

Cartographie de la salinité des eaux souterraines de l'estuaire de la Seine

Mots clés : intrusion saline, zones humides, prélèvements d'eau, synthèse de connaissances, observations mutualisées, protocole partagé.

Contexte et finalité des travaux scientifiques

La propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine s'accompagne d'un mélange des eaux marines venues du large avec les eaux douces issues du bassin versant. Une zone de gradient entre l'eau douce et l'eau de mer plus dense se développe : il s'agit du biseau salé. Ce gradient influence la qualité des eaux superficielles (lit mineur et lit majeur) et des eaux de la nappe alluviale. Le dynamisme de cette zone de dilution est contrôlé par :

- Les fluctuations des principaux forçages de l'estuaire : la marée, le débit de la Seine, le gradient hydrologique de l'aquifère de la craie.
- Les caractéristiques morpho-sédimentaires du lit mineur (bathymétrie, nature et épaisseur des sédiments) qui influencent la propagation de la marée. Elles jouent également un rôle sur la connectivité hydraulique entre le lit de la Seine et les eaux souterraines. Elles évoluent au gré des aménagements ainsi que des apports et exports sédimentaires d'origines naturelle et anthropique.
- L'aménagement des berges de la Seine. Il influence la connectivité hydraulique latérale et directement les gradients de salinité latéraux.
- La géologie du secteur aval de l'estuaire. Elle structure le fonctionnement hydrogéologique et notamment les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines et, *in fine*, les flux d'eaux saumâtres vers la nappe.
- Les prélèvements en eaux souterraines. Ils influencent localement les bilans hydrologiques et la pénétration des eaux salées dans les eaux souterraines.
- Les apports locaux de chlorures naturels ou anthropiques complémentaires aux sources marines actuelles.

Les impacts du changement climatique sur les forçages hydrologiques (augmentation du niveau marin, baisse des débits de la Seine, baisse de la recharge de la nappe de la craie), **ainsi que les stratégies d'aménagement de l'estuaire et de gestion de la ressource en eau vont inévitablement modifier le fonctionnement de l'estuaire.** Les conséquences sur les évolutions morpho-sédimentaires et les bilans hydrologiques influenceront directement la dynamique de la salinité des eaux de surface et souterraines. Or, **les problématiques de préservation des milieux naturels, de maintien d'usages agricoles et de prélèvement de la ressource en eau dans la plaine alluviale impliquent de mieux comprendre les possibles évolutions à long terme de la salinité, en particulier dans les eaux souterraines.**

Le suivi et la modélisation des eaux superficielles permettent de bien décrire les dynamiques 3D de la salinité dans le lit mineur à des échelles de temps tidales, saisonnières ou pluriannuelles (GIP Seine-Aval, 2013 ; Grasso *et al.* – SA6-ARES 2021). D'autre part, l'état de l'art permet également de commencer à anticiper les évolutions morpho-sédimentaires de

l'embouchure de l'estuaire et donc les conséquences sur les variations de la salinité dans les eaux du lit mineur (Grasso *et al*/ SA6-MORPHOSEINE, 2021). En parallèle, la modélisation de la dynamique des inondations dans la plaine alluviale est développée (travaux en cours, GIP Seine-Aval / Artelia). A court terme, il sera possible d'étudier des scénarios de modification des échanges hydrauliques entre lit mineur et lit majeur ainsi que les écoulements de surface dans le lit majeur. Les conséquences en matière d'apport de sel dans le lit majeur pourront ainsi être appréhendées.

Concernant les eaux souterraines, les connaissances de la géologie et du fonctionnement hydrogéologique associé sont éparées et non organisées à l'échelle de la basse vallée fluviale de l'estuaire. Ainsi, face à la problématique d'une potentielle salinisation des eaux souterraines à moyen ou long terme, une stratégie d'acquisition et de formalisation de ces connaissances doit être établie. Elle doit permettre aux acteurs de l'estuaire de progresser dans l'identification des enjeux prioritaires et des stratégies de modélisation à mettre en œuvre.

Les travaux devront permettre de disposer d'un premier modèle conceptuel (non numérique) hydrogéologique et hydrochimique (type BRGM RP60186-FR, Kloppmann *et al.*, 2011) **sectorisé** qui sera basé sur l'ensemble des informations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et géochimiques/minéralogiques disponibles sur le secteur concerné par le gradient naturel de salinité. De nouvelles observations seront réalisées pour obtenir une première cartographie cohérente de la salinité. Ces observations s'appuieront sur un réseau d'acteurs mobilisés sur le suivi des eaux souterraines et intéressés pour appréhender les enjeux associés à cette problématique. La mutualisation des moyens de suivi et la mobilisation des connaissances disponibles sont un enjeu important pour l'atteinte des objectifs.

Les travaux permettront également de dégager des recommandations pour renforcer le suivi des évolutions de la dynamique de la salinité de l'estuaire en s'appuyant sur le réseau d'acteurs identifiés.

Objectifs des travaux scientifiques

Le premier objectif est de **mettre en œuvre un protocole de suivi de la salinité des eaux souterraines sur le secteur concerné par le gradient de salinité et sur une durée d'environ 2 ans**. Ce suivi constituera une acquisition originale permettant une première cartographie cohérente de la salinité des eaux souterraines, en lien avec la variabilité des forçages (marée, hydrologie annuelle du débit fluvial, recharge de la nappe...). Un maillage de piézomètres devra être proposé en concertation avec les acteurs référents sur les différents secteurs concernés par la problématique de la salinisation (cf. annexe). Le protocole d'acquisition de données devra permettre d'assurer une bonne interopérabilité des mesures et ainsi la cohérence du suivi. Selon les possibilités de mutualisation des moyens d'observation, une description plus fine sur des secteurs d'intérêt particulier pourra être proposée. **Une méthode de traitement et d'analyse des données est à établir en lien avec la finalité des travaux.**

En complément de cet objectif prioritaire, deux volets d'acquisition de nouvelles connaissances pourraient être proposés :

1. Sur la base des connaissances déjà disponibles et expertises locales, des analyses géochimiques et isotopiques pourraient être proposées afin de bien identifier les sources de salinisation observées. En effet des sources géologiques ou anthropiques sont possibles en basse vallée de Seine et peuvent perturber l'analyse du signal de conductivité.
2. En complément des connaissances déjà disponibles, des reconnaissances géophysiques pourraient être proposées si elles permettent un gain important pour l'interprétation spatiale (3D) du signal de salinité sur des secteurs particuliers.

L'objectif final est de produire un bilan sous forme de modèle conceptuel hydrogéologique et hydrochimique sectorisé, couvrant l'ensemble du secteur d'étude, en s'appuyant sur les connaissances déjà disponibles et l'interprétation des nouvelles données. Ce type de modèle qualitatif pourra être adapté et peaufiné au fur et à mesure du progrès des connaissances (e.g. BRGM RP60186-FR, Kloppmann et al., 2011). Il pourra constituer une base de connaissances pour le développement ou l'amélioration d'un modèle numérique spatialisé lors de travaux ultérieurs.

Objectifs de la phase d'évaluation des lettres d'intention

Dans le contexte de cet AAP, la phase d'évaluation des lettres d'intention a pour objectifs :

- ⇒ D'identifier des équipes disposant d'un bon retour d'expérience dans l'étude du biseau salé en contexte de basse vallée fluviale à fort marnage.
- ⇒ D'identifier des propositions méthodologiques pertinentes par rapport au contexte et à la finalité des travaux. En particulier, des premiers éléments de méthode pour la mise en œuvre d'un protocole de suivi mutualisé des eaux souterraines sont attendus (prises de contact avec les partenaires locaux, méthodologie en lien avec les moyens financiers alloués...). Plus généralement, un équilibre entre synthèse des connaissances et acquisition de nouvelles données doit être recherché pour atteindre de manière efficiente les objectifs.
- ⇒ D'identifier des projets de développement des connaissances sur le territoire dans un objectif de mutualiser des moyens.

Enveloppe budgétaire prévisionnelle

L'enveloppe budgétaire prévisionnelle allouée à l'ensemble des travaux prévus dans cet appel à projets est de **150 k€**. Ce montant constitue un ordre de grandeur destiné à orienter les proposant sur le niveau d'ambition des actions à proposer et les moyens à mettre en œuvre. Le contexte de la mise en œuvre d'un protocole de suivi mutualisé de la salinité des eaux souterraines constitue un cas particulier. La phase de concertation puis de définition d'une stratégie mutualisée constituera une étape importante pour évaluer l'effort financier nécessaire pour la bonne mise en œuvre du protocole. L'enveloppe prévisionnelle pourrait être ajustée après cette étape, tout en restant cohérente avec l'ordre de grandeur initial.

Bibliographie et sites web d'intérêt

Jardani A. (coord.), Dupont J.P., 2012. Projet TIDEHYDREX : Forçages hydrologiques des aquifères du remplissage estuarien : un atelier expérimental pilote pour la prévision de l'influence des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique des zones humides. Projet Seine-Aval 4, 136 p.

<https://www.seine-aval.fr/projet/tidehydrex/>

GIP Seine-Aval, 2013. La salinité dans l'estuaire de la Seine. Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6 p.

<https://www.seine-aval.fr/publication/ft-salinite/>

Grasso F. (coord.), Bismuth E., Verney R., 2021. Projet ARES « Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 65 p.

<https://www.seine-aval.fr/projet/ares/>

Grasso F. (coord.), Le Hir P., Mengual B., Walther R., Verney R., 2021. Projet MORPHOSEINE « Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 97 p.

<https://www.seine-aval.fr/projet/morphoseine/>

Kloppmann W, Bourhane A., Shcomburgk S., Asfirane F. (2011), Salinisation des masses d'eau en France : du constat au diagnostic, Rapport BRGM RP-60186-FR, 41 p.

<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60186-FR.pdf>

Réseau SYNAPSES : <https://www.seine-aval.fr/reseau-synapses/>

Annexe

Des référents par secteur permettront de faciliter la mise en œuvre d'un suivi cohérent et mutualisé.

- Le lit mineur de l'estuaire – GIP Seine-Aval. Il fait l'objet d'un suivi haute-fréquence de la conductivité depuis 2012 (réseau SYNAPSES).
 - ⇒ Référent : Jean-Philippe Lemoine – GIP Seine-Aval
- Les secteurs de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine. Un enjeu particulier concerne le devenir d'habitats prairiaux sub-halophiles patrimoniaux.
 - ⇒ Référent : Thomas Lecarpentier – Maison de l'estuaire
- Les secteurs de la Risle maritime et du Marais Vernier (alluvial et tourbeux). Un enjeu particulier concerne le devenir du marais tourbeux et des zones humides alluviales.
 - ⇒ Référente : Clémentine Camus – PNR des Boucles de la Seine Normande.
- La boucle Port-Jérôme/Norville. Cette boucle représente une zone particulière étant soumise à une pression importante de prélèvements en eaux (de surface et souterraines) pour des usages industriels et eaux potables. Ces pressions ont notamment entraîné par le passé un déséquilibre hydrologique et une intrusion saline.
 - ⇒ Référente : Anais Moucheron – SAGE Vallée du Commerce.

Autres acteurs impliqués dans les suivis piézométriques souhaitant s'impliquer dans un suivi mutualisé.

- France Chimie Normandie : un accord de principe de certains industriels est acquis sur les secteurs du Havre et le secteur de Port-Jérôme.
 - Référente : Amandine Lafitte - France Chimie Normandie.
- HAROPA – Port de Rouen
 - Référente : Sandrine Samson – service environnement.