

CONNECT

Caractérisation de la connectivité latérale en
estuaire de Seine



L'utilisation des données ou d'éléments de ce rapport devront être cités sur la forme suivante :

MUNTONI Manuel, L'EBRELLEC Eric, MALLEVILLE Martin. 2025. CONNECT : Caractérisation de la connectivité latérale en estuaire de Seine. Rapport d'étude du GIP Seine-Aval. 37 pp.

Ce projet s'est appuyé en partie sur les base de données fournies par nos partenaires techniques, notamment :



Le GIP Seine-Aval est financé par :



TABLE DES MATIERES

Table des matières

1	Contexte et objectif de la démarche.....	4
1.1	Contexte	4
1.2	Objectif de la démarche.....	4
1.3	Objectifs et structure du rapport.....	5
2	Description de la démarche	6
2.1	Définition de l'emprise d'étude	6
2.2	Méthodologie.....	6
2.2.1	Structuration de la base de données	7
4.1.1	Complétion et harmonisation de la cartographie du réseau hydrographique.....	9
4.1.2	Inventaire et caractérisation des ouvrages traversant les berges	11
4.1.3	Estimation de la connectivité hydraulique.....	19
4.1.4	Traitement, nettoyage et standardisation des données.....	20
5	Résultats	22
5.1	Synthèse des informations collectées	22
5.2	Réseau hydrographique.....	26
5.3	Ouvrages	26
5.4	Limites de l'étude	29
5.4.1	Réseau hydrographique.....	29
5.4.2	Ouvrages traversants.....	31
6	Conclusion et Perspectives.....	33
7	Annexes.....	34
7.1	Structure de la base de données et métadonnées.....	34
7.1.1	Sous ensemble « Ouvrages en estuaire de Seine » : BDD OUVR.....	34
7.1.2	Sous ensemble « Réseau hydrographique » : BDD RH.....	36

1 CONTEXTE ET OBJECTIF DE LA DEMARCHE

1.1 Contexte

La continuité latérale représente les échanges entre le cours d'eau et les habitats naturels riverains, incluant les berges, les zones alluviales et les plaines inondables. En structurant les flux hydrauliques et écologiques, la continuité latérale favorise la dispersion des espèces aquatiques, facilite le transfert des nutriments et détermine les schémas d'inondation et de submersion de la vallée. Cependant, les aménagements artificiels tels que la rectification de cours d'eau et la disparition des espaces de mobilité latérale dans les vallées, perturbent la continuité. La réglementation (la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE) et la Directive Habitats (92/43/CEE)) appellent à la restauration des connexions hydrauliques et écologiques dans le but de rétablir le fonctionnement écologique des cours d'eau tout en répondant aux défis du changement climatique.

Concernant l'estuaire de Seine, la déconnexion entre le lit mineur et les habitats de la vallée représente une des principales causes de sa dégradation écologique. Cette déconnexion est principalement due à l'artificialisation des berges du fleuve, qui a restreint l'accès des eaux estuariennes aux zones humides de la vallée. Cet endiguement s'est accompagné au fil du dernier siècle de la construction d'un vaste réseau hydrographique tout au long de la vallée estuarienne visant le drainage des secteurs humides. Ces aménagements sont souvent dotés d'exutoires, parfois équipés de clapets pour empêcher les intrusions tidales dans les habitats du lit majeur. Selon les caractéristiques de ces infrastructures (dimensions, typologie, position topographique et localisation dans l'estuaire), leur influence sur les régimes hydrauliques, sédimentaires et écologiques varie. Bien que ces infrastructures aient favorisé le développement d'activités agricoles, urbaines et industrielles considérables dans la vallée, elles altèrent profondément les échanges hydrauliques, hydrologiques et écologiques au sein de l'estuaire.

En conséquence, la restauration de la continuité latérale constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour améliorer la qualité des échanges et, *in fine*, la qualité écologique de l'estuaire de la Seine. Elle vise la réhabilitation d'un gradient de continuités hydrauliques, favorable à la bonne réalisation des processus écologiques de l'écosystème fleuve-plaine inondable. Le diagnostic du fonctionnement des ouvrages et du réseau hydrographique est nécessaire pour déterminer les secteurs où des actions de restauration seraient les plus bénéfiques et donc prioritaires.

1.2 Objectif de la démarche

Le projet CONNECT a pour but d'améliorer la compréhension des échanges hydrauliques et écologiques entre le lit mineur et le lit majeur de la Seine sur la zone estuarienne. Dans cette perspective, la **création d'une base de données homogène, exhaustive et actualisée de la structuration du réseau hydrographique au sein de la vallée estuarienne et de ses ouvrages hydrauliques** représente un socle pour orienter les actions de restauration et de gestion des infrastructures hydrauliques.

Le projet a pour objectifs spécifiques de :

i. Caractériser le réseau hydrographique : ce volet implique la cartographie et la caractérisation des fossés, petits cours d'eau et autres éléments du réseau hydrographique qui jouent un rôle dans le drainage et la gestion des flux hydrauliques au sein de la vallée estuarienne. Le terme "réseau" souligne les interconnexions physiques et fonctionnelles entre les milieux

aquatiques (plans d'eau, cours d'eau, eaux souterraines et zones humides) (<https://www.eaufrance.fr/glossaire/reseau-hydrographique>).

ii. Inventorier et analyser les ouvrages hydrauliques : ce volet vise à formaliser un inventaire complet des ouvrages hydrauliques existant au sein du réseau hydrographique et ses exutoires. Notamment, les ouvrages traversant les berges, tels que les buses, les dalots ou les ponts cadres ainsi que les éléments associés (clapets, vannes, grilles, etc.) et autres structures ont été identifiés et caractérisés.

iii. Fournir des éléments pour évaluer la connectivité transversale : cette partie du projet vise à fournir des éléments pour évaluer le degré de connectivité entre le lit mineur et le lit majeur en fonction des caractéristiques des infrastructures hydrauliques (positionnement topographique, dimensions, type de structure, équipements annexes tels que les clapets ou les grilles). Cette évaluation permettra d'identifier les principales entraves à la connectivité hydraulique et de proposer des priorités pour la restauration des échanges naturels.

1.3 Objectifs et structure du rapport

Ce rapport documente les méthodologies adoptées pour constituer et organiser la base de données spatiale du réseau hydrographique et des infrastructures traversant les berges. Une vision synthétique et globale des informations contenues dans la base de données est également présentée dans la section des résultats. Les limites rencontrées, comme les manques de données ou les marges d'erreur dans les mesures, sont abordées dans une section dédiée pour encourager des améliorations futures. Enfin, l'annexe décrit la base de données relationnelle structurée dans le cadre du projet.

2 DESCRIPTION DE LA DEMARCHE

2.1 Définition de l'emprise d'étude

L'estuaire de la Seine représente les 170 derniers kilomètres du fleuve allant du barrage de Poses en amont à la partie orientale de la baie de Seine en aval. De manière transversale, il intègre les milieux adjacents correspondant aux zones intertidales et humides ainsi que les nappes phréatiques. Plus précisément, ce travail s'est focalisé principalement sur les berges et sur le réseau hydrographique s'étendant sur la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine [Figure 1].

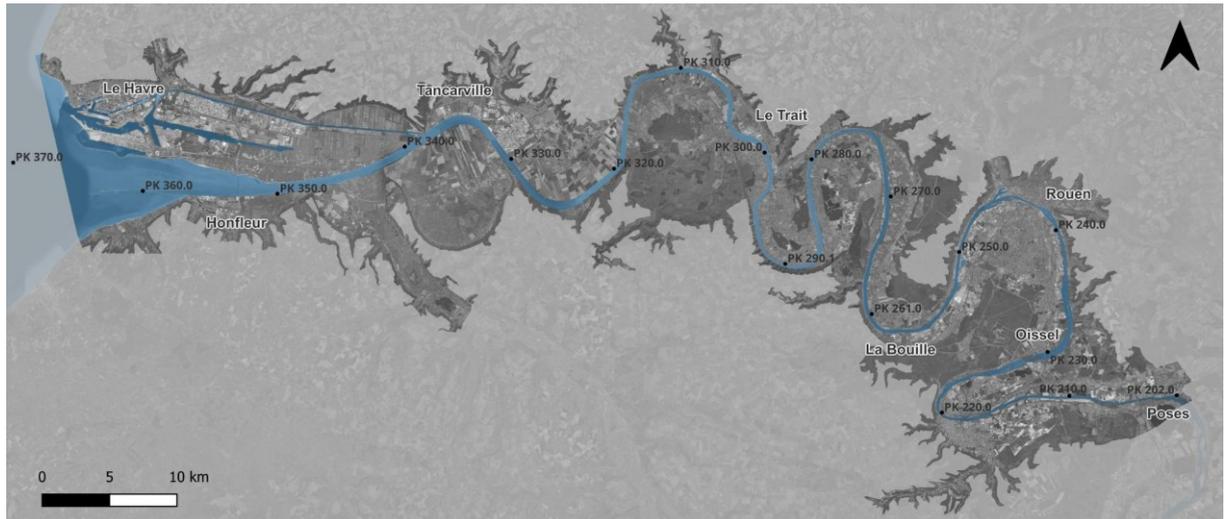


Figure 1. L'estuaire de la Seine

2.2 Méthodologie

La méthodologie développée dans le cadre de CONNECT mobilise une combinaison des bases de données préexistantes, de relevés de terrain et d'outils d'analyse géomorphologique. Les étapes sont décrites en Figure 2.

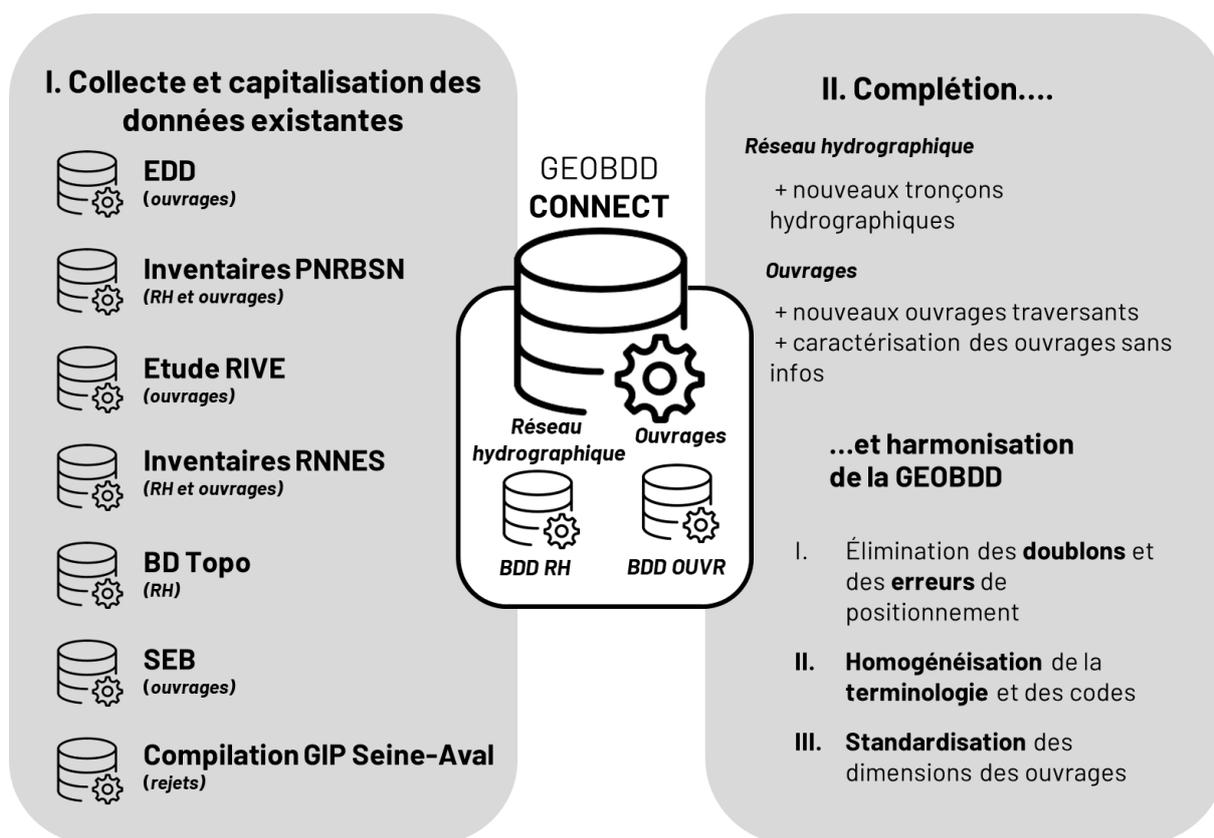


Figure 2. Représentation schématique des étapes de création de la base de données CONNECT (GEOBDD CONNECT) et de ses sous-ensembles : la base des données sur le réseau hydrographique (BDD RH) et celle sur les ouvrages (BDD OUVR)

2.2.1 Structuration de la base de données

La première phase du travail a permis de collecter et capitaliser les informations disponibles, notamment :

- La cartographie des zones riveraines de l'estuaire de la Seine ([Rapport RIVE](#), GIP Seine-Aval, 2011) apportant un premier diagnostic des berges de l'estuaire de la Seine (de Poses à Tancarville), alliant de nombreux paramètres dont la nature des berges et la présence d'ouvrages.
- Schéma Environnemental des Berges de l'estuaire de la Seine ([SEB](#), GIP Seine-Aval, 2024). Une base de données de caractérisation des berges a été établie sur la base de photographies des berges de Seine (de Poses à Honfleur) prises depuis un bateau longeant les berges de manière systématique en condition de marée basse. Un GPS associé à l'appareil photo a permis de géolocaliser chaque prise de vue. Sur la base de ces photographies, un travail de photo-interprétation a permis la caractérisation des berges, l'identification d'une partie des ouvrages et leur localisation.
- L'inventaire des ouvrages des Études De Danger (EDD, SMGSN, 2023). Les EDD recensent les ouvrages notoires des systèmes d'endiguement gérés par le syndicat, incluant une description de leur position, type, dimensions et altitudes côté Seine et côté terre.

- Inventaires et cartographies des réseaux hydrographiques et des ouvrages associés, menés par le Parc Naturel Régional des Boucles de Seine Normande (PNRBSN) entre 2004 et 2022 et par la Réserve Nationale Naturelle de l'Estuaire de la Seine (RNNES) entre 2008 et 2010. Cet inventaire répertorie la position des fossés parcourant la plaine alluviale et donne la position des ouvrages traversants associés sur le périmètre respectif de ces deux structures.
- Les données hydrographiques de la BD topo de l'IGN de 2022. Les données de tronçon hydrographique ont servi de base pour la composante réseau hydrographique de la base de données.
- Compilation des données sur les rejets, collectées par le GIP Seine-Aval en 2008, contenant des informations sur la position et la nature des rejets industriels et urbains (notamment les rejets des stations d'épuration et d'eau pluviale). Cet inventaire prend en compte les informations de la base de données sur les rejets de l'Agence de l'Eau et des services de l'Etat (Police de l'eau).

Ces données ont été intégrées dans une base relationnelle structurée en deux sous-ensembles : **réseau hydrographique** et **ouvrages**.

Le sous ensemble "**réseau hydrographique**" (BDD RH) contient des éléments de type « polyligne » représentant les différents tronçons du réseau hydrographique. Ils sont identifiés par un code unique attribué par le propriétaire de la donnée ou un identifiant généré automatiquement. Chaque entité est décrite par un type (fossés, cours d'eau, drains souterrains, filandres, etc.) et une fonction (drainage agricole ou routier, rejet d'assainissement, alimentation des annexes aquatiques en eau, alimentation des abreuvoirs, etc.). Les cours d'eau issus de la BD Topo sont identifiés par leur hydronyme. Chaque tronçon est également associé à une source décrite dans les champs "fournisseur de données" et "bases de données source".

Le sous-ensemble "**ouvrages**" (BDD OUVR) contient tous les éléments ponctuels identifiés par un identifiant unique et géoréférencés, auxquels sont associées l'information sur l'origine de la donnée et la date de mise à jour. Pour chaque ouvrage, les principales caractéristiques morphologiques et techniques sont détaillées (type, aménagement de l'exutoire, altimétrie etc.).

Les métadonnées de cette base de données sont reportées en annexe.

Dans la deuxième partie du projet, différentes approches ont été mises en place afin de compléter la GEOBDD CONNECT, notamment :

- i. la **cartographie du réseau hydrographique** en identifiant les tronçons non recensés sur le périmètre d'étude,
- ii. la **base de données des ouvrages** (exutoires) et leurs caractéristiques techniques.

Afin d'alimenter les analyses nécessaires pour atteindre les objectifs de l'étude, d'autres informations ont été mobilisées :

- 1 Le modèle numérique de terrain (MNT) de l'estuaire calculé à partir des données topographiques acquises en mars 2022 par le GIP Seine Aval lors de la campagne [LIDAR/orthophotographie de la vallée de la Seine Normande](#). Ce référentiel présentant une résolution de 1 m a été généré à partir des données sol du semis de points par la méthode de calcul du "point le plus bas".

- 2 L'orthophotographie synchrone au LIDAR, acquise à marée basse en mars 2022. Cette période correspond à la saison présentant des niveaux d'eau généralement importants.

2.2.2 Complétion et harmonisation de la cartographie du réseau hydrographique

En estuaire de Seine, un vaste réseau hydrographique s'articule dans la vallée. Parmi les éléments faisant partie de ce réseau, les fossés sont définis comme éléments linéaires artificiels de collecte et d'écoulement des eaux de pluie, de ruissellement ou de drainage¹. Cette partie du travail s'est focalisée sur le repérage géomatique des nouveaux tronçons du réseau hydrographique non répertoriés, notamment de fossés.

La BDDRH repose davantage sur les inventaires terrain réalisés par les acteurs du territoire tels que le PNRBSN et la RNNES et sur les informations contenues dans la BD Topo (cf § 2.2.1). Afin de préciser et d'identifier les tronçons de fossé qui ne sont pas encore recensés, le MNT a été traité sous le module Geomorphon (*Geomorphologic phonotypes*) qui permet de le reclasser sur la base d'une typologie morphologique² [Figure 3]. Les fossés ont été identifiés en retenant exclusivement la forme "valley".

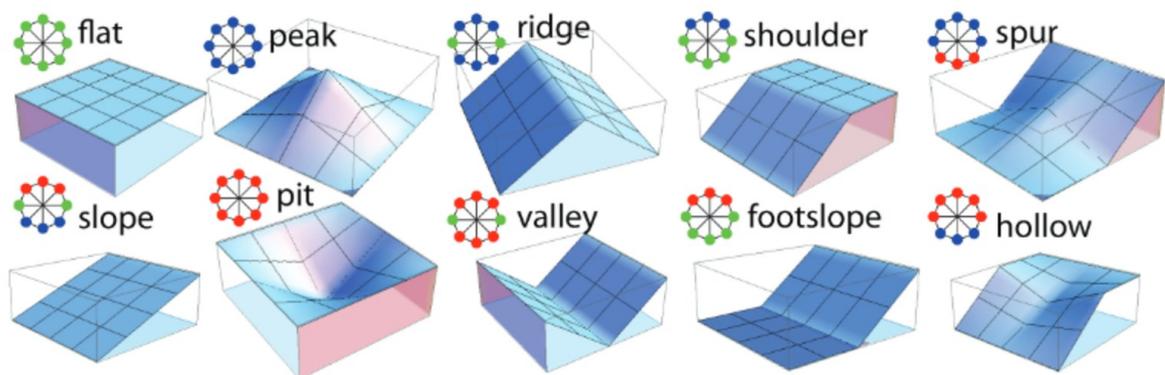


Figure 3. Classification des morphologies identifiées à travers la méthode Geomorphon (depuis Jasiewicz and Stepinski, 2013)

Les zones de regroupement linéaire de pixels répondant à ce critère ont permis d'identifier le réseau de fossés. La superposition géomatique de ces informations avec les inventaires disponibles a permis d'identifier les tronçons non recensés [Figure 4]. Toutefois, la résolution du MNT, ainsi que son mode de calcul, permet également de détecter des éléments plus petits, comme les ornières de tracteurs. Afin de limiter la surestimation du linéaire, des vérifications complémentaires ont été effectuées à l'aide de coupes topographiques transversales. Cette identification par analyse morphologique a ensuite été affinée par vérification visuelle à l'aide

¹ ONEMA - INRA 2013. Synthèse bibliographique des différentes fonctions des réseaux de fossés aux échelles du fossé élémentaire et du réseau

² Jarosław Jasiewicz, Tomasz F. Stepinski, 2013. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms, *Geomorphology*, Volume 182 : 147-156.

des orthophotographies afin de replacer les éléments ajoutés dans le contexte environnant et de vérifier la présence/absence d'eau. La période d'acquisition de l'orthophotographie (mars 2022) permet de visualiser les portions en eau du réseau hydrographique étant donné que c'est à cette saison que les niveaux d'eau peuvent être importants.

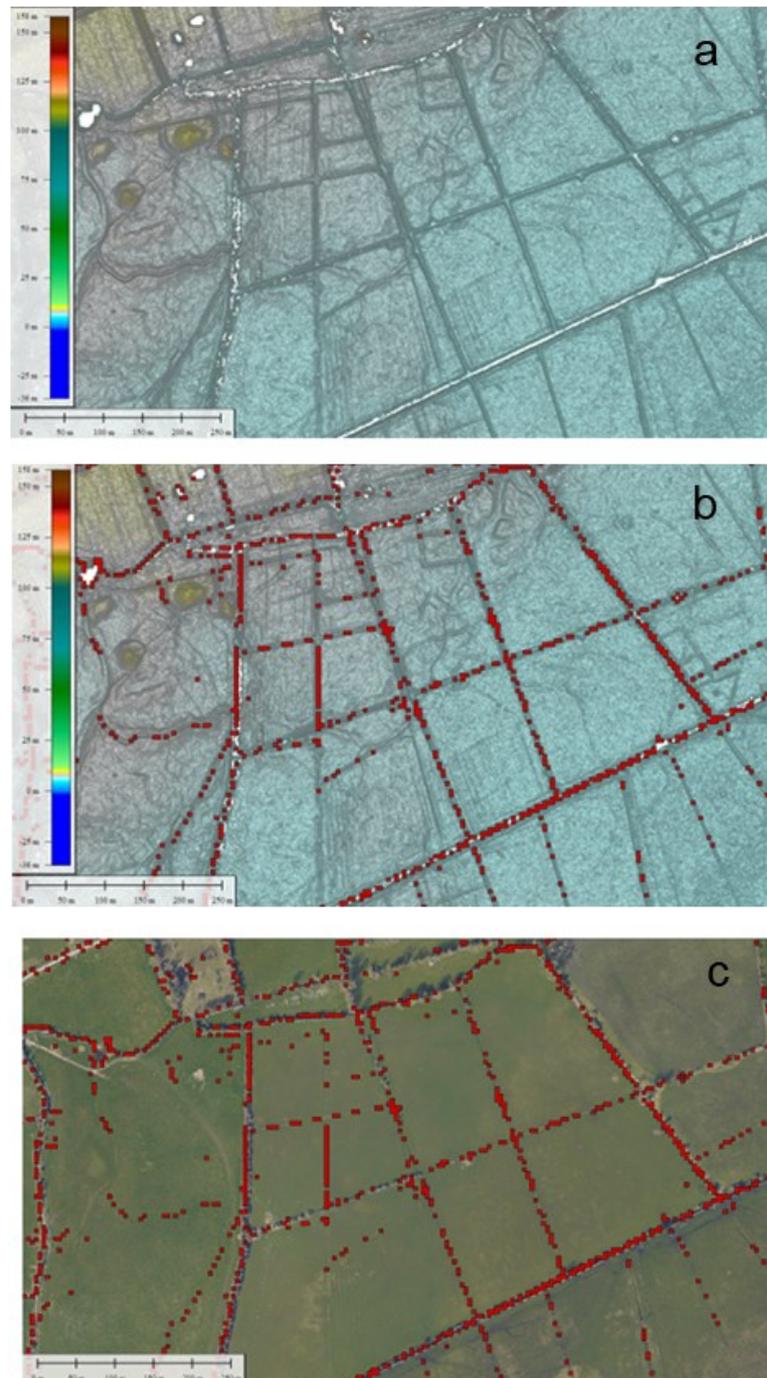


Figure 4. Illustration de l'application de la méthode d'identification du réseau hydrographique. À partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT (a)), un classement a été réalisé via l'outil Geomorphon, en ne conservant que les formes de type "valley" pour délimiter les linéaires de fossés intégrés au réseau hydrographique (b). Afin de valider et affiner les tronçons identifiés, des vérifications complémentaires ont été effectuées à l'aide de coupes transversales du MNT et d'orthophotographies (c).

2.2.3 Inventaire et caractérisation des ouvrages traversant les berges

Une fois les informations de base sur les ouvrages traversants collectées, une analyse approfondie a été menée pour identifier les ouvrages non recensés et compléter les données existantes. La caractérisation des ouvrages s'est articulée autour de plusieurs phases :

- **Identification des ouvrages manquants ou incomplets** : Cette étape a impliqué une recherche systématique des points de confluence entre le réseau hydrographique et la Seine.
- **Détermination des caractéristiques des ouvrages** : Les ouvrages identifiés ont été caractérisés en fonction de leur type (buse, pont cadre, ouverture voûtée, etc.), de leur équipement (clapet, grille), et de leur dimension. Un logiciel d'analyse d'image (JMicroVision) a été utilisé pour effectuer des mesures précises sur les photos disponibles, calibrées à partir des données du MNT et de la hauteur d'eau enregistrée au moment de la prise de vue.

Cette phase a également inclus des analyses de sensibilité et de quantification des incertitudes afin de mesurer la marge d'erreur associée aux mesures photographiques, en particulier pour les ouvrages partiellement masqués ou visibles sous des angles variés.

2.2.3.1 Identification des ouvrages manquants et/ou ayant des informations à compléter

Pour compléter la BDD OUVR, une recherche systématique des ouvrages manquants a été menée à partir des données existantes. Cette approche a consisté à identifier les points de confluence par croisement géomatique du réseau hydrographique de la vallée et du fleuve [Figure 5]. Ceci a permis d'identifier de nouveaux ouvrages correspondant aux débouchés de fossés et de petits cours d'eau.



Figure 5. Ouvrage repéré (en rouge) grâce au réseau de fossés (en bleue)

Dans les ouvrages de maçonnerie, tels que les digues, on trouve souvent de petites ouvertures ou conduits d'un diamètre inférieur à 150 mm, appelés **barbacanes** [Figure 6]. Ces

structures jouent un rôle crucial en évacuant l'eau accumulée derrière les digues, réduisant ainsi la pression qui pourrait compromettre leur stabilité. En facilitant ce drainage, elles participent à la préservation de la durabilité et de la solidité des ouvrages de génie civil.

Cependant, les barbacanes [Figure 6] sont difficiles à identifier sur les photographies, et n'étant pas des structures traversantes, elles n'ont pas été systématiquement recensées dans le cadre de cette étude. La majorité des données relatives à ces éléments provient des études de danger. Bien qu'elles soient présentes dans l'ensemble des systèmes d'endiguement, leur absence de contribution directe à la continuité hydraulique et écologique a mené à leur exclusion de la synthèse. Les informations collectées sur ces structures, bien que partielles, ont été conservées et restent accessibles sur demande.



Figure 6. Exemple de berge présentant des barbacanes

2.2.3.2 Détermination des caractéristiques des ouvrages

Nomenclature utilisée pour la caractérisation des ouvrages

Les ouvrages ont été caractérisés à l'aide de descripteurs simples, facilement identifiables sur les photos. Une liste des types d'ouvrages et de confluences a été éditée sur la base des informations contenues dans les bases de données mobilisées pour l'étude afin de créer une typologie. Cette nomenclature préexistante a pu être mobilisée pour classer les nouveaux ouvrages recensés lors de cette étude. Plus précisément, les ouvrages ont été classés en :

Type d'ouvrage	Description	Photo
Pont cadre	Pont constitué d'une structure en béton armé qui forme un cadre rigide, avec généralement une dalle horizontale. Les ponts cadres sont souvent utilisés pour franchir des rivières, des routes ou des voies ferrées.	

<p>Buse</p>	<p>conduite traversante présentant une ouverture de forme ronde, avec divers matériaux et des tailles variables, servant à l'écoulement de l'eau</p>	
<p>Dalot</p>	<p>conduit ou passage couvert, généralement en béton armé et de forme carrée, conçu pour permettre l'écoulement d'eau sous une route, un chemin de fer, un remblai ou une digue. Il sert à drainer l'eau de pluie ou à canaliser des cours d'eau de faible débit sous ces infrastructures, permettant ainsi d'éviter l'accumulation d'eau qui pourrait fragiliser le sol ou endommager les ouvrages</p>	
<p>Ouverture voûtée</p>	<p>Conduite traversante présentant une forme carrée ou rectangulaire avec une partie supérieure en forme d'arrondi ou de voûte [Figure 8]. Elles sont principalement associées au réseau pluvial urbain.</p>	
<p>Ouvrage supposé</p>	<p>Confluence entre le réseau de fossés et la Seine pas identifiable sur les photos.</p>	

En complément de cette nomenclature, les ouvrages ont été caractérisés sur la base de l'aménagement de l'exutoire. Plusieurs types d'aménagements ont ainsi été identifiés.

Aménagement de l'exutoire	Description	Photo
Ouvert	Absence de dispositif permettant de bloquer le flux d'eau dans un sens ou un autre. Le passage de l'eau se fait sans contrainte	
Fermé	Ouvrage présentant un exutoire condamné ou fermé par scellement	
Clapet	Ouvrages munis d'un clapet anti-retour empêchant ou limitant l'intrusion des eaux tidales estuariennes vers le lit majeur et le réseau hydrographique. Dans le cas où le clapet apparaissait dysfonctionnel (ex. ouvert), l'information a été renseignée dans la base de données	
Vanne	Présence d'une vanne ayant pour objectif de réguler les niveaux d'eau entrants et sortants. Aucune informations sur l'état de ces ouvrages a pu être renseignée lors de cette étude	

Grille	Présence d'une grille en sortie d'exutoire	
Filet anti déchet	Certains ouvrages localisés en zone urbaine présentent des filets permettant de piéger les déchets en sortie de réseau pluvial	
Clapet et grille	Exutoire présentant plusieurs dispositifs	

La présence d'un écoulement [Figure 7], si observable dans la photographie, a été également notée .



Figure 7. Ecoulement actif

Les ouvrages ont été classés selon leur fonction, à savoir :

Exutoire souterrain : Cette fonction a été attribuée aux ouvrages qui sont raccordés à une portion du réseau hydrographique souterrain.

Rejet urbain ou industriel : regroupe les ouvrages identifiés dans la couche des émissaires, qui regroupe les rejets urbains (provenant des réseaux d'assainissement et d'eaux pluviales) et industriels. Les ouvrages localisés aux abords immédiats de grand centre urbain ou complexe industriel ont également été identifiés de cette manière.

Confluence de cours d'eau : Cette fonction a été attribuée aux ouvrages qui permettent de connecter les cours d'eau identifiés dans la BD Topo à la Seine.

Exutoire de fossés : Cette fonction a été attribuée aux ouvrages qui permettent de connecter le réseau de fossés à la Seine.

Connexion annexe : regroupe les ouvrages connectant des annexes hydrauliques telles que bras morts ou plans d'eau.

Mesure des ouvrages

La détermination des caractéristiques des ouvrages traversants a été menée à travers une analyse morphométrique des ouvrages, utilisant trois sources de données :

- La base de données photographique SEB. La mesure de l'ouvrage a été réalisée à partir de la photo présentant le meilleur angle de vue et garantissant la meilleure visibilité de l'ouvrage.
- Le MNT donne une information topographique précise du sol et permet des mesures de référence pour la calibration.
- L'orthophotographie synchrone au LIDAR, qui permet de positionner précisément les ouvrages et apporte une aide pour identifier visuellement leur fonction en relation au mode d'occupation du sol.

Afin de déterminer les dimensions de l'ouvrage, l'outil JMicroVision a été utilisé. Ce logiciel a été choisi car il permet de mesurer des objets sur une photo sur la base d'une étape de calibration. Cette étape consiste à indiquer une mesure réelle connue sur l'image, qui va servir de point de référence en permettant d'attribuer une valeur de taille en millimètres aux pixels de l'image.

Pour réaliser le segment de calibration, deux valeurs de référence ont été définies :

- **Cote du haut de berge**, définie grâce à la lecture du profil transversal de la berge sur le MNT au niveau de l'ouvrage [Figure 8]. Plusieurs transects sont systématiquement effectués afin d'avoir une appréciation de l'uniformité topographique du haut de la berge.

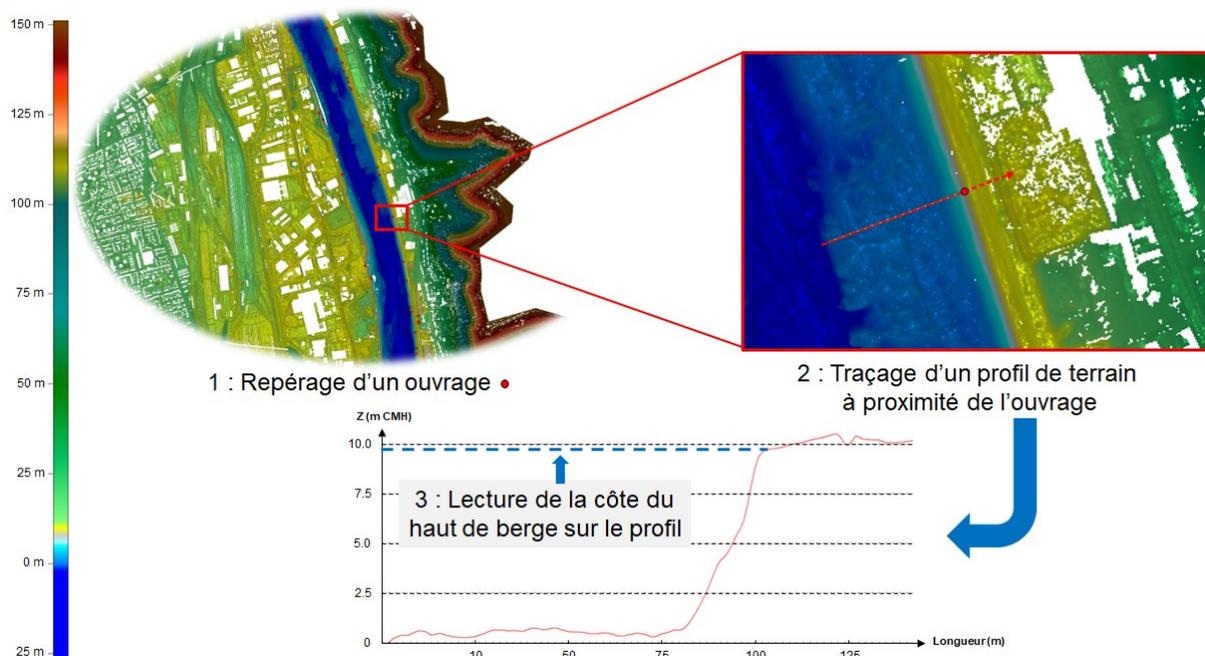


Figure 8. Schéma explicatif de la méthode de détermination de hauteur de berge

- **Cote du niveau de l'eau.** Chaque photo a été associée à un niveau d'eau issu du réseau de marégraphes géré par HAROPA PORT. Cette cote a été définie grâce à la position GPS de la photo et à l'heure de prise de vue, ce qui permet d'obtenir une valeur précise du niveau d'eau au moment de la prise de vue en se référant aux mesures des marégraphes les plus proches [Figure 9]. Cette cote a été inscrite dans les métadonnées des photos.

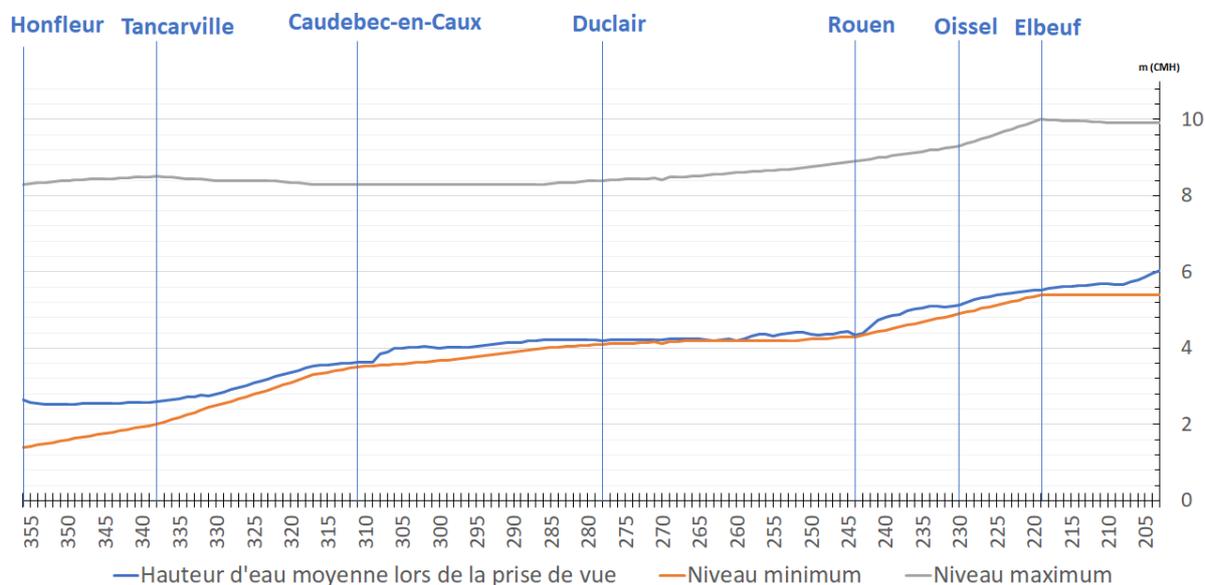


Figure 9. Hauteurs d'eau estimées lors de la prise de vue au regard des cotes correspondants aux niveaux de basse et haute mer

Une fois ces deux valeurs déterminées, un segment de calibration est tracé dans le logiciel JMicroVision, reliant le niveau de l'eau visible sur la photo au sommet de la berge. La longueur de

ce segment, correspondant à la distance entre les deux cotes est ensuite saisie dans le logiciel. A partir de cette distance de calibration, différentes mesures ont été réalisées [Figure 10]:

- **Fil d'eau** : Cette cote correspond à la partie basse de l'ouverture et est exprimée en Cote Marine du Havre (CMH). Cote estimée à travers la mesure de la distance entre le bas de l'ouvrage et le niveau de l'eau sur la photo à laquelle on additionne la hauteur d'eau au moment de la prise de vue.
- **Cote maximale (haut de l'ouverture)** : Cette mesure correspond au haut de l'ouvrage et est associée à la hauteur d'eau. Cette cote est calculée à partir de la distance entre le haut de l'ouvrage et le niveau de l'eau sur la photo. Cette cote est également exprimée en CMH.
- **Diamètre** pour les ouvrages circulaires et **largeur** et **hauteur** pour les ouvertures non circulaires exprimées en millimètres.

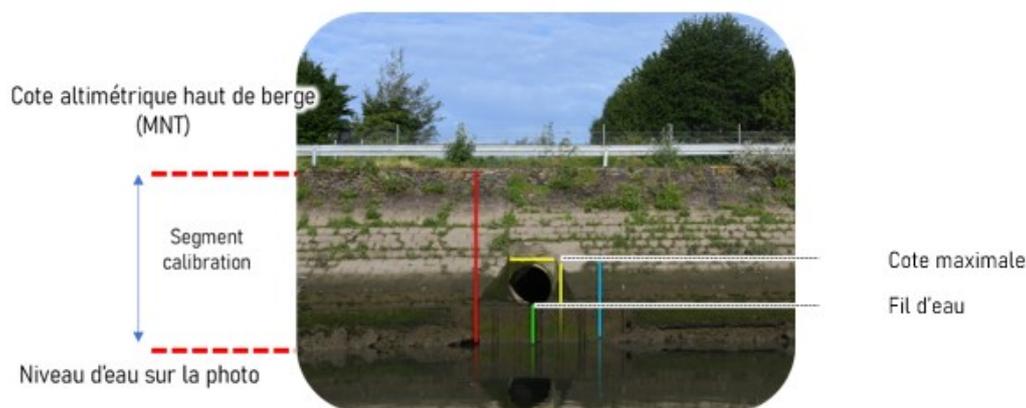


Figure 10. Schéma montrant les principales mesures effectuées pour la caractérisation des ouvrages (ligne rouge = segment de calibration, ligne jaune = mesures de longueur et largeur ou diamètre de l'ouvrage, ligne verte = distance utilisée pour le calcul du fil de l'eau, ligne bleue = distance entre la partie haute de l'ouvrage et le niveau d'eau sur la photo)

2.2.3.3 Analyses de sensibilité de la lecture et quantification des incertitudes des mesures

Les mesures photographiques des ouvrages présentent des incertitudes inhérentes à la méthode, liées à la qualité et aux variations dans la prise de vue (angle, distance, ombre, exposition, netteté, etc.) ainsi qu'à la précision de la calibration des images. De plus, la végétation ou les ombrages peuvent masquer les ouvrages et limiter la précision des mesures. Ces variabilités introduisent une marge d'erreur dans l'interprétation des mesures qu'il convient de quantifier.

Pour évaluer ces incertitudes, un échantillon aléatoire de 20 ouvrages a été sélectionné dans la base de données pour une reprise de mesures. Les hauteurs d'eau et les profils de terrain associés ont été mesurés à nouveau, afin de générer des **estimations d'erreur sur les diamètres de ouvrages** mesurés. Ces mesures ont été répétées trois fois, avec un intervalle d'une semaine entre chaque session pour maximiser l'indépendance des observations.

Les écarts obtenus lors de ces nouvelles mesures ont ensuite été analysés. Une moyenne des écarts a été calculée établissant une marge d'erreur moyenne de 60 mm sur le diamètre de l'ouvrage (pas significative après test des variances ANOVA).

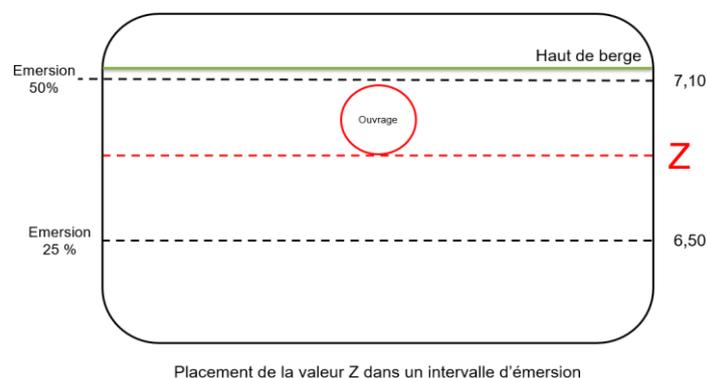
De plus, pour 132 ouvrages une analyse des différences entre les valeurs mesurées par morphométrie et les mesures effectuées dans le cadre des EDD a été réalisée afin de mieux caractériser les incertitudes associées à la méthode appliquée. Les ouvrages faisant partie de cette analyse sont des ouvrages "buse" présentant un exutoire non aménagé ("ouvert"). Ceci a permis de rassembler des ouvrages présentant des conditions cohérentes de mesure en termes de visibilité de la portion à mesurer. Une différence moyenne de 77 mm a été calculée (non significative après test des variances ANOVA).

2.2.4 Estimation de la connectivité hydraulique

L'évaluation de la connectivité hydraulique a consisté à estimer la fréquence d'immersion de chaque ouvrage traversant. Pour cela, les temps moyens d'émersion, fournis par HAROPA PORT, ont été utilisés en fonction des cotes de niveau d'eau mesurées entre 2010 et 2020. Les étapes suivantes ont été suivies :

- **Interpolation linéaire** des données d'émersion entre les différents marégraphes de l'estuaire pour obtenir des valeurs à chaque point kilométrique (PK) ;
- **Jointure spatiale** entre les données d'émersion et les ouvrages, permettant d'identifier l'intervalle d'émersion spécifique dans lequel les ouvrages se localisent verticalement.

À partir de ces deux points de référence caractérisant l'émersion (où x représente la cote et y le temps d'émersion en pourcentage) de l'intervalle topo-bathymétrique incluant l'ouvrage, une équation linéaire ($\%emersion_ouvrage (Y) = m(Z) + q$) a été établie pour calculer la pente (m) et l'interception (q) nécessaire à l'estimation du temps d'immersion des ouvrages [Figure 11]. Une fois cette valeur déterminée, le temps d'émersion a été converti en temps d'immersion ($100 - \% temps d'émersion$). Cette valeur représente une approximation du temps de connexion hydrologique, en supposant qu'à partir du moment où la hauteur d'eau atteint le fil de l'eau de l'ouvrage commence à être connecté³.



³ Cette valeur n'exprime pas la connectivité écologique, étant donné que le passage des organismes nécessite une lame d'eau minimale spécifique à chaque espèce pour pouvoir se réaliser.

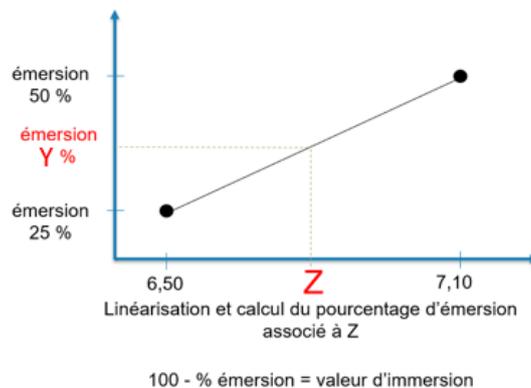


Figure 11. Représentation schématique de la méthode utilisée pour définir le pourcentage d'émergence. En haut, schématisation du placement de l'ouvrage au sein d'un intervalle de pourcentage d'émergence connu et cotes respectives. En bas, linéarisation et calcul du pourcentage d'émergence spécifique à la cote de l'ouvrage à partir des valeurs minimale et maximale de l'intervalle

Ouvrages traversants : différence de cote entre la Seine et la partie terrestre de l'ouvrage

Dans la plupart des cas, une différence d'altitude existe entre le côté Seine des ouvrages et leur côté terre, conçue pour faciliter les écoulements. Cette pente peut influencer la connectivité en limitant la remontée des eaux fluviales vers le lit majeur. Cependant, cette information n'est pas disponible pour la majorité des ouvrages et n'a pas pu être estimée dans le cadre de la démarche présentée dans ce rapport. Seuls certains ouvrages (237) inspectés lors des études de dangers disposaient de données concernant la cote du fil d'eau côté Seine (Z_{Seine}) et la cote minimale côté terre (Z_{terre}).

En se basant sur les différences observées entre le 25^e et le 75^e percentile des valeurs de Z_{terre} et de Z_{Seine} , une différence moyenne de 250 mm a été retenue. Par conséquent, pour les cas où seule la Z_{Seine} était disponible (via les mesures EDD ou celles de cette étude), une estimation de Z_{terre} a été ajoutée en augmentant de 250 mm la valeur de Z_{Seine} . Les mesures ainsi obtenues pourront servir de guide pour de futures études sur la connectivité hydraulique.

Cette approximation ne prend pas en compte les variations potentielles selon la topographie locale et les caractéristiques individuelles de chaque ouvrage. Ces limites doivent être considérées lors de l'interprétation des résultats. De futures études et inspections terrain pourront fournir des données plus complètes.

2.2.5 Traitement, nettoyage et standardisation des données

Une fois la base de données construite et actualisée des méthodes présentées dans les paragraphes 2.2.2, 2.2.3 et 2.2.4, un travail de nettoyage et d'homogénéisation a été réalisé. Cette phase s'est déroulée en plusieurs étapes, notamment :

- **Élimination des doublons et des erreurs de positionnement⁴**

⁴ En cas de doublons provenant de différentes bases de données, les informations ont été fusionnées, à l'exception des dimensions. Pour ce paramètre, les dimensions issues des EDD ont été privilégiées lorsqu'elles étaient disponibles.

- **Homogénéisation de la terminologie et des codes**
- **Standardisation des dimensions des ouvrages**

Les mesures affichées présentent des valeurs décimales (ex. diamètre d'une buse mesuré à 403,54 mm). Une standardisation sur la base des ouvrages mesurés dans les EDD a été réalisée afin d'obtenir des valeurs cohérentes avec les différentes tailles des canalisations couramment utilisées pour la construction de ces ouvrages.

3 RESULTATS

3.1 Synthèse des informations collectées

Une vision globale des informations contenues dans la BDD CONNECT est présentée en Figure 12.

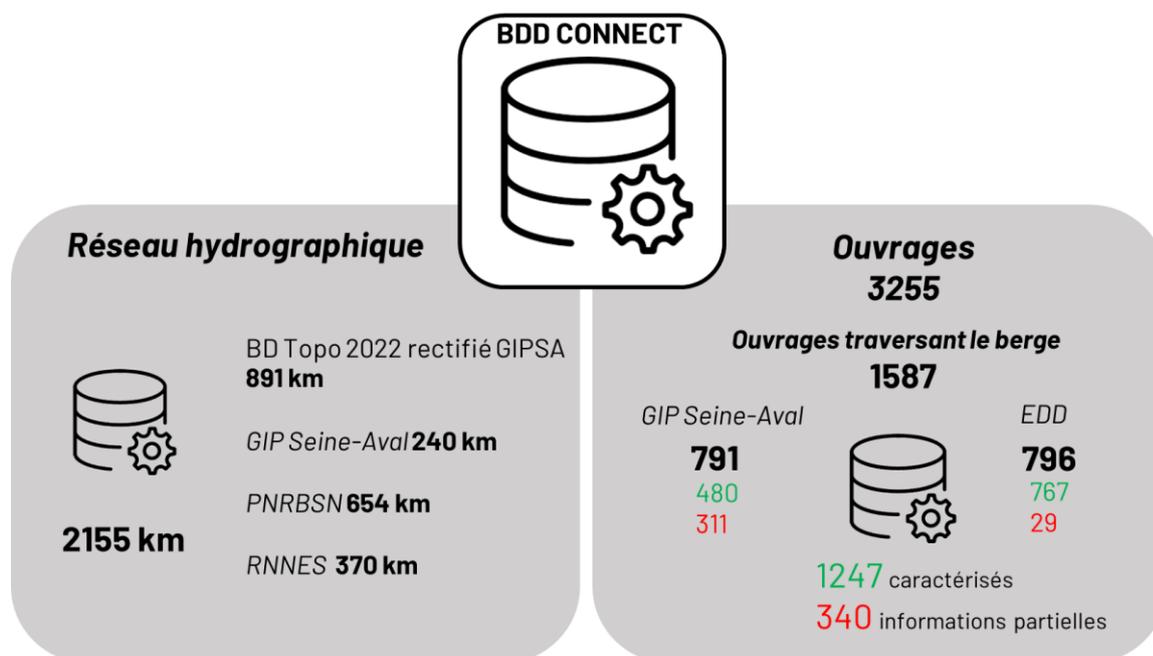


Figure 12. Schéma résumant les informations contenues dans la base de données CONNECT

Un aperçu cartographique des informations contenues dans la base de données est présenté en Figure 13, Figure 14, Figure 15, pour les différents secteurs de l'estuaire.

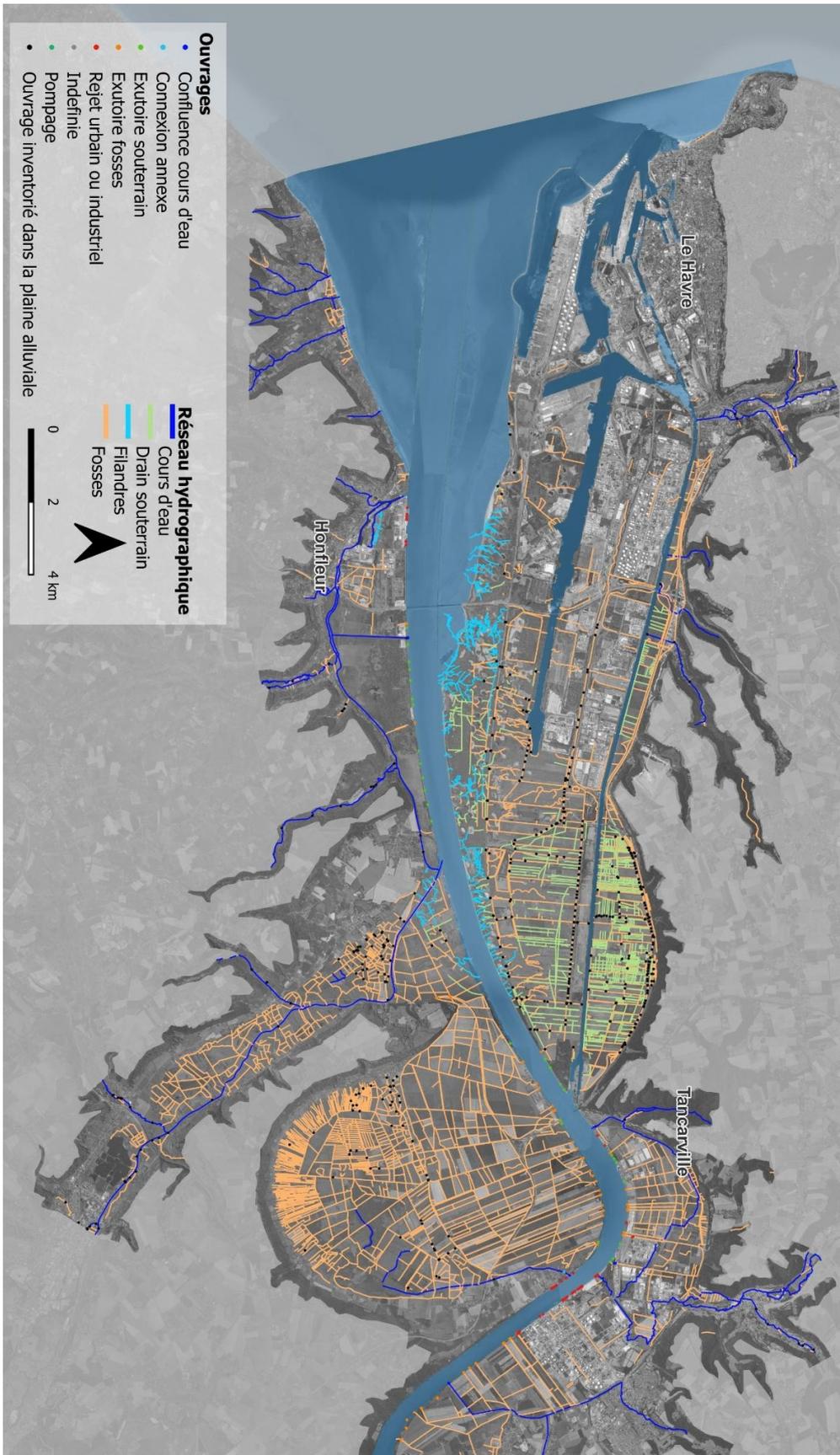


Figure 13. Extrait de la cartographie du réseau hydrographique et des ouvrages identifiés : secteur aval

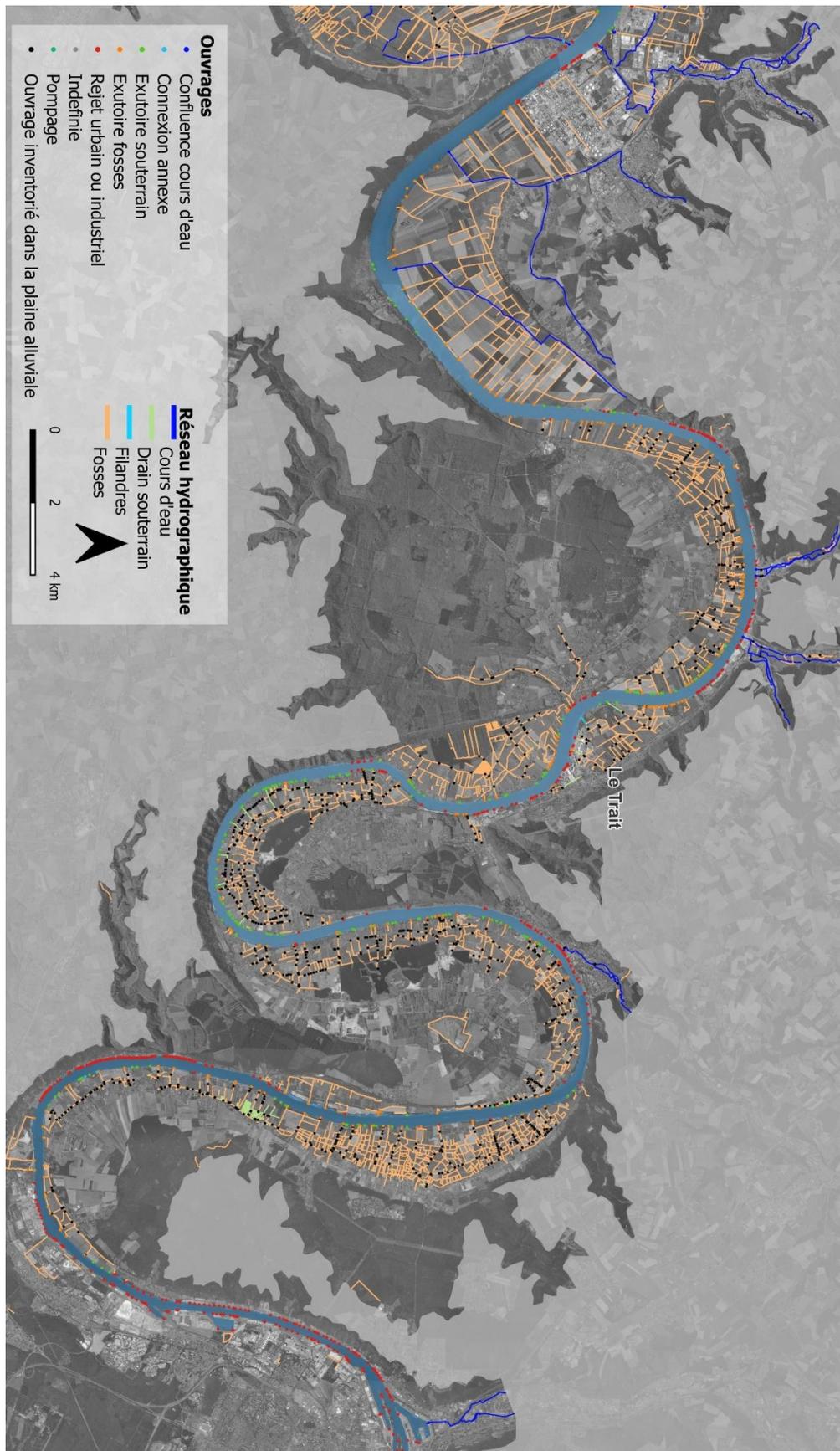


Figure 14. Extrait de la cartographie du réseau hydrographique et des ouvrages identifiés : secteur intermédiaire

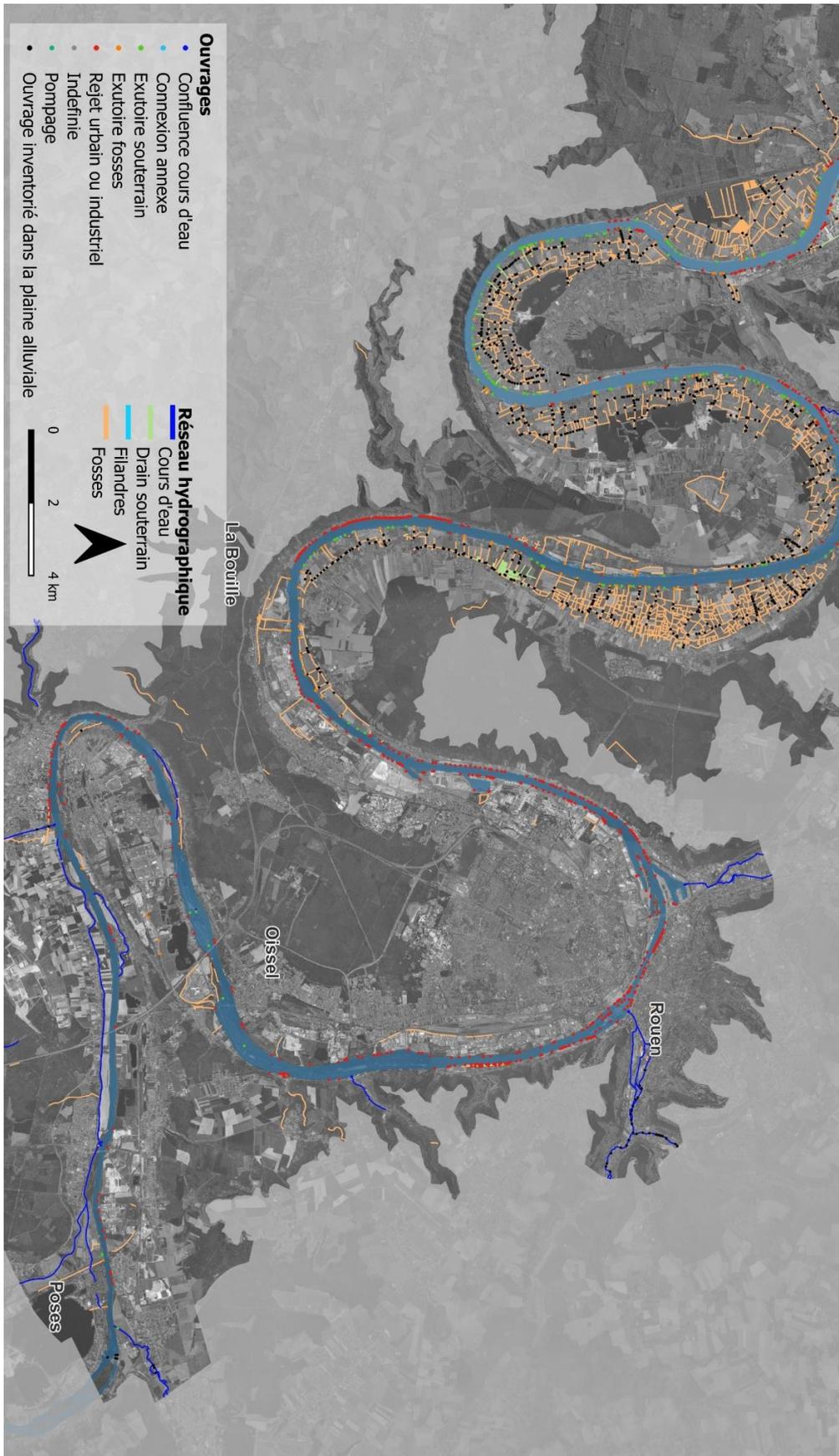


Figure 15. Extrait de la cartographie du réseau hydrographique et des ouvrages identifiés : secteur amont

3.2 Réseau hydrographique

L'analyse du sous-ensemble réseau hydrographique de l'estuaire de la Seine révèle un linéaire total d'environ **2150 km de linéaire hydraulique**, réparti entre plusieurs types de structures [Figure 16]. Les fossés représentent la part la plus importante avec près de 1570 km, illustrant le caractère humide de la vallée et l'ampleur de l'aménagement anthropique finalisé au drainage de ces milieux pour favoriser l'installation des activités économiques et urbaines. Les cours d'eau occupent une part notable du linéaire, avec environ 306 km, soulignant leur importance dans le réseau hydrographique de la vallée. D'autres types de structures hydrauliques contribuent à la gestion locale des eaux : les drains souterrains couvrent un linéaire de 207 km et sont souvent utilisés pour éviter la saturation des sols agricoles. Enfin, les filandres, qui totalisent 72 km, complètent ce réseau complexe.

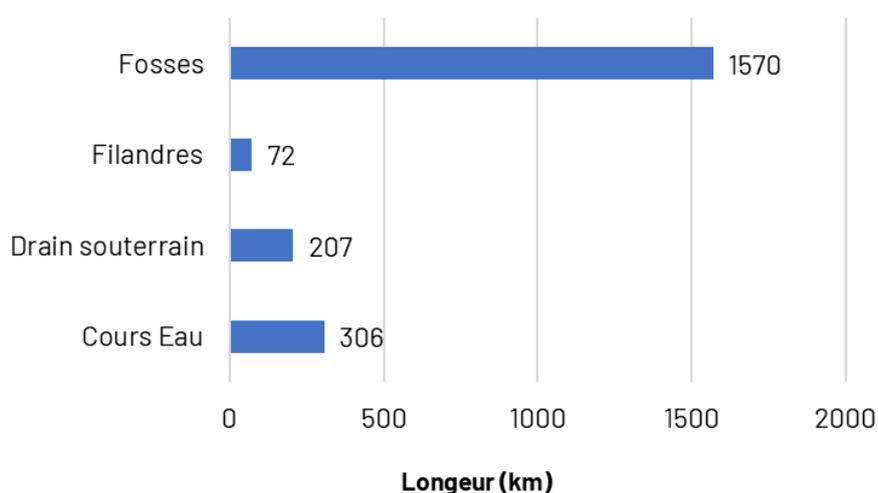


Figure 16. Répartition du linéaire (km) au sein du réseau hydrographique selon le type de structure

3.3 Ouvrages

Le projet CONNECT a permis de recenser un total de **3255 ouvrages** dans l'estuaire de la Seine, dont **1587 sont des ouvrages traversant les berges**.

Parmi ces derniers, **791 ouvrages traversants nouvellement identifiés** (soit 50 % des ouvrages traversants compilés) viennent compléter les données déjà disponibles [Figure 17].

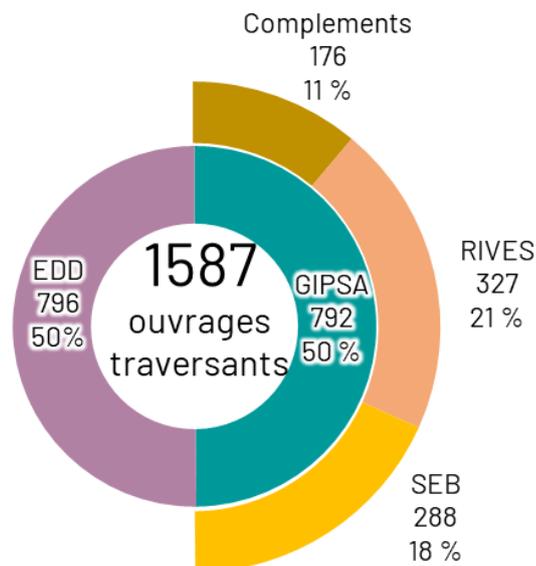


Figure 17. Source de la donnée concernant les ouvrages traversants intégrée dans la base données CONNECT

Approximativement 40% des ouvrages intégrés dans la base de données sont représentés par des rejets urbains ou industriels (867)[Figure 18]. Les exutoires du réseau de drainage de la vallée, soit 414 ouvrages, représentent approximativement 20 % du total des ouvrages.

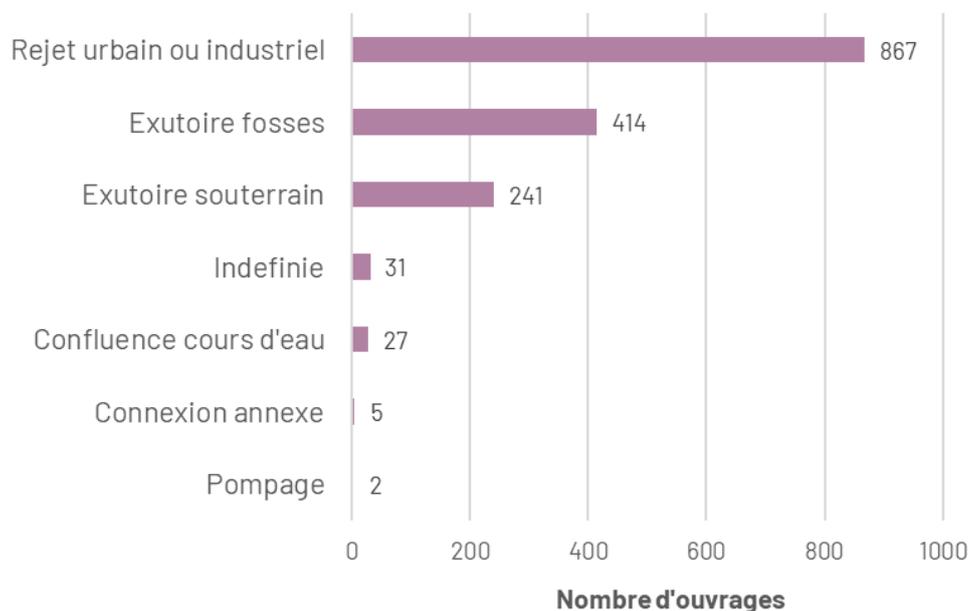
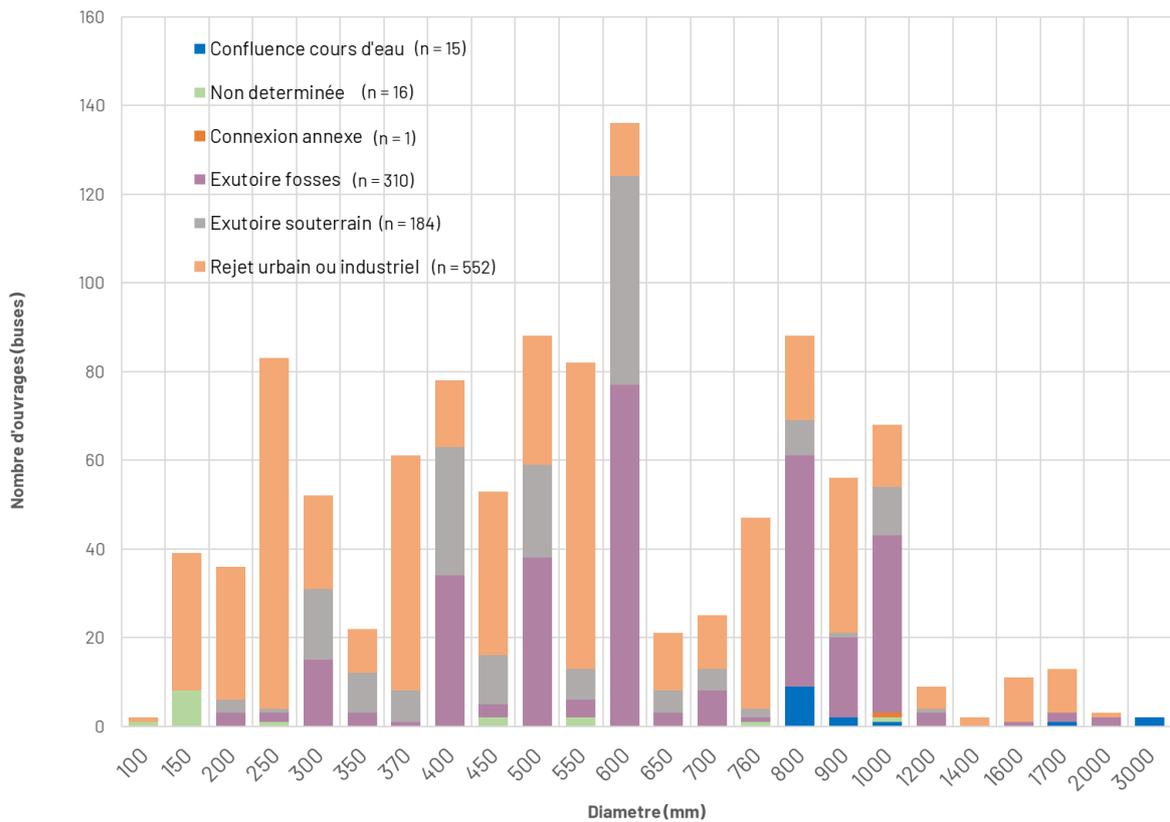


Figure 18. Distribution des différentes fonctions d'ouvrages recensés dans l'étude

Approximativement 80 % des ouvrages hydrauliques traversants est représenté par des buses. Dans la plupart des cas, les buses représentent le débouché des rejets urbains et industriels (552 ouvrages) ou l'exutoire du réseau de fossés (310 ouvrages). Sur le total des ouvrages caractérisés (1247) **65% présentent une taille égale ou inférieure à 600 mm**[Figure 19].

La plupart de ces ouvrages représentent l'exutoire de confluences, d'annexes hydrauliques ou du réseau fosses connectant la Seine aux marais. La présence de ces ouvrages représente donc une **barrière hydraulique et écologique importante** qui illustre la fragmentation physique importante entre le lit mineur et majeur de la Seine. Cette fragmentation est renforcée par l'aménagement de l'exutoire avec un clapet, une grille ou par la combinaison des deux. Sur les 718 exutoires de confluences, d'annexes hydrauliques ou du réseau de fosses connectant la Seine aux marais, 237 (soit **33%**) **présentent un aménagement tel qu'un clapet, une grille ou encore une vanne levante**. La présence de ces aménagements est associée aux ouvrages de dimension comprise entre 500 et 800 mm.



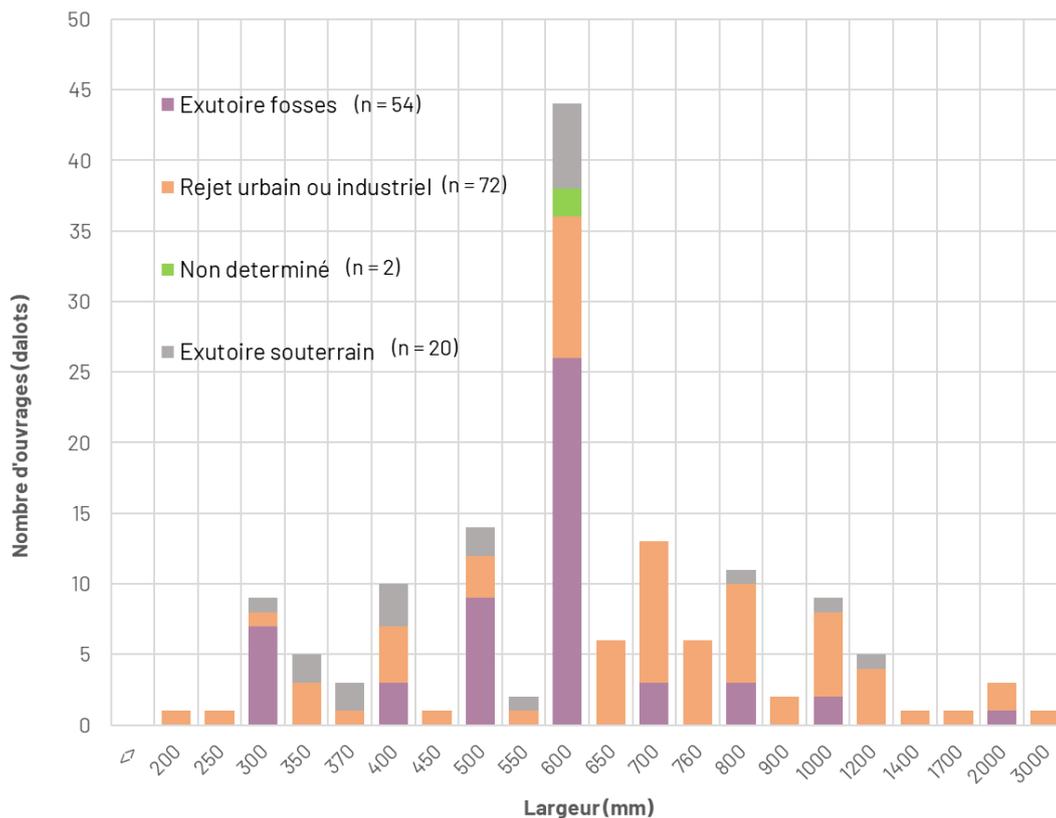


Figure 19. Fréquence absolue des buses (en haut, n = 1078) et des dalots (en bas, n = 148) intégrées dans la base de données par classes de diamètre et fonction

3.4 Limites de l'étude

3.4.1 Réseau hydrographique

Un effort substantiel de détection des tronçons du réseau hydrographique non cartographiés a été entrepris en utilisant les données LIDAR, ce qui a permis de découvrir un linéaire additionnel significatif. Cependant, l'intégration d'inventaires plus anciens dans la base de données a révélé certaines limites : plusieurs portions du réseau hydrographique préalablement inventoriées ne sont plus visibles dans les orthophotographies récentes ou le MNT de haute résolution [Figure 20]. Ce manque de visibilité peut être attribué à trois facteurs principaux : i) le comblement du réseau hydrographique, ii) la modification d'un fossé en canalisation enterrée non détectable par nos méthodes actuelles de télédétection, et iii) l'inondabilité des différents secteurs (ex. niveaux d'eau élevés au moment de l'acquisition des données LIDAR), notamment dans les secteurs de la RNNES et du Marais Vernier, qui ont limité la détection morphologique des tronçons.



Figure 20. Exemple d'incohérence entre les informations issues des inventaires (lignes rouges) et les orthophotographies

Par ailleurs, les informations précises sur les caractéristiques spécifiques des tronçons identifiés sont limitées, en l'absence de relevés de terrain détaillés. Ce manque de détails entrave l'analyse morphologique des segments et ne permet pas de distinguer les fonctions spécifiques des différentes parties du réseau. Des inventaires ciblés et des campagnes de terrain complémentaires sont donc recommandés pour combler ces lacunes et affiner l'interprétation des nouveaux tronçons. L'approche terrain permettrait également de compléter la caractérisation des ouvrages au sein de réseau hydrographique, facilitant la priorisation des ouvrages et des secteurs à restaurer.

L'approche morphologique adoptée pour détecter les nouveaux tronçons a nécessité une supervision visuelle et une validation par interprétation d'orthophotographies. Cette méthode présente des risques de sur- ou de sous-estimation des linéaires en raison des variations locales de topographie, de couverture végétale et des limites des données LiDAR utilisées.

- Sous-estimation potentielle : Les données topographiques et orthophotographiques sur la partie terrestre ont été acquises en mars 2022, une période où certains secteurs, tels que la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine ou le Marais Vernier, connaissent des niveaux d'eau élevés dans les réseaux hydrographiques de drainage. Dans ce cas, les potentielles confusions entre l'eau (souvent turbide) et le terrain peuvent entraîner une classification erronée, menant à un comblement numérique des fossés.
- Sur-estimation potentielle : la présence de micro reliefs, comme des ornières, peut conduire à une surestimation du linéaire du réseau hydrographique.

La mise en œuvre de techniques de classification et caractérisation systématiques, telles que proposées par Rapinel et al. (2015)⁵ ou encore Roelens et al. (2016)⁶ pourrait être envisagée pour améliorer la précision de cette analyse et mieux caractériser le réseau hydrographique (largeur du tronçon, estimation de la profondeur, encombrement et végétalisation, détermination des patrons saisonniers de la présence d'eau).

3.4.2 Ouvrages traversants

L'évaluation morphométrique des ouvrages traversants à partir de photographies s'est avérée efficace pour obtenir des données sur tout le linéaire estuarien, mais elle présente également des limites. Bien que cette méthode se montre adaptée pour l'étude de vastes territoires, elle est sensible aux imprécisions et aux erreurs induites par l'analyse morphométrique sur les photographies. La lisibilité de la photographie représente la source d'erreur principale. La lisibilité des photographies est impactée par la distance, la mauvaise exposition lors de la prise de la photo, le mauvais angle ou la présence d'éléments masquant les ouvrages (ex. bateaux, végétation, embâcles). Notamment, les ouvrages partiellement masqués ou non-visibles à cause de la mauvaise qualité de photos [Figure 21], requièrent des vérifications de terrain pour valider les dimensions et confirmer les informations collectées. De futures campagnes de photographie focalisées sur des ouvrages difficilement accessibles ou partiellement obstrués (par exemple, ceux protégés par des grilles), pourraient améliorer la précision de l'inventaire.



Figure 21. Exemples de photographies ne permettant pas la caractérisation de l'ouvrage de par la distance de la prise et/ou la mauvaise exposition (à gauche) ou de par la couverture végétale (à droite)

De plus, l'état de fonctionnement des aménagements des exutoires tels que le clapet ne peut pas être systématiquement reporté par analyse photographique car dérivant non seulement de

⁵ Rapinel S., Hubert-Moy L., Clement B., Nabucet J., Cudennec C. 2015. Ditches' network extraction and hydrogeomorphological characterization using LiDAR-derived DTM in wetlands. *Hydrology Research* 46(2):276-290

⁶ Roelens J., Dondeyne S., Van Orshoven J., Diels J.. 2016. Extracting cross sections and water levels of vegetated ditches from LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* Volume 53: 64-75

son état d'usure mais aussi des méthodes de gestion. Cependant, la présence d'un clapet dysfonctionnel a été reportée quand visible sur la photographie [Figure 22].



Figure 22. Exemple de clapet dysfonctionnel

La présente étude a exclusivement mesuré les exutoires situés côté Seine. En l'absence de détails concernant l'état hydraulique des ouvrages côté terre, il demeure difficile de déduire les patrons de connectivité hydraulique avec précision.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude CONNECT a permis de **structurer, centraliser et compléter les informations disponibles sur le réseau hydrographique et ses exutoires de la vallée de l'estuaire de la Seine**. Une **base de données relationnelle** a été réalisée sur la base d'un travail de capitalisation, d'actualisation et de caractérisation des infrastructures hydrauliques, ce qui renforce la **connaissance spatiale et fonctionnelle du réseau hydrographique** dans la vallée estuarienne. La GEOBDD structurée dans le cadre de ce projet offre une vue d'ensemble des infrastructures hydrauliques et représente un outil pour évaluer la connectivité écologique et hydraulique de la zone étudiée.

Avec plus de **2150 km de linéaire hydrographique étudié** et **3255 ouvrages recensés**, CONNECT offre une cartographie inédite des infrastructures hydrauliques qui façonnent ce territoire. Parmi ces ouvrages, **1587 sont traversants**, dont **1247 ont été entièrement caractérisés**. Les approches mises en œuvre dans ce projet ont permis d'enrichir les informations existantes (notamment celles issues des EDD) avec l'identification et la caractérisation de **791 nouveaux ouvrages**.

Ces données, collectées et centralisées dans une base relationnelle exhaustive, constituent un outil stratégique pour orienter les futures actions de restauration. Ces données seront mises à profit pour des études menées en estuaire de Seine et pourront fournir des éléments d'appui pour la gestion et la priorisation de mesures de rétablissement de la continuité écologique.

Une attention particulière a été portée à la **gestion et à la future actualisation de la base de données**. Les données sont accompagnées de métadonnées permettant de retracer l'origine des informations et la date de leur mise à jour. La base de données a vocation à être enrichie lors des futures études terrain, en incluant de nouvelles données collectées par les partenaires et acteurs locaux. La mise en place d'une **dynamique collaborative de mise à jour va être étudiée** pour garantir la fiabilité et l'exhaustivité de cet outil de gestion des infrastructures hydrauliques de l'estuaire. Les acteurs techniques et locaux jouant un rôle clé dans la gestion de l'estuaire pourraient ainsi contribuer à une meilleure caractérisation du réseau hydrographique. Un travail de terrain serait pertinent pour intégrer des mesures de largeur et de profondeur spécifiques ainsi que pour caractériser la saisonnalité et l'inondabilité des différents tronçons du linéaire de ce réseau. Ce renforcement des connaissances serait essentiel pour affiner la compréhension des potentiels écologiques et hydrauliques de ces zones. Enfin, l'identification des points de connexion prioritaires pour la restauration de la mobilité latérale du fleuve ouvre de nouvelles perspectives pour des projets d'aménagement visant à rétablir les milieux aquatiques du lit majeur.

5 ANNEXES

5.1 Structure de la base de données et métadonnées

5.1.1 Sous ensemble « Ouvrages en estuaire de Seine » : BDD OUVR

Nom du fichier : Ouvrages_17102024.shp

Mise à jour : 17/10/2024

Description de la couche : Couche de points définissant la position et les caractéristiques des ouvrages traversants de l'estuaire de la Seine, intégrant les données issues de l'étude RIVE (GIPSA 2011), du Schéma Environnemental des Berges, des Études de Dangers et des observations réalisées lors du stage de Martin Malleville de mars à août 2024.

Géométrie : points

Projection : Lambert 93 EPSG 2154

Nom du champ	Type de champ	Description du champ
ID_ouvr	Entier	Identifiant unique de l'ouvrage
ID_photo	Entier	Numéro du point de la photo de berge issue de la base de données photo de 2022 ayant servi à l'identification, la description et la mesure
Visible	Caractère	Visibilité de l'ouvrage définie d'après l'étude des photos
Type_exut	Caractère	Type d'ouvrage (buse, pont cadre, ...)
Traversant	Oui/Non	Ouvrage situé sur la berge
Amenag_exut	Caractère	Type d'exutoire (clapet, grille,...)
Forme_exut	Caractère	Forme de l'exutoire (rond, voûté, carré,...)
Ecoulement	Caractère	Observation d'un écoulement sur la photo
Fonction	Caractère	Définition de la fonctionnalité de l'ouvrage (rejet urbain ou industriel, exutoire de fosses ou confluence de cours d'eau,...)
Comment	Caractère	Commentaire sur l'ouvrage apportant des précisions sur son état ou sa mesure, si nécessaire
H_ouvr	Numérique entier	Hauteur standardisé de l'ouvrage en millimètre
L_ouvr	Numérique entier	Largeur standardisée de l'ouvrage en millimètre
Fileau	Numérique décimal	Fil d'eau de l'ouvrage. Pour les ouvrages issus

		des EDD, le Z seine a été retenu. Pour les ouvrages mesurés, c'est la somme entre la cote du niveau d'eau et la hauteur entre le niveau de l'eau et le fil d'eau de l'ouvrage. Côte définie en CMH
Zterre	Numérique décimal	Côte altimétrique en CMH côté terre mesuré dans le cadre des EDD.
Zterre_est	Numérique décimal	Prend la valeur de Fileau_all (qui correspond au Zterre des EDD ou à la valeur mesurée) en ajoutant 0.25. Ne s'applique que sur les lignes où le Zterre est absente des mesures EDD.
CoordX_L93	Numérique décimal	Coordonnées X de l'ouvrage en Lambert 93 (EPSG 2154)
CoordY_L93	Numérique décimal	Coordonnées Y de l'ouvrage en Lambert 93 (EPSG 2154)
Source	Caractère	Origine de l'ouvrage, source de la données
Date_maj	Caractère	Date de mise à jour des informations. Cette date doit être mise à jour dès modification sur un ouvrage

5.1.2 Sous ensemble « Réseau hydrographique » : BDD RH

Nom du fichier : RH_17102024.shp

Mise à jour : 17/10/2024

Description de la couche : Couche de polygones représentant la position et les caractéristiques du réseau hydrographique, intégrant les données issues des inventaires du PNRBSN, de la RNNES, de la BD Topo et d'un travail d'identification des réseaux à l'aide des données topographiques et des orthophotographies de la campagne LIDAR 2022 du GIP Seine-Aval.

Géométrie : polygone

Projection : Lambert 93 EPSG 2154

Nom du champ	Type de champ	Description du champ
id_hydro	Caractère	Identifiant unique de l'ouvrage. Les identifiants tronçon des BDD ont été conservés afin de faire le lien avec les bases de données source
Type	Caractère	Type de tronçon (cours d'eau, fossés, drain souterrain, ...)
Fonction	Caractère	Fonction du tronçon (drainage agricole, pluvial,...)
Hydronyme	Caractère	Nom du tronçon, exclusivement pour les cours d'eau nommés
Longueur	Numérique décimal	Longueur du tronçon en mètre
Source	Caractère	Source et producteur de la données
Fichier_source	Caractère	Nom du fichier source



Hangar C - Espace des marégraphes - Quai de Boisguilbert
76176 ROUEN

MUNTONI Manuel, L'EBRELLEC Éric, MALLEVILLE Martin. 2025. CONNECT :
Caractérisation de la connectivité latérale en estuaire de Seine. Rapport d'étude
GIP Seine-Aval. 37 pp.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable
de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

www.seine-aval.fr

gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par

