



Influences
fluviales à
l'amont



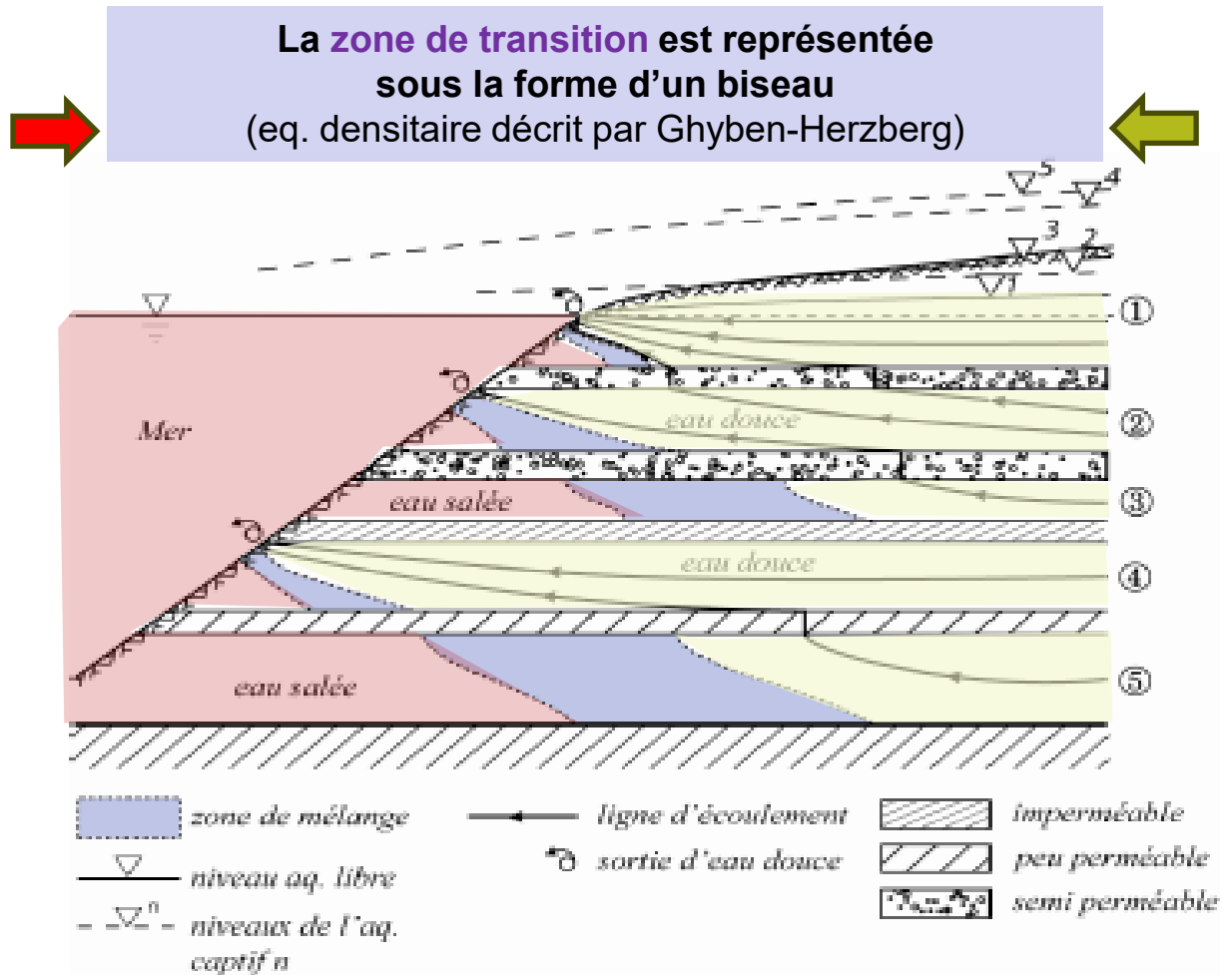
Coupe schématique 2D de l'estuaire de la Seine à son embouchure,
modèle géologique 3D (BRGM)

1 -Contexte

La position du front de salinité dépend **de l'équilibre hydrodynamique entre l'eau de mer ou saumâtre et l'eau douce continentale**. Cet équilibre peut être modifié par :

- la baisse/hausse du niveau dans les eaux souterraines (charge ESOU),
- une augmentation/diminution du flux d'eau douce en amont (charge ESU),
- une augmentation/diminution de la charge d'eau de mer/saumâtre en aval
- des prélèvements et rejets

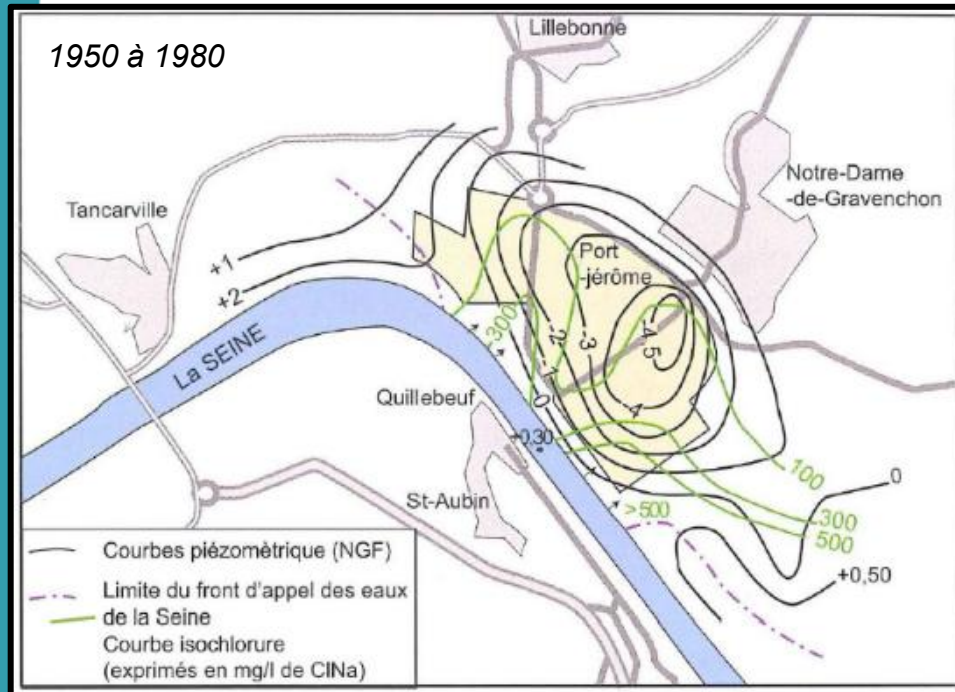
Cet équilibre est donc fragilisé dans un contexte de CC et dans un système estuarien fortement anthropisé



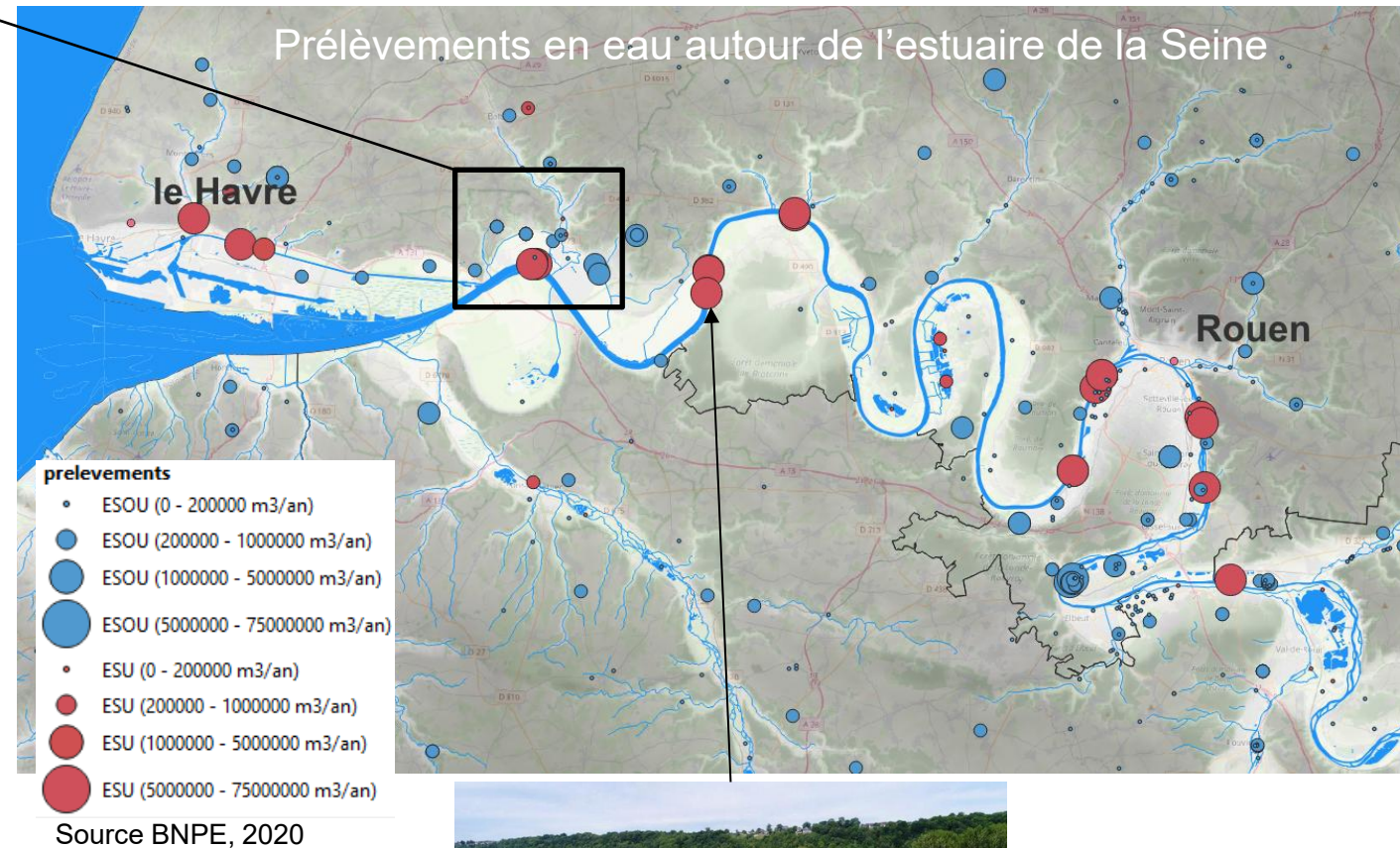
Zones de transition dans un système aquifère côtier multicouches (d'après Custodio, 2002, dans De Montety, 2008)

1 -Contexte

ENJEUX EXPLOITATION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LA VALLÉE DE SEINE



Surexploitation de la nappe des alluvions de la Seine au droit du site industriel de Port Jérôme ayant conduit à la salinisation de l'aquifère (Roux et De la Quèrrière, 2005)



Crédit photo SAUR

Usine Eau Industrielle Norville (1976 réhabilitée en 2023)

1 -Contexte

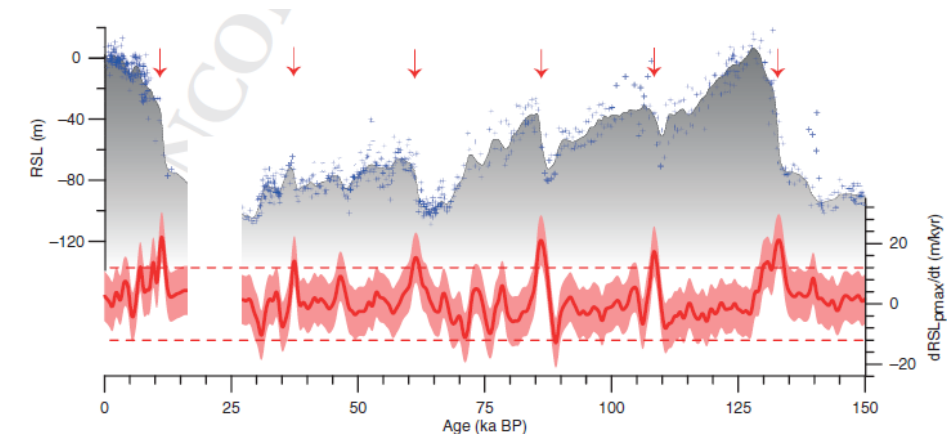
La bibliographie fait également mention de possibles **contaminations anciennes** des aquifères de l'estuaire de la Seine par les eaux marines

Certains aquifères et sédiments anciens, conserveraient donc **une trace durable** des anciennes invasions marines.

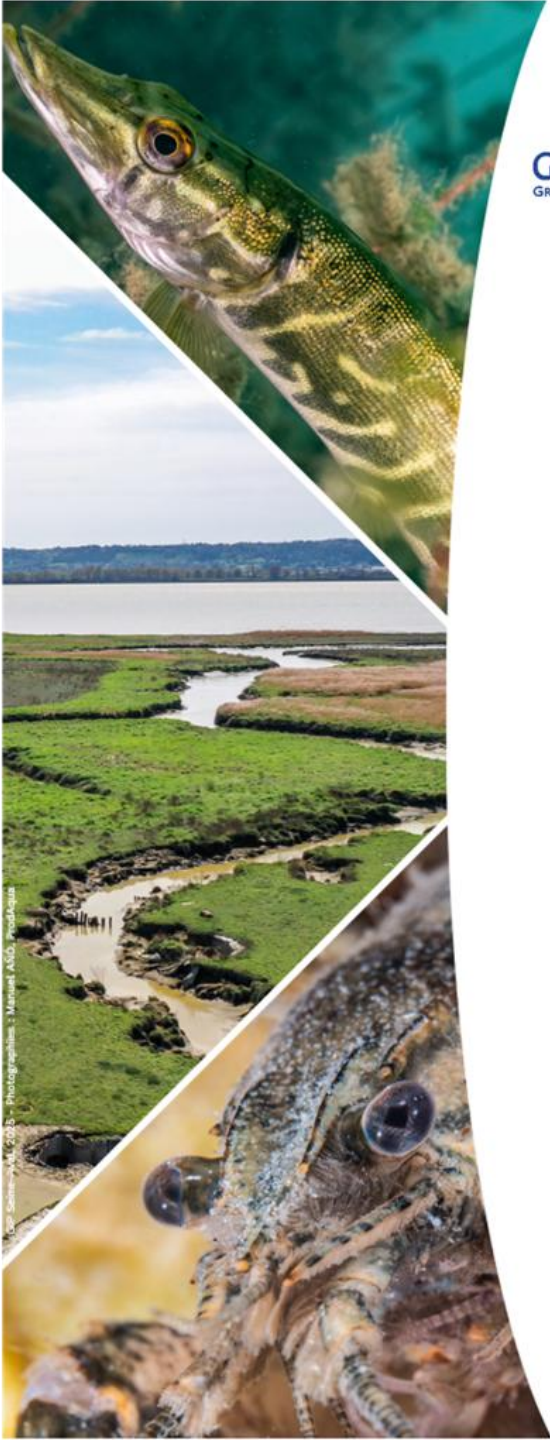
Hypothèse : Ces contaminations passées seraient en lien avec les **mouvements eustatiques** (variation du niv. marin) au cours du Quaternaire.

En particulier : **Albien** (Vuillaume, 1971 et Castany & Mégrien, 1974), **syst alluvionnaire du Marais Vernier** (Frouin et al, 2009)

> Concerne les nappes à faible renouvellement (uniquement ?)



Harff et al., 2017



2- Programme d'étude SALIN'AQUISEINE

2- Programme d'étude SALIN'AQUISEINE

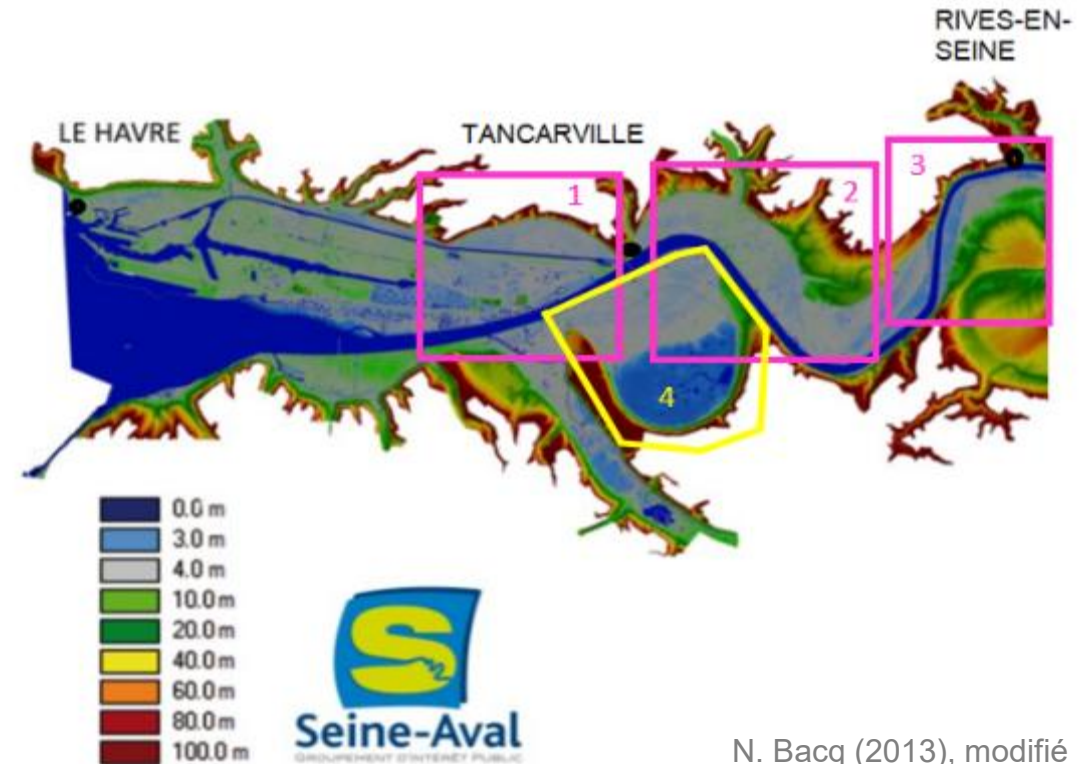
4 Sites d'études dans l'estuaire

1. Le Marais du Hode et réserve naturelle de l'estuaire
2. La ZIP de Port-Jerome
3. Les Marais de Norville et Brotonne
4. Le Marais Vernier et la Basse Risle (Complément)

Ces sites ont été choisis :

- de part l'**existence d'études ou d'investigations** témoignant de la présence d'une salinisation des eaux superficielles ou souterraines,
- Parce que ces sites **disposaient de réseaux de suivi existants** et de piézomètres potentiellement accessibles,
- Parce qu'ils **représentent une diversité de contextes différents** : à la fois sur le plan hydrologique/géologique qu'en termes d'occupation des sols/enjeux.

SITES D'ÉTUDE DU PROJET SALINAQUISEINE



N. Bacq (2013), modifié

2- Programme d'étude SALIN'AQUISEINE

Cofinancement GIPSA/BRGM/Univ. Rouen Normandie

Objectifs généraux :

- Réaliser un état des lieux spatialisé et une caractérisation préliminaire de la dynamique de salinisation dans les aquifères de l'estuaire de la Seine aval
- Proposer un modèle conceptuel hydrogéologique et hydrochimique du processus de salinisation

Objectif final :

Faire des propositions pour **renforcer le suivi de la dynamique et de l'évolution de la salinité** de l'estuaire et **formuler des recommandations pour l'aménagement du territoire.**

Phase 1 : Collecte des données et bancarisation

- Echange avec partenaires techniques et scientifiques
- Compilation et Synthèse des données

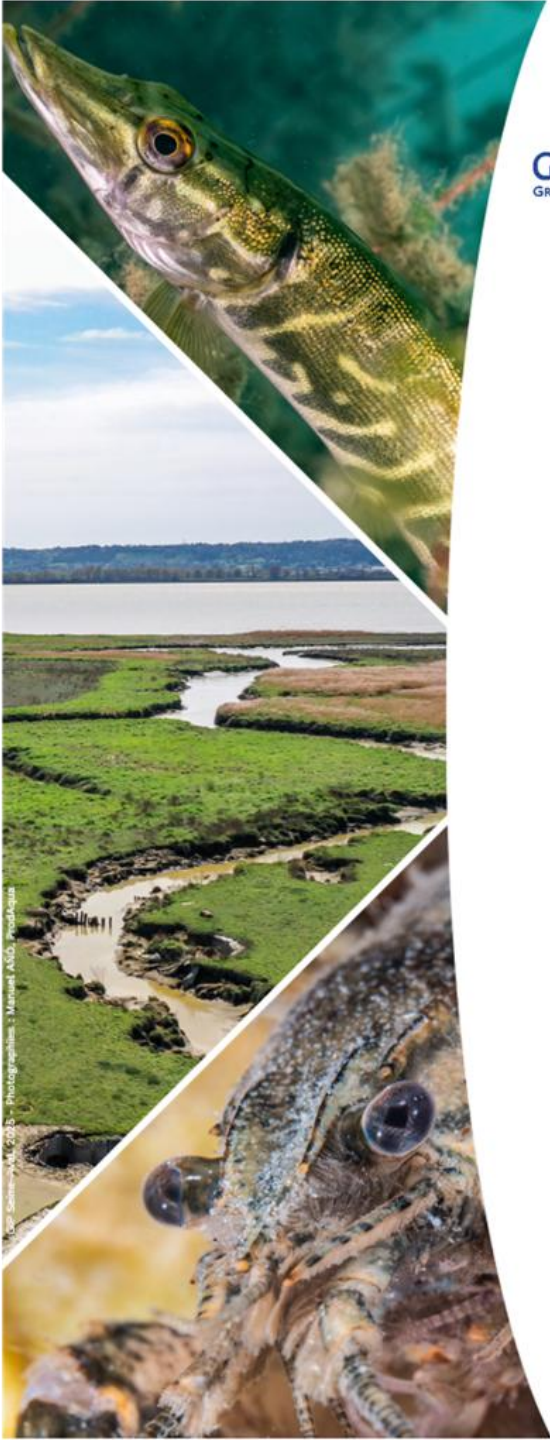
Phase 2 : Campagnes de mesures

- Mesures piézométriques, log Conductivité et Température
- Campagnes géophysiques (ERT, EM)
- Analyses chimiques
- Mise en place de sondes de mesures en continu (suivi dynamique)

Phase 3 : Analyse des données et élaboration d'un schéma conceptuel

- Etat des lieux
- Proposition modèle conceptuel
- Recommandation pour le suivi, proposition pour mise en place d'un réseau
- Capitalisation des résultats, Rapport

3,5 ans (2023-2026)



3a- Mesure de la conductivité des eaux souterraines

3a- Mesures Niveau Température/Conductivité ESOU

Recherche de points de mesure

Résultats : **125 points (EDL 2023)**

Secteur	0-10m*	10-20m	20 - 30m	30- 40 m	40 et plus **	Total
Zone 1	3	8	7	2	-	20
Zone 2	19	11	4	3 (4)	1	39
Zone 3	23	4	7	3	1	38
Zone 4	11	10	3	4	-	28
Total	56	33	21	12 (13)	2	125

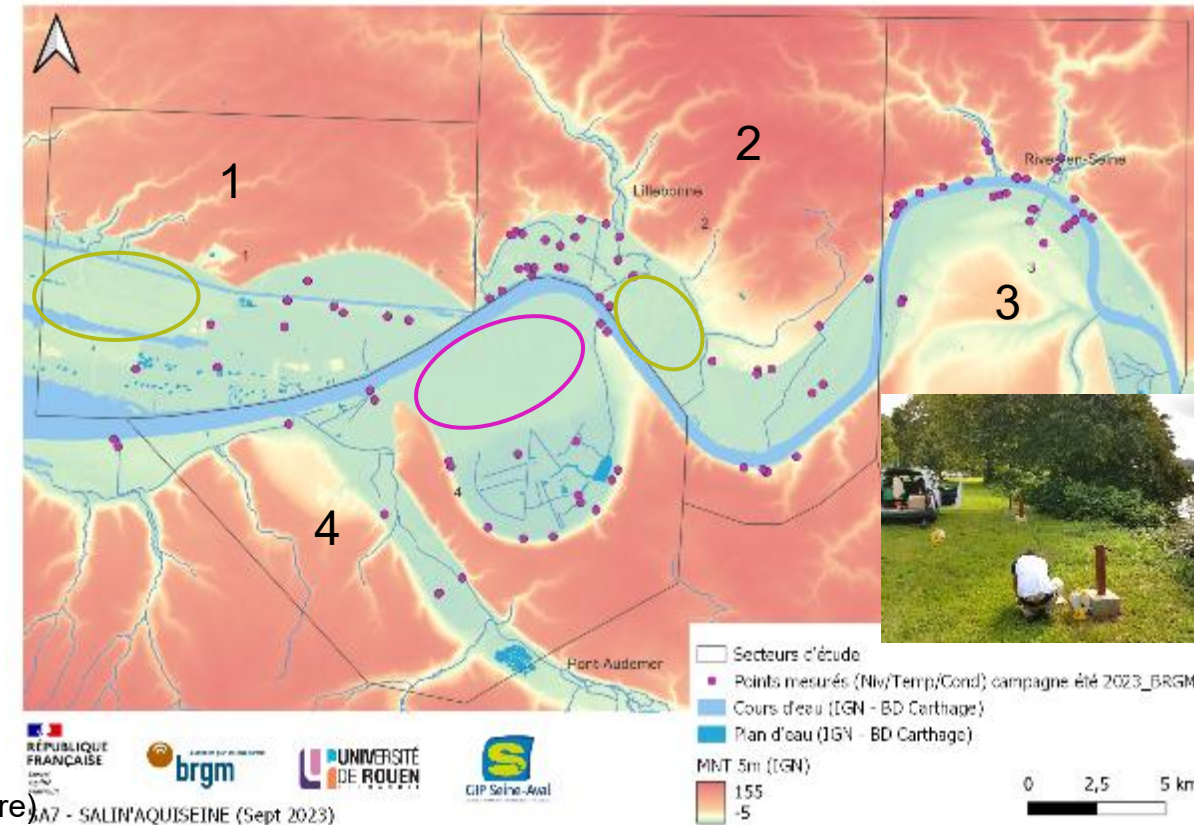
* Ouvrages pour la plupart non soumis au code minier, pas de déclaration

** Ouvrage Albien mesuré

 Densité faible : Accès sites Industriels (Chronophage, Objectif secondaire)

 Densité faible : Peu de points retrouvés ou disponibles

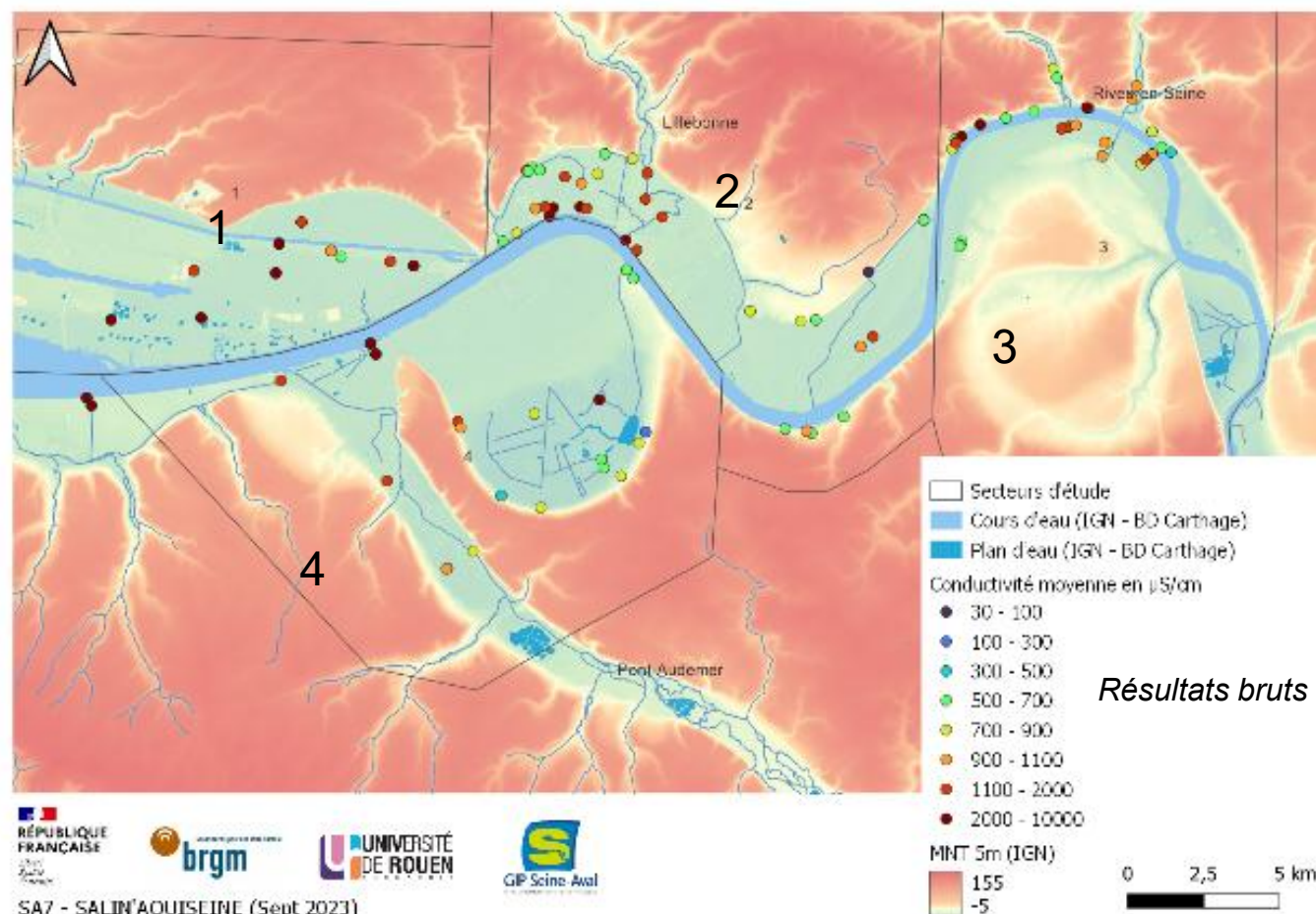
RECHERCHE DE POINTS DE MESURE DES ESOU



**Constat : Peu d'ouvrages profonds disponibles, bcp ne sont pas déclarés (sans coupe géologique et technique)
Durée de vie « courte » des ouvrages (colmatage, rebouchage, abandon, destruction)**

3a- Mesures Niveau Température/Conductivité ESOU

Campagne de mesures ponctuelles – été 2023



Commentaire généraux :

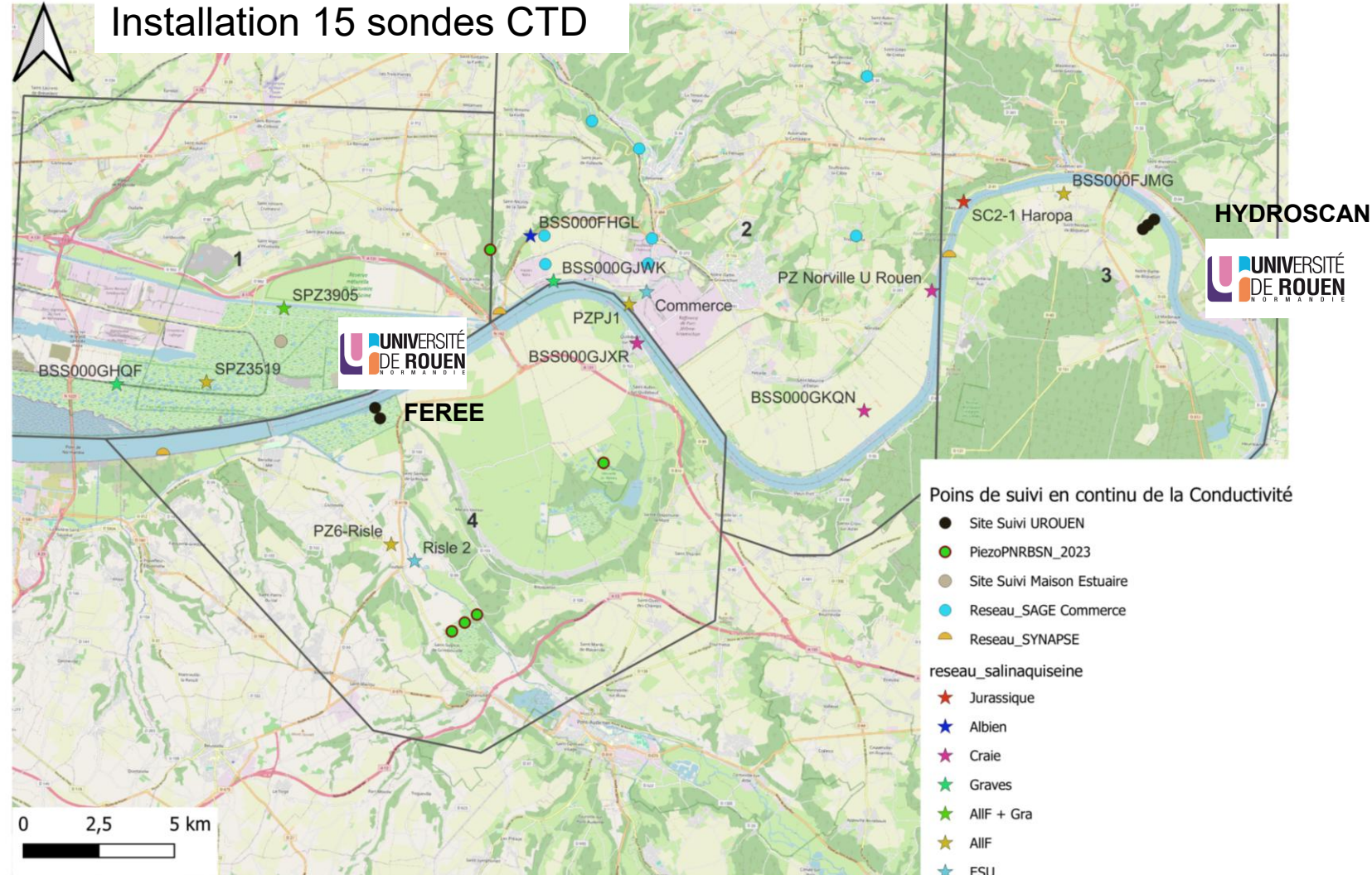
- Valeurs élevées à l'aval
- Valeurs assez hétérogènes sur Marais-Vernier, depuis confirmées par étude PNR
- Valeurs importantes sur zone 2 Port-Jerôme
- « Surprise » sur la **boucle de Brotonne** avec valeurs assez importantes autour de Rives en Seine et Villequiers

Données cohérentes avec les observations sur les eaux de surface (SYNAPSES) et BIBLIO

- Résultats encourageants, confirment l'intérêt de la problématique.
- Base pour choix pts pour instrumentation et mesures hydrochimiques

3a- Stratégie de suivi des ESOU/ESU

Importance des sites Feree et Hydroscan (U.Rouen)



Assurer un suivi représentatif des eaux souterraines pendant 1 à 2 cycles hydro :

- sur les 4 sites entre amont et aval
- dans les différents aquifères : alluvions fines, alluvions grossières, craie, albien et jurassique

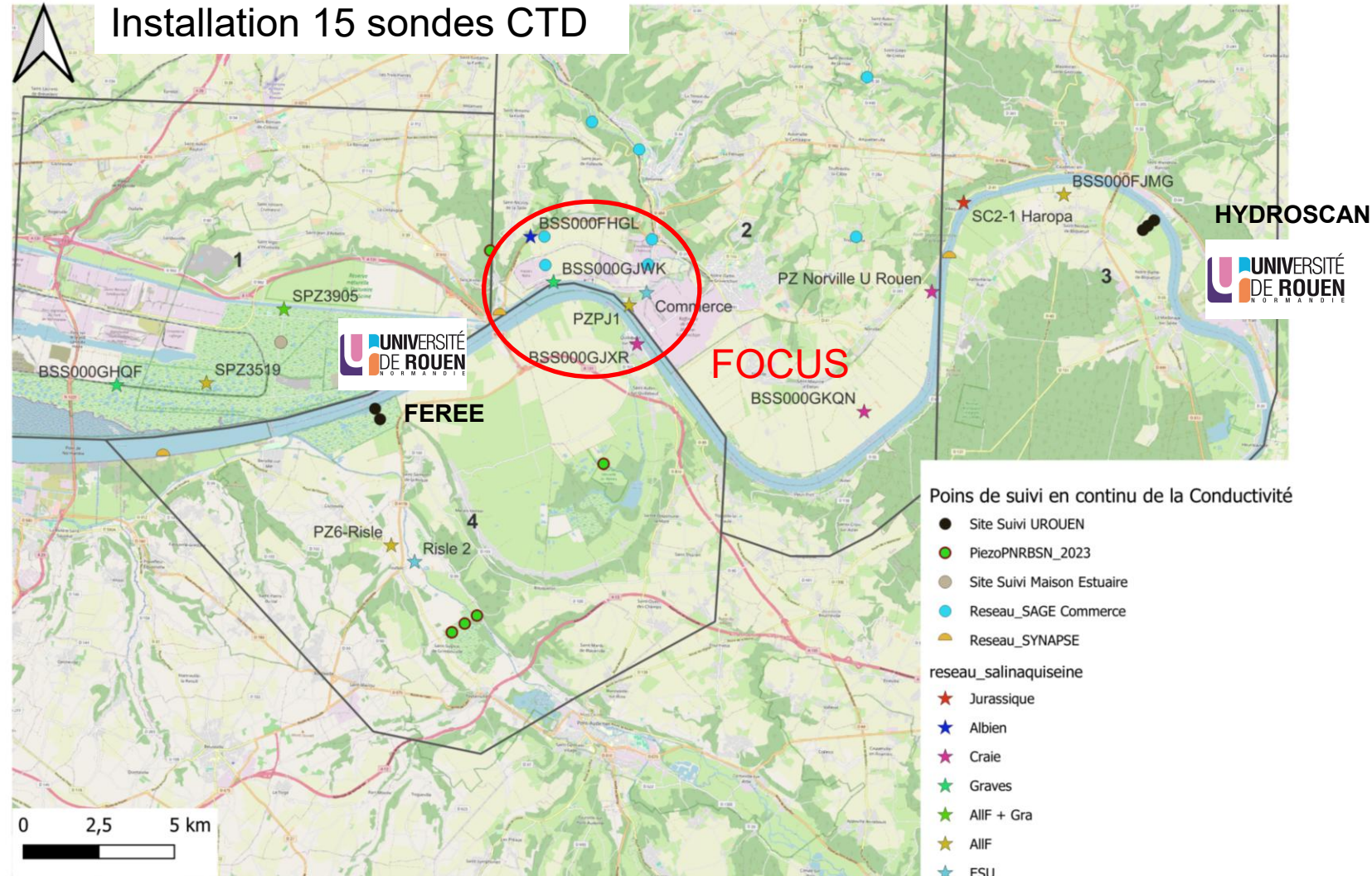
Assurer un complément sur les eaux de surface : Commerce et Risle



Illustration : capteur autonome Solinst Levellogger LTC

3a- Stratégie de suivi des ESOU/ESU

Importance des sites Feree et Hydroscan (U.Rouen)



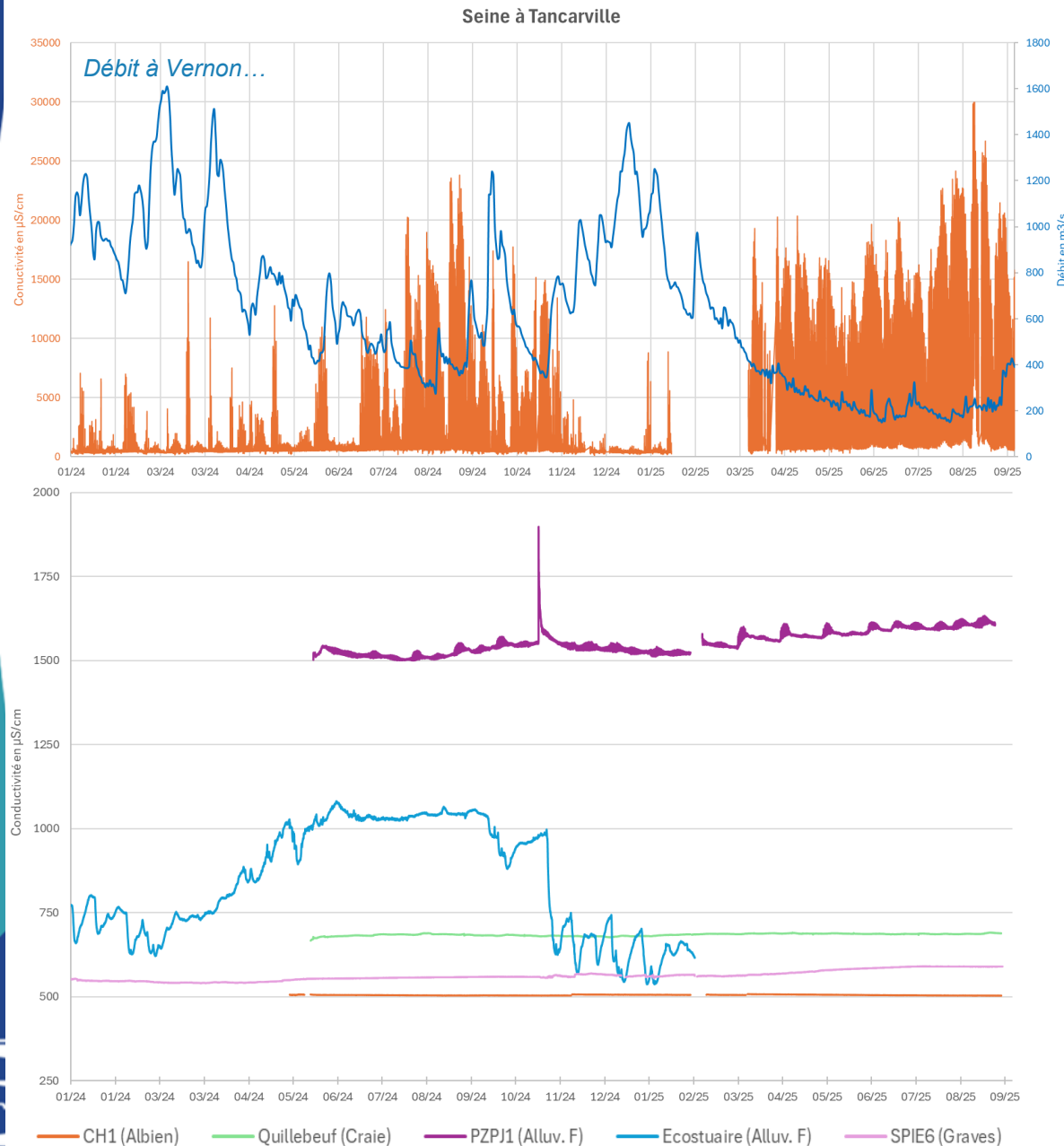
Assurer un suivi représentatif des eaux souterraines pendant 1 à 2 cycles hydro :

- sur les 4 sites entre amont et aval
- dans les différents aquifères : alluvions fines, alluvions grossières, craie, albien et jurassique

Assurer un complément sur les eaux de surface : Commerce et Risle



Illustration : capteur autonome Solinst Levellogger LTC



Sur le secteur de Port Jerome, les ESOU des **alluvions fines** montrent des variations + **importantes** de la conductivité (amplitude et fréquence)

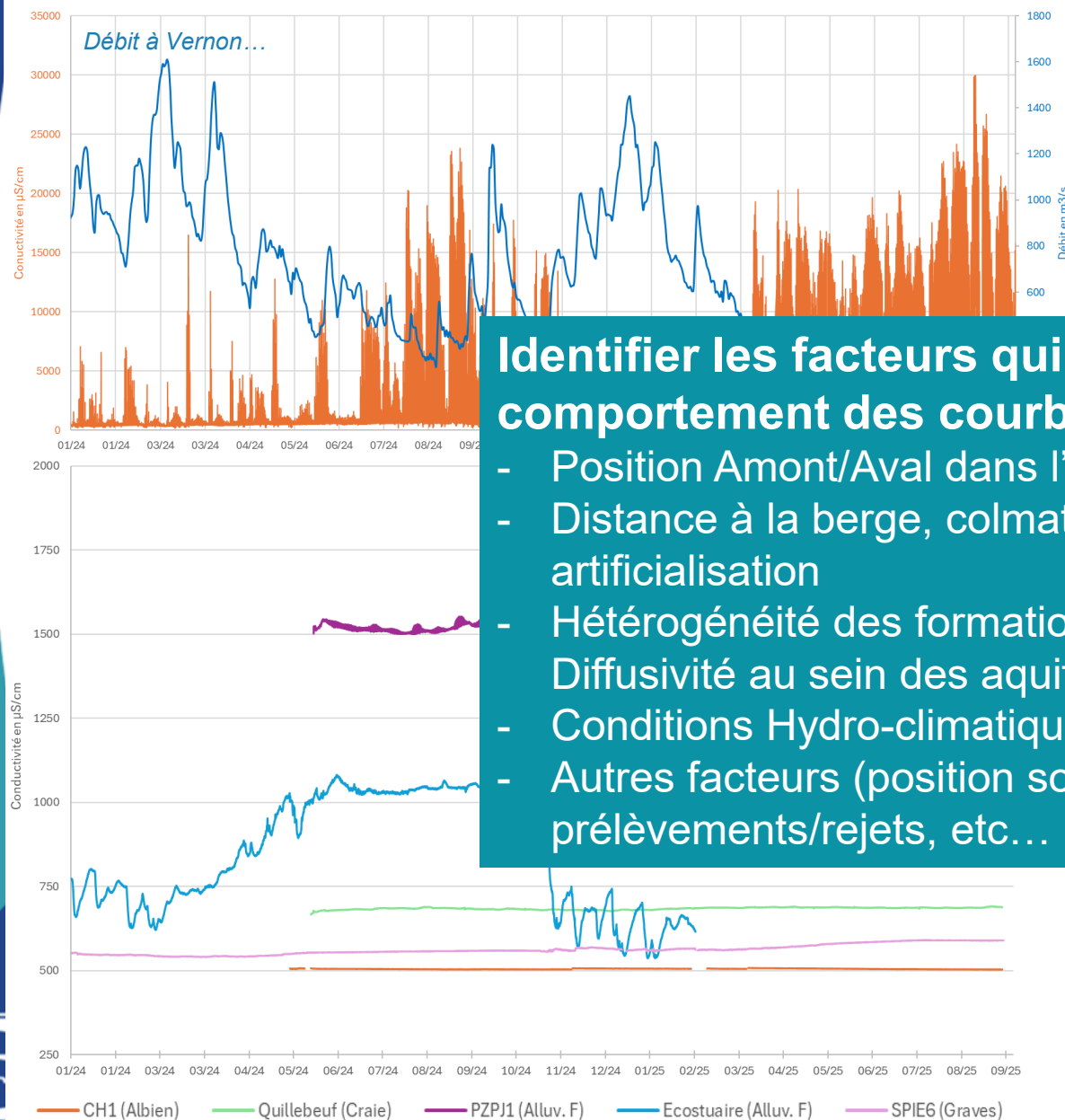
Les **graves de fond et la craie** montrent des variations + **faibles** de la conductivité (saisonnières à faible amplitude)

Albien stable/constant (décharge artésienne)

Commerce (ESU) impacté par une hausse sensible en fin d'été 2024 :

- apports du BV = lessivages ?
- remontée eaux Seine ?

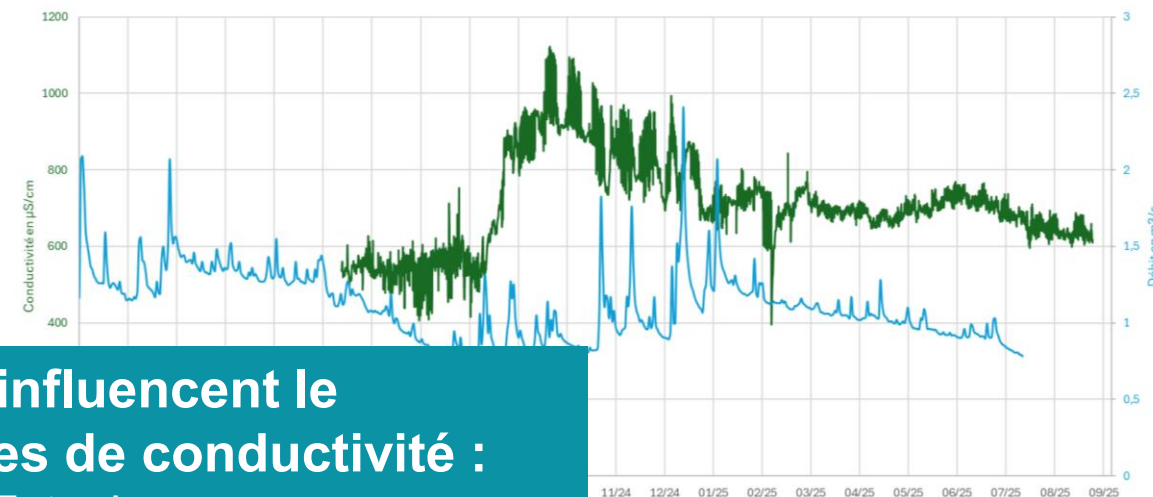
Seine à Tancarville



Identifier les facteurs qui influencent le comportement des courbes de conductivité :

- Position Amont/Aval dans l'Estuaire
- Distance à la berge, colmatage fond et berges, artificialisation
- Hétérogénéité des formations géologiques et Diffusivité au sein des aquifères
- Conditions Hydro-climatiques et Océaniques
- Autres facteurs (position sonde/crépines, proximité prélèvements/rejets, etc...)

Commerce à Lillebonne



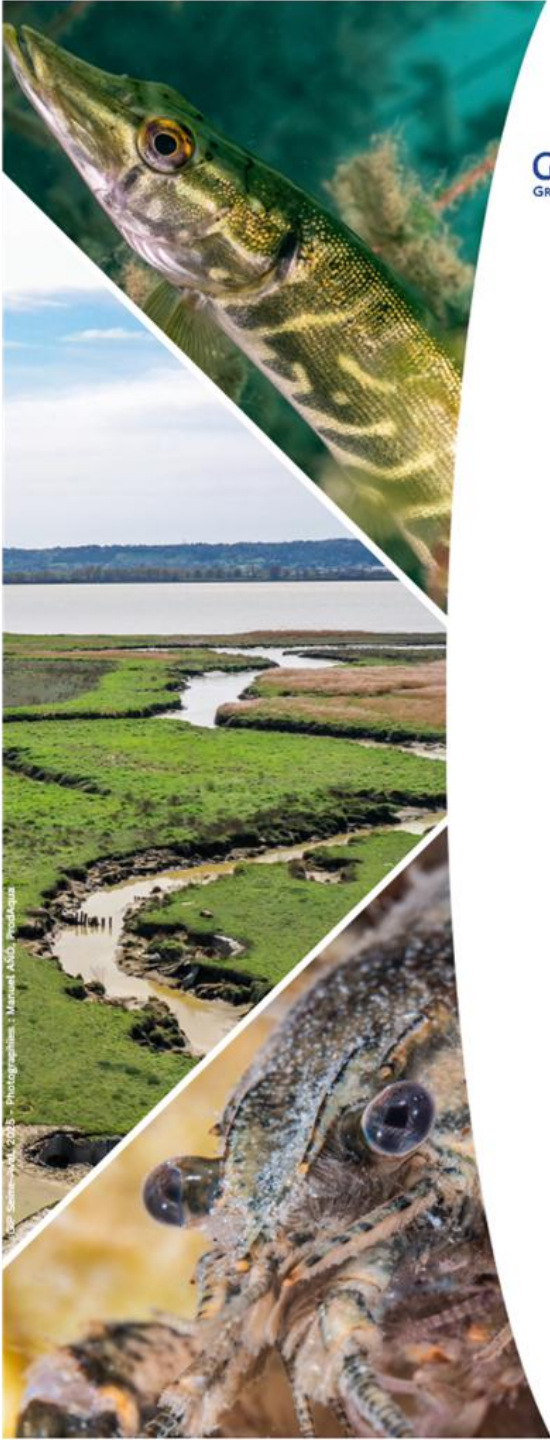
ne, les ESOU des **alluvions**
s + **importantes** de la
équence)

laie montrent des variations +
isonnières à faible amplitude)

Albien stable/constant (charge artésienne)

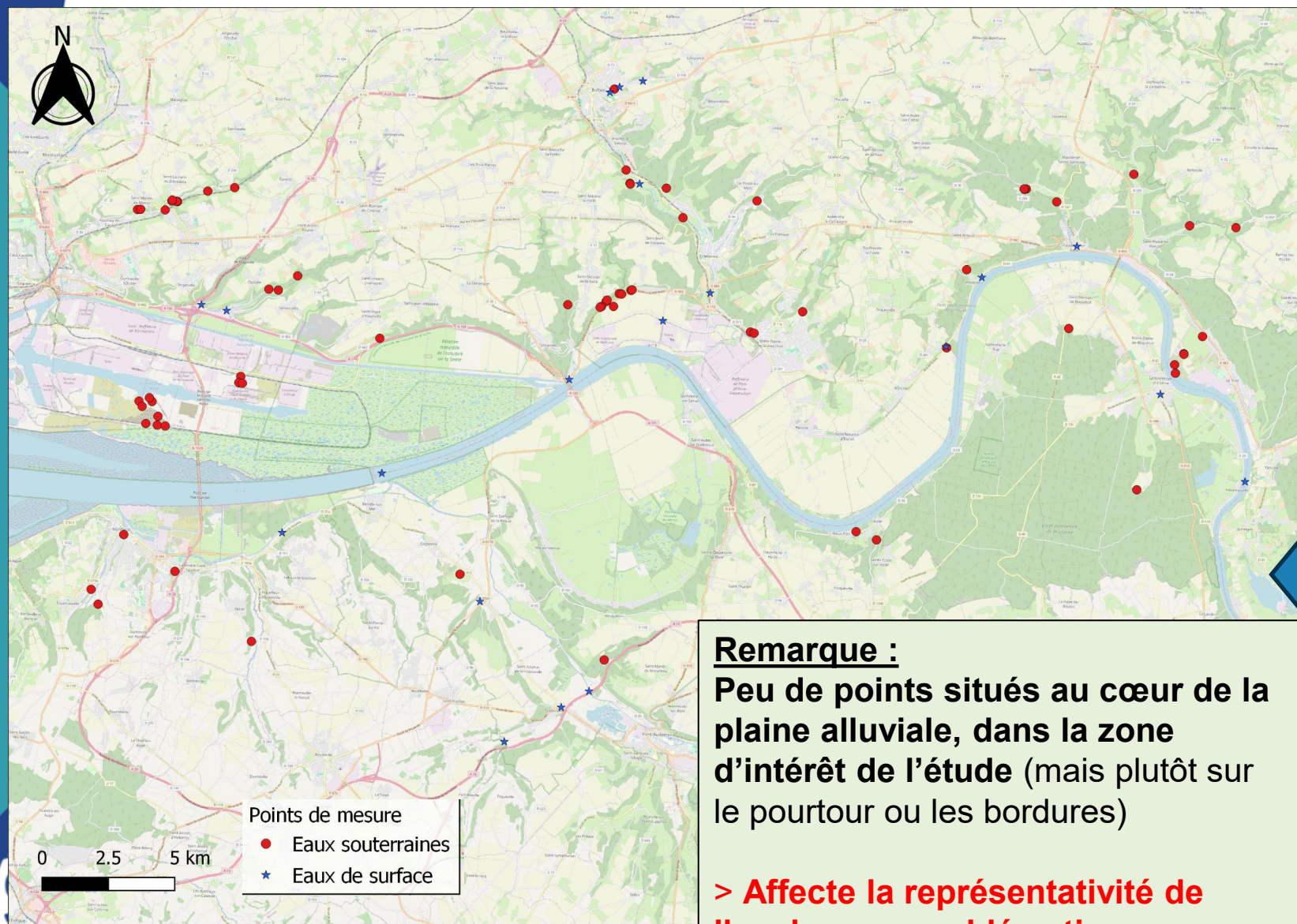
Commerce (ESU) impacté par une hausse sensible en fin d'été 2024 :

- apports du BV = lessivages ?
- remontée eaux Seine ?



3b- Hydrochimie

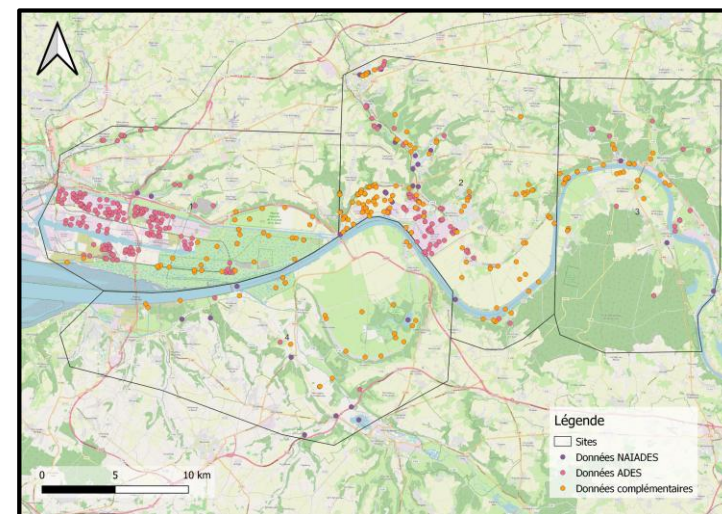
Analyse préliminaire de la BD qualité des eaux souterraines (données disponibles)



Remarque :

Peu de points situés au cœur de la plaine alluviale, dans la zone d'intérêt de l'étude (mais plutôt sur le pourtour ou les bordures)

> Affecte la représentativité de l'analyse vs problématique



Données disponibles :

290 pts ESO (ADES) **572 pts avec données**
40 pts ESU (NAIADES)
+ 242 pts complémentaires (données ponctuelles)

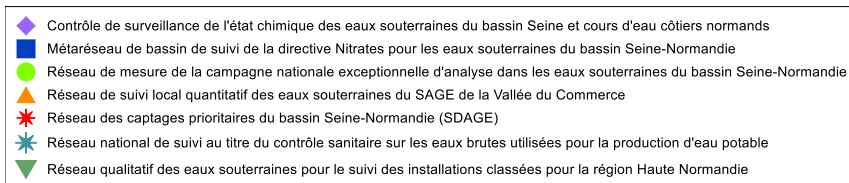
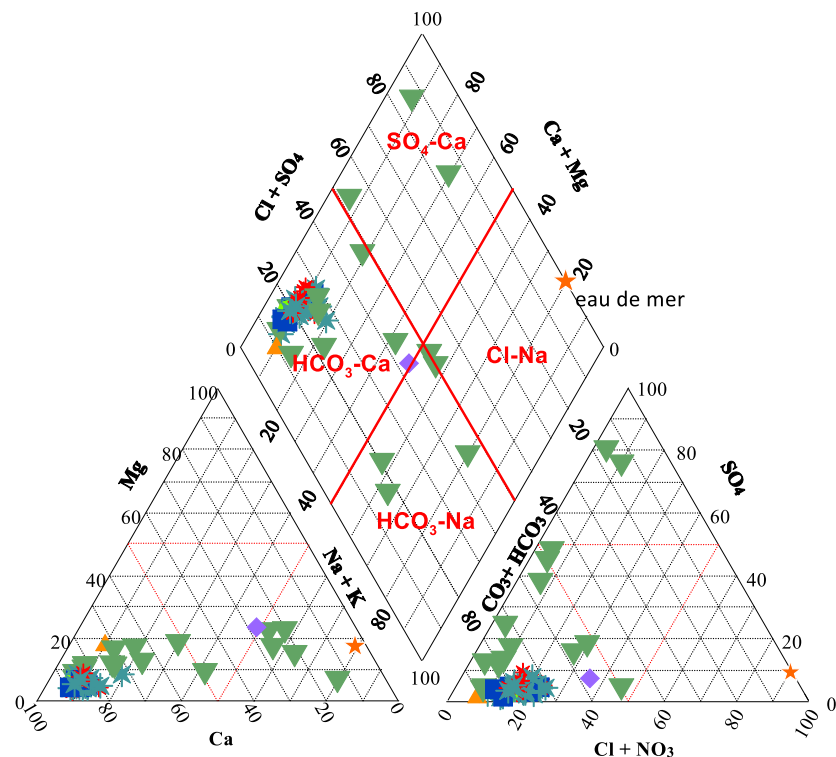
Données retenues :

89 pts (ESU+ESO) avec données suffisantes (ions majeurs et mineurs) = 15% Total

Attention : fréquence de mesure et longueur de chronique des données de qualité sont très variables

> Difficile d'utiliser les données pour déterminer des tendances d'évolution.

Analyse préliminaire de la BD qualité des eaux souterraines (données disponibles)

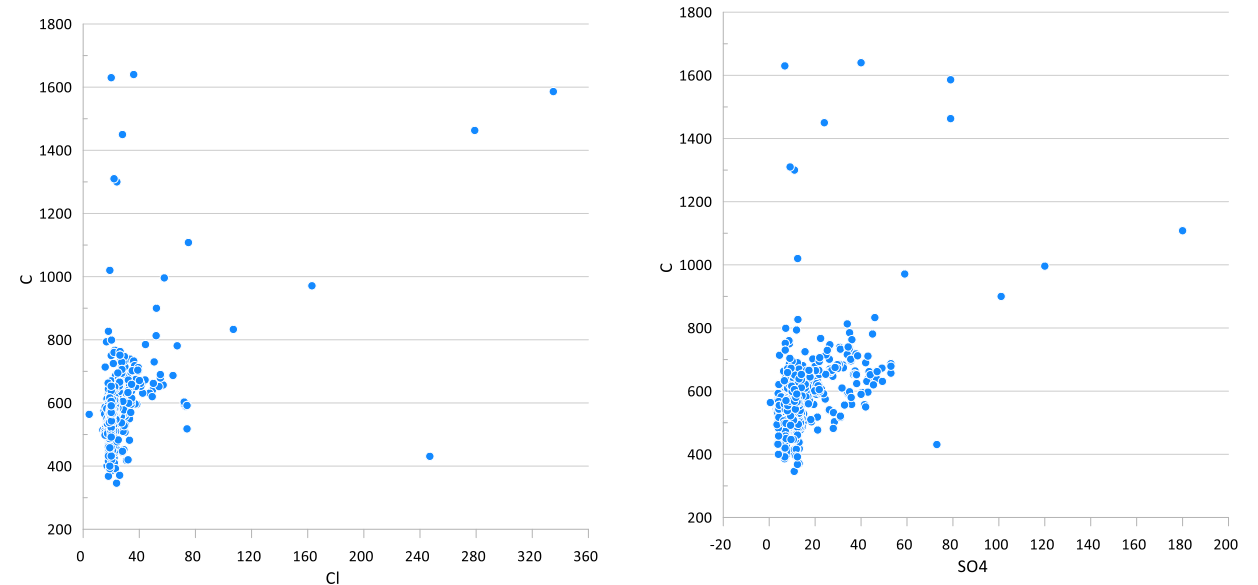
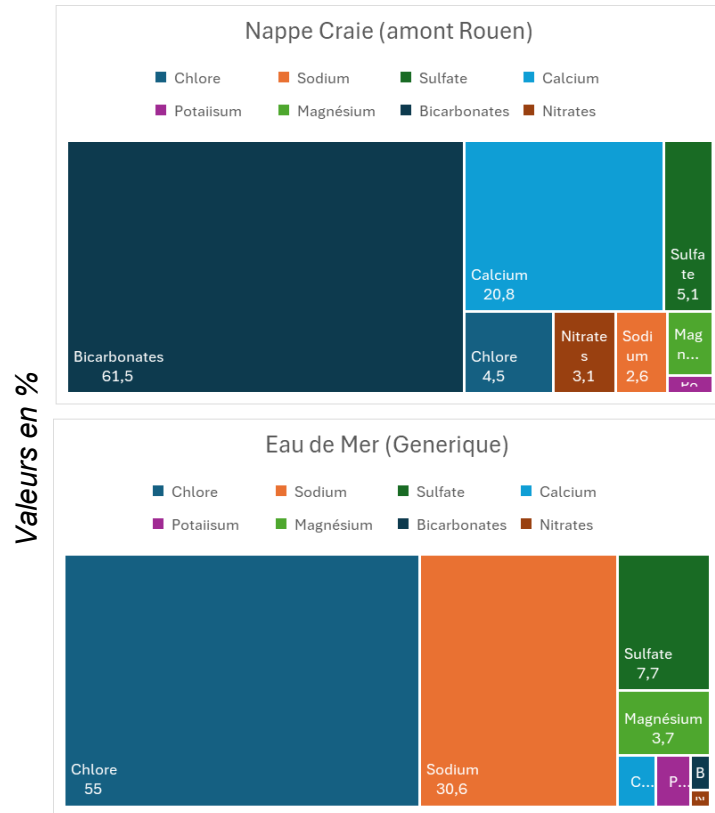


Eléments à retenir de l'analyse préliminaire des données de qualité des eaux de l'estuaire de Seine issus de l'échantillons de la BD qualité :

- La **salinité de type eau de mer** joue un rôle **faible** sur la **variabilité chimique** des **eaux souterraines et de surface** (points éloignés du pôle eau de mer)
 - Quelques points d'eau souterraine (non ICPE) montrent un enrichissement Na et Cl de type eau de mer (**Albien et alluvions à St Nicolas de la Taille**)
 - Pas d'augmentation significative des concentrations en Na ou Cl dans le temps
- **Forte influence de la contamination anthropique**
= influence des rejets divers (urbains, agricoles et industriels) et pollutions industrielles.

En conclusion : Les **ions majeurs et mineurs ne sont pas suffisants** pour distinguer avec certitude ce qui relève d'activités humaines ou de processus naturels (échange eau de mer, échanges eau-roche).

Analyse préliminaire de la BD qualité des eaux souterraines



ARCHTUNG ! La conductivité des eaux en domaine estuarien n'est pas directement liée à la salinité de l'eau de mer. il y a d'autres sources riches en sels (contamination anthropique ou naturelle ?)

Lesson Learned :

La **mesure de conductivité** est adaptée en milieu littoral pour caractériser la salinité. Mais **en zone de transition estuarienne elle est le marqueur d'une « minéralisation » dont l'origine peut-être diverse :**

Salinisation marine (actuelle ou ancienne), rejets/contamination anthropique, transformation matière organique, échange eau-roche et ph. oxydo-reduction en particulier dans les nappes captives,...

Que mesurent nos capteurs dans ce contexte ?

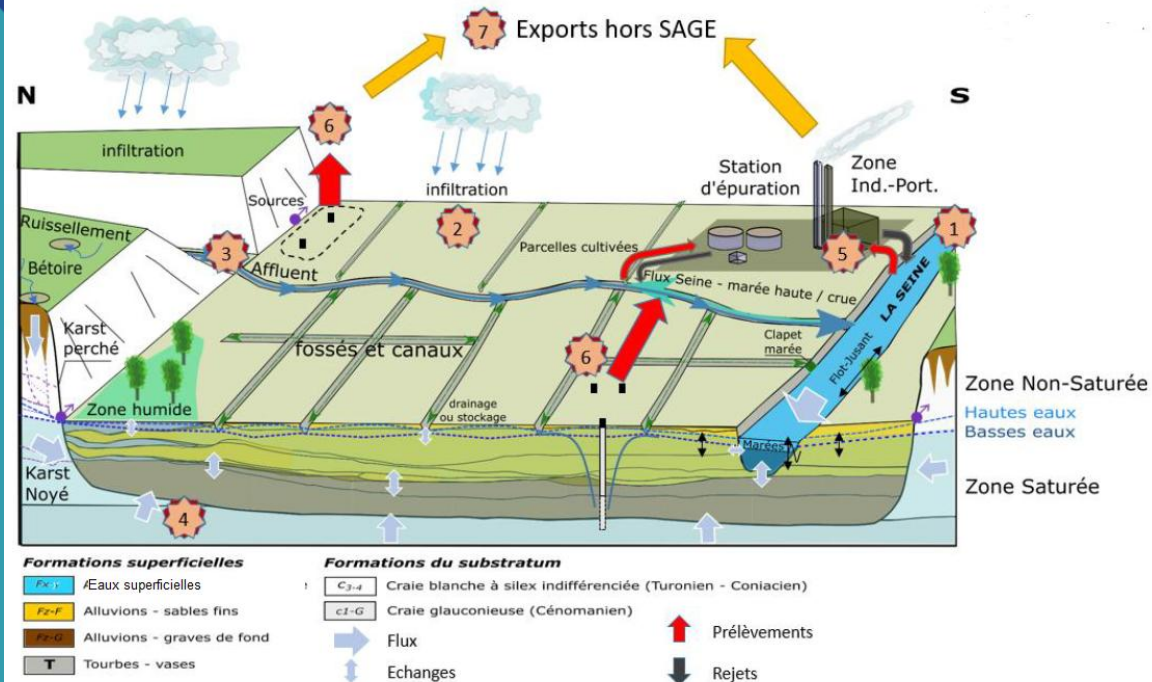


Illustration : capteur autonome Solinst Levellogger LTC

?

> mesures éléments traces et isotopes nécessaires

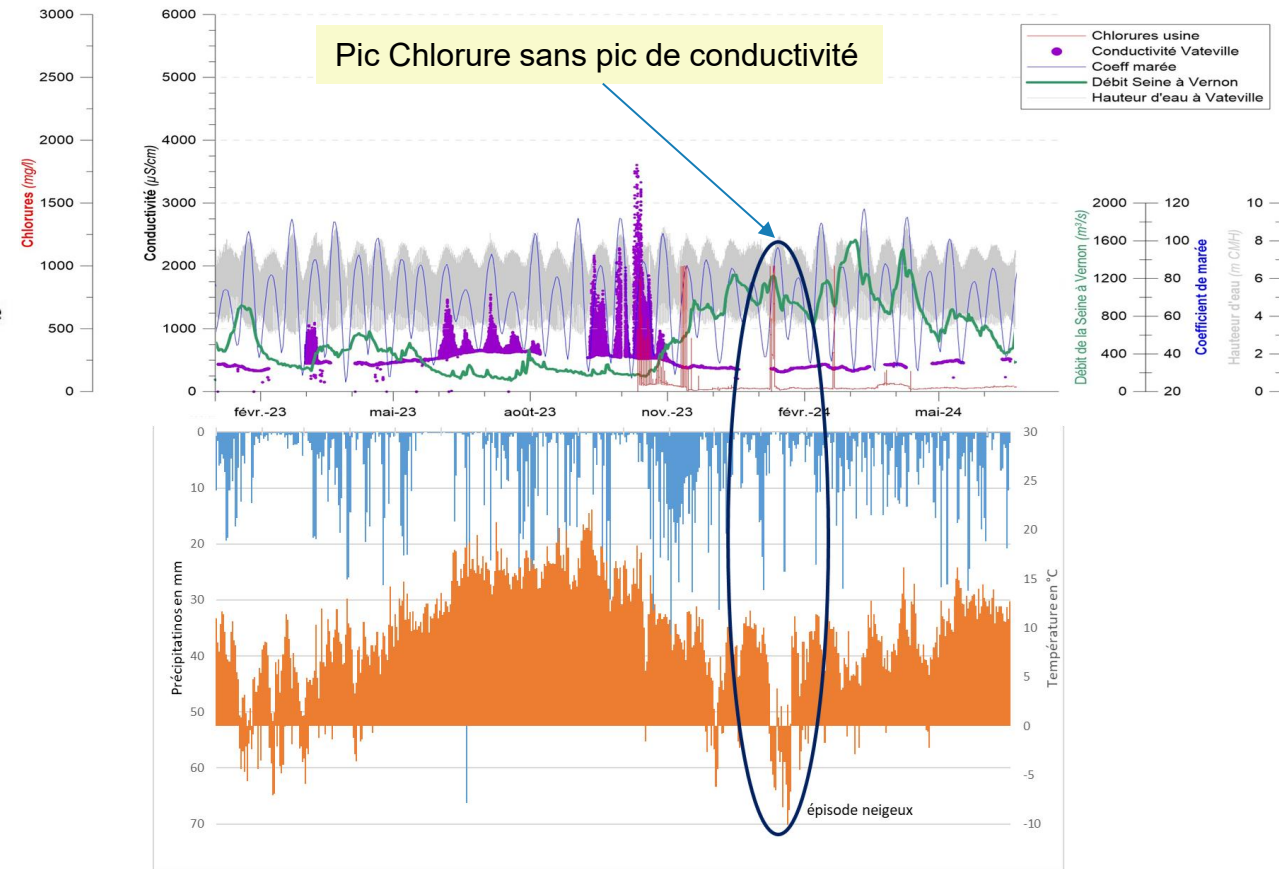
Milieux interconnectés, fortement anthropisés



Source : Étude SAGE Commerce, Rapport BRGM/RP-69580-FR

- Apports latéraux directs des effluents EP/EU urbains, agricoles et industriels sur la qualité des eaux de la Seine
- Apports des affluents
- Apports amont estuaire Seine

Exemple : effet des salages hivernaux sur la qualité des eaux de la Seine (à confirmer ?)



Suivi chlorure usine AEI de Norville, données SAUR et GIP Seine-Aval (2024)



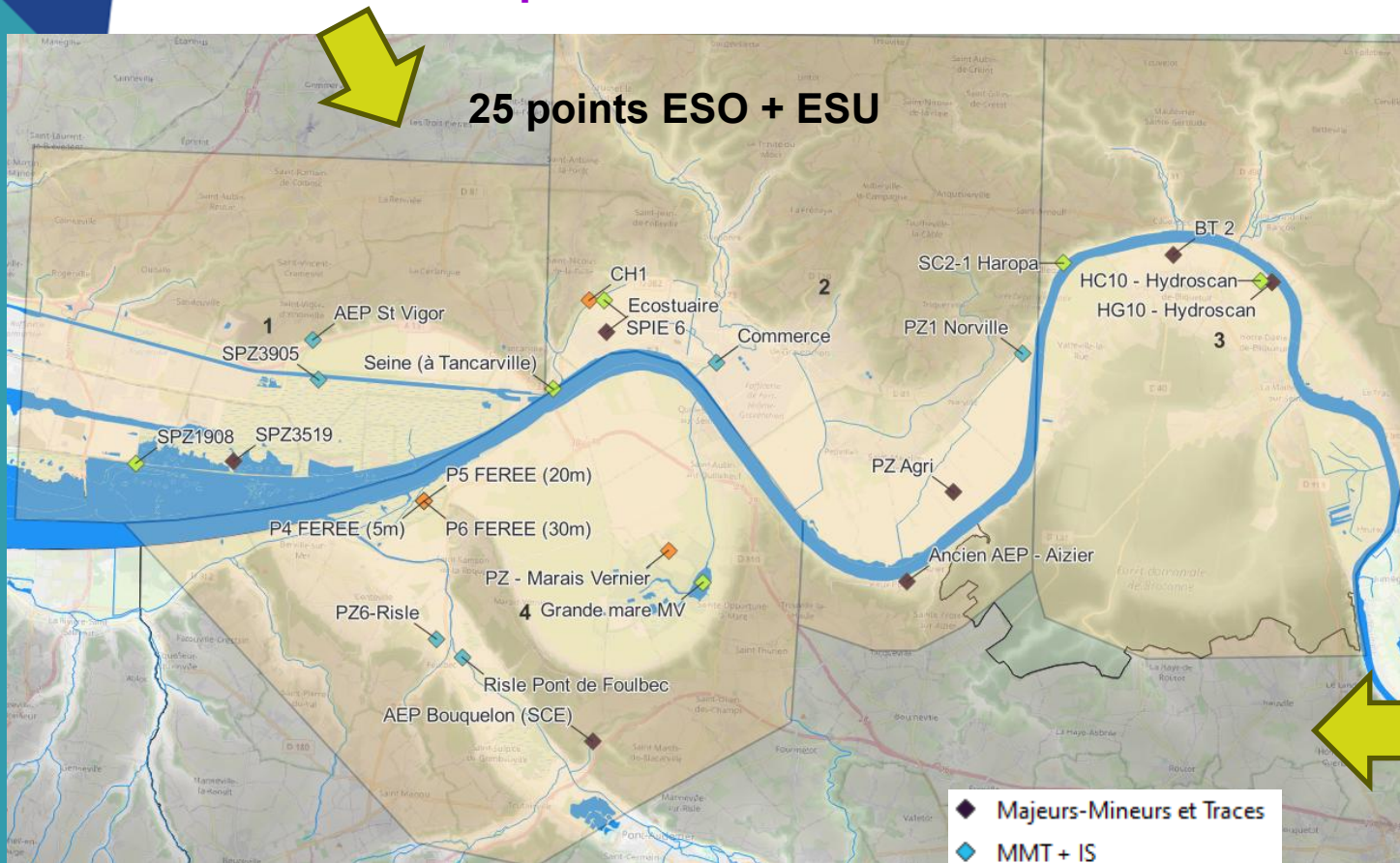
Pour aller plus loin : besoin de mesurer des éléments complémentaires

Mesures sur pts au cœur de la zone d'intérêt



Paramètres mesurés lors de 2 campagnes Hautes Eaux /Basses Eaux :

- Ions majeurs et mineurs
- Traces : Fer, Mn, Al, Sr, Li+, Br, F, Iodures
- Marqueurs de dégradation des écosystèmes : COD, Silice, PO4, Bore, Sulfates, Nitrates, Nitrites, Ammonium



Fev. 2025 (HE)
Septembre 2025 (BE)

> Données tout juste livrées par le Labo

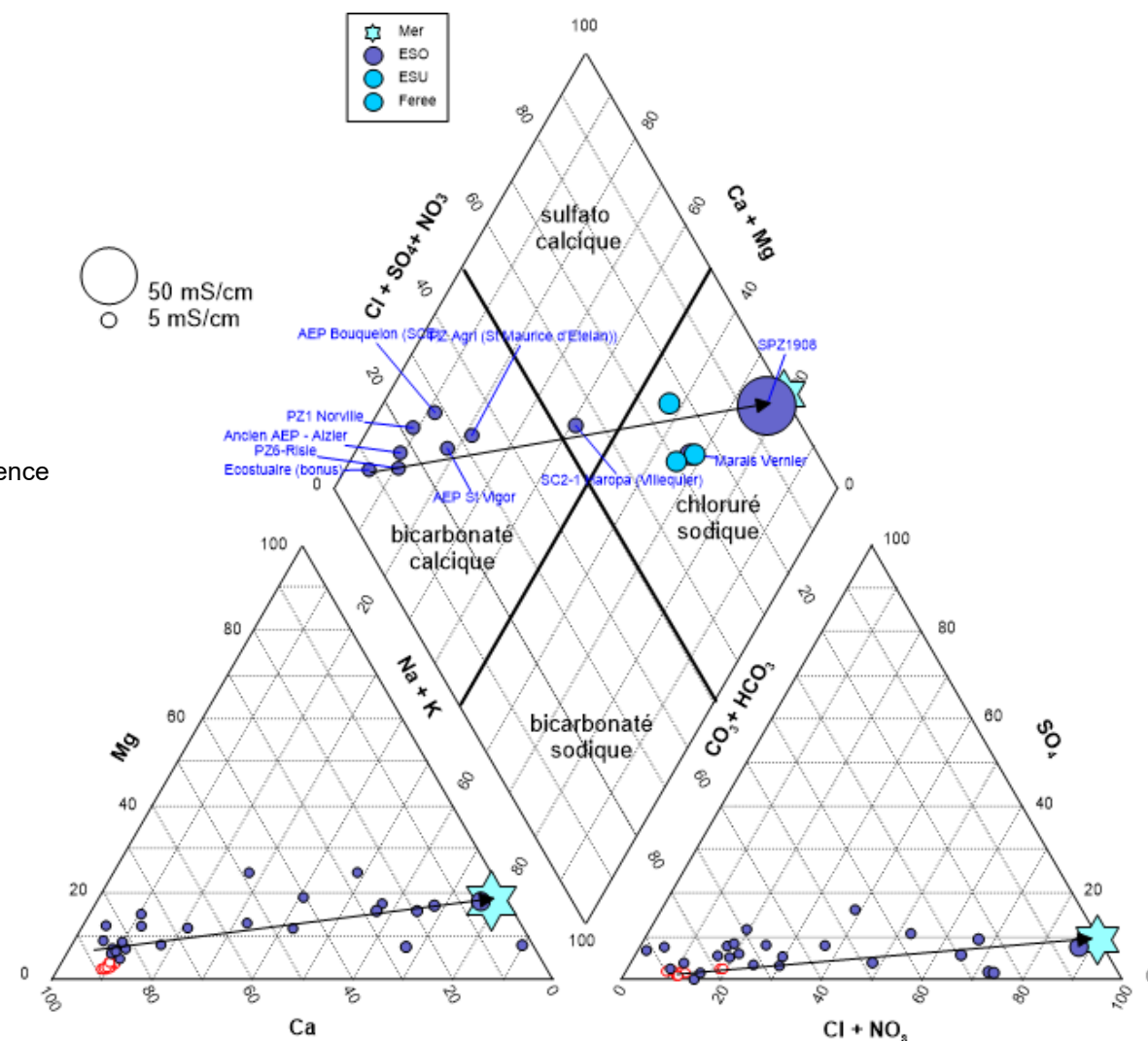
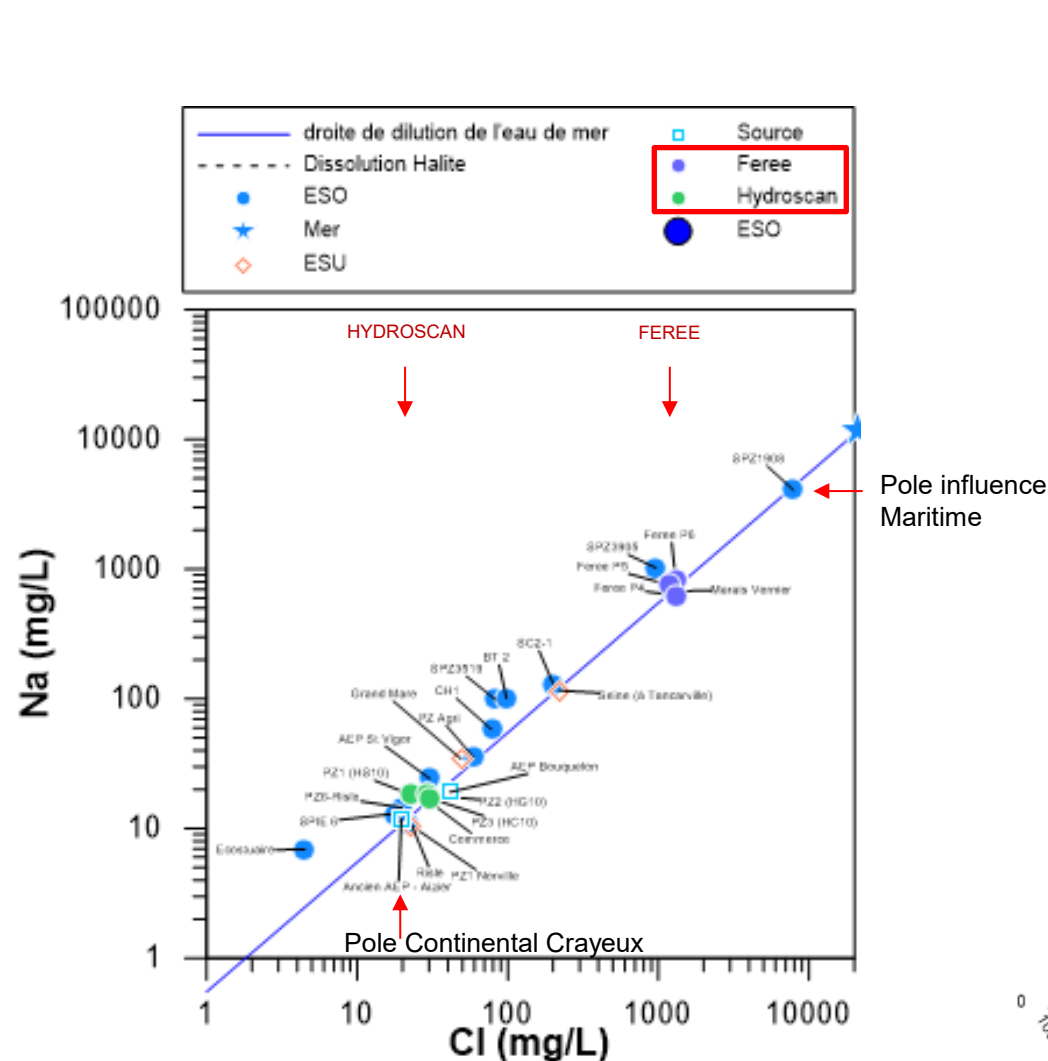
Utilisation d'éléments traces et des isotopes stables (O et H) + isotopes strontium pour essayer de **déterminer l'origine naturelle ou anthropique de la minéralisation**

Sur quelques points Datation avec Carbone 14 et Tritium pour caractériser si le **processus peut être actuel ou ancien**

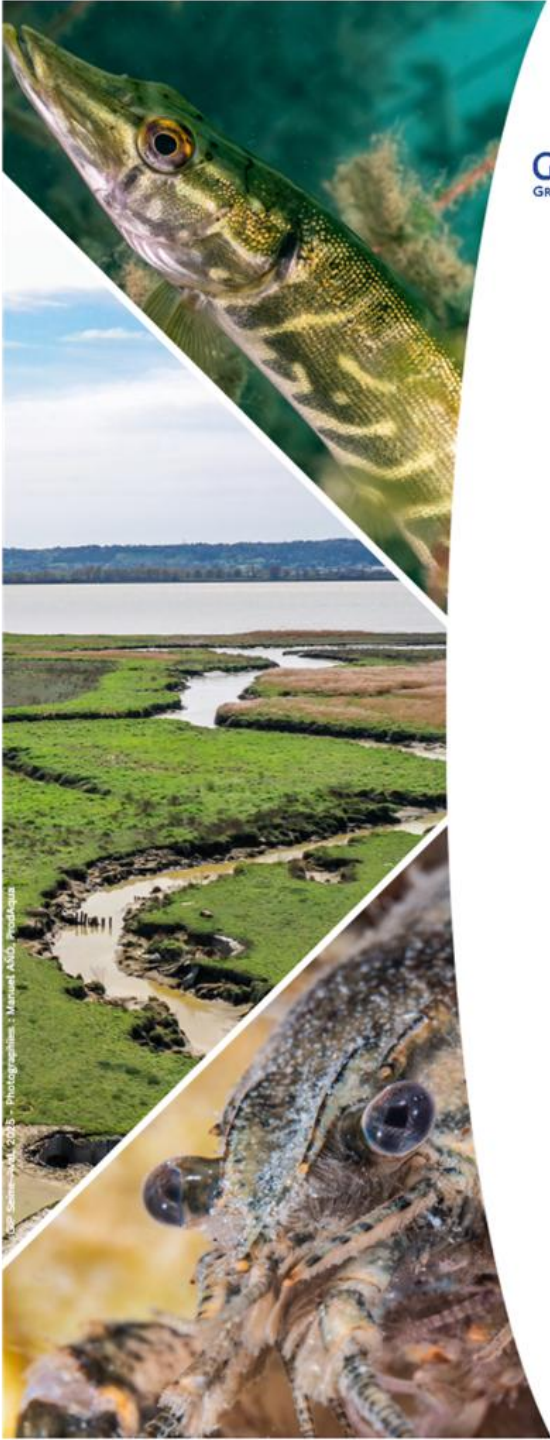
Autant que possible choix de point cohérent avec les suivis CTD opérés sur les différents sites.



1^{er} informations suite campagne de Hautes-Eaux 2025



Enrichissement progressif entre un pôle eau douce et marin dans l'estuaire
 > Anomalie Marais Vernier, Albien et Boucle de Brotonne/Villequier confirmée



3c- Géophysique

Campagne de mesures de le long de la conductivité électrique sur 5 sites

2 Dispositifs :

- mesures électromagnétique horizontale et verticale à l'aide d'un EM34
- Tomographie de la Résistivité Électrique, Syscal (64 électrodes)

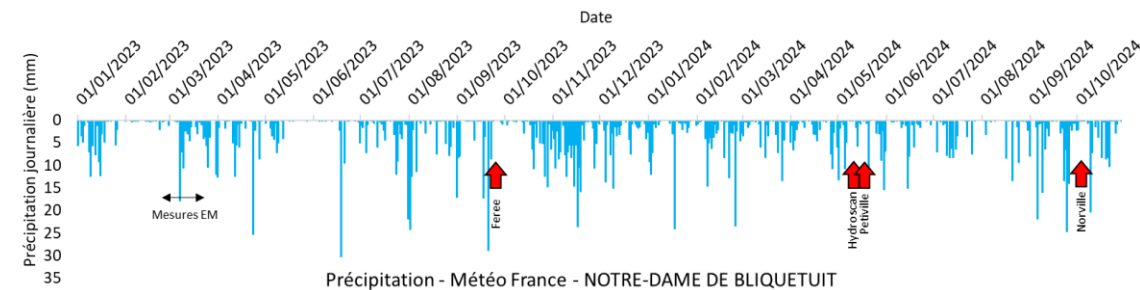
● EM + ERT
● EM

Objectif général :

Apprécier la conductivité électrique du sous-sol le long de profils (2D) sécants à l'axe Seine.

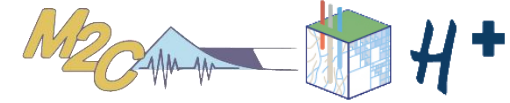
Identifier les secteurs présentant des anomalies potentiellement imputables à la salinité
Apprécier leur diffusion dans les différents compartiments aquifères

PROFILS EM + ERT RÉALISÉS (LABO M2C)

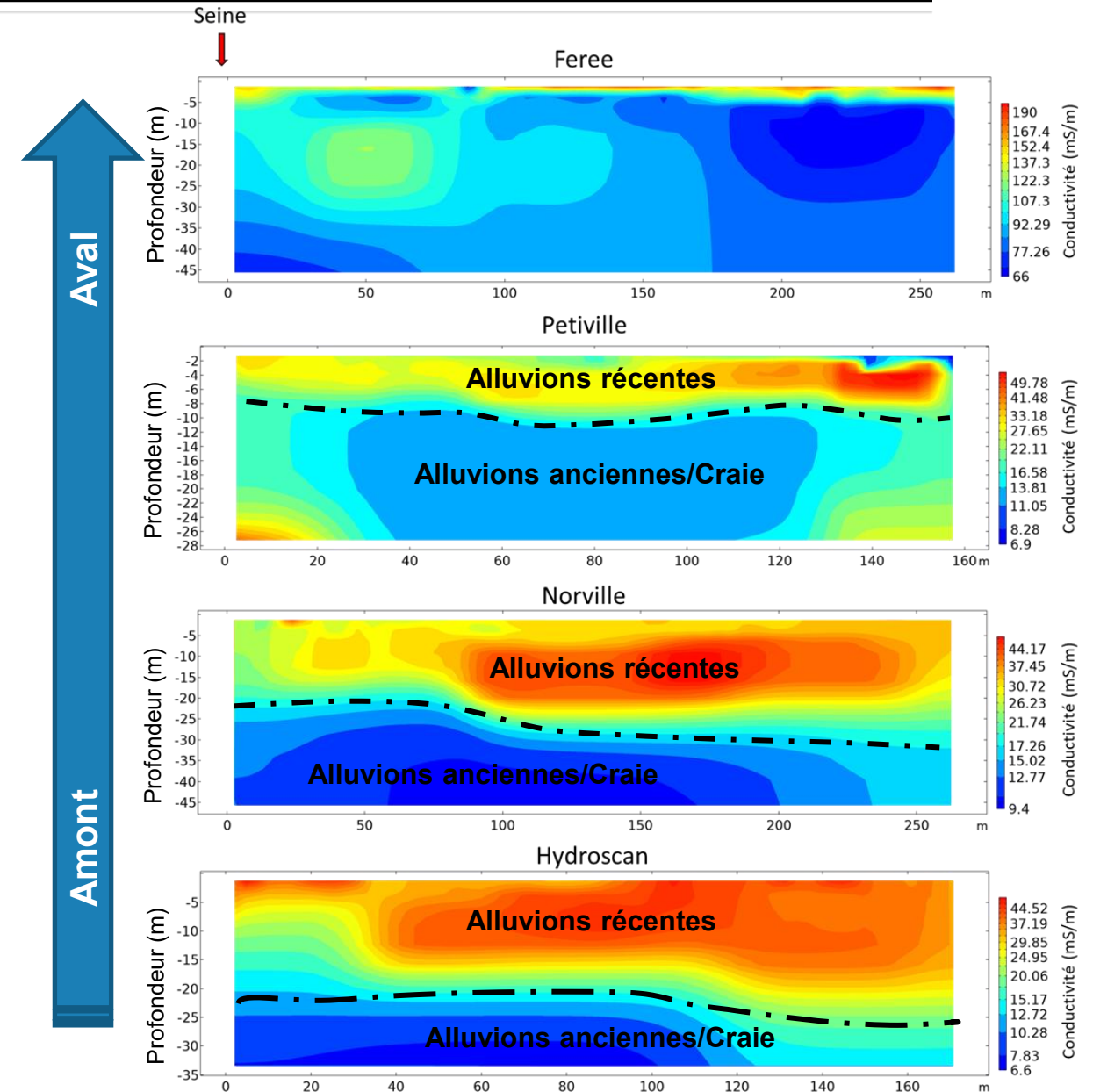


Mise en œuvre des investigations en 2023-2024

Résultats des profils de Résistivité électrique



- Les dispositifs ERT et EM distinguent **deux couches principales** à faible profondeur (jusqu'à 30 m), à savoir les **alluvions récentes** (silts) avec une **conductivité électrique plus élevée**, et les **alluvions anciennes** (sables grossiers et des graviers) + **craie altérée** avec une **conductivité plus faible**.
- Une **augmentation significative** de la **conductivité électrique** des deux couches au fur et à mesure qu'elles **s'approchent de l'aval** de l'estuaire = gradient.
- Le site de **Feree**, situé dans la zone estuarienne, présente un **comportement différent** des autres sites en amont, car la conductivité électrique élevée du milieu rend difficile la distinction des deux couches observées sur les autres sites. Ceci est dû à l'**intrusion d'eau salée**.



Conclusions sur le volet géophysique

- Les méthodes géophysiques au sol (EM+ERT) se révèlent efficaces pour aider à l'identification et à cartographier les interfaces eau douce/eau salée des formations aquifères de l'estuaire de la Seine.

>> Cependant l'information doit être confrontée à d'autres mesures physiques en forage (diagraphies résistivité et conductivité eau) et hydrochimiques pour « calibrer » l'information

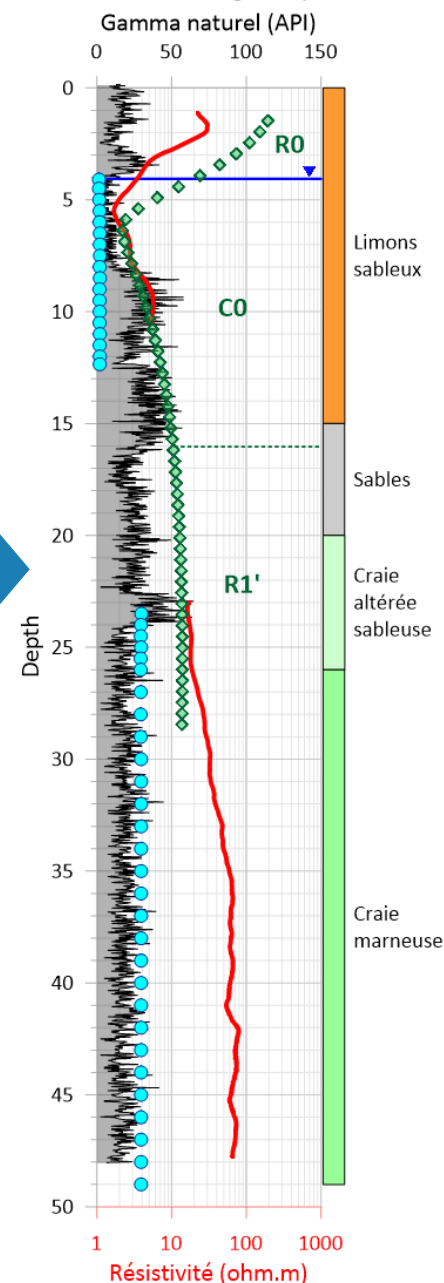
>> Les dispositifs déployés actuellement pour SALINAQUISEINE ne sont pas suffisants pour permettre de bien cartographier le phénomène à l'échelle de l'estuaire

Temps d'effectuer un changement d'échelle ?

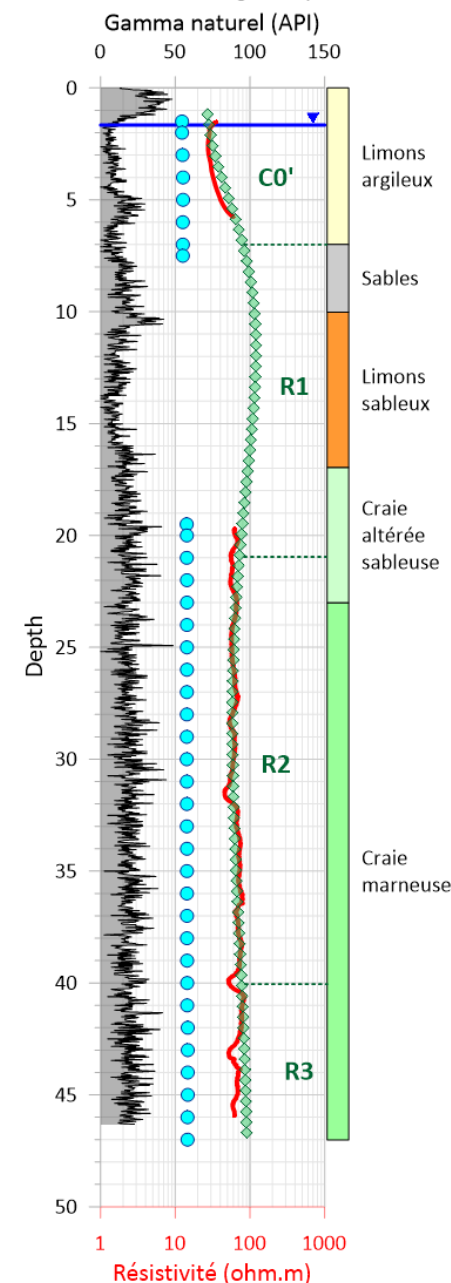
- Les méthodes géophysiques permettent également de suivre l'évolution le front de salinité sur le long terme.

>> Renouveler des acquisitions pour apprécier la dynamique (dispositif et fréquence à déterminer)

Pz01a-Pz02c - Log composite



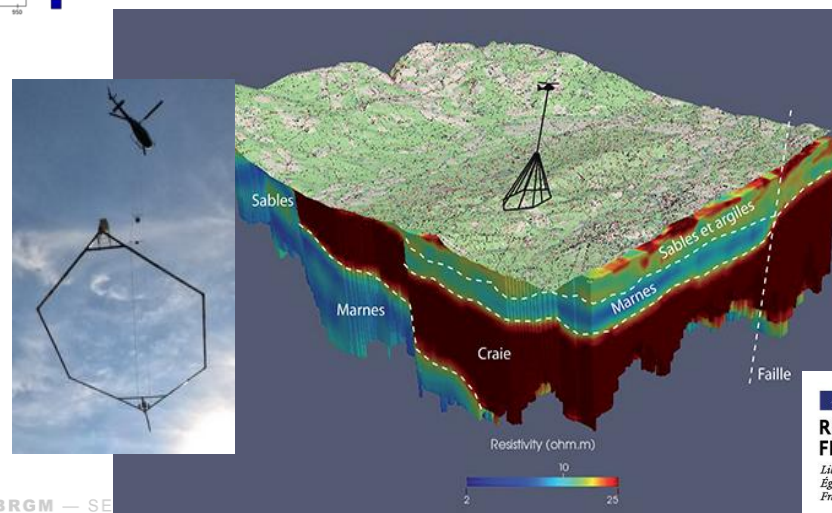
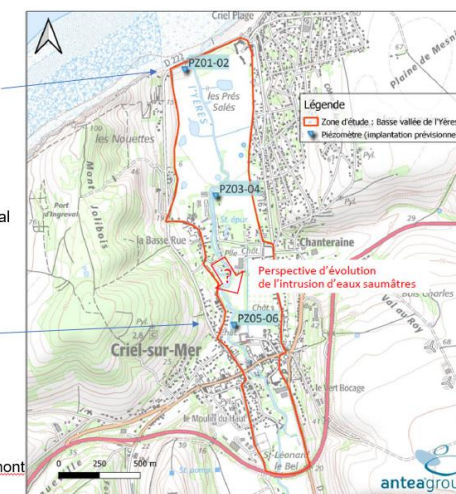
Pz03a-Pz04c - Log composite



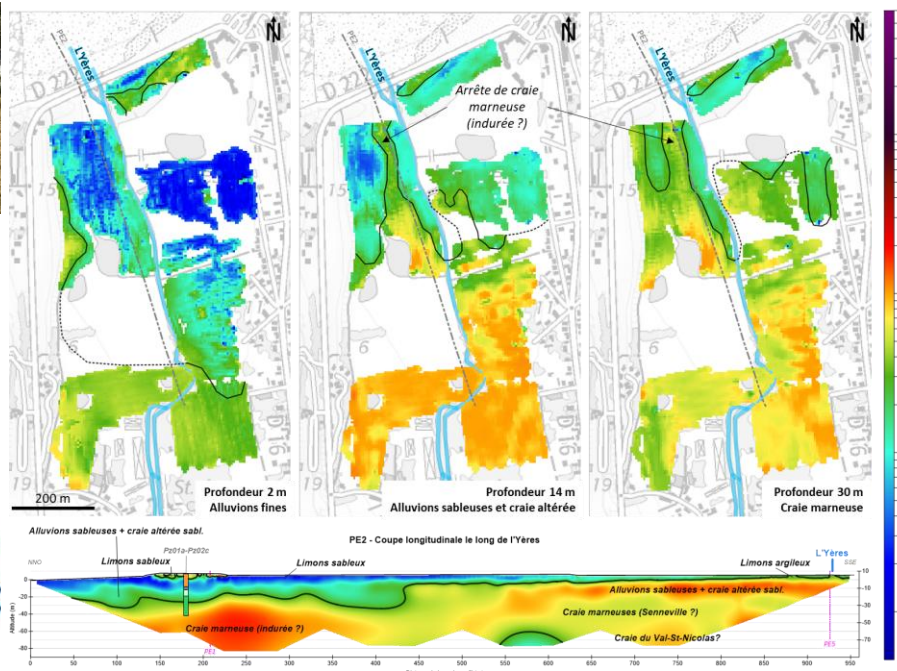
Perspectives

Salinisation de la Basse Vallée de l'Yères (76)

Géophysique sol (ERT + TTEM), Suivi Hydrométrique et Piézométrique, Hydrochimie

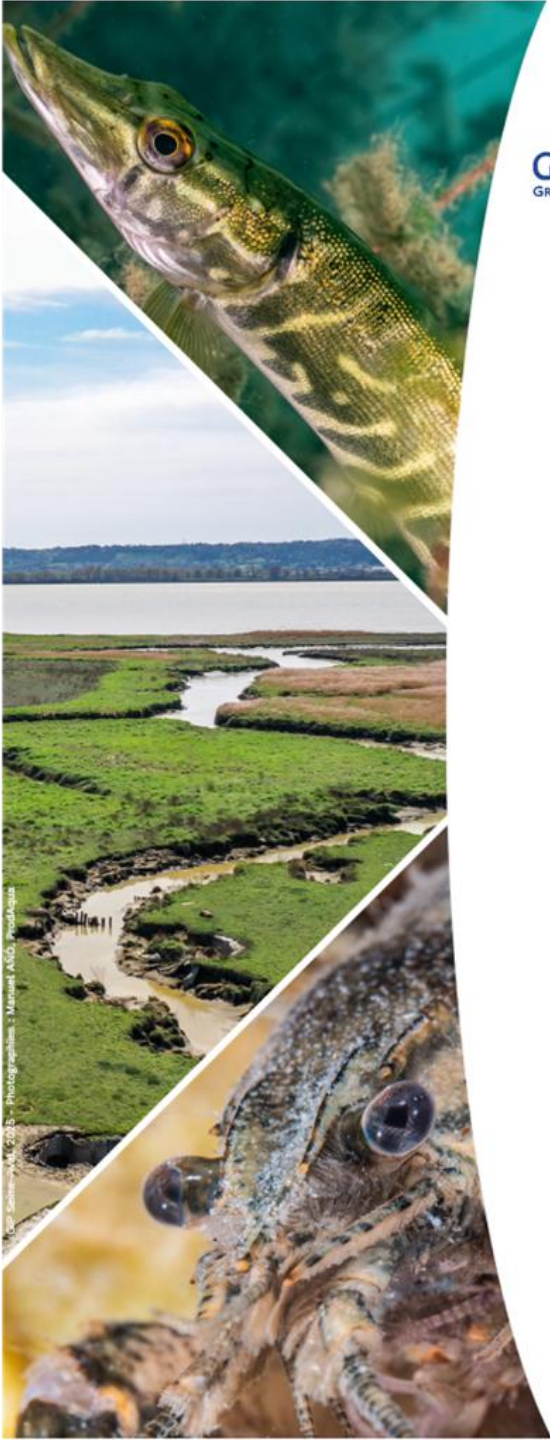


AQUASEL :
Comprendre et suivre le processus de salinisation des aquifères du littoral Artois Picardie



Objectif à terme :

Dégager une méthode de travail adaptée aux différents contextes pour **assurer un état des lieux** (cartographie) de la salinisation des ESOU > **dimensionner un dispositif de suivi pour caractériser sa dynamique**



4- Vers la fin du projet

4- Finalisation et perspectives

Actions à mener en 2025-2026

- **Fin collecte des données** des sondes enregistreuses CTD (BRGM, U-Rouen et autres partenaires). **Analyse préliminaire** des chroniques Niveau-Température-Conductivité (BRGM et U-Rouen)
- **Poursuite des investigations géophysiques** EM et ERT (U. ROUEN)
- **Analyse des résultats des 2 campagnes hydrochimiques (BRGM),**
 - Réalisation d'un « Etat des lieux » préliminaire hydrochimique
 - Identification de paramètres potentiellement discriminants pour l'origine de la salinité (actuelle, ancienne, anthropique)
- **Formuler des propositions pour compléter l'état des lieux, et recommandations pour opérer un suivi de la salinité des ESOU-ESU** à l'échelle de l'estuaire, et sur les zones à plus fort enjeux
- **Bancarisation des données** (ensemble des partenaires),
- **Synthèse et comparaison avec autres estuaires, Restitution COPIL (Final)**

Confronter les résultats

Merci pour votre attention !



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**UNIVERSITÉ
DE ROUEN**
N O R M A N D I E