



Rapport de recherche

consacre

CONTinuite écologique de la Seine
et intérêt des ACteurs pour sa REstauration

Modélisation de la continuité écologique sur la Seine et ses affluents Rapport technique final

Marie-Line Merg et Céline Le Pichon

Le projet CONSACRE s'inscrit dans le CPIER Vallée de Seine et est soutenu financièrement par l'AESN et les régions Ile de France et Normandie.



RÉGION
NORMANDIE

Région
ile de France



Coordination : Céline Le Pichon



2022

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Scientifiques participants au rapport

INRAE, HYCAR, Antony

- Céline Le Pichon
- Marie-Line Merg

Le projet CONSACRE s'inscrit dans le CPIER Vallée de Seine et est soutenu financièrement par l'AESN et les régions Normandie et Ile de France

Le projet PHRESQUES est labellisé Zone Atelier Seine



Table des matières

Table des matières	1
PARTIE 1 : Introduction	8
1. Contexte de l'étude	8
1.1. La continuité écologique et ses enjeux	8
1.2. Une politique apaisée autour de la restauration de la continuité écologique	8
1.3. La continuité écologique dans le bassin de la Seine	9
1.4. Le projet CONSACRE.....	9
1.5. Objectifs de l'étude	10
2. Comment modéliser la connectivité écologique ?	10
2.1. La connectivité écologique en écologie du paysage	10
2.2. La théorie des graphes paysagers pour mesurer la connectivité.....	11
2.3. Les étapes de l'étude.....	11
PARTIE 2: Méthodologie pour modéliser la connectivité écologique	13
3. Choix des secteurs d'étude et des espèces de poissons cibles	13
3.1. L'estuaire de la Seine.....	13
3.2. La Seine.....	15
3.3. L'Austreberthe.....	16
3.4. L'Eure.....	18
3.5. L'Andelle	19
3.6. L'Epte.....	21
3.7. La Mauldre.....	22
4. Identification des frayères potentielles	24
4.1. Les caractéristiques physiques des frayères	24
4.1.1. Le saumon Atlantique.....	24
4.1.2. La truite de mer et la truite résidente.....	24
4.1.3. La grande alose.....	25
4.1.4. La lamproie marine.....	25
4.2. Compilation des données substrat/faciès.....	25
4.2.1. Sources des données.....	25
4.2.2. Transformation des données substrat/faciès	26
4.3. Cartographie des frayères potentielles.....	27
4.4. Les frayères observées	27
5. Les éléments du paysage influençant la migration	28
5.1. Les périodes de migration	28

5.2.	Les évènements hydrologiques.....	29
5.3.	Les conditions hydrodynamiques.....	30
5.3.1.	Impact des conditions hydrodynamiques sur la migration	31
5.3.1.	Les données de vitesse de courant	32
5.4.	Les paramètres physico-chimiques	35
5.4.1.	Impact des paramètres physico-chimiques sur la migration	35
5.4.2.	Les données physico-chimiques	36
5.5.	Les ouvrages transversaux	37
5.5.1.	Impact des ouvrages transversaux sur la migration.....	37
5.5.2.	Les données relatives aux ouvrages.....	38
5.6.	La présence d'abris.....	43
5.6.1.	Impact des abris sur la migration ?	43
5.6.2.	Les données relatives aux abris.....	43
6.	Attribution des résistances au déplacement	46
6.1.	Résistances des vitesses de courant	48
6.2.	Résistances des paramètres physico-chimiques	49
6.1.	Résistances des ouvrages	49
6.2.	Abris et préférences de déplacement	50
7.	Évaluer le coût de la migration	50
7.1.	Calcul de la matrice raster de coût de déplacement.....	51
7.2.	Calcul des distances fonctionnelles nécessaires pour accéder aux frayères	51
8.	Scénarios de restauration de la continuité écologique.....	52
8.1.	Choix des scénarios "ouvrages"	52
8.1.	Autres scénarios envisagés.....	54
8.2.	Test des scénarios	54
PARTIE 3: Résultats de la modélisation de la continuité écologique et effets des scénarios de restauration		55
9.	Estuaire	Erreur ! Signet non défini.
10.	Austreberthe	56
11.	Eure.....	62
12.	Andelle.....	66
13.	Seine	70
14.	Epte.....	73
15.	Mauldre.....	78
Bibliographie.....		84
Annexe 1 : Cartes de répartition des grands migrateurs dans le bassin de la Seine (source SEINORMIGR).....		87
Annexe 2: Tableau des dénominations des substrats faciès initiales et harmonisées		92
Annexe 3: Projection des données linéaires substrat/faciès sur les polygones surface en eau de la BD TOPO		95

Annexe 4: Valeurs des limites des classes d'état pour les paramètres physico-chimiques généraux pour les cours d'eau	96
Annexe 5: Moyennes des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2016 pour les 6 périodes de migration	97
Annexe 6: Moyennes des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 pour les 6 périodes de migration	104

Table des Figures

Figure 1: Axes et actions du projet CONSACRE (Le Pichon, 2018)	9
Figure 2: Illustration du calcul de la distance euclidienne (DE), de la distance hydrographique (DH) et de la distance fonctionnelle (DF) dans un cours d'eau. DH est le tracé le plus court et DF celui qui évite les profondeurs inférieures à 1 m (Le Pichon, 2006).	11
Figure 3: Schéma représentant les éléments du paysage à prendre en compte dans la modélisation de la connectivité écologique. L'attribution des résistances est schématisée par un gradient. Exemple ici d'un saumon Atlantique qui devrait accéder à une zone de frayère depuis l'estuaire.	12
Figure 4: Linéaires de cours d'eau et espèces sélectionnés pour modéliser la continuité écologique	13
Figure 5 : L'estuaire de la Seine (GIP SA, 2015).....	14
Figure 6: Répartition historique (1850) et actuelle (2018) de la lamproie marine (LPM), du saumon Atlantique (SAT) et de la grande alose (ALA) dans le bassin de la Seine. Source: Le Pichon et al. (2020)	15
Figure 7: Ouvrages transversaux sur le secteur étudié de la Seine. Photos: Géoportail (2019).....	16
Figure 8: confluence entre l'Austreberthe et la Seine à Duclair. La confluence est sous l'influence de la marée entraînant temporairement une déconnexion au fleuve (à gauche). Cette déconnexion à marée basse est accentuée par la présence d'un ouvrage (à droite). Source: GéObs.....	17
Figure 9: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Austreberthe. Source: SIRAS (2019)	17
Figure 10: Ouvrage de Martot avant et après effacement (décembre 2018). Source: FDAAPPMA27 (2019)	18
Figure 11:Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Eure. Source ROE (2019).....	19
Figure 12: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Andelle. Source: GéObs.....	21
Figure 13: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Epte. Source: GéObs.....	22
Figure 14: État physico-chimique des masses d'eau du bassin de la Mauldre (source: Observatoire des poissons du bassin Seine-Normandie – Qualité de l'eau - État des lieux 2019, AESN).....	23
Figure 15: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique sur la Mauldre. Source: GéObs.....	24
Figure 16: Couche "faciès" linéaire et couche polygone "SURFACE_EAU" de la BDTOPO (en bleu) sur l'Andelle.....	26
Figure 17: Couche polygone "faciès" créée sur l'Andelle.....	26
Figure 18: Histogramme des faciès (à gauche) et substrats (à droite) caractérisant les 1204 sites d'observation de frayères de lamproies marines (données AAPPMA27 de 2009 à 2018 sur l'Eure, l'Andelle et l'Epte)	27
Figure 19: Couche polygone "frayères potentielles de lamproie marine" (en hachurées) créée sur l'Andelle. Les drapeaux rouges correspondent aux observations de frayères par l'AAPPMA27.....	28
Figure 20: Rythmes migratoires des truites de mer au barrage de Poses ayant servi à identifier les périodes de migration pour TRM (modifié à partir de Grall et al. (2018)). Dans le cas de TRM, deux périodes migratoires ont été identifiées.....	29
Figure 21: Distribution des débits moyens mensuels (QMM) sur la Seine à Vernon de 2010 à 2018 pour chaque période de migration.....	30
Figure 22: Bilan de la caractérisation hydrologique des mois de migration sur la période 2010-2018 pour chaque espèce	30
Figure 23: Bilan des mois de migration de 2010 à 2018 et de leur caractère hydrologique (débits bas, moyens et hauts).....	30
Figure 24: Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de courant pour les groupes ICE 1 et 3 (Baudoin et al., 2014a)	31

Figure 25: Détermination des périodes de flot et de jusant à partir des graphiques de hauteur d'eau et de vitesse de courant en fonction du temps.....	33
Figure 26: Vitesses moyennes dans l'estuaire pendant le flot pour la période de migration Mai-Juillet pour SAT (débits bas)	33
Figure 27: Calcul des vitesses moyennes sur la Seine pour la période de migration Mai-Juillet pour SAT (cas hydrologique: normal)	34
Figure 28: Seuils de température et d'oxygène dissous influençant la migration	36
Figure 29: Modélisation de l'oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine de 1955 à 2017 (source : GIP Seine-Aval, 2014).....	56
Figure 30: Exemple de transformation point vers polygone des valeurs d'oxygène dans la Seine au niveau du barrage de Méricourt pour la période de migration Mai-Juillet 2011. Données: Prose-PA.	37
Figure 31: Exemple de construction polygonale des ouvrages (secteur barrage de Poses)	39
Figure 32: Comparaison des distributions des classes ICE (Geobs) et pseudo-ICE calculées sur environ 5000 ouvrages en France pour le groupe d'espèce Gr1 (TRM, SAT >50cm).....	41
Figure 33: Polygones caractérisant les abris potentiels (végétation aquatique et ombrage)	44
Figure 34: Attribution des résistances au déplacement R en fonction des classes ICE de l'ouvrage ou du type d'ouvrage dans le cas d'aménagement sans hauteur de chute.....	50
Figure 35: Combinaison par multiplication des rasters de coût des variables environnementales. Si un ouvrage est présent sur le pixel, la valeur du pixel résultante sera la valeur du pixel de l'ouvrage (exemple avec un pixel ouvrage de valeur R=10).....	51
Figure 36: Schéma simplifié des étapes de calcul du chemin de moindre coût	52
Figure 37: Distribution des distances fonctionnelles (DF) en fonction A) des périodes de migration et des cas hydrologiques et B) des espèces pour rejoindre l'Eure depuis l'estuaire.	55
Figure 38: Pourcentage du temps où les températures dépassent 20°C dans l'estuaire sur la période Juin-Juillet (migration TRM) et comparaison des distributions de dépassement en fonction des cas hydrologiques. Données MARS3D 2010-2018.	56
Figure 39: Moyennes des paramètres physico-chimiques issus des données modélisées par le modèle pyNuts-Riverstrahler sur 2010-2016 pour la période de migration Juin-Juillet (période de migration de la truite de mer). Les linéaires en gris sont sans données. Les graphiques pour les autres périodes de migration sont en Annexe 5	61
Figure 40: Pourcentage du temps sous le seuil de 6 mg(O ₂)/L sur la période de migration de la Truite de Mer (Juin-Juillet) pour l'année 2011. Données: PROSE-PA	72
Figure 41: Évolution temporelle des valeurs des paramètres physico-chimiques sur la Mauldre à Épône. Les seuils utilisés sont ceux définis par l'arrêté du 27 juillet 2018. Données: Naïades.	83

1. Contexte de l'étude

1.1. La continuité écologique et ses enjeux

La notion de continuité écologique d'un cours d'eau a été introduite suite à la mise en place, en 2000 de la Directive Cadre sur l'Eau. Elle se définit comme la libre circulation des organismes vivants, l'accès aux habitats indispensables à la réalisation de leur cycle de vie (e.g reproduction, croissance, alimentation, abri, etc.) et comme le bon déroulement du transport naturel des sédiments. Or, les cours d'eau figurent parmi les écosystèmes les plus fragmentés et la présence d'ouvrages bloquant (barrage, seuil, digue, etc.) constitue la principale cause de perte de continuité écologique en rivière car ils agissent comme des verrous pour la faune aquatique et les sédiments.

La continuité écologique étant le support du mouvement des organismes entre les différentes zones d'habitats, son maintien est essentiel à la pérennité des populations et donc à la conservation des espèces de poissons. Elle est garante des échanges génétiques et autres flux écologiques assurant la viabilité des populations et le maintien des espèces. Elle constitue notamment la possibilité pour ces populations de s'adapter face au changement climatique, notamment via le déplacement de leurs aires géographiques devenues hostiles vers des zones plus favorables. Restaurer la continuité écologique est donc aujourd'hui un enjeu majeur pour atteindre les objectifs de la DCE et préserver la biodiversité dans un contexte de dérèglement climatique.

1.2. Une politique apaisée autour de la restauration de la continuité écologique des cours d'eau

Si la notion de continuité écologique est assez récente, les principes qui lui sont attachés comme celui de la libre circulation des espèces sont plutôt anciens : dès 1865 une loi impose à certains ouvrages l'aménagement de passes à poissons. Ce n'est qu'à partir de 2006, suite à la DCE, qu'elle a été introduite dans la législation française. Par la suite, cette notion a été mise en avant par les lois « Grenelle » (2009 et 2010) avec la mise en place des trames vertes et bleues ainsi que l'élaboration du **plan d'action pour la restauration de la continuité écologique (PARCE)**. Depuis 2012, le PARCE a comme priorité de hiérarchiser les actions de restauration en établissant **une liste d'ouvrages prioritaires** par bassin. Afin d'identifier les secteurs prioritaires, l'article L.214-17 du code de l'environnement a prévu **le classement de cours d'eau en deux listes**, arrêtées entre 2012 et 2013 en France métropolitaine (hors Corse):

- En Liste 2 figurent les cours d'eau sur lesquels il est nécessaire d'assurer un transport suffisant de sédiments et la circulation des poissons migrateurs. Ce classement impose alors une obligation d'interventions adaptées sur les ouvrages existants sur ces cours d'eau, cela dans un délai de cinq ans à compter de la date de classement.
- En Liste 1 figurent les cours d'eau en très bon état écologique, jouant le rôle de réservoirs biologiques et nécessitant une protection complète des poissons amphihalins. Ce classement empêche la construction d'ouvrages nouveaux constituant un obstacle à la continuité écologique sur ces cours d'eau.

Les deux objectifs des listes sont complémentaires, en particulier sur les axes à grands migrateurs sur lesquels il faut à la fois ne pas ajouter d'obstacles et améliorer la continuité écologique au niveau des obstacles existants, c'est pourquoi de nombreux tronçons de cours d'eau sont donc logiquement classés dans les deux listes.

Pour dépasser les difficultés apparues dans la mise en œuvre du PARCE, un "plan d'action pour une politique apaisée de restauration de la continuité écologique" (PAPARCE) est publié en 2018 suivi d'une

note technique proposant 7 actions permettant de faciliter le dialogue sur les plans techniques, administratifs, sociaux et économiques relatifs à la mise en œuvre des projets de RCE.

1.3. La continuité écologique dans le bassin de la Seine

La vallée de la Seine possède une grande variété de paysages, supports d'un formidable réservoir de biodiversité où chaque type de paysage correspond à des milieux hébergeant une flore et une faune spécifiques, voire rares. Pour la composante aquatique, la vallée de la Seine assure des fonctions écologiques de nourricerie, de transit et de croissance pour de nombreuses espèces, notamment pour les peuplements de poissons. Elle joue un rôle majeur pour les poissons migrateurs et résidents qui doivent circuler entre la mer, l'estuaire, le fleuve et ses affluents afin de réaliser tout ou partie de leur cycle de vie. Pour exemple, historiquement, huit espèces de poissons potamotiques¹ occupaient une large partie du bassin de la Seine. Mais l'aménagement du fleuve, ainsi que la pollution de l'eau ont fragilisé ces espèces, au point de faire disparaître certaines du bassin de la Seine au cours du 20^e siècle (Belliard et al., 2018, Le Pichon et al., 2020). Aujourd'hui, grâce à l'amélioration de la qualité de l'eau, l'aménagement et l'effacement de certains ouvrages, on observe une recolonisation progressive de plusieurs de ces espèces. La restauration de la continuité écologique du bassin de la Seine est donc un enjeu majeur de recolonisation et de préservation de ces espèces.

1.4. Le projet CONSACRE

C'est dans ce contexte qu'a débuté en 2018 le projet CONSACRE, CONTinuité écologique de la Seine et intérêt des ACteurs pour sa Restauration. En partenariat avec l'AESN, les régions Île-de-France et Normandie, le GIP Seine-Aval et INRAE, le projet a l'ambition d'analyser d'un point de vue global et local, la continuité écologique piscicole de l'axe Seine. L'objectif est de proposer des pistes d'actions, qui concernent d'une part les possibilités d'aménagements pour la préservation et la restauration des milieux naturels, et d'autre part l'amélioration de l'association des différents publics impliqués dans cette problématique.

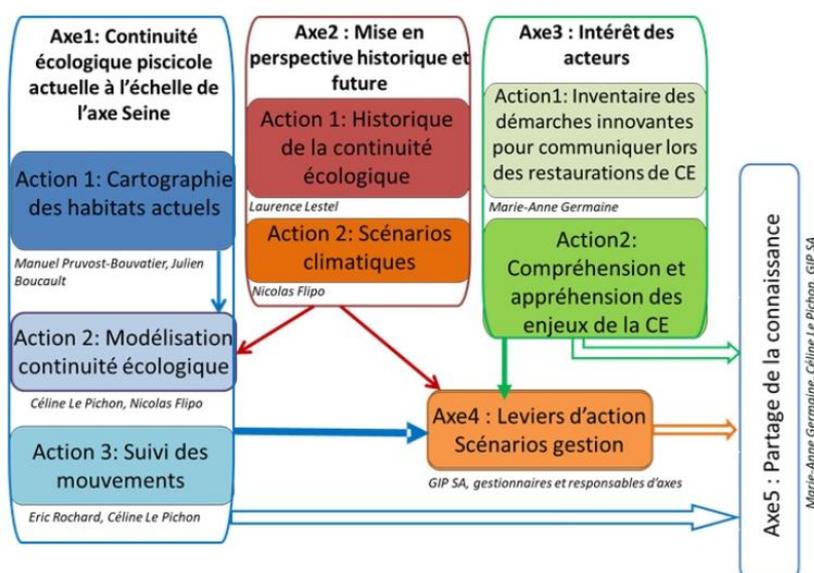


Figure 1: Axes et actions du projet CONSACRE (Le Pichon, 2018)

Pour répondre à ces objectifs, le projet s'articule en 5 grands axes (Figure 1) dont un premier qui s'intéresse à la continuité écologique piscicole actuelle (Axe1), un second à l'évolution historique et au devenir de cette continuité (Axe2) et un troisième axe orienté sciences humaines et sociales

¹ Poisson qui vit en mer mais qui naît et se reproduit en eau douce.

visant à appréhender le rapport des populations à la rivière et aux enjeux de la continuité écologique (Axe3).

1.5. Objectifs de l'étude

Ce travail intitulé "**Modélisation de la continuité écologique sur la Seine et ses affluents**" s'intègre à l'Axe² 1 - Action2 du projet CONSACRE. Dans cette étude, **l'état actuel des continuités écologiques est modélisé pour plusieurs espèces de poissons grands migrateurs en montaison, depuis l'estuaire de la Seine jusqu'aux frayères**. L'intérêt de modéliser la continuité écologique est ici de pouvoir 1) identifier des zones critiques pour la migration, 2) proposer, tester et comparer des scénarios de gestion pour identifier des pistes opérationnelles améliorant la qualité de la continuité des milieux aquatiques et enfin 3) développer des indicateurs de continuité (ou métrique de connectivité) qui, en étant intégré dans des modèles de distribution d'espèces, permettrait d'améliorer leur performance prédictive (Davion et Jeliaskov, 2021).

2. Comment modéliser la connectivité écologique ?

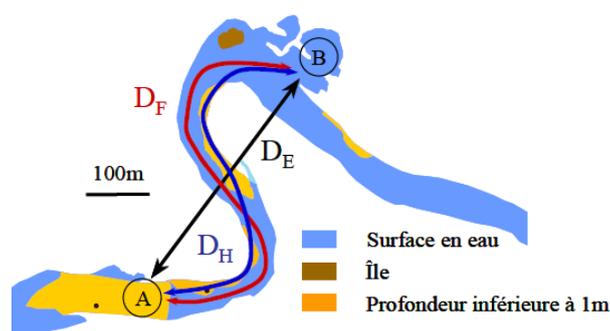
2.1. La connectivité écologique en écologie du paysage

En écologie du paysage, la continuité écologique se réfère au terme de "connectivité écologique", qui se définit comme étant le degré de connexion entre les divers milieux naturels présents au sein d'un même paysage, au niveau de leurs composantes, de leur répartition spatiale et de leurs fonctions écologiques (Taylor et al., 1993). Au sein d'un réseau hydrographique et dans le cas des poissons, deux types de connectivité sont à distinguer (Merriam, 1984) (Figure 2):

1) la connectivité structurelle, évaluée par le calcul de la distance hydrographique (D_H) entre deux habitats et qui représentent le chemin le plus court au sein du réseau.

2) la connectivité fonctionnelle, évaluée par le calcul de la distance fonctionnelle (D_F), qui intègre à la fois la distance hydrographique et la « résistance » du milieu, c.-à-d. le coût énergétique de déplacement pour les organismes (lié p. ex. au passage d'obstacles physiques ou chimiques) et variant d'une espèce à l'autre selon ses caractéristiques morphologiques, comportementales, physiologiques, etc. (d'où le terme de « fonctionnelle »).

Dans cette étude, nous nous intéresserons à la **connectivité fonctionnelle** potentielle³ du milieu.



³ La connectivité fonctionnelle réelle est estimée sur le terrain par observation de certaines espèces alors que la connectivité fonctionnelle potentielle est estimée à partir de modèles de simulation spatiale (Tischendorf et Farig, 2000)

Figure 2: Illustration du calcul de la distance euclidienne (DE), de la distance hydrographique (DH) et de la distance fonctionnelle (DF) dans un cours d'eau. DH est le tracé le plus court et DF celui qui évite les profondeurs inférieures à 1 m (Le Pichon, 2006).

2.2. La théorie des graphes paysagers pour mesurer la connectivité

Depuis les années 2000, l'utilisation des graphes paysagers, pour modéliser la connectivité potentielle, est reconnue comme un outil pertinent d'aide à la gestion paysagère. Cette approche suppose des déplacements au sein d'un réseau constitué de nœuds représentant les habitats, et de liens représentant les déplacements potentiels. Elle permet ainsi une représentation visuelle des possibilités de dispersion d'une espèce. Parmi les méthodes existantes pour évaluer ces connectivités, l'analyse des chemins de moindre coût et la théorie des circuits sont les plus utilisées (Bourgeois et al., 2017).

- Les modèles de connectivité basés sur le chemin de moindre coût - *least cost modelling* (Adriaensen et al., 2003)(Etherington, 2016). Cette approche suppose que l'individu minimise le coût énergétique lié à son déplacement. À partir de matrices de coût, ces modèles permettent de tracer le chemin le moins coûteux et de calculer des indices spatiaux de connectivité entre les habitats (distances fonctionnelles, probabilité d'atteindre un habitat cible, indices de proximité, etc.). Ces modèles peuvent être développés à l'aide du logiciel Anaqualand (Le Pichon et al., 2006), du package R "leastcostpath" (Lewis, 2021), du logiciel Pathmatrix (Ray, 2005) ou de l'extension Spatial Analyst de ArcGIS.
- Les modèles de connectivité basés sur la théorie des circuits (McRae et al., 2008). Cette approche suppose que le déplacement est aléatoire et que la résistance au déplacement dans le paysage est analogue à la résistance dans un circuit électrique. Dans cette approche, tous les chemins possibles entre habitat sont alors considérés et des métriques de connectivité pondérée sont calculées. Ces modèles peuvent être développés avec les logiciels Circuitscape (McRae and Shah, 2009).

Peu de modèles de connectivité ont été développés ou appliqués en cours d'eau et leur approche est souvent pensée pour les écosystèmes terrestres. En supposant que les poissons minimisent les coûts énergétiques pendant leurs déplacements en rivière, nous avons choisi une approche de chemin de moindre coût pour modéliser la connectivité écologique entre l'estuaire et les frayères potentielles de grands migrateurs (Le Pichon et al., 2007, Carnie et al., 2016). Enfin, plusieurs métriques ont été développées pour mesurer la connectivité fonctionnelle à l'aide de graphes paysagers (Keeley et al., 2021). Dans cette étude la distance fonctionnelle (DF) et la distance hydrographique (DH) depuis l'estuaire aux frayères serviront d'indicateur de connectivité.

2.3. Les étapes de l'étude

Ce travail, pour **modéliser la connectivité fonctionnelle d'une migration de montaison de l'estuaire aux frayères potentielles, est divisé en six étapes:**

1) Choisir les secteurs géographiques d'étude et les espèces de poissons migrateurs cibles

2) Identifier les frayères potentielles et évaluer leur disponibilité

Les frayères potentielles serviront d'habitats cibles pour évaluer la connectivité.

3) Identifier les éléments du paysage influençant la migration

Une migration amont, de la mer jusqu'à une zone de fraie, constitue un coût énergétique important pour un poisson. Ce coût énergétique va dépendre des **éléments du paysage** que le poisson va rencontrer au cours de sa migration. Certains éléments du paysage pourront contraindre le déplacement et en augmenter le coût: la présence d'obstacles, de pollutions et certaines conditions

hydrodynamiques (ex. forte vitesse de courant). À l'inverse d'autres pourront favoriser le déplacement et en diminuer le coût: les périodes de flot dans l'estuaire, la présence d'abris.

4) Attribuer des coûts de déplacement aux éléments du paysage

En confrontant ces éléments du paysage aux caractéristiques des espèces (ex. capacité de nage et de franchissement d'obstacle, seuil de tolérance aux pollutions, etc.), il sera possible d'attribuer **des coûts de déplacement** (ou résistance) à chacun de ces éléments du paysage (Figure 1).

5) Calculer des métriques de connectivité pour évaluer l'accessibilité aux habitats cibles

Enfin, en utilisant **une approche de chemin de moindre coût** (Le Pichon and Alp, 2018, Roy and Le Pichon, 2017), il sera possible de calculer des distances fonctionnelles et de conclure quant à l'accessibilité des frayères.

6) Étudier l'effet de scénarios de restauration de la continuité écologique

Cette modélisation servira à tester l'effet de scénarios de restauration de la continuité écologique tels que l'effacement d'ouvrages transversaux.

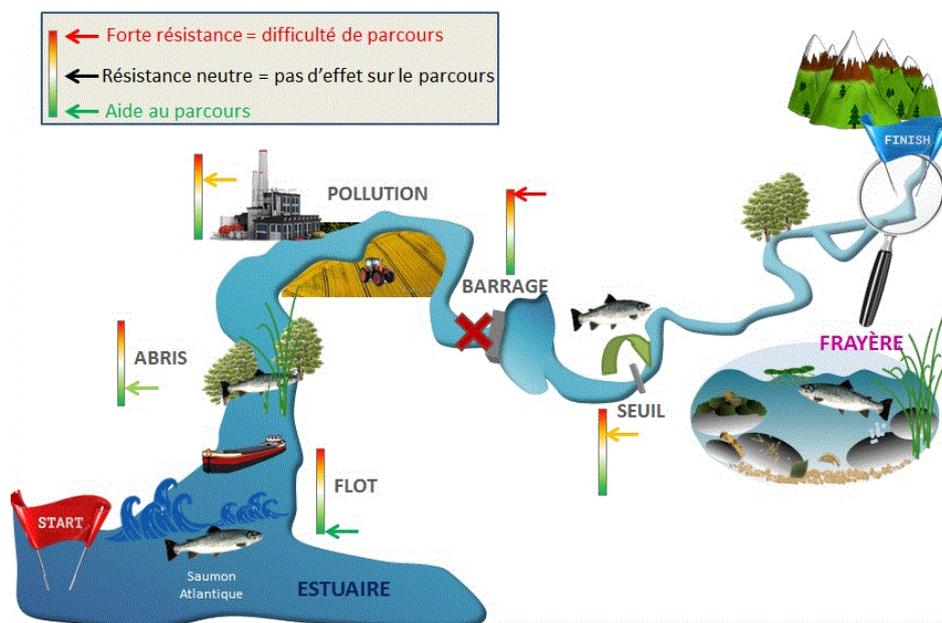


Figure 3: Schéma représentant les éléments du paysage à prendre en compte dans la modélisation de la connectivité écologique. L'attribution des coûts est schématisée par un gradient. Exemple ici d'un saumon Atlantique qui devrait accéder à une zone de frayère depuis l'estuaire.

PARTIE 2: Méthodologie pour modéliser la connectivité écologique

3. Choix des secteurs d'étude et des espèces de poissons cibles

La modélisation de la continuité écologique est réalisée dans l'estuaire de la Seine entre Honfleur et Poses, dans le fleuve Seine entre Poses et Epône (confluence avec la Mauldre) et dans 5 affluents: l'Austreberthe, l'Eure, l'Andelle, l'Epte et la Mauldre (Figure 4).

Les trois espèces de poissons grands migrateurs sélectionnées: truite de mer, lamproie marine et alose, sont anadromes: les adultes matures migrent de la mer vers les rivières pour se reproduire en eau douce (montaison) et les juvéniles retournent en mer pour grossir (dévalaison). Dans le cas du de la truite de mer et de la lamproie marine, les géniteurs meurent après la reproduction.

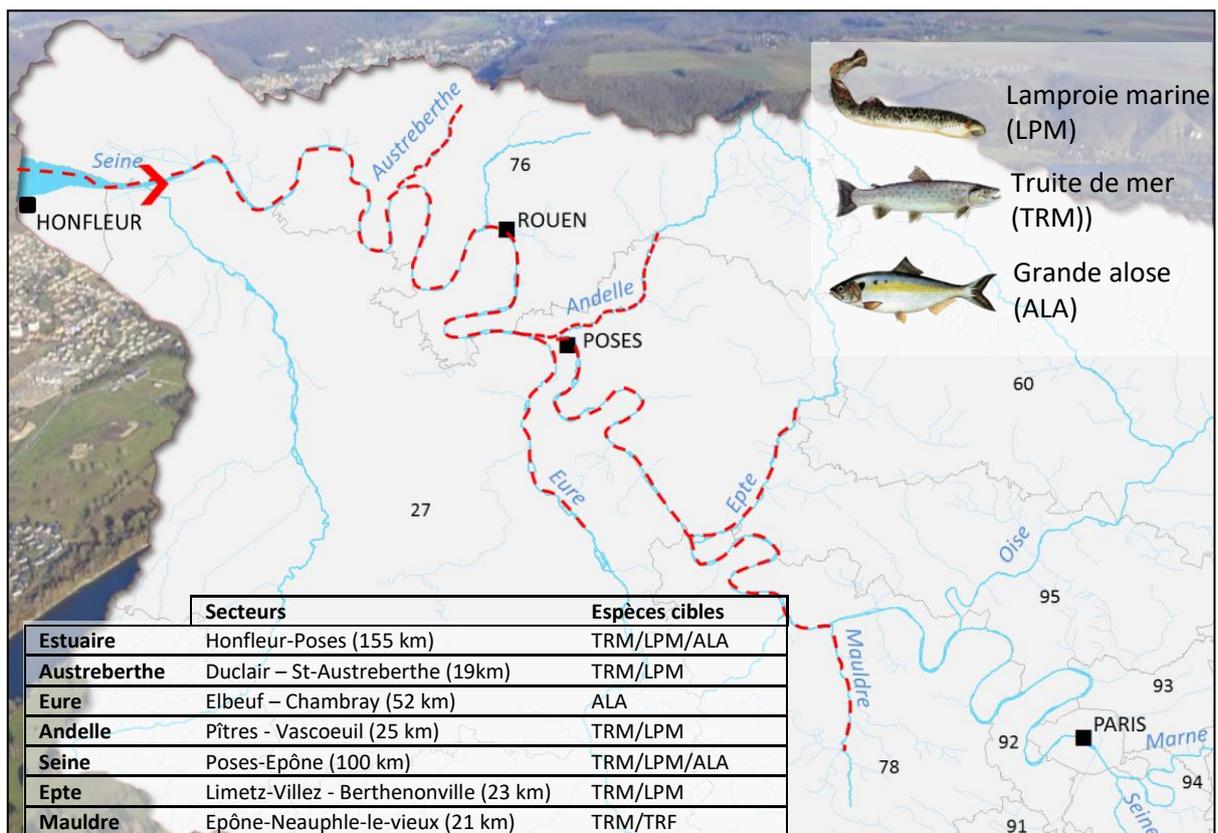


Figure 4: Linéaires de cours d'eau et espèces sélectionnés pour modéliser la continuité écologique

3.1. L'estuaire de la Seine

Les caractéristiques géographiques

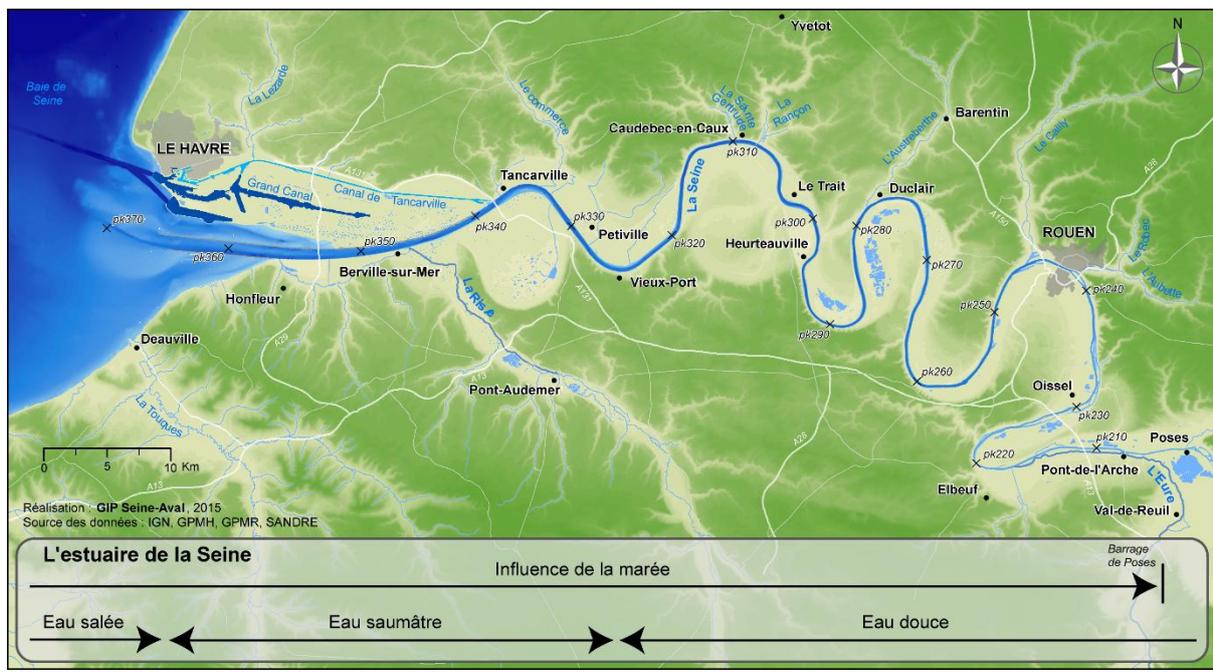


Figure 5 : L'estuaire de la Seine (GIP SA, 2015)

L'estuaire de la Seine correspond à la portion aval de la Seine sous l'influence de la marée. Il représente 170 km et est délimité par le barrage de Poses en amont et la baie de Seine en aval. L'estuaire est un milieu hétérogène et changeant composé de trois zones (Figure 5) : l'estuaire amont (ou fluvial) entre Poses et Vieux-Port, zone soumise à la marée dans laquelle l'eau est douce, l'estuaire moyen, entre Vieux-Port et Honfleur, zone de mélange des eaux douces et marines et l'estuaire aval (ou marin) de Honfleur à la partie orientale de la baie de Seine, où les eaux sont toujours salées. Le bassin de l'estuaire s'étend sur une superficie de 11 500 km², sur trois départements (Eure, Seine Maritime et Calvados) et reçoit les eaux de plusieurs affluents dont le Cailly, l'Austreberthe, la Risle, l'Eure et l'Andelle. Les parties de l'estuaire considérées dans cette étude correspondent à l'estuaire amont et moyen entre Poses et Honfleur.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes

Tableau 1 : Espèces de poissons migrateurs observées en estuaire de Seine

Espèce			Liste rouge des espèces menacées			Disparition (estuaire de Seine)
			Monde	France	Haute-Normandie	
Espèces potamotoques (migration anadrome)	Alose feinte	<i>Alosa fallax</i>	LC	VU	CR	~ 1970
	Eperlan d'Europe	<i>Osmerus eperlanus</i>	LC	NE	EN	~ 1970
	Esturgeon sibérien*	<i>Acipenser baerii</i>	VU	NA	NA	
	Esturgeon européen	<i>Acipenser sturio</i>	CR	CR	RE	1917
	Grande alose	<i>Alosa alosa</i>	LC	VU	EN	~ 1920
	Lamproie de rivière	<i>Lampetra fluviatilis</i>	LC	VU	VU	
	Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	LC	NT	VU	1970 ?
	Saumon atlantique	<i>Salmo salar</i>	LC	VU	EN	~ 1900-1910
Truite de mer	<i>Salmo trutta trutta</i>	LC	LC	NT	1980 ?	
Espèces thalassotoques (migration catadrome)	Anguille européenne	<i>Anguilla anguilla</i>	CR	CR	CR	
	Flet	<i>Platichthys flesus</i>	LC	DD	NT	
	Mulet porc	<i>Liza ramada</i>	LC	DD	DD	

Statut sur liste rouge

EX Espèce éteinte au niveau mondial	EN En danger	LC Préoccupation mineure
RE Espèce disparue de métropole	VU Vulnérable	DD/NA/NE Données insuffisantes/Non applicable/Non évaluée
CR En danger critique d'extinction	NT Quasi menacée	* Espèce introduite

GIP Seine-Aval, 2016 - Source des données : Belliard et al., 2009 ; Ciolfi & Paptorey, 2012 ; FDAAPPMA76 & FDAAPPMA27 ; Mirkovic & Bordier, 2013

Historiquement, l'estuaire de Seine était un axe migratoire majeur pour les poissons migrateurs. Ces populations étaient particulièrement ciblées pour la pêche en estuaire, avec des tonnages relativement importants. Onze espèces étaient historiquement présentes dont huit potamotoques (Belliard et al., 2009, Rochard et al., 2007). Mais ces populations de poissons migrateurs ont été fortement fragilisées par l'intensification des pressions anthropiques dans l'estuaire de la Seine, depuis la fin du XVIII^e siècle : barrages, travaux d'endiguement, assèchement des marais, etc. ont progressivement empêché l'accès aux zones de reproduction ou de nurserie. Certaines espèces ont ainsi disparu de l'estuaire au cours du XX^e siècle (Tableau 1). Depuis les années 2000, on constate une recolonisation progressive de certaines dans le bassin de l'estuaire et aujourd'hui, dix espèces autochtones colonisent l'estuaire dont sept potamotoques. Ainsi, l'estuaire, en tant que zone de transit obligatoire pour rejoindre les zones de reproduction, est un milieu à fort enjeu pour les migrateurs potamotoques qu'il convient de préserver.

Les pressions anthropiques

L'estuaire est sous l'influence de nombreuses pressions industrielles, urbaines et agricoles qui pèsent sur la qualité de l'eau et des sédiments. Bien que la qualité de l'eau se soit nettement améliorée ces dernières décennies, la contamination chimique des poissons reste un sujet de préoccupation.

3.2. La Seine

Les caractéristiques géographiques

La Seine prend sa source sur le plateau de Langres en Côte d'Or et parcourt 775 km avant de se jeter dans la Manche. Sa partie fluviale est délimitée à l'aval par le barrage de Poses, premier barrage depuis l'estuaire.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes et potentialités d'accueil

La vallée de la Seine assure des fonctions écologiques de nurserie, de transit et de croissance pour de nombreuses espèces. C'est un axe majeur pour les poissons migrateurs qui doivent circuler entre la mer, l'estuaire, le fleuve et ses affluents afin de réaliser tout ou partie de leur cycle de vie. Historiquement, la partie fluviale de la Seine comptait 10 espèces de grands migrateurs (l'éperlan étant inféodé à l'estuaire) dont sept espèces potamotoques qui colonisaient une large partie du bassin. Pour exemple en 1750, le saumon et la lamproie marine remontaient jusque dans la Cure à plus de 900 km de l'estuaire (Figure 6). Le XX^e siècle marqua une période de déclin majeur des populations de grands migrateurs dans la Seine. Plusieurs espèces telles que le saumon, les aloses et l'esturgeon disparurent du fleuve. Aujourd'hui, à l'exception de l'esturgeon européen, ces espèces recolonisent progressivement le fleuve mais leur répartition reste encore restreinte à la partie basse du fleuve en aval de Paris.

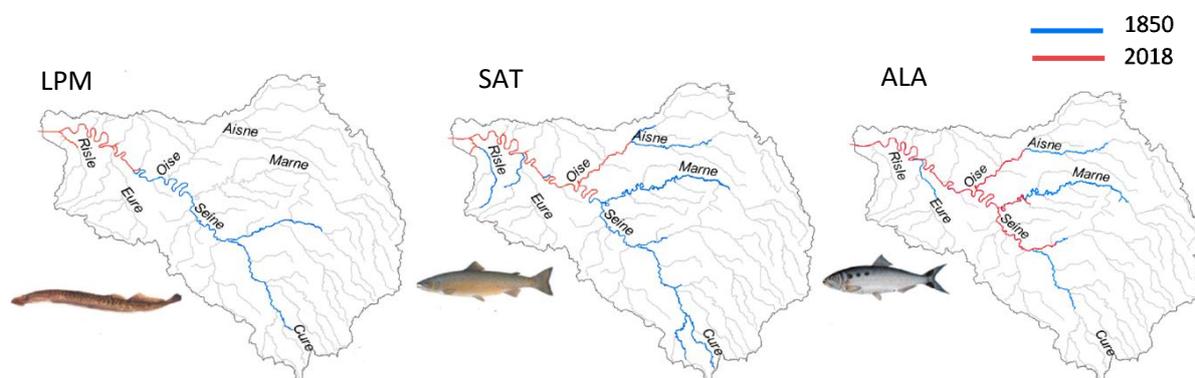


Figure 6: Répartition historique (1850) et actuelle (2018) de la lamproie marine (LPM), du saumon Atlantique (SAT) et de la grande alose (ALA) dans le bassin de la Seine. Source: Le Pichon et al. (2020)

Les pressions anthropiques

Le bassin de la Seine se caractérise par de fortes pressions anthropiques liées à des densités urbaines localement élevées et de nombreuses activités industrielles et agricoles, qui peuvent être à l'origine

d'une altération de la qualité de l'eau. Son état physico-chimique est d'ailleurs classé moyen entre Poses et Epône (État des lieux 2019, AESN).

De plus, la Seine est un fleuve aménagé pour la navigation; ces barrages de navigation et écluses constituent des obstacles pouvant affecter la libre circulation des poissons. Entre Poses et Epône, il existe trois ouvrages de navigation (Figure 9):

- 1) Le barrage-écluses de Poses. Il est aménagé d'une passe à anguilles en rive gauche et d'une passe à poissons disposant d'une chambre de vidéo comptage en rive droite.
- 2) Le barrage-écluses de Port-Mort/Notre Dame la Garenne. Il est aménagé d'une rivière de contournement et d'une passe à anguilles.
- 3) Le barrage-écluses de Méricourt. Il est aménagé d'une passe à poissons.

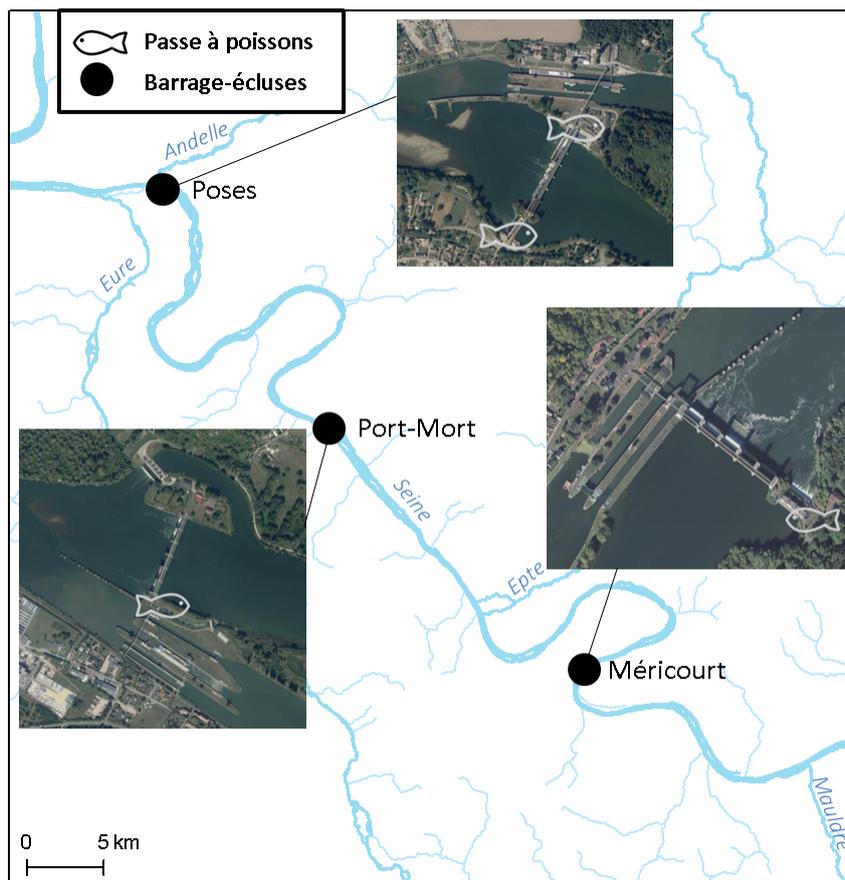


Figure 7: Ouvrages transversaux sur le secteur étudié de la Seine. Photos: Géoportail (2019)

3.3. L'Austreberthe

Les caractéristiques géographiques

L'Austreberthe est un affluent rive droite de la Seine. La rivière prend sa source à Sainte-Austreberthe et parcourt 18 km dans le département de la Seine-Maritime avant de se jeter dans la Seine à Duclair.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes et potentialités d'accueil

L'Austreberthe accueille trois espèces de grands migrateurs : la truite de mer, le saumon Atlantique et l'anguille. Les fronts de colonisation connus se situent actuellement au niveau du seuil du Paulu pour la truite de mer et le saumon Atlantique et au niveau du seuil de la Corderie Bidault (ROE25849) pour l'anguille (site [Seinormigr](#)).

Bien qu'elles n'aient pas été récemment inventoriées, le PDPG 76 (2007) indique que l'Austreberthe pourrait également accueillir des espèces comme la lamproie marine, la lamproie fluviatile et le flet.

La continuité écologique sera modélisée depuis la mer jusqu'aux frayères potentielles sur l'Austreberthe pour 2 espèces de grands migrateurs : **la truite de mer et la lamproie marine**.

Les pressions anthropiques



Figure 8: confluence entre l'Austreberthe et la Seine à Duclair. La confluence est sous l'influence de la marée entraînant temporairement une déconnexion au fleuve (à gauche). Cette déconnexion à marée basse est accentuée par la présence d'un ouvrage (à droite). Source: GéObs

L'Austreberthe est classée en Liste 1 et Liste 2 (voir encadré 1). Ce classement implique donc la mise en place d'actions visant à assurer la continuité écologique en intervenant sur les obstacles existants. Ainsi, 6 ouvrages hydrauliques ont été identifiés comme prioritaire sur l'Austreberthe (Figure 9).

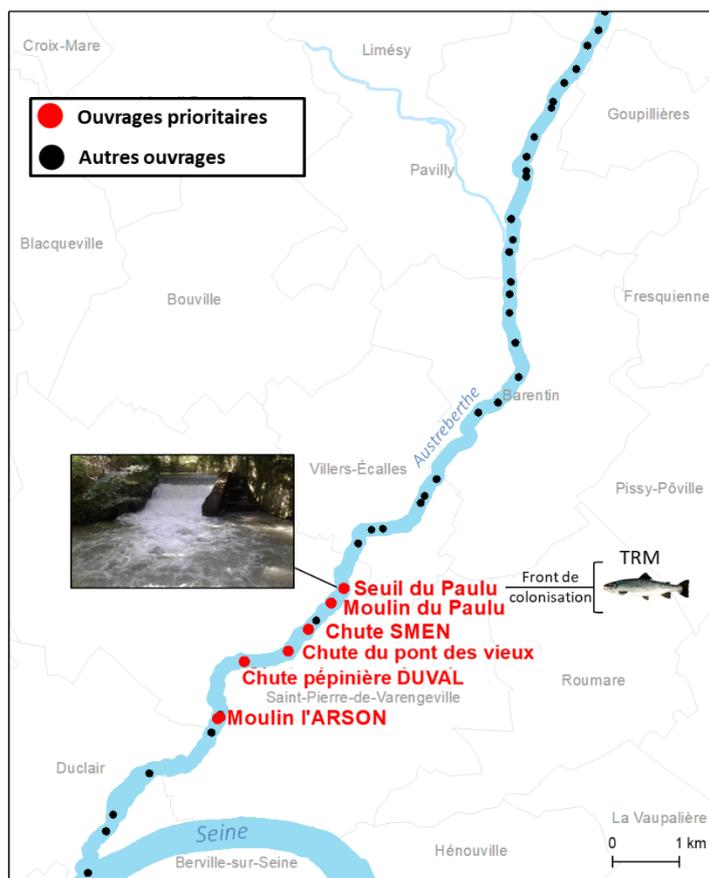


Figure 9: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Austreberthe. Source: SIRAS (2019)

À la problématique des ouvrages bloquant s'ajoutent également des pressions liées à l'artificialisation des berges (absence de ripisylve sur la moitié du linéaire) et à la rectification du cours d'eau induisant une altération de l'hydromorphologie naturelle (SIRAS, 2019).

3.4. L'Eure

Les caractéristiques géographiques

L'Eure est un affluent rive gauche de la Seine. La rivière prend sa source dans la région naturelle du Perche et parcourt 229 km dans les départements de l'Orne, l'Eure-et-Loir, l'Eure et la Seine-Maritime avant de se jeter dans la Seine à Martot.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes et potentialités d'accueil

L'Eure accueille deux espèces de grands migrateurs : la lamproie marine et l'anguille, espèce cible faisant l'objet d'une protection spécifique sur le bassin. Le front de colonisation connu de la lamproie marine se situe au niveau du complexe d'Heudreville (suivi 2018 - FDAAPPMA27, 2019).

Le PLAGEPOMI (PLAGEPOMI Seine Normandie, 2016) indique que l'Eure est un cours d'eau à enjeux pour les lamproies marine, dont la reproduction est suivie par l'AAPPMA27 depuis 2012 sur l'Eure aval (FDAAPPMA27, 2019, FDAAPPMA27, 2013). Bien qu'elles n'aient pas récemment été observées, le PLAGEPOMI indique également que l'Eure pourrait accueillir des espèces comme la lamproie fluviatile, la truite de mer et la grande alose. Un suivi de la reproduction de la grande alose est d'ailleurs entrepris par l'AAPPMA27 depuis 2019, les relevés de terrain confirment la présence de sites adaptés à la reproduction de l'espèce (FDAAPPMA27, 2020). Cette espèce était d'ailleurs présente historiquement sur l'Eure (Le Pichon et al., 2020).

La continuité écologique sera modélisée depuis la mer jusqu'aux frayères potentielles dans l'affluent pour 1 espèce de grands migrateurs : **la grande alose**.

Les pressions anthropiques



Figure 10: Ouvrage de Martot avant et après effacement (décembre 2018). Source: FDAAPPMA27 (2019)

Le barrage de Martot était le premier ouvrage infranchissable empêchant la plupart des poissons migrateurs de remonter dans l'Eure. Son effacement en 2018 a donc permis le décroisement de l'Eure à la Seine. D'autres ouvrages plus en amont ont été aménagés afin de restaurer la continuité piscicole et sédimentaire (Tableau 2).

Tableau 2 : Aménagements réalisés sur l'Eure (27) pour restaurer la continuité écologique

Type d'aménagement	
2007	Passé à poissons du clapet des Jonquets à Louviers
2011	Bras de contournement du barrage de la Villette à Louviers
2012	Aménagement du bras de Dievet à Louviers
2016	Effacement du seuil de l'ancienne écluse de l'île du roi

2016	Bras de contournement des Pâtures pour contourner le clapet de la Morte Eure au Vaudreuil
2017	Effacement de l'ouvrage de l'ancienne écluse de l'île du roi
2018	Effacement du seuil du barrage de Martot
2020	Ajustement du bras de contournement de la centrale d'Heudreville

Il reste cependant de nombreux ouvrages difficilement franchissables. Pour exemple, bien que le front de colonisation des lamproies marine ait progressé depuis quelques années et malgré les aménagements réalisés au niveau du complexe d'ouvrages à Louviers, le suivi de la lamproie marine réalisée par l'AAPPMA27 montre toujours un point de blocage en aval du bras de Dievet (FDAAPPMA27, 2019).

La présence d'ouvrages bloquant est une des principales raisons du classement de l'Eure comme cours d'eau dégradé dans le PDPG (FDAAPPMA27, 2000). L'Eure aval est classée en Liste 1 et Liste 2 (voir encadré 1). Ce classement implique donc la mise en place d'actions visant à assurer la continuité écologique en intervenant sur les obstacles existants. Ainsi, des projets d'aménagement et d'effacement sont prévus : 7 ouvrages hydrauliques ont été identifiés comme prioritaires pour la montaison dans le cadre du PAOT sur l'Eure en aval de Chambray (Figure 11) et 6 ouvrages en amont de Chambray dans le cadre du PDM.

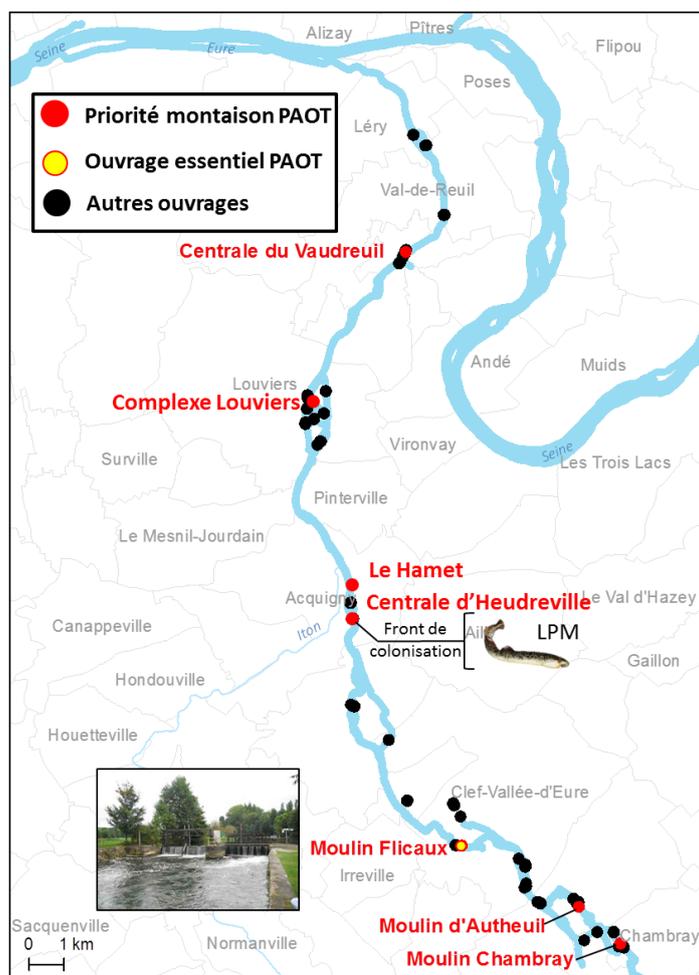


Figure 11:Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Eure. Source ROE (2019)

3.5. L'Andelle

Les caractéristiques géographiques

L'Andelle est un affluent rive droite de la Seine. La rivière prend sa source dans le pays de Bray à Serqueux et parcourt 57 km dans les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure avant de se jeter dans la Seine à Pîtres, en aval du barrage de Poses.

Les enjeux migrateurs: espèces présentes et potentialités d'accueil

L'Andelle est un cours d'eau de type salmonicole, en effet, son linéaire très court et son débit soutenu limitent le réchauffement des eaux et en fait un lieu de reproduction et de grossissement intéressant pour les salmonidés et la lamproie marine. De plus, l'Andelle constitue le dernier exutoire pour les espèces migratrices avant le barrage de Poses, ce qui en fait un cours d'eau à fort enjeu migrateurs. Le cours d'eau accueille cinq espèces de grands migrateurs potamotoques: la truite de mer, le saumon Atlantique, la lamproie marine et la lamproie fluviatile. Les fronts de colonisation connus se situent actuellement au niveau du moulin de la Besle (ROE104867) pour la lamproie fluviatile, au niveau de l'aménagement de Fontaine-Guérard (ROE672) pour la truite de mer et la lamproie marine et au niveau de l'ancien seuil de dérivation du moulin de Perpignan pour le saumon Atlantique (site Seinormigr). À noter que L'AAPPMA27 réalise depuis 2009 un suivi de la reproduction des lamproies marines et du stock d'anguilles.

La continuité écologique sera modélisée depuis la mer jusqu'aux frayères potentielles sur l'Andelle pour 2 espèces de grands migrateurs : **la truite de mer et la lamproie marine.**

Les pressions anthropiques

L'Andelle est classée en Liste 1 et Liste 2 (voir encadré 1). Ce classement implique donc la mise en place d'actions visant à assurer la continuité écologique en intervenant sur les obstacles existants.

En 2015, l'usine électrique de Fontaine-Guérard (ROE672), située à 8.5 km de la confluence avec la Seine a été équipée d'un bras de contournement (projet porté par le SIBA), cependant ce site marque encore aujourd'hui le front de colonisation de la lamproie marine. De plus, d'autres ouvrages situés en aval constituent toujours un obstacle (ex. moulin de Bétillé) induisant des reproductions forcées de lamproies marines (APPMMA27, 2017).

Ainsi, 9 ouvrages hydrauliques ont été identifiés comme prioritaires pour la montaison sur l'Andelle (4 PAOT et 5 PDM).

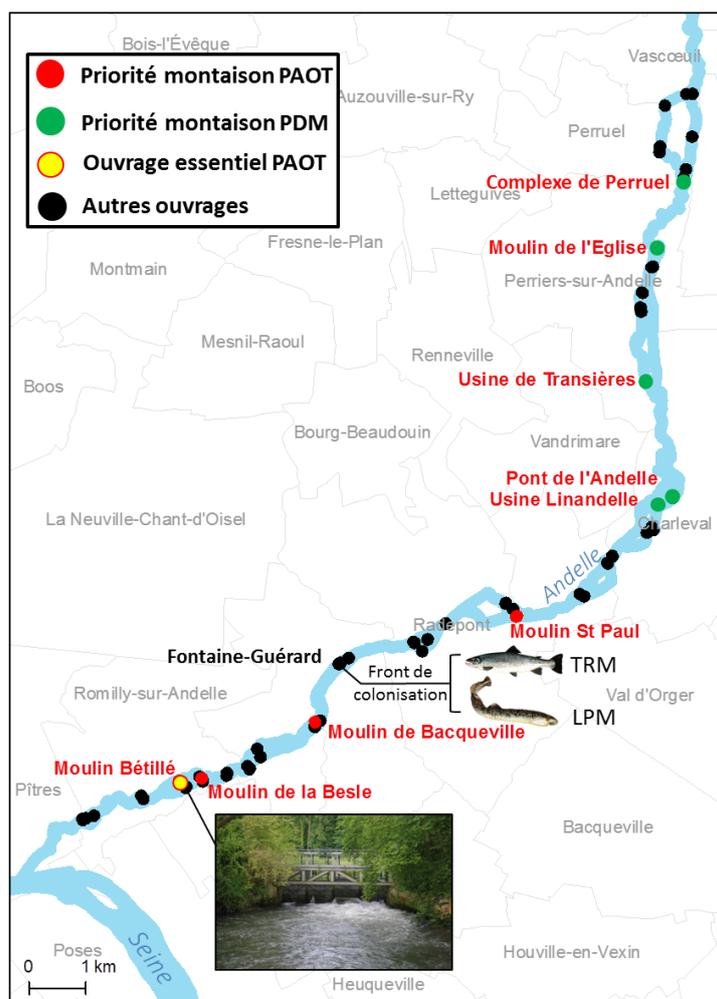


Figure 12: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Andelle. Source: Géobs

À la problématique des ouvrages bloquant s'ajoutent également des pressions liées à l'artificialisation des berges (absence de ripisylve sur le tiers du linéaire (FDAAPPMA27, 2000).

3.6. L'Epte

Les caractéristiques géographiques

L'Epte est un affluent rive droite de la Seine. La rivière prend sa source dans le pays de Bray près de Forges-les-Eaux et parcourt 117 km dans les départements de la Seine-Maritime, de l'Eure et des Yvelines avant de se jeter dans la Seine au niveau de 3 bras : à Giverny, Vernon et Limetz-Villez.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes et potentialités d'accueil

L'Epte est le premier affluent de la Seine en amont du barrage de Poses (et de Port-Mort), ce qui en fait un cours d'eau à enjeu pour les poissons migrateurs. Le cours d'eau accueille deux espèces de grands migrateurs potamotoques: la lamproie marine et la truite de mer. Bien qu'elles n'aient pas été récemment inventoriées, l'Epte pourrait également accueillir des espèces comme le saumon Atlantique et la lamproie fluviatile. Les fronts de colonisations connus à ce jour se situent au niveau du pont du lavoir de Villez (ROE36679) pour la truite de mer et au niveau du moulin de Gasny (ROE36735) pour la lamproie marine. À noter que, l'AAPPMA27 réalise depuis 2009 un suivi de la reproduction des lamproies marines sur l'Epte dans l'Eure.

La continuité écologique sera modélisée depuis la mer jusqu'aux frayères potentielles sur l'Epte pour 2 espèces de grands migrateurs: **la truite de mer et la lamproie marine**.

Les pressions anthropiques

En 2014, l'ouvrage hydraulique de Sainte-Genièvre-lès-Gasny (ROE56314), située à 5.4 km de la confluence avec la Seine marquait le front de colonisation de la lamproie marine (APPMMA27, 2014); cet ouvrage est à présent partiellement détruit. Bien que ce front ait progressé par rapport à 2010, l'ouvrage hydraulique "Isobox" situé plus en aval sur le bras sud et qui marquait le front de colonisation en 2010, constitue toujours aujourd'hui un obstacle important. À noter qu'en 2018, aucune frayère de lamproie marine n'a été recensée sur l'Epte. Pour la truite de mer, le front de colonisation connu se situe au niveau du pont du lavoir de Villez (ROE36679), à moins de 600m de la confluence avec la Seine, sur le bras sud.

L'Epte est classée en Liste 1 et Liste 2 (voir encadré 1). Ce classement implique donc la mise en place d'actions visant à assurer la continuité écologique en intervenant sur les obstacles existants.

Ainsi, 8 ouvrages hydrauliques ont été identifiés comme prioritaires pour la montaison sur l'Epte (4 PAOT et 4 hors PAOT).



Figure 13: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique et front de colonisation des espèces étudiées sur l'Epte. Source: Géobs

3.7. La Mauldre

Les caractéristiques géographiques

La Mauldre est un affluent rive gauche de la Seine. La rivière prend sa source à Saint-Rémy-l'Honoré et parcourt 35 km dans le département des Yvelines avant de se jeter dans la Seine à Epône.

Les enjeux migrateurs : espèces présentes et potentialités d'accueil

La Mauldre est un cours d'eau de type salmonicole, dont l'espèce repère est la truite fario. Elle accueille aujourd'hui une espèce de grands migrateurs : l'anguille. Bien qu'elles n'aient pas été observées récemment, la Mauldre, pourrait accueillir des espèces comme le saumon Atlantique, la truite de mer, la lamproie marine et fluviatile (voir Annexe 1).

La continuité écologique sera modélisée depuis la mer jusqu'aux frayères potentielles sur la Mauldre pour 1 espèce de grands migrateurs: **la truite de mer**. La continuité écologique sur la Mauldre uniquement sera également modélisée pour **la truite commune**.

Les pressions anthropiques

La Mauldre présente un bassin fortement anthropisé, où la qualité physico-chimique et l'hydromorphologie du cours d'eau sont très dégradées. L'état physico-chimique sur la Mauldre est classé médiocre sur sa partie aval (Figure 14).

Le cours d'eau ne présente pas de problème quant aux paramètres d'oxygénation du milieu. Cependant, le phosphore et l'azote constituent les principaux paramètres déclassant sur le bassin versant de la Mauldre (SCE, 2012). Les deux principales sources d'apport en phosphore sont les rejets des stations d'épuration et les dysfonctionnements de réseau.



Figure 14: État physico-chimique des masses d'eau du bassin de la Mauldre (source: Observatoire des poissons du bassin Seine-Normandie – Qualité de l'eau - État des lieux 2019, AESN)

Les altérations morphologiques dominantes sont principalement dues à une rectification et un recalibrage important du cours d'eau. L'état des berges y est également dégradé avec une faible présence de ripisylve.

Par ailleurs, de nombreux ouvrages transversaux et bloquants sont présents sur le cours d'eau. L'abaissement du clapet d'Aulnay-sur-Mauldre a permis de restaurer la continuité écologique sur les 8 derniers kilomètres de la Mauldre. Actuellement, le déversoir du moulin de la Chaussée (ROE57527) à Maule marque le premier point bloquant pour la montaison. La Mauldre est classée en Liste 1 de sa confluence avec la Guyonne à sa confluence avec le bras du Blanc Soleil et est classée en Liste 1 et 2 de sa confluence avec le ru Maldroit à sa confluence avec la Seine (voir encadré 1). À notre connaissance, aucun ouvrage du bassin de la Mauldre n'est classé comme étant prioritaire ou Grenelle. Néanmoins, le classement du cours d'eau en Liste 2 implique la mise en place d'actions visant à assurer la continuité écologique au niveau des obstacles existants.

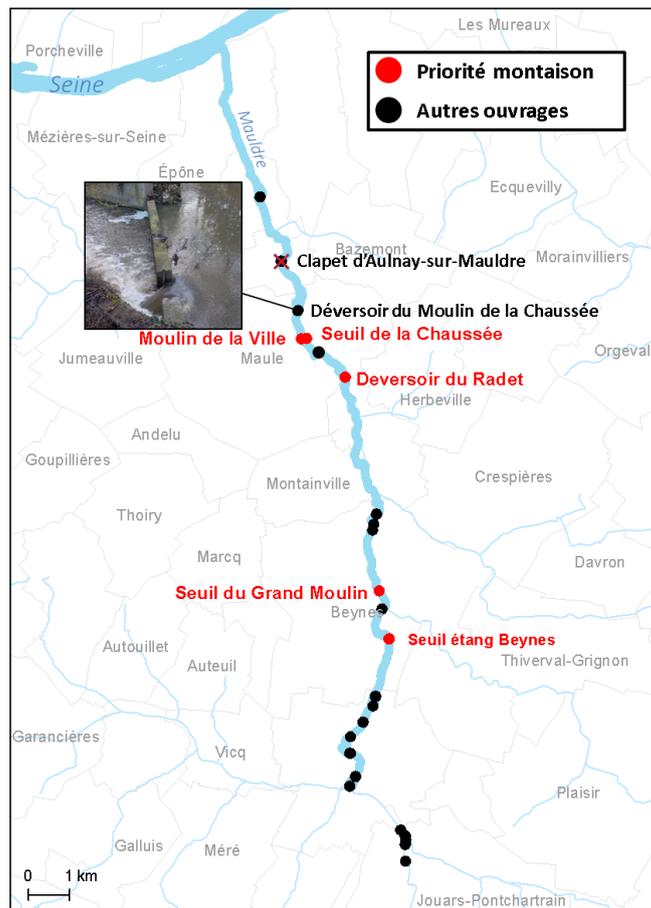


Figure 15: Ouvrages transversaux et prioritaires impactant la continuité écologique sur la Mauldre. Source: Géobs

4. Identification des frayères potentielles

Dans cette étude, nous avons fait le choix d'étudier la continuité écologique au cours de la montaison de 3 espèces à partir de l'estuaire de la Seine et de considérer les frayères comme habitats cibles. Pour cela, la première étape a été de cartographier les frayères potentielles sur les affluents: l'Austreberthe, l'Eure, l'Andelle, l'Epte et la Mauldre.

4.1. Les caractéristiques physiques des frayères

Pour cartographier les frayères potentielles, il nous a fallu lister les caractéristiques physiques de ces habitats pour chacune des espèces à partir des données de la bibliographie.

4.1.1. Le saumon Atlantique

Le saumon Atlantique fraie de novembre à février dans des **eaux fraîches** (7°C) et vives. Les frayères de saumons sont constituées par des plages de **galets** ou de **graviers** en eau habituellement **peu profondes** (0.5 à 1 m) dans les zones d'alternance de mouille et de **radier** (Keith and Allardi, 2001).

4.1.2. La truite de mer et la truite résidente

Pour le frai, de novembre à janvier, la truite recherche des eaux bien oxygénées et fraîches (**2 à 11°C**). La femelle enfouit les œufs fécondés dans un substrat constitué de **graviers/petits galets** (de un à dix centimètres de diamètre). La vitesse du courant au fond doit se situer entre 15 et 70 cm/s afin de permettre la circulation de l'eau dans le « nid » (Puissauve et al., 2015).

4.1.3. La grande alose

Les aloses fraient entre mai et mi-août sur des sites typiques caractérisés par une plage de substrat grossier de **cailloux** et **galets** délimité en amont par un profond et en aval par une zone peu profonde à **courant rapide** (Keith and Allardi, 2001). Les œufs tombent sur le fond en se logeant dans les interstices du substrat. Le temps d'incubation est très court (quatre à huit jours) mais la température doit être **supérieure à 17°C**.

4.1.4. La lamproie marine

La reproduction a lieu de fin avril à fin mai à des températures de **15 à 18°C** sur des zones typiques : faciès de **plat courant** (> 40 cm/s) et **profond** (> 50 cm). L'espèce construit un vaste nid en forme de cuvette, les mâles remaniant en premier le substrat constitué de **galets** et de **graviers** (Keith and Allardi, 2001).

Les informations trouvées dans la bibliographie indiquent que la température, les types de faciès (hauteur/vitesse) et de substrats sont les principaux descripteurs de ces habitats (Keith & Allardi, 2001). Ainsi, pour chaque cours d'eau, à l'exception de la Mauldre et de l'Epte, nous avons récupéré auprès de différents partenaires des données de substrat et de faciès. Un inventaire terrain des substrat/faciès a été réalisé sur la Mauldre en mars 2021. Ces données sont actuellement en cours de traitement dans le cadre d'un stage de M2. Des données ponctuelles de température ont également été analysées et ont confirmé que les conditions thermiques sur ces affluents étaient optimales pour la reproduction de ces espèces (températures fraîches).

Tableau 3: Caractéristiques physiques retenues des frayères

	TRM/TRF	ALA	LPM
Faciès	Radier	Radier	Chenal lotique
	Radier/Plat courant	Radier/Plat courant	Plat courant
	Plat courant		
Substrat	Cailloux	Cailloux	Cailloux
	Graviers	Graviers	Graviers
			Pierre
Profondeur	Entre 50 cm et 1 m		> 50 cm

4.2. Compilation des données substrat/faciès

4.2.1. Sources des données

Pour chaque cours d'eau, à l'exception de la Mauldre et de l'Epte, nous avons pu récupérer auprès de différents partenaires des couches linéaires de tronçons caractérisant le type de substrat et de faciès. Sur la Mauldre, un inventaire sur le terrain des substrats et faciès a été réalisé dans le cadre d'un stage de M2 en parcourant en canoé le cours d'eau de Neauphles-le-Vieux à Epône (21 km), en suivant l'échelle granulométrique de Wentworth, modifiée par Malavoi et Souchon (1989) et la clé de détermination proposée par Malavoi & Souchon (2002). Les données terrain ont été saisies dans l'application OsmAnd. Des données ponctuelles de température ont également été analysées et ont confirmé que les conditions thermiques sur ces affluents étaient optimales pour la reproduction de ces espèces (températures fraîches).

Tableau 4: Source des données substrats/faciès

	Données disponibles	Source
Austreberthe	Faciès/Substrat	SUEZ - Étude pour SIRAS (2019)
Eure	Faciès/Substrat	CASE - Étude PPRE (Eure aval d'Acquigny) (2012) Étude PPRE (Eure amont d'Acquigny - dpt 27) (2010)

Andelle	Faciès/Substrat	SOGETI Ingénierie - Étude pour SIBA/SYMAC (2008)
Epte	Faciès uniquement	Non disponible
Mauldre	Faciès/Substrat	Inventaire terrain INRAE (mars 2021)

Le nom des modalités des substrats et faciès varient en fonction des sources. Une harmonisation des appellations a donc été réalisée (voir Annexe 1).

4.2.2. Transformation des données substrat/faciès

L'approche du chemin de moindre coût nécessite des données d'entrée en 2D (sous forme polygonale). Or les données de substrat et faciès dont nous disposons sont sous la forme de polygones. Ainsi, une projection des données linéaires (1D) en données polygones (2D) sur le cours d'eau a dû être réalisée. Les étapes de la transformation sont présentées en Annexe 3. Pour chaque cours d'eau une couche polygone substrat et une couche polygone faciès ont été générées.

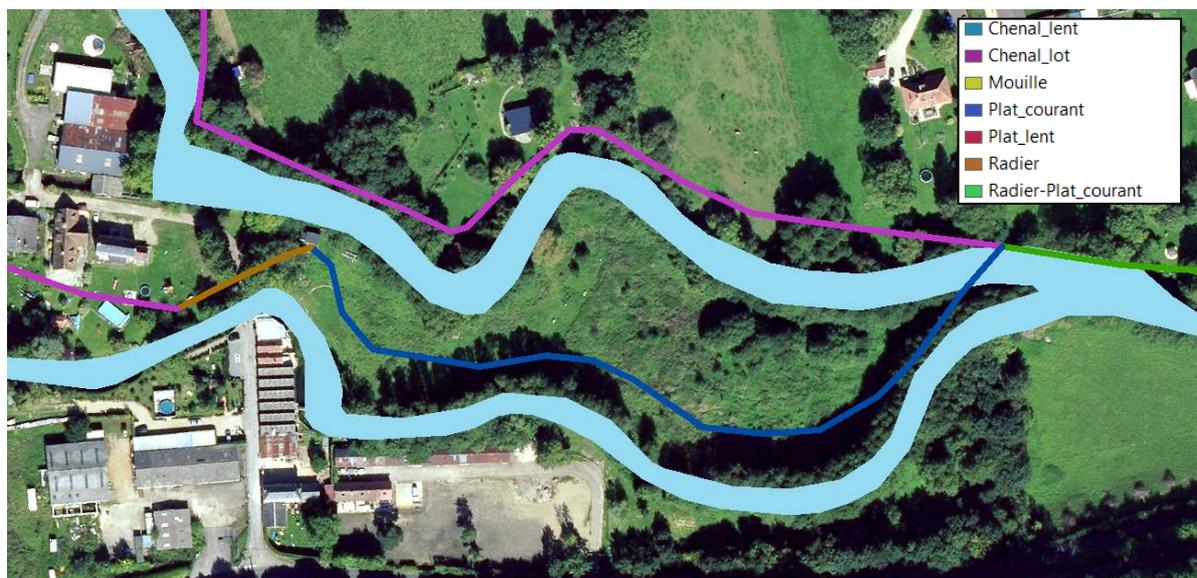


Figure 16: Couche "faciès" linéaire et couche polygone "SURFACE_EAU" de la BDTOP0 (en bleu) sur l'Andelle



Figure 17: Couche polygone "faciès" créée sur l'Andelle

4.3. Cartographie des frayères potentielles

À partir des données de la littérature et des couches faciès et substrats créées, nous avons pu cartographier les zones de frayères potentielles sur l'Austreberthe, l'Eure et l'Andelle (Figure 19).

Remarque: Sur l'Austreberthe, nous disposons d'une information sur la hauteur d'eau au niveau de chaque tronçon. Cette donnée a été utilisée pour filtrer les zones de frayères de lamproies marines généralement situées dans des zones supérieures à 50 cm de profondeur et de salmonidés, situées dans des zones de 50 cm à 1 m de profondeur.

4.4. Les frayères observées

Dans l'idéal, nous aurions souhaité compléter les cartographies de frayères potentielles avec des données d'observations de frayères. Cependant, à l'exception des lamproies marines qui font l'objet d'un suivi de frayères depuis 2009 sur l'Andelle et depuis 2012 sur l'Epte et l'Eure (<https://www.seinormigr.fr/fr/relevés-frayères-9818>) par l'AAPPMA27, les sites de frai pour le saumon, la truite de mer et l'aloise sont peu renseignés sur les secteurs étudiés.

Le croisement des 1204 frayères de lamproies marines recensées (données AAPPMA27 de 2009 à 2018 sur l'Eure, l'Andelle et l'Epte) avec les couches substrats/faciès ont néanmoins permis de faire ressortir les caractéristiques physiques de ces habitats observés et de confirmer les données de la littérature pour cette espèce (Figure 18).

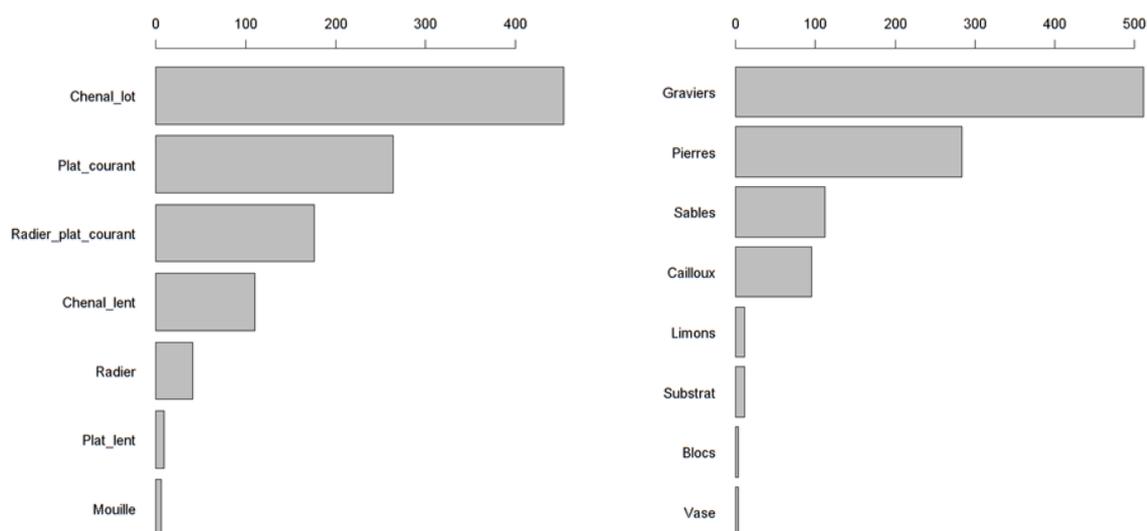


Figure 18: Histogramme des faciès (à gauche) et substrats (à droite) caractérisant les 1204 sites d'observation de frayères de lamproies marines (données AAPPMA27 de 2009 à 2018 sur l'Eure, l'Andelle et l'Epte)

À noter que les observations de frayères peuvent déjà traduire des problématiques de continuité écologique (ex. de nombreux sites de frai de lamproies marines sont situés en aval d'ouvrages, témoin d'une reproduction forcée). On comprend donc bien que l'inventaire des frayères ne permettrait pas d'estimer à lui seul le potentiel d'accueil de frai sur l'ensemble du cours d'eau.

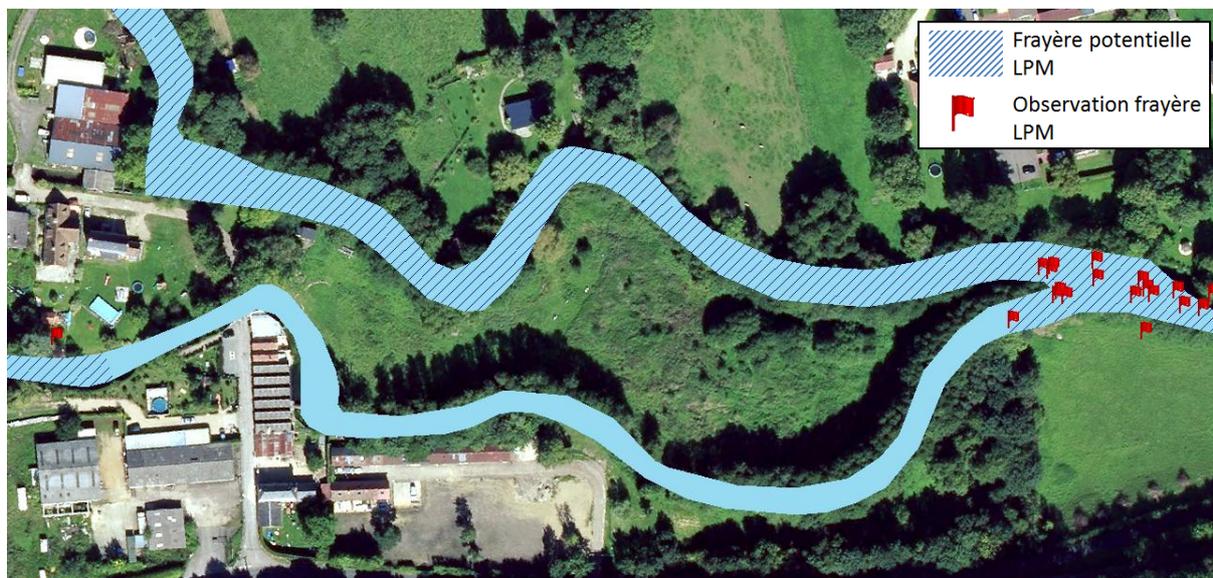


Figure 19: Couche polygone "frayères potentielles de lamproie marine" (en hachurées) créée sur l'Andelle. Les drapeaux rouges correspondent aux observations de frayères par l'AAPPMA27.

Tableau 5: Pourcentage de surface de frayères potentielles sur les 3 cours d'eau

	ALA	TRM/SAT	LPM
Austreberthe	20%	22%	26%
Andelle	9%	34%	39%
Eure	1%	10%	27%
Mauldre		22%	

La cartographie des frayères potentielles de LPM, ALA, TRM et SAT sur l'Austreberthe, l'Andelle et l'Eure a permis de mettre en évidence le **fort potentiel d'accueil pour les frayères de LPM** (>25% de la surface en eau) sur ces cours d'eau. L'Austreberthe présente une potentialité d'accueil similaire pour les 4 espèces (20-26% de la surface). L'Andelle et l'Eure présente une **potentialité d'accueil moindre pour ALA** (resp. 9% et 1% de la surface). L'Eure présente le plus faible potentiel d'accueil pour les salmonidés (10% de la surface).

5. Les éléments du paysage influençant la migration

Après avoir identifié les habitats cibles dans les affluents, la deuxième étape de l'étude a consisté à identifier les éléments du paysage et conditions du milieu susceptibles de favoriser ou contraindre la migration des poissons vers les frayères.

5.1. Les périodes de migration

Un premier travail a donc consisté à déterminer les périodes de migration pour les 4 espèces migratrices. Ce sont sur ces périodes temporelles que nous focaliseront notre compilation de données hydrodynamiques et physico-chimiques. Cela nous permettra d'**évaluer les conditions du milieu au moment des migrations**.

En effet, les conditions physico-chimiques et hydrodynamiques d'un cours d'eau varient naturellement au cours de l'année (alternance des saisons). Ces conditions peuvent également fortement varier d'une année à l'autre en fonction des événements hydrologiques qui se produisent (forte crue ou étiage sévère). A plus courte échelle, les conditions hydrodynamiques du milieu varient journalièrement avec la marée dans l'estuaire (alternance flot et jusant). Ainsi, en fonction du moment de la journée dans

l'estuaire et plus globalement de la période de l'année, les conditions du milieu peuvent être plus ou moins favorisante ou limitante pour la migration.

À partir des histogrammes de remontée des migrateurs réalisés annuellement par Seinormigr sur la Seine à Poses, nous avons pu déterminer les périodes de migration pour SAT, TRM, ALA et LPM (Tableau 6). Un exemple de ces graphiques est proposé ci-dessous en Figure 20

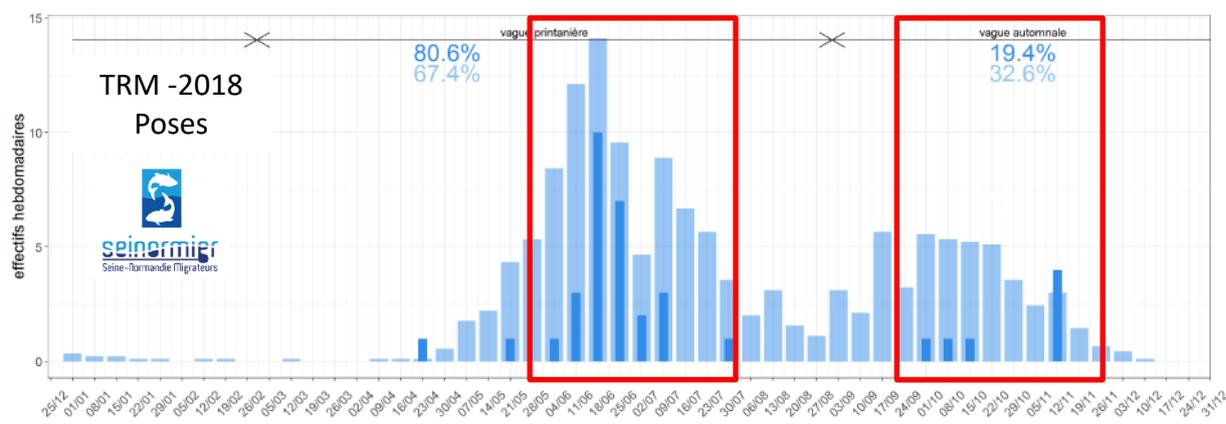


Figure 20: Rythmes migratoires des truites de mer au barrage de Poses ayant servi à identifier les périodes de migration pour TRM (modifié à partir de Grall et al. (2018)). Dans le cas de TRM, deux périodes migratoires ont été identifiées.

Tableau 6: Périodes de migration définies sur la Seine

	SAT	TRM	ALA	LPM
1 ^{er} passage	Mai-Juillet	Juin-Juillet	Avril-Mai	Mai
2 ^{ème} passage	Septembre-Octobre	Septembre-Octobre	-	-

5.2. Les évènements hydrologiques

Comme les conditions peuvent varier d'une année à l'autre en fonction des évènements climatiques, un second travail a ensuite été de sélectionner parmi les périodes de migration, les périodes à débits bas, moyens et hauts. Cela nous permettra d'évaluer l'impact des évènements hydrologiques sur la migration des espèces.

Parmi les 5 périodes de migration identifiées, nous avons cherché à savoir si l'hydrologie pouvait fortement varier d'une année à l'autre. Pour cela, nous avons extrait les débits mensuels des mois de migration sur la Seine à Vernon de 2010 à 2018 à partir de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr>) et avons analysé la variabilité de ces débits pour chaque période de migration (Figure 21).

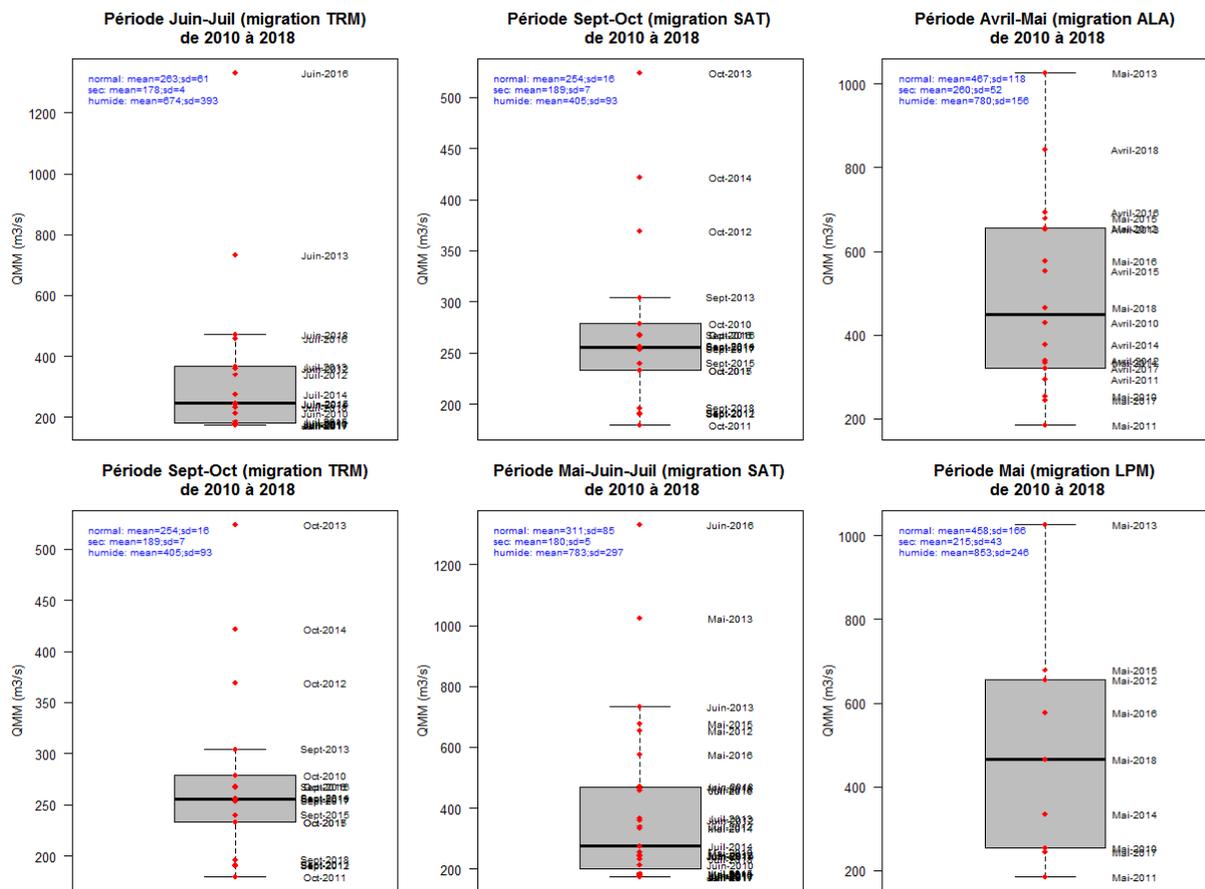


Figure 21: Distribution des débits moyens mensuels (QMM) sur la Seine à Vernon de 2010 à 2018 pour chaque période de migration.

Les mois présentant un débit moyen mensuel entre Q25 et Q75 sont considérés comme des mois à débits "moyens" (ex. Mai 2014). Ceux présentant un débit moyen mensuel inférieur au Q25 sont considérés comme des mois à débits "bas" (ex. Octobre 2011) et ceux présentant un débit moyen mensuel supérieur au Q75 sont considérés comme des mois à débits "hauts" (ex. Juin 2016). Pour chaque période de migration, les débits bas, moyens et hauts ainsi que leur écart-type sont indiqués.

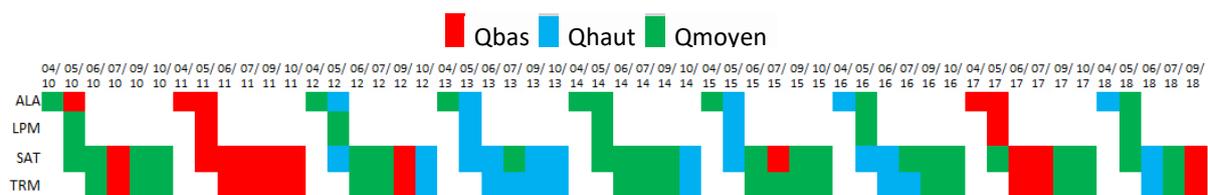


Figure 23: Bilan des mois de migration de 2010 à 2018 et de leur caractère hydrologique (débits bas, moyens et hauts)

Dans la suite, l'extraction des données hydrodynamiques se fera par cas hydrologique (débits bas, moyens et hauts) par période de migration en se référant à la Figure 23. Par exemple, pour ALA, les mois de mai 2010, avril-mai 2011 et avril-mai 2017, qui sont des mois à débits bas, serviront à calculer des variables moyennes dans le cas d'une période de migration à débits bas pour la période de migration avril-mai. L'extraction et la compilation des données sont expliquées plus en détails dans les prochains paragraphes pour les différents milieux: l'estuaire de la Seine: d'Honfleur à Poses, la Seine: de Poses à Epône et les affluents.

5.3. Les conditions hydrodynamiques

5.3.1. Impact des conditions hydrodynamiques sur la migration

Les conditions hydrodynamiques (vitesses de courant, hauteurs d'eau, débits) influencent les capacités de nage des poissons et par conséquent le coût énergétique de la migration. Certaines conditions peuvent faciliter la nage (flot) alors que d'autres peuvent la contraindre (crue, étiage, accélération des vitesses de courant au niveau d'un ouvrage, etc.).

La capacité de nage s'exprime en termes de vitesse de nage et d'endurance, qui dépendent de la longueur du poisson et de sa morphologie:

- La **vitesse de croisière** peut être maintenue pendant des heures sans engendrer de modifications physiologiques profondes. En rivière, lorsque la vitesse de courant est inférieure à la vitesse de croisière du poisson, le poisson nage à sa vitesse de croisière pour limiter le coût énergétique (Baudoin et al., 2014a).
- La **vitesse de pointe** résulte d'un effort intense et ne peut être maintenue qu'un temps très limité. Les poissons utilisent le sprint pour franchir un obstacle ou traverser des chenaux où la vitesse de courant est supérieure à leur vitesse de croisière. Le coût énergétique de ce type de nage est élevé et réduit considérablement la vitesse pouvant être parcourue (voir Figure 24).

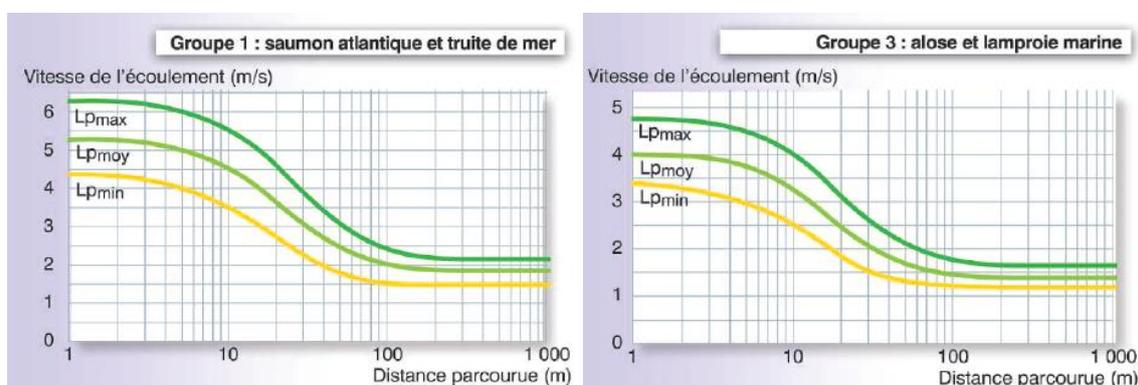


Figure 24: Évolution de la distance parcourue en fonction de la vitesse de courant pour les groupes ICE 1 et 3 (Baudoin et al., 2014a)

Les vitesses de croisière et de pointe moyennes citées dans la littérature sont présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7: Vitesse de croisière et de pointe renseignées dans la littérature

	SAT	TRM	ALA	LPM
$V_{\text{croisière}}$	1.7 - 2.5 m/s (Larinier et al., 2006) 1.8 m/s (ICE)	1.5 m/s (Le Pichon and Alp, 2018) 1.8 m/s (ICE)	0.8 - 1.4 m/s (Larinier and Travade, 1992) 1.4 m/s (ICE)	1.25 m/s (ICE) 0.4- 0.8 m/s en zone de balancement de marée (Migado) 0.1-0.4 m/s (Migado)
V_{pointe} (Baudoin et al., 2014a)	5.5 m/s (ICE)	5.5 m/s (ICE)	4.25 m/s (ICE)	3.75 m/s (ICE)

Dans l'estuaire, certaines espèces de grands migrateurs profitent du flot (marée montante) pour remonter l'estuaire vers les affluents et ainsi limiter le coût énergétique de la remontée (Baglinière and Porcher, 1994, Menesson-Boisneau et al., 2000).

La migration peut être facilitée ou contrainte par les conditions hydrodynamiques. Il est donc important de prendre en compte les vitesses de courant ainsi que les capacités de nage des espèces afin d'évaluer les coûts énergétiques induits par les conditions hydrodynamiques.

5.3.1. Les données de vitesse de courant

Dans l'estuaire, le GIP Seine aval nous a transmis pour chaque année de 2010 à 2018, des données hydrodynamiques dans l'estuaire issu du projet Seine-Aval ARES porté par l'Ifremer (Grasso F. et al., 2021). Pour chaque maille de l'estuaire et pour un pas de temps de 30 min, nous disposons de valeurs pour plusieurs variables hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesses, température de l'eau, MES, etc.). Pour certaines variables telles que la température et la concentration en MES, les données sont disponibles pour 10 profondeurs. Pour alléger la quantité de données à extraire, nous avons choisi de **limiter l'emprise de l'estuaire d'Honfleur à Poses** et de réaliser **des moyennes par variable sur les périodes de migration pour chaque maille**.

L'élévation de la surface libre (XE) et la cote bathymétrique (H0) ont été extraites afin de calculer la hauteur d'eau (HCE=XE+H0) pour chaque pas de temps au niveau de chaque maille. Lorsque la hauteur d'eau était supérieure à 20 cm (données peu fiables à faible hauteur), la **température de l'eau moyenne dans la colonne d'eau** (TEMP), la **concentration moyenne en MES fines dans la colonne d'eau** (MES_mud) et la vitesse de courant ($v=\sqrt{U^2 + V^2}$) ont été calculées (Tableau 8).

Tableau 8: Récapitulatif des variables extraites et calculées à partir des données du projet ARES de 2010 à 2018

Variable	Description	Dimension	Condition d'extraction	Variable synthétique finale
XE	Élévation de la surface libre	3D (i,j,t)		
H0	Cote bathymétrique	2D (i,j)		
HCE (XE+H0)	Hauteur d'eau	3D (i,j,t)		Moyenne par cas hydrologique pour chaque période de migration
TEMP	Température de l'eau	4D (i,j,h,t)	HCE>20cm Moyenne des 10 profondeurs	Moyenne par période de migration
U	Vitesse dans le sens longitudinal	3D (i,j,t)	HCE>20cm	
V	Vitesse dans le sens latitudinal	3D (i,j,t)	HCE>20cm	
$v(\sqrt{U^2 + V^2})$	Vitesse de courant	3D (i,j,t)	HCE>20cm	Moyenne pour le FLOT par cas hydrologique pour chaque période de migration
				Moyenne pour le JUSANT par cas hydrologique pour chaque période de migration

MES_mud	Concentration en matières fines en suspension	4D (i,j,h,t)	HCE>20cm Moyenne des 10 profondeurs	Moyenne par période de migration
---------	---	--------------	--	----------------------------------

Les données de vitesse de courant ont été séparées en deux périodes: le **jusant** (marée descendante) et le **flot** (marée montante). Les périodes de flot et de jusant ont été déterminées en identifiant le changement de signe de hauteur d'eau (HCE) (Figure 25).

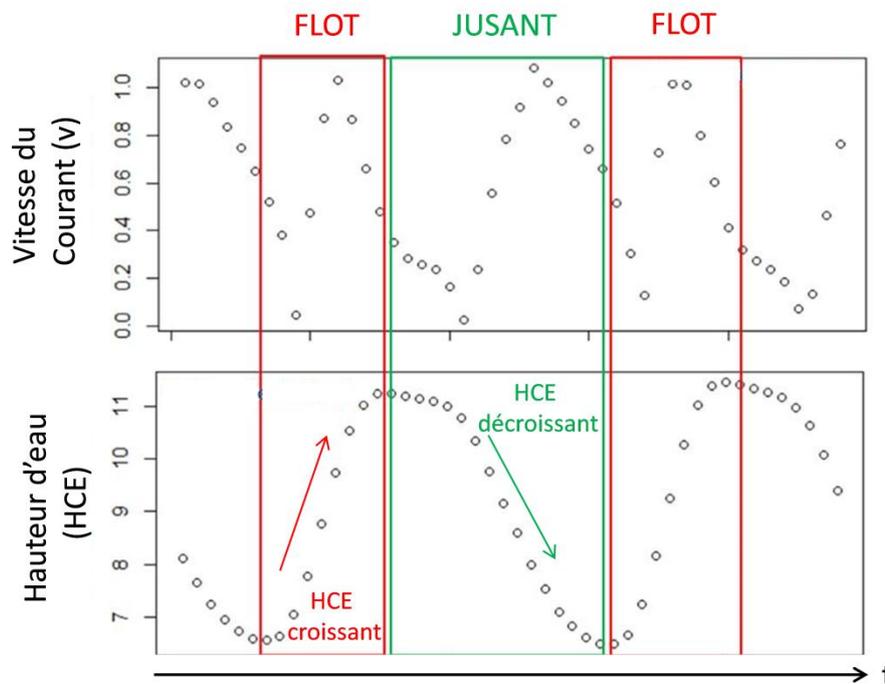


Figure 25: Détermination des périodes de flot et de jusant à partir des graphiques de hauteur d'eau et de vitesse de courant en fonction du temps

Pour chaque maille, les valeurs de vitesse pour le flot et le jusant ont été moyennées par cas hydrologiques (débits bas, moyens, hauts) pour les différentes périodes de migration (Tableau 6). Un exemple cartographié de sortie est donné en Figure 26.

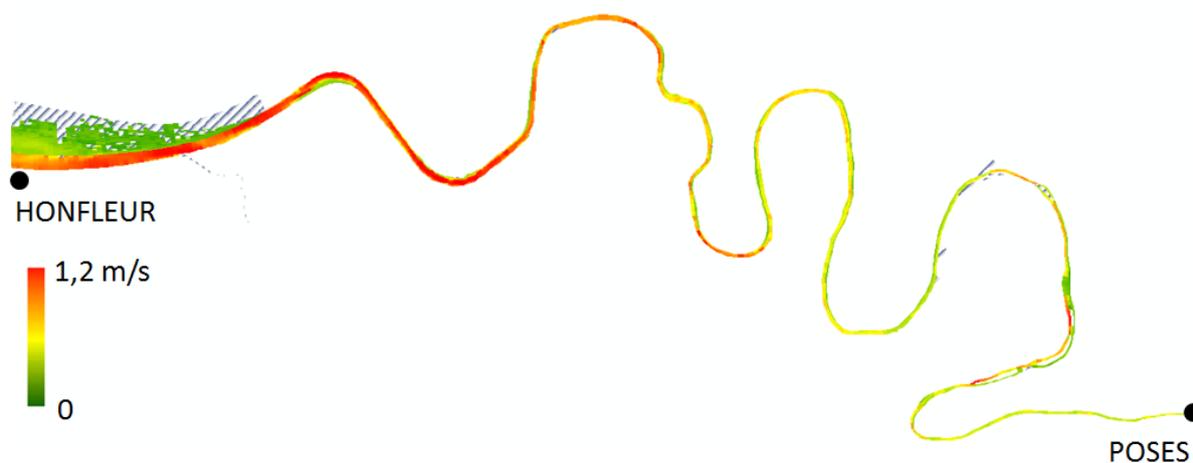


Figure 26: Vitesses moyennes dans l'estuaire pendant le flot pour la période de migration Mai-Juillet pour SAT (débits bas)

Sur la Seine, les données de vitesse de courant en 2 dimensions ont été extraites du modèle Prose-Pa développé par l'école des Mines (Wang, 2019) pour 3 années: 2007 (débit moyen), 2008 (débit haut) et 2011 (débit bas). Une valeur d'oxygène est disponible pour chaque maille (25/25m) à chaque pas de temps (12h). Des vitesses moyennes de courant ont été calculées pour chaque année et période de migration. Le maillage Prose-Pa 2D étant dynamique, nous avons réalisé une jointure spatiale des valeurs d'oxygène sur un maillage fixe (25/25m) pour chaque pas de temps (voir exemple Figure 27).

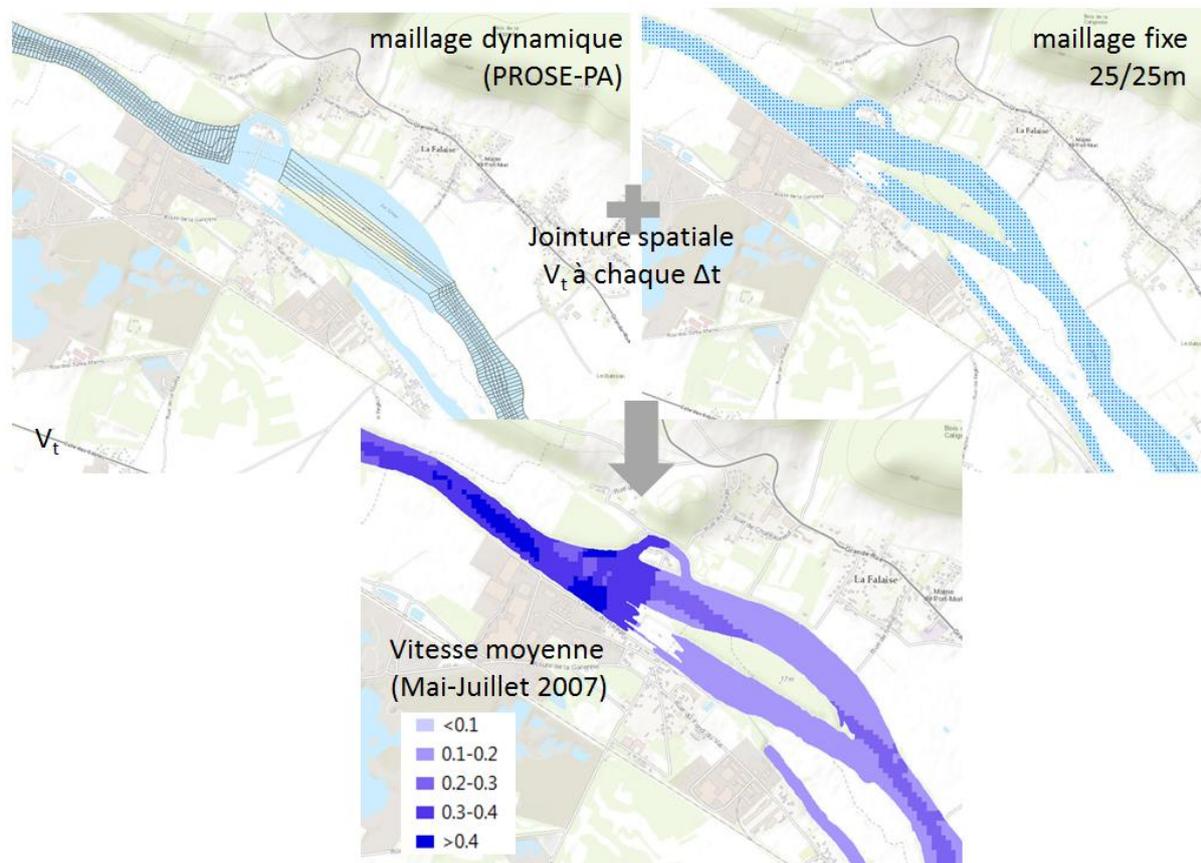


Figure 27: Calcul des vitesses moyennes sur la Seine pour la période de migration Mai-Juillet pour SAT (cas hydrologique: normal)

Sur les différents affluents, nous ne disposons pas des vitesses de courant. Cependant, les données de faciès dont nous disposons sont un indicateur du type de courant rencontré. Nous avons donc choisi d'**utiliser les faciès comme un proxy de la vitesse** (voir §4.2 Compilation des données substrat/faciès, pour savoir comment nous avons compilé les données de faciès). À chaque faciès, nous avons attribué une valeur de vitesse en se basant sur des données terrain récoltée en interne et des éléments de la littérature (Bagliniere and Champigneulle, 1982).

Tableau 9: Attribution d'une valeur de vitesse de courant aux types de faciès

Faciès	Vitesse (m/s)
Eau stagnante	0
Mouille/Fosse	0
Plat lentique	0.1
Chenal lentique	0.1
Chenal lotique	0.3
Plat courant	0.3

Radier /Plat courant	0.4
Radier	0.5

5.4. Les paramètres physico-chimiques

5.4.1. Impact des paramètres physico-chimiques sur la migration

Les conditions physico-chimiques et la qualité du milieu sont des facteurs essentiels dans le processus migratoire des espèces piscicoles :

- **Température:** Déclencheur de migration, important pour la reproduction et le développement des œufs. La température influence également d'autres paramètres physico-chimiques (plus la température augmente plus l'oxygène dissous diminue) ainsi que les capacités de nage/saut. Les seuils de température influençant la migration sont présentés Figure 28. Pour les cours d'eau salmonicole, le seuil de bon état est fixé est **21.5°C**.
- **Oxygène:** Facteur de vie des poissons. Les salmonidés sont les plus exigeants. Une diminution de l'oxygène peut agir comme une barrière à la migration. Les seuils d'oxygène influençant la migration sont présentés Figure 28. Le seuil de bon état est fixé est **6 mg (O₂) /L**.
- **Nitrates:** Produit de la dégradation de la matière organique. Pas de toxicité directe, mais une concentration élevée entraîne un risque d'eutrophisation du milieu (diminution O₂) et une transformation des nitrates en nitrites (toxiques). Le seuil de bon état est fixé à **50 mg (NO₃⁻) /L**
- **Nitrites:** Produit de la dégradation de la matière organique. Les nitrites sont toxiques pour la faune piscicole. Même en petite quantité les nitrites causent des stress chez les poissons, provoquant des problèmes respiratoires, affaiblissement, maladies, vulnérabilité. Le seuil de bon état est fixé à **0.3 mg (NO₂⁻) /L**.
- **Ammoniaque (NH₃):** Issu de la transformation de l'ammonium (NH₄⁺), produit de la dégradation de la matière organique. C'est la forme la plus toxique, et sa part augmente quand le pH de l'eau augmente (pH >9). À défaut de valeur de NH₃, nous considérons ici la concentration en ammonium **NH₄⁺**. Le seuil de bon état est fixé à **0.5 mg (NH₄⁺) /L**.
- **Phosphates:** Produit de la dégradation de la matière organique. Pas de toxicité directe, mais une concentration élevée entraîne un risque d'eutrophisation du milieu (diminution O₂). Le seuil de bon état est fixé à **0.5 mg (PO₄³⁻) /L**.
- **Turbidité:** Teneur importante en MES organiques ou inorganiques (phytoplancton, débris organiques, sédiment, etc.). La teneur en MES n'a pas de toxicité (sauf cas de colmatage des branchies) directe mais peut témoigner d'une pollution et peut être peu attractif pour les poissons. La forte teneur en MES diminue la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau (diminution de la photosynthèse) et entraîne une consommation d'O₂ par les bactéries pour les dégrader. En rivière, une teneur en **MES >50 mg/L témoigne d'une pollution**. Dans l'estuaire, la turbidité est liée au bouchon vaseux et la concentration en MES y est donc naturellement plus importante qu'en rivière. Tétard et al. (2016) ont montré, dans l'estuaire de la Loire, que c'est en période de mortes eaux que la concentration y est la plus faible et que les périodes de fortes turbidité pendant les marées (jusqu'à 3 g/L) pouvait entraîner une importante chute de la concentration en dioxygène dissous et stoppait la migration amont de l'aloose savoureuse.

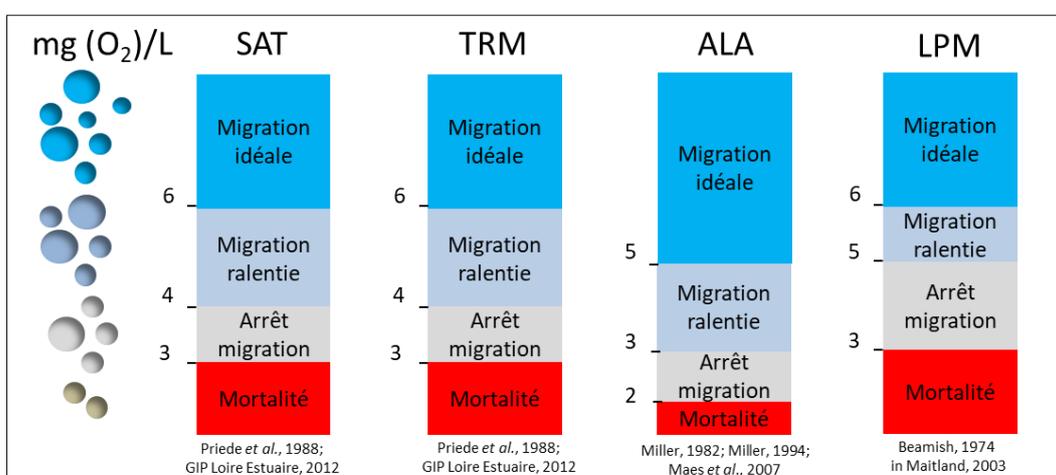
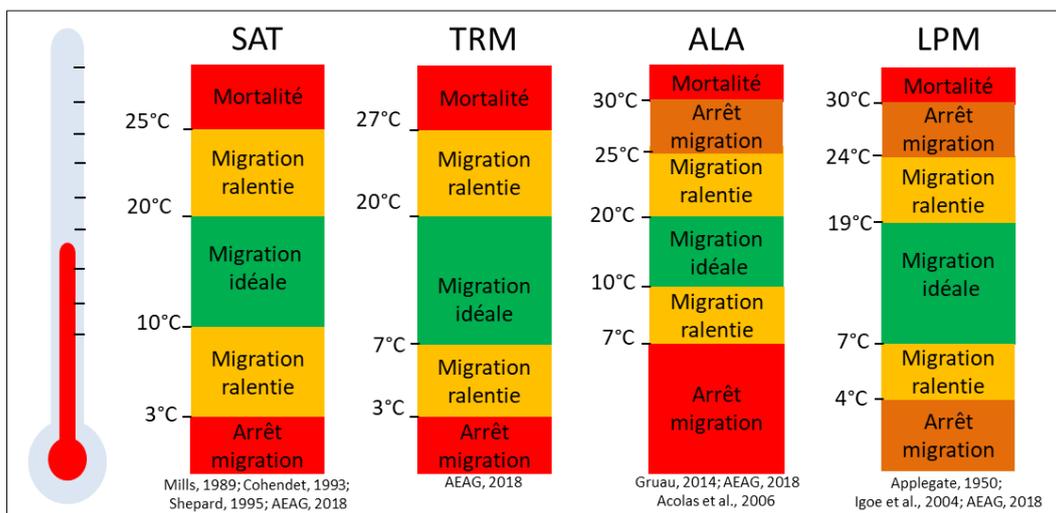


Figure 28: Seuils de température et d'oxygène dissous influençant la migration

Des conditions physico-chimiques peu favorables peuvent contraindre voire empêcher la migration. Il est donc important d'identifier la présence de perturbations physico-chimiques sur le parcours migratoire afin de prendre en compte leur impact dans la modélisation de la continuité écologique.

5.4.2. Les données physico-chimiques

Dans l'estuaire, les données physico-chimique ont été extraites :

- 1) **de la base de données Naiades** (<http://www.naiades.eaufrance.fr/acces-donnees#/physicochimie>) pour 11 stations entre 2010 et 2020 pour 7 paramètres: l'ammonium, les matières en suspensions, les nitrates, les nitrites, les orthophosphates, l'oxygène dissous et la température de l'eau. Les moyennes de ces paramètres ont été calculées pour chaque période de migration. L'ensemble des cartes est disponible en **Annexe 6**.
- 2) **de modélisations physico-chimiques** (oxygène, ammonium, nitrates) (Fisson, 2014) (Figure 39) et de température de l'eau (modèle MARS3D entre 2010 et 2018).

Pour la Seine et les affluents, les données physico-chimiques ont été extraites à partir de plusieurs sources:

- 1) **de la plateforme de modélisation pyNuts-Riverstrahler** (Billen et al. 1994, Garnier et al. 1995). Les données utilisées correspondent à l'extraction des résultats pyNuts-Riverstrahler de

l'exercice d'état des lieux de l'AESN pour les années 2010 à 2016. Les simulations sont réalisées par année au pas de temps décennaires (tous les 10 jours), par objet de simulation (bassin versant), par ordre de Strahler et par point kilométrique (pK). 6 paramètres ont été retenus: le débit (flow), les nitrates, les nitrites, l'ammonium, les phosphates et l'oxygène. Les moyennes de ces paramètres ont été calculées pour chaque période de migration à chaque pK.

- 2) **de la base de données Naïades** entre 2010 et 2020 pour 7 paramètres: l'ammonium, les matières en suspensions, les nitrates, les nitrites, les orthophosphates, l'oxygène dissous et la température de l'eau. La Seine, de Poses à Epône, comprend 6 stations de suivi physico-chimiques. Les moyennes de ces paramètres ont été calculées pour chaque période de migration. L'ensemble des cartes est disponible en Annexe 6
- 3) **du modèle Prose-PA** (Wang, 2019) pour la Seine entre Poses et Epône. La température de l'eau et les concentrations en oxygène dissous et nitrites sont disponibles sous forme ponctuelles (pK) tous les 25m au pas de temps de 2h pour les années 2007, 2008 et 2011. Pour chaque Pk et chaque espèce, le pourcentage du temps sous ou au-dessus des seuils identifiés ont été calculés pour les différentes périodes de migration. Les données ponctuelles ont été transformées en données polygones (Figure 29).

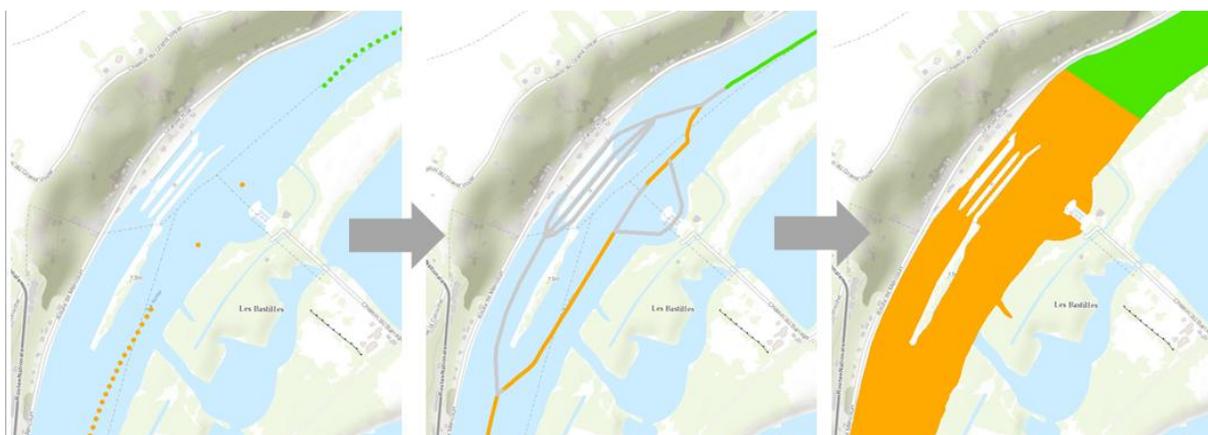


Figure 29: Exemple de transformation point vers polygone des valeurs d'oxygène dans la Seine au niveau du barrage de Méricourt pour la période de migration Mai-Juillet 2011. Données: Prose-PA.

5.5. Les ouvrages transversaux

5.5.1. Impact des ouvrages transversaux sur la migration

La présence d'ouvrages transversaux (seuils, barrages, écluses et buses) est à l'origine d'une fragmentation des cours d'eau. La présence d'une chute artificielle parfois infranchissable, la succession de nombreux ouvrages à franchir (même de faible hauteur ou cas des écluses), l'absence de lumière peu attractive dans les buses, etc. ont pour conséquence:

- **un retard dans la migration**
Certaines espèces comme les salmonidés grands migrateurs ont des fenêtres migratoires bien définies, alors même si le poisson parvient finalement à atteindre une frayère potentielle, la reproduction peut se révéler inefficace si l'arrivée est trop tardive, notamment parce que les conditions environnementales ne sont plus propices à une bonne survie des œufs ou parce que l'énergie dépensée par l'individu en migration a entraîné un phénomène d'épuisement qui l'empêche de défendre un territoire ou d'éviter les prédateurs.
- **une reproduction forcée**

À défaut de pouvoir passer l'obstacle, certaines espèces se reproduisent à l'aval des ouvrages, où l'habitat est souvent peu favorable à la survie et au développement des œufs. Des zones de reproduction forcées ont été notées pour les lamproies marines sur l'Andelle et l'Epte. (AAPPMA27)

- **abandon de reproduction**
- **mortalité par épuisement/prédation**

Évaluer les **capacités de franchissement des poissons** (nage et saut) et diagnostiquer l'impact de chaque ouvrage est donc essentiel si l'on veut pouvoir restaurer efficacement et durablement les continuités écologiques des cours d'eau. Grâce à l'enrichissement du ROE (Référentiel national des Obstacles à l'Écoulement), on dispose d'informations sur plus de 100 000 ouvrages en France. Cela a conduit au développement d'un nouveau protocole, nommé ICE (Information sur la Continuité Écologique), ayant pour objectif 1) de décrire précisément la configuration et les caractéristiques hydraulique de l'ouvrage et 2) d'évaluer leur impact sur la continuité biologique (Baudoin et al., 2014a). La méthode propose de tenir compte de la capacité de franchissement des espèces référencées pour diagnostiquer le caractère bloquant d'un ouvrage. Cette démarche ouvre ainsi la voie à l'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la faune piscicole migratrice puisque 8 espèces de grands migrateurs y sont référencées.

Les salmonidés grands migrateurs, dont font partie le saumon Atlantique et la truite de mer, possèdent, au stade adulte, les plus grandes capacités de franchissement d'obstacles par saut et/ou nage. Les hauteurs de chute maximales pouvant être franchies par saut sont de l'ordre de 1 à 2.5 m suivant la taille de l'individu et la présence d'une fosse d'appel en aval de l'ouvrage.

Les aloses ne présentent pas de capacité de saut et éprouvent rapidement des difficultés à franchir des obstacles dès lors que les jets sont plongeants.

Les lamproies ont un mode de franchissement bien différent des autres espèces: elles possèdent un comportement de "burst and attach", qui consiste en une succession rapide de nage suivie d'accrochage au substrat avec leur bouche-ventouse. Néanmoins, sans capacité de saut et avec une capacité réduite de nage, leurs capacités de franchissement restent faibles lorsque l'obstacle est vertical et sans point d'accroche.

5.5.2. Les données relatives aux ouvrages

L'estuaire de la Seine ne présente pas d'ouvrages transversaux. La majeure partie des ouvrages sont longitudinaux tels que des digues de calibrage. Les espèces étudiées ne présentent a priori pas de migration transversale ainsi leur migration est donc peu voire pas impactée par ces ouvrages. Aucun ouvrage impactant n'est donc retenu dans l'estuaire.

La Seine dénombre plusieurs grands ouvrages transversaux de type écluse, barrage et seuil. Ces ouvrages ont été compilés depuis la BDTPO (couche "CONSTRUCTION_SURFACIQUE") ou rectifiés/dessinés manuellement lorsqu'ils n'existaient pas. Les dispositifs de passage piscicole (passes à poissons et rivières de contournement) ont été dessinés manuellement.

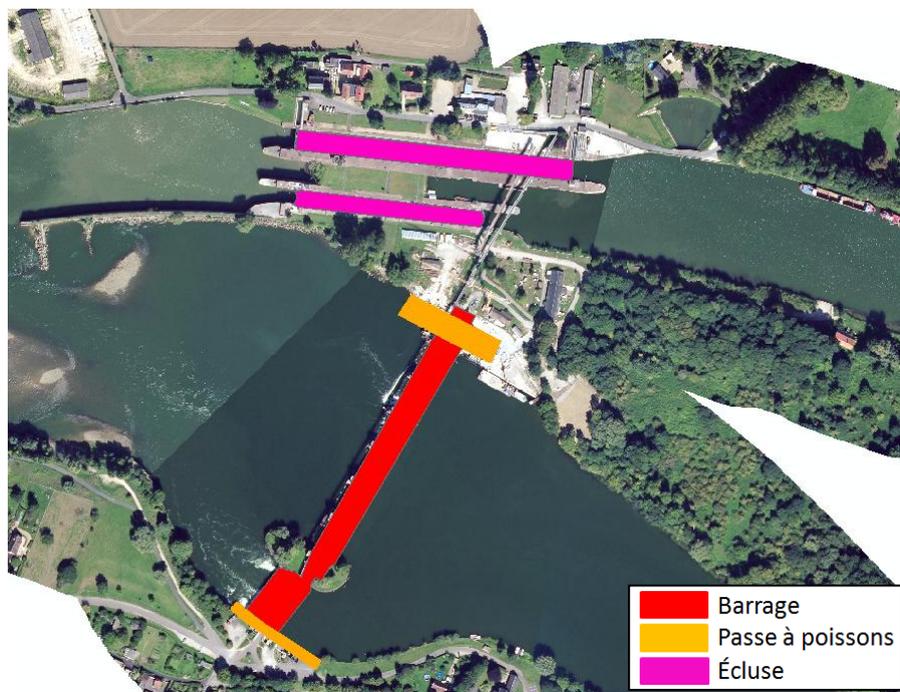


Figure 30: Exemple de construction polygonale des ouvrages (secteur barrage de Poses)

Les caractéristiques des ouvrages (type, hauteur de chute dans le cas des barrages) ont été collectées par jointure spatiale avec la base de données ROE (maj 07/2021)(OFB) (n=14).

À ce stade, nous ne disposons pas encore des classes ICE pour les ouvrages (Baudoin et al., 2014b) sur les secteurs de la Seine étudié. Ainsi, pour chaque ouvrage et chaque groupe d'espèce ICE, une "pseudo-classe ICE" a été déterminée en tenant compte du type d'ouvrage, de sa hauteur de chute et de la présence de dispositifs de franchissement. Sur le secteur étudié, toutes les hauteurs de chute étaient renseignées. La détermination des pseudo- classes ICE est expliquée dans l'Encadré 1.

Encadré 1: Détermination d'une pseudo-classe ICE par ouvrage et groupe d'espèces

Étapes:

1) Remplacement des hauteurs de chute manquantes

- par la moyenne de la classe de hauteur de chute si elle est renseignée; à défaut,
- par la hauteur de chute médiane du type d'ouvrage concerné. Ces médianes ont été calculées à partir des hauteurs de chute des 74 ouvrages sur l'Andelle.

Tableau 10: Médiane des hauteurs de chute par type d'ouvrage sur l'Andelle

	Type	H chute (m)	Nb ouvrages
1.1.7	Barrage remblais	3.19	1
1.2	Seuil	0.69	16
1.2.1	Seuil déversoir	0.69	15
1.2.2	Seuil radier	0.60	50
1.4.1	Radier de pont	0.22	4
1.4.2	Buse	0.69	1

2) Attribution du groupe d'espèces ICE aux 4 espèces migratrices de l'étude

Tableau 11: Classes ICE de franchissabilité (1 ; 0.66; 0.33; 0) par groupe d'espèces ICE défini à partir des valeurs seuils des hauteurs de chute à l'étiage (en mètres) (modifié à partir des p.3-4 dans (Baudoin and Kreutzenberger, 2016)).

Groupe d'espèces ICE	Espèce	1 Barrière franchissable à impact limité	0.66 Barrière partielle à impact significatif	0.33 Barrière partielle à impact majeur	0 Barrière totale
1	SAT TRM	≤ 1 m]1-1.5 m]]1.5-2.5 m]	> 2.5 m
3a/c	ALA LPM	≤ 0.6 m]0.6-1 m]]1-1.4 m]	> 1.4 m

3) Attribution d'une classe ICE à chaque ouvrage et chaque groupe d'espèces

Pour chaque ouvrage et en fonction de la hauteur de chute à l'étiage, on attribue pour chaque groupe d'espèces, une classe ICE (1; 0.66; 0.33;0) basée sur les capacités de franchissement des espèces (Tableau 11).

Cette méthode d'attribution des classes ICE est très simplifiée puisqu'on ne considère pas ici, la pente de l'ouvrage, la présence de fosse à l'aval, le tirant d'eau au niveau de l'obstacle, etc. L'obstacle est ici considéré comme étant vertical, ce qui représente la configuration la plus extrême.

4) Correction des classes ICE : cas des dispositifs de franchissement et écluses

- Pour les **ouvrages avec dispositif de franchissement** de type "Ascenseur à poissons", "Pré-barrage", "Écluse à poissons", "Rivière de contournement", "Passes à bassins successifs" et "Passe à ralentisseurs" on attribue une classe de 1. Bien que ces aménagements aient pour objectif de faciliter la traversée de l'obstacle, ils représentent une contrainte pour les poissons et leur efficacité est fortement dépendante de leur entretien et de la gestion de l'ouvrage globale.

- Pour les **écluses**, aucune hauteur de chute n'est renseignée, cependant ces ouvrages ne sont pas transparents pour la migration. Une classe ICE de 0.33 a été attribuée, correspondant à une barrière partielle à impact majeur.

MISE EN GARDE SUR L'UTILISATION DES PSEUDO-CLASSES ICE

Le calcul des pseudos classes ICE est très réducteur par rapport à la méthode de calcul des classes ICE. La pente de l'obstacle, la capacité ou non de saut de l'espèce, le tirant d'eau sur l'ouvrage, la profondeur de la fosse aval, l'éventuel chute aval, l'ouverture des vannes etc. sont des paramètres indispensables pour évaluer la capacité de franchissement et qui n'ont pas été intégrés au calcul des pseudos classes ICE. Ainsi, les pseudos classes ICE calculées auront nécessairement tendance à surestimer la franchissabilité d'un ouvrage. Par exemple, un seuil de pente faible (<25%), de hauteur de chute moyenne (50 cm) sera considéré comme franchissable par une TRM (pseudo-ICE=1), alors que dans l'ICE, il sera caractérisé comme infranchissable car la profondeur de la fosse aval et le tirant d'eau y sont trop faibles (8 cm). La Figure 31 montre que 80% des ouvrages avec une information ICE sont totalement infranchissables (classe 0) pour le groupe d'espèce 1 contre seulement 5% si l'on considère le pseudo-ICE!

Ce constat confirme l'importance de poursuivre l'effort réalisé dans le déploiement du protocole ICE et la saisie et mise à disposition des données sur la plateforme Géobs.

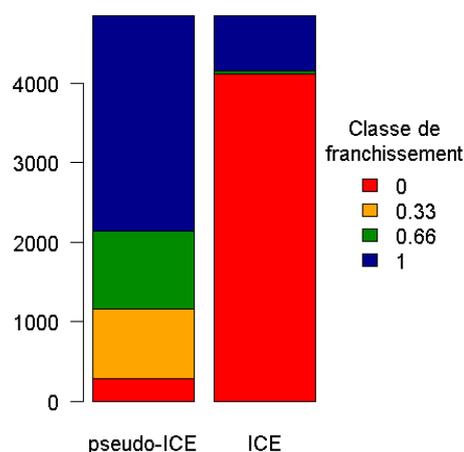
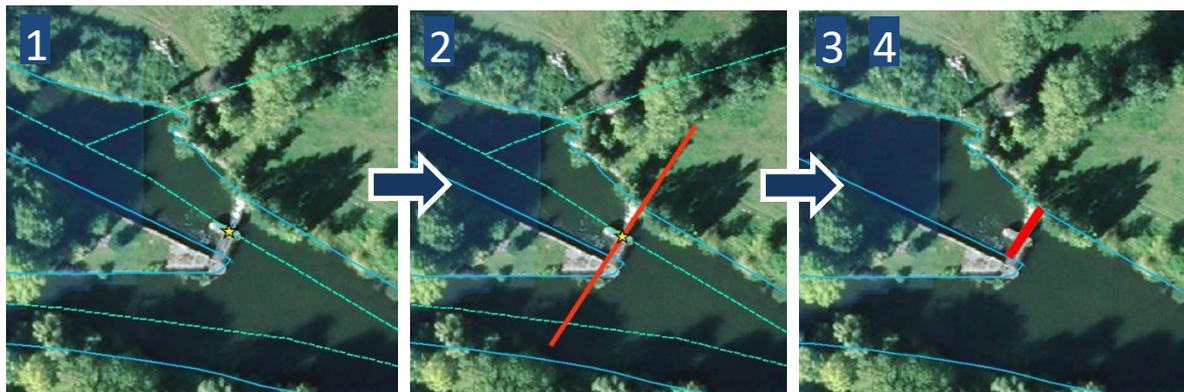


Figure 31: Comparaison des distributions des classes ICE (Geobs) et pseudo-ICE calculées sur environ 5000 ouvrages en France pour le groupe d'espèce Gr1 (TRM, SAT >50cm).

Sur l'Austreberthe, les ouvrages transversaux (n=48) ont été compilés à partir des données de l'étude SUEZ de 2018 pour le SYMAC et du ROE. La transformation des données polypoints d'ouvrages en données polygones est expliquée dans l'Encadré 2. Les caractéristiques des ouvrages (type, hauteur de chute, présence d'ouvrage de franchissement) ont été rattachées aux ouvrages polygones créés par jointure spatiale. Sur ce cours d'eau, nous ne disposons pas des données ICE. Une pseudo-classe ICE a donc été attribuée à chaque ouvrage pour chaque groupe d'espèces (voir Encadré 1)

Encadré 2: Projection des données points ouvrages en données polygones ouvrages transversaux



Uniquement dans le cas des ouvrages ROE :

Sélection des ouvrages impactant la migration des poissons étudiés:

1. Exclusion des ouvrages dont la validation est "gelée" (StObstEcou = "Gelé").
2. Exclusion des ouvrages non transversaux de types "épis", "grilles de pisciculture" et "digues" (CdTypeOuvr = "1.3", "1.5" ou "1.6"). On considère que ces obstacles n'ont pas d'impact sur la circulation des poissons migrateurs.
3. Exclusion des ouvrages en "projet" (CdEtOuvrag = "0").
4. Exclusion des ouvrages "totalement détruits" (CdEtOuvrag = "2").

Étapes:

- 1) Capture des polypoints ouvrages (★) sur le linéaire "TRONCON_COURS_EAU" (----) de la BDTOPO. Vérification visuelle et correction manuelle si nécessaire.
- 2) Génération d'un transect perpendiculaire au linéaire du cours d'eau (—) au niveau de chaque point ouvrage.
- 3) Découpage des transects selon la largeur du cours d'eau "SURFACE_EAU" de la BDTOPO.
- 4) Conversion des polylignes générées en polygone avec un buffer de rayon 1 m (■). **Les ouvrages sont donc représentés avec une longueur de 2 m.**
- 5) Récupération des caractéristiques des ouvrages par jointure spatiale

Sur l'Andelle, les données relatives aux ouvrages transversaux ont été compilées à partir des données du ROE (n=74). Une sélection des ouvrages transversaux impactant a été préalablement réalisée. À noter que 8 ouvrages n'avaient pas de hauteur de chute renseignée. Les classes ICE étaient disponibles pour 29 ouvrages, pour les autres, une pseudo-classe ICE a été attribuée.

Sur l'Eure, les données relatives aux ouvrages transversaux ont été compilées à partir des données des travaux de réalisation des PPRE et complétées avec le ROE (n=121). Une sélection des ouvrages transversaux impactant a été préalablement réalisée. À noter que 13 ouvrages n'avaient pas de hauteur de chute renseignée. Les classes ICE étaient disponibles pour 13 ouvrages, pour les autres, une pseudo-classe ICE a été attribuée.

Sur l'Epte, les données relatives aux ouvrages transversaux ont été compilées à partir des données du ROE. Une sélection des ouvrages transversaux impactant a été préalablement réalisée. À noter que 4 ouvrages n'avaient pas de hauteur de chute renseignée. Les classes ICE étaient disponibles pour 19 ouvrages, pour les autres, une pseudo-classe ICE a été attribuée.

Sur la Mauldre, les données relatives aux ouvrages transversaux ont été compilées à partir des données du ROE (n=35). Une sélection des ouvrages transversaux impactant a été préalablement réalisée. À noter que 1 ouvrage n'avait pas de hauteur de chute renseignée. Aucun ICE n'était disponible sur la Mauldre. Une pseudo-classe ICE a donc été attribuée à chaque ouvrage pour chaque groupe d'espèces.

5.6. La présence d'abris

5.6.1. Impact des abris sur la migration ?

La migration des espèces anadromes peut être source de nombreuses contraintes et la présence d'abris et de refuge sur le parcours semble donc primordiale pour les individus. Cette information est cependant peu renseignée dans la littérature. Mais, on peut penser que la présence de ripisylve et d'ombrage, contribue au maintien de températures plus fraîches recherchées par les salmonidés. La présence d'embâcles, de zones profondes (fosses/mouilles) sont également des endroits de cache/repos pour les salmonidés (communication personnelle J.L Baglinière). La végétation aquatique pourrait jouer un rôle d'abris mais cela n'est pas renseigné dans la littérature.

À défaut d'information plus précises, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte un éventuel effet de l'ombrage, de la ripisylve ou encore de la végétation aquatique sur la migration. Cependant, nous avons considéré un effet de la présence d'embâcle ou de mouille (comme abris à la prédation et refuge thermique) lorsque l'information était disponible.

5.6.2. Les données relatives aux abris

Bien que seules les données relatives à la présence d'embâcle aient été retenues, nous avons également compilées des données caractérisant la ripisylve, la végétation aquatique et l'ombrage, pour une éventuelle utilisation future.

Dans l'estuaire, des données issues de l'étude RIVE (GIP Seine-Aval, 2011) ont permis de repérer la présence d'embâcles. Ces données ponctuelles ont été transformées en données polygonales (2D). Une zone tampon de rayon égale à la longueur de l'embâcle divisée par 2 a été définie pour les embâcles.

Sur la Seine, le schéma des berges réalisé dans les départements de l'Eure et de l'Île de France par l'Institut Paris Région a permis d'extraire des données de présence d'embâcles. Ces données ponctuelles ont été transformées en données polygonales en considérant un buffer de 25m.

Sur l'Austreberthe, nous ne disposons de données sur l'état des berges, ni sur la présence d'embâcles. Cependant, des données de caractérisation de la ripisylve (densité et ombrage) et de présence de végétation aquatique ont été compilées à partir d'une étude réalisée en 2018 par SUEZ pour le SYMAC. Les données linéaires (ripisylve) ont été transformées en données polygonales en appliquant un buffer de 1 m de rayon et les données ponctuelles (végétation aquatique) avec un buffer de 2 m.

Sur l'Andelle, nous ne disposons pas de données caractérisant l'état des berges la présence de végétation aquatique ou d'embâcles. Cependant, des données de caractérisation de la ripisylve (présence et type d'essence) ont pu être compilées à partir de la couche "ZONE_VEGETATION" de la BDTOPO et des polygones ont été générés le long des berges. La transformation des données est expliquée dans l'Encadré 3.

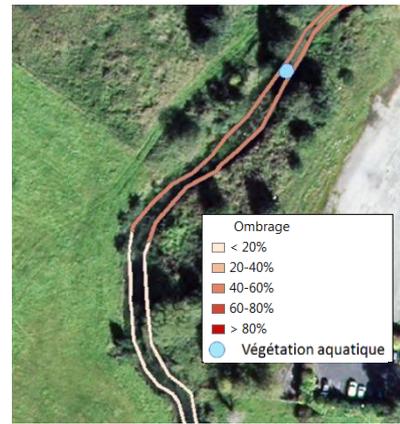
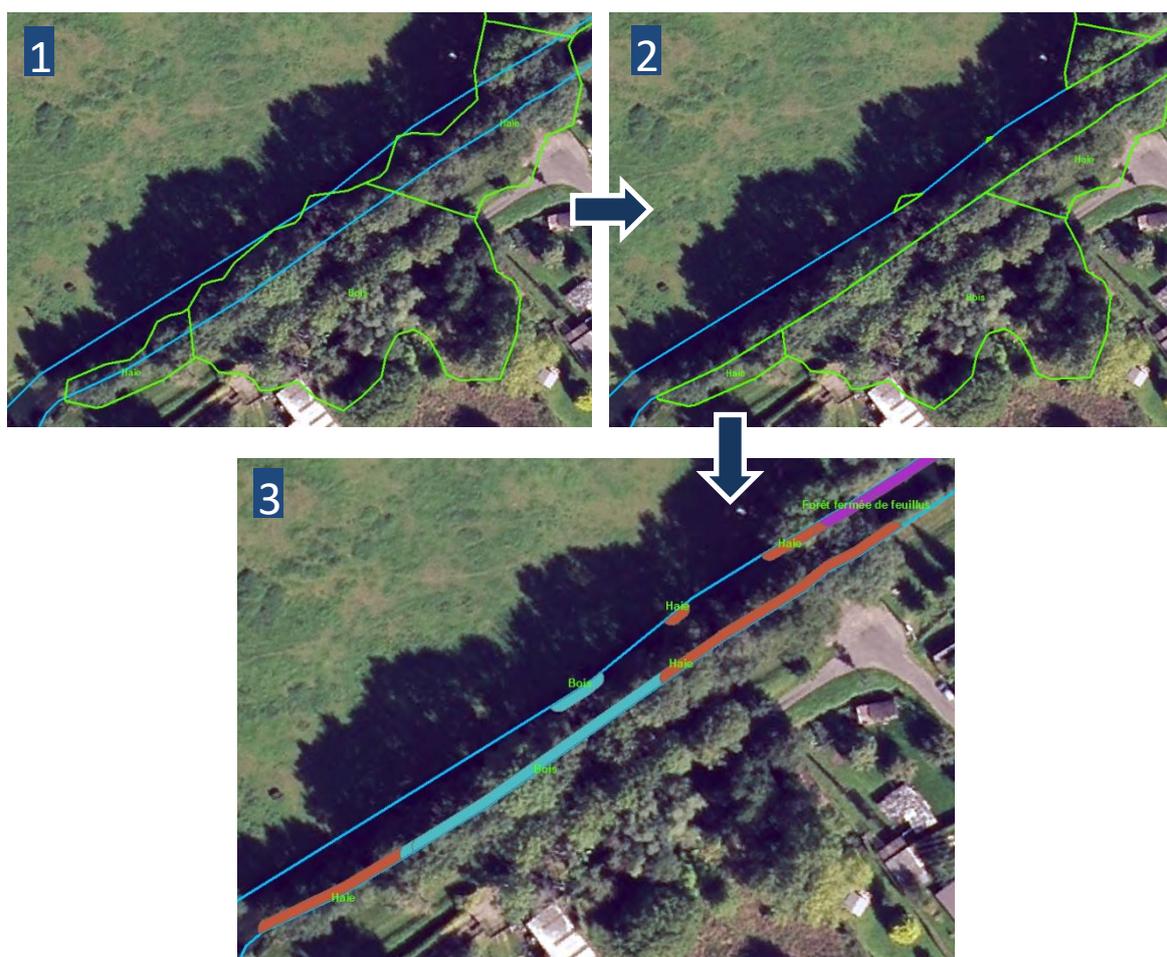


Figure 32: Polygones caractérisant les abris potentiels (végétation aquatique et ombrage)

Encadré 3: Transformation des données "ZONE_VEGETATION" de la BDTOPO en données polygones "végétation rivulaire"



Étapes:

1) Sélection des zones de végétation (—) recoupant la zone de cours d'eau (—)

2) Suppression des zones de végétation inclus dans la zone de cours d'eau (—)

+ Conversion des polygones végétation en données polylignes

+ Capture des polylignes sur le contour du cours d'eau.

3) Application d'un buffer de rayon 1 m aux polylignes végétation et découpage selon la zone de cours d'eau (—). L'épaisseur de la ripisylve est donc représentée par une bande de 1 m de large dans le chenal.

Sur l'Eure, des données relatives aux abris ont été compilées à partir des travaux de réalisation des PPRE (Eure amont et aval dans l'Eure).

Tableau 12: Récapitulatif des données "abris" disponible sur l'Eure (27)

	Eure aval – territoire CASE (PPRE 2012)	Eure amont (PPRE 2010)	Transformation des données avec buffer
Embâcles	X		10 m
Aménagements berges	X	X	4 m
Densité ripisylve	X	X	4 m
Ombrage		X	Emprise cours d'eau
Végétation aquatique		X	Emprise cours d'eau

Sur l'Epte, nous ne disposons pas de données terrain caractérisant l'état des berges et la présence de végétation aquatique. Cependant, des données de caractérisation de la ripisylve (présence et type d'essence) ont pu être compilées à partir de la couche "ZONE_VEGETATION" de la BDTOPO et des polygones ont été générés le long des berges. La transformation des données est expliquée dans l'Encadré 3.

Sur la Mauldre, un inventaire de terrain des abris potentiels et embâcles a été réalisé en mars 2021. Ces données ponctuelles ont été transformées en données polygonales en appliquant un buffer correspondant à l'emprise de l'abri.

6. Attribution des coûts de déplacement

Une fois les habitats cibles et les éléments du paysage identifiés, on peut représenter l'ensemble du paysage sous la forme d'un maillage composé de ces éléments du paysage (Figure 33 A et B). La hiérarchisation des éléments est importante si l'on veut donner davantage de poids à certains éléments.

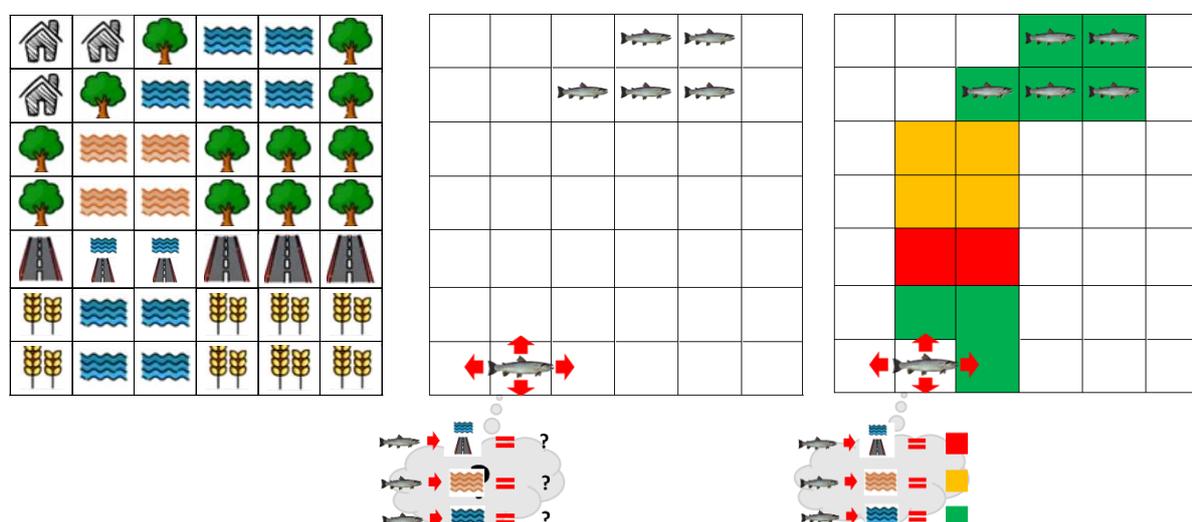


Figure 33: Schéma simplifié du maillage du paysage (A), de la localisation des habitats cibles (B) et de l'attribution de classe de perméabilité aux éléments du paysage (C).

A chacun de ces éléments paysagers, et en fonction des caractéristiques écologiques et physiologiques des espèces (capacité de nage, tolérance à la pollution, risque de prédation), un coût de déplacement est attribué. Ce coût traduit à la fois un effort, un évitement comportemental et un risque de mortalité pour traverser une maille. Pour attribuer ces coûts, on utilise une méthode qui consiste à définir des

classes de perméabilité dans lesquelles on va regrouper différents éléments du paysage (Figure 33 C). Dans notre étude, 4 classes de perméabilité sont définies (Tableau 13):

Tableau 13 : Classes de perméabilité et conséquences sur l'accès aux frayères amont

Perméabilité du milieu	Conséquence sur l'accès aux frayères amont	Coût
Perméable	→ La quasi-totalité de la population <u>peut traverser</u> ce milieu. Les frayères sont accessibles.	Coût neutre ou faible lié à la nage (croisière) $R < 240$
Peu perméable	→ Une partie de la population <u>ne peut pas</u> traverser ce milieu (25%). Les frayères sont donc partiellement accessibles avec un potentiel retard et/ou risque de blessures/maladies.	Coût élevé $R [240; 530[$
Très peu perméable	→ Une grande partie de la population <u>ne peut pas</u> traverser ce milieu (75%). Les frayères sont donc très partiellement accessibles avec un fort retard et un risque important de blessures/maladies.	Coût très élevé $R [530; 900[$
Imperméable	→ La population <u>ne peut pas</u> traverser ce milieu. Les frayères sont inaccessibles induisant une reproduction forcée, un abandon de migration ou de la mortalité.	Coût maximal $R \geq 900$

Une fois que les éléments du paysage ont été classés en fonction de leur perméabilité, il convient ensuite de leur attribuer un coefficient de coût ou de résistance (R). Plus le coefficient attribué sera élevé ($R > 1$), plus la traversée de la maille sera contraignante pour l'espèce (présence d'obstacles infranchissables, pollution importante). Un coût neutre ($R = 1$) traduira une absence de contrainte. Un coefficient de coût $R < 1$ traduira une aide au parcours (le flot, des zones de repos sur le parcours, etc.). En pratique, des gammes de coût peuvent être établies sur la base d'avis d'experts, de littérature sur l'utilisation des habitats, des expériences de radio-tracking ou de capture-marquage-recapture. De nombreuses études se basent également sur une courbe exponentielle entre une valeur minimale et maximale pour définir les coûts (REF).

Dans notre cas, nous avons fait l'hypothèse que la perméabilité d'un milieu neutre (=sans coût supplémentaire) diminue naturellement avec la distance parcourue. Par conséquent, la probabilité d'atteindre une frayère pour une espèce de poisson migrateur donné diminue avec la distance parcourue par le poisson. Pour représenter la loi de probabilité associée, nous avons choisi une courbe de type demi-gaussienne décroissante,

$$f(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

Où $\sigma = d_{max}/2$ et $d_{max} = 900$ km (distance maximale historique de migration depuis l'estuaire pour ALA, TRM et LPM) (Merg et al., 2020).

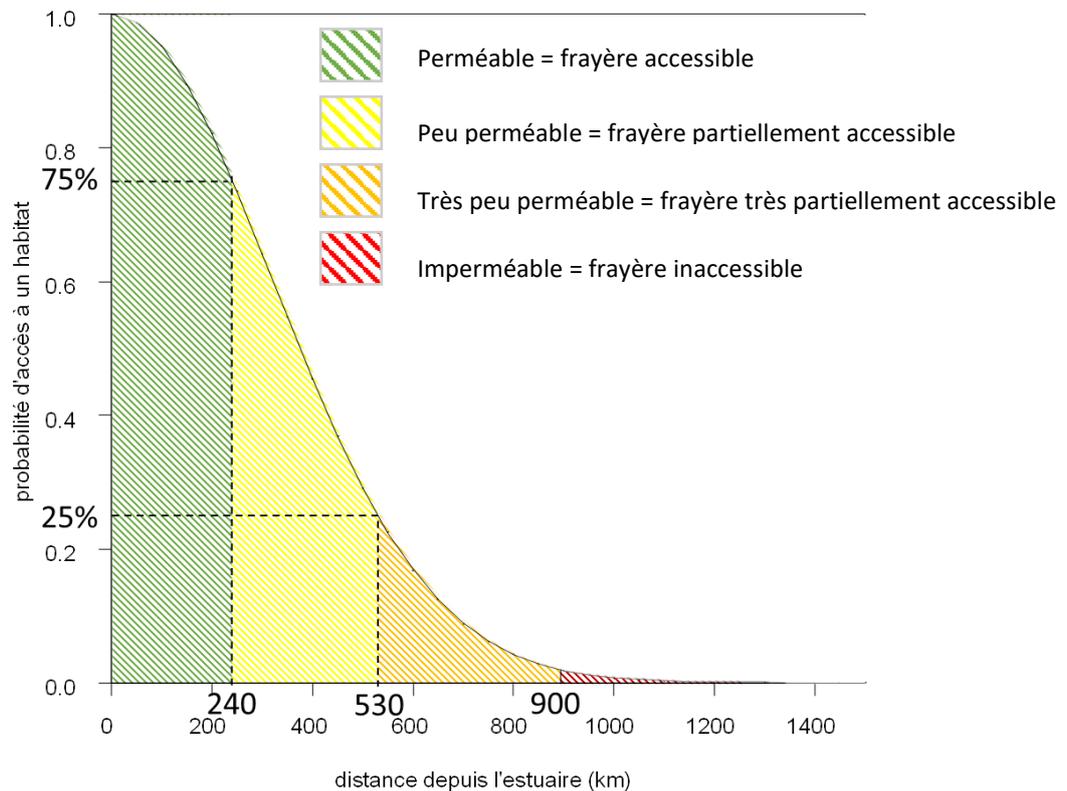


Figure 34 : Probabilité d'accès à un habitat dans un milieu neutre en fonction de la distance parcourue par un poisson depuis l'estuaire. Cas pour LPM, TRM et ALA. Ex de lecture : 75% de la population de TRM peut atteindre un habitat situé à 240 km de l'estuaire.

Les coefficients de coût attribués à chaque classe de perméabilité sont obtenus en repérant les distances parcourues associées aux probabilités d'accès à un habitat. Par exemple, si l'on considère un seuil en rivière, classé comme très peu perméable et laissant passer 25% de la population, le coût total attribué à cet ouvrage sera équivalent à une traversée de 530 km dans un milieu neutre. Attention, il faut bien distinguer le **coût total de l'élément** du coût attribué aux mailles qui le composent. La longueur de l'ouvrage, et plus globalement de l'élément considéré, est donc importante à prendre en compte car elle conditionne **la valeur de coût à attribuer par maille**. Par exemple, s'il faut 2 mailles de 1 mètre pour traverser cet obstacle, la résistance qui sera attribuée à chacune des mailles sera $R=530\ 000\ m / 2\ m$. Ainsi, traverser cette maille d'obstacle sera 265 000 fois plus coûteux que si elle était traversée dans un milieu neutre.

6.1. Coûts attribués aux vitesses de courant

Le calcul du coefficient de coût (R) pour le paramètre hydrodynamie prend en compte la vitesse de courant moyenne de la période de migration ($V_{courant}$) au niveau du pixel ainsi que la capacité de nage de l'espèce ($V_{poisson}$).

Dans l'estuaire, pendant le flot, les coefficients de coût sont inférieurs à 1 traduisant une facilité pour le poisson à remonter l'estuaire:

$$R_{\text{estuaire-flot}} = V_{\text{poisson}} / (V_{\text{poisson}} + V_{\text{courant}})$$

Dans le fleuve et les affluents les coefficients de coût sont supérieurs à 1 traduisant un coût énergétique pour le poisson pour remonter le cours d'eau.

$$R_{\text{fleuve/affluent}} = V_{\text{poisson}} / (V_{\text{poisson}} - V_{\text{courant}})$$

Dans le cas d'un faciès "rapide", un coefficient de coût $R=2$ a été attribué.

6.2. Coûts attribués aux paramètres physico-chimiques

Pour chaque paramètre physico-chimique, les coefficients de coût sont attribués en tenant compte des seuils de tolérance des espèces (Figure 28), du temps de dépassement de ces seuils sur les périodes de migration (Tableau 14) et de la longueur du linéaire où ces seuils sont dépassés.

Tableau 14: Attribution des coefficients de coût (R) en fonction des seuils de tolérance aux paramètres physico-chimiques (ou seuils de bon état physico-chimique (*)) et du % de temps de dépassement de ces seuils.

	Paramètre	Seuil létal	Seuil contraignant
SAT	Oxygène	<3 mg/L	< 6 mg/L et > 3 mg/L
	Température	<3°C ou >25°C	>20°C et <25°C
TRM	Oxygène	<3 mg/L	< 6 mg/L et > 3 mg/L
	Température	<3°C ou >27°C	>20°C et <27°C
ALA	Oxygène	<2 mg/L	< 5 mg/L et > 2 mg/L
	Température	<10°C ou >30°C	>20°C et <30°C
LPM	Oxygène	<3 mg/L	< 6 mg/L et > 3 mg/L
	Température	<4°C ou >30°C	>19°C et <30°C
Toutes espèces	PO ₄ ³⁻	-	> 0.5 mg/L*
	NO ₃ ⁻	-	> 50 mg/L*
	NO ₂ ⁻	>1 mg/L	> 0.3 mg/L*
	NH ₄ ⁺	-	> 0.5 mg/L*

Un coefficient de coût croissant est attribué en fonction du temps de dépassement du seuil contraignant. Si le dépassement est inférieur à 5% du temps, un coefficient neutre sera attribué (R=1), au-delà de 70% du temps, on attribuera un coût de 10 à la maille, traduisant un coût 10 fois plus élevé qu'en condition neutre. Par exemple, traverser l'estuaire lorsque la température de l'eau dépasse 20°C dans 60% du temps sera équivalent à parcourir 155km x 5 = 775km et donc à traverser un milieu très peu perméable que seuls 10% de la population de TRM peut traverser.

% du temps où le seuil contraignant est dépassé	R
<5%	1
5-30%	1.5
30-50	3
50-70	5
>70%	10

6.1. Coûts attribués aux ouvrages

L'indice global ICE (IG) de l'ouvrage, lorsqu'il était renseigné, a été utilisé pour classer les ouvrages en fonction de leur perméabilité et attribuer des coefficients de coût grâce à la courbe de probabilité d'accès à un habitat (Figure 34). Lorsqu'ils n'étaient pas renseignés, la "pseudo-classe ICE" a été considérée. Pour exemple, un ouvrage avec un IG= 3, a été classé « très peu perméable », avec une probabilité d'accès de 25%, le coût total pour traverser cet ouvrage est donc équivalent à 530 km. L'ouvrage mesure 2m de long soit 2 mailles de 1m : le coût pour chacune des mailles est donc R=530 000 m / 2 m.

Classe ICE ou IG	Rmaille	Longueur moyenne ouvrage	Classe de perméabilité (% probabilité)	Type d'ouvrage	Rmaille	Longueur moyenne ouvrage	Classe de perméabilité (% probabilité d'accès)
ICE : 1 / IG : 10	22 500	2 m	Perméable (99%)	Rivière de contournement	450	100 m	Perméable (99%)
ICE : 0.66 / IG : 6-9	121 000	2 m	Peu perméable (75%)	Passé à poissons	2400	100 m	Peu perméable (75%)
ICE : 0.33 / IG : 2-5	265 000	2 m	Très peu perméable (25%)	Passage souterrain	1000	100 m	Perméable (95%)
ICE : 0 / IG : 1	450 000	2 m	Imperméable	Écluse	1200	200 m	Très peu perméable (25%)

Figure 35: Attribution des coefficient de coût (R) en fonction des classes ICE de l'ouvrage ou du type d'ouvrage dans le cas d'aménagement sans hauteur de chute.

Les aménagements de type écluse, passe à poissons et rivière de contournement n'ont pas de classe ICE renseignée, ils ont donc été évalués comme étant respectivement très peu perméables (R=530 000 m / 200 m), peu perméables (R= 240 000 m / 100 m) et perméables (R= 45 000 m/ 100 m) sur la migration des espèces. Dans le cas d'un passage souterrain ou busé, avec une perméabilité à 95%, un coût R= 100 000 m / 100 m été attribué.

6.2. Abris et préférences de déplacement

Pour les trois espèces considérées, un coût R=0.8 est attribué au niveau des zones d'embâcle. Afin de représenter au mieux les préférences de déplacement des espèces dans le fleuve, un coût R=0.9 est attribué: dans le chenal pour la grande alose et le long des berges pour les autres espèces (communication personnelle Catherine Boisneau). Le déplacement dans ces milieux sur la Seine sera donc privilégié.

Type d'abris ou préférence de déplacement	R	Espèces concernées
Embâcle	0.8	TRM/LPM/ALA
Berge	0.9	TRM/LPM
Chenal	0.9	ALA

7. Évaluer le coût de la migration

Après avoir identifié et compilé les éléments du paysage influençant la migration et leur avoir attribué un coût de déplacement, le coût total de la migration est évalué par une approche de moindre coût. Cette approche repose sur les hypothèses générales prévoyant que les poissons auront tendance à minimiser les coûts d'énergie pendant leur voyage (Giske et al., 1998). Le chemin de moindre coût correspond au chemin ayant le coût cumulatif le plus faible entre deux points par l'intégration de la distance et de la résistance au déplacement d'une espèce dans un milieu. Le chemin le moins coûteux entre deux taches d'habitat fonctionnel peut parfois impliquer de parcourir une distance plus longue que la distance hydrographique la plus courte afin d'éviter un obstacle ou une zone à risque.

Dans cette étude, le coût de la migration est exprimée sous la forme d'une distance fonctionnelle (ou résistance cumulée minimale), exprimée en kilomètres fonctionnels (kmF) (Knaapen et al., 1992, Adriaensen et al., 2003).

7.1. Calcul de la matrice raster de coût de déplacement

Pour chaque cours d'eau, chaque espèce et chaque variable environnementale, un raster de coût est généré (taille d'un pixel: 1m pour les affluents, 5 m pour l'estuaire et 3m pour le fleuve). À chaque pixel correspond une valeur de résistance R. Pour chaque cours d'eau et chaque espèce, les rasters de coût des variables environnementales sont ensuite combinés pour former un raster de coût unique. La combinaison des rasters de coût des variables environnementales se fait en les multipliant entre eux, sauf au niveau des pixels d'un ouvrage, où la résistance du pixel du raster final correspondra à la résistance de l'ouvrage (voir exemple Figure 36).

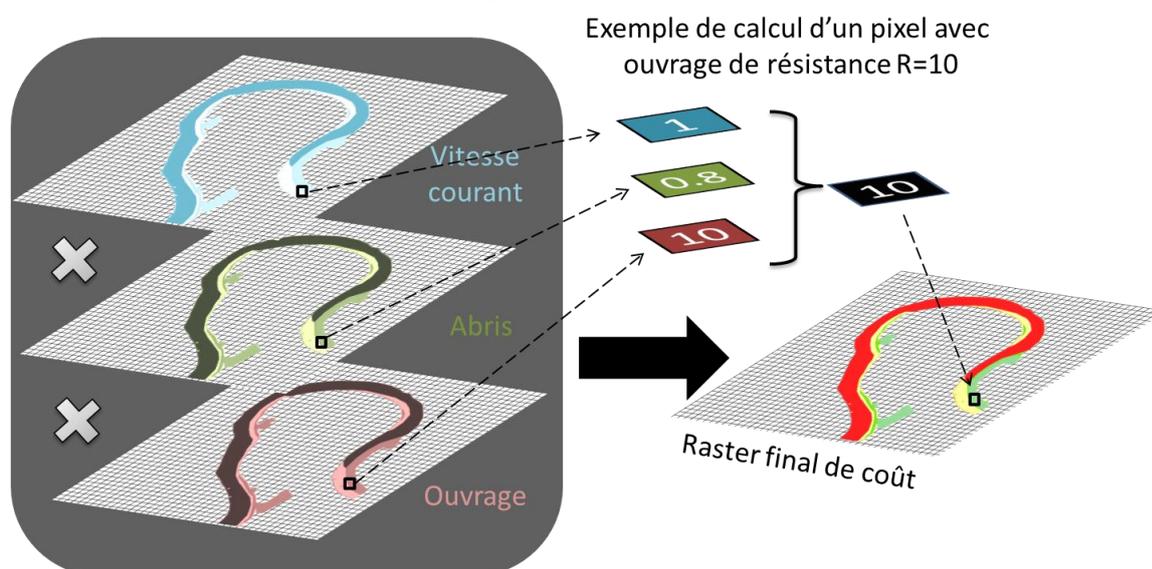


Figure 36: Combinaison par multiplication des rasters de coût des variables environnementales. Si un ouvrage est présent sur le pixel, la valeur du pixel résultante sera la valeur du pixel de l'ouvrage (exemple avec un pixel ouvrage de valeur R=10).

7.2. Calcul des distances fonctionnelles nécessaires pour accéder aux frayères

À partir des rasters finaux de coût et de la localisation des frayères potentielles, l'outil "Distance de coût" (ArcGIS 10.8, extension Spatial Analyst) calcule les distances fonctionnelles (DF) pour accéder à chaque frayère potentielle, en tenant compte de la distance et du coût de chaque cellule. Le chemin de moindre coût est représenté par l'outil "Chemin de coût en polyligne" (Figure 37). La distance hydrographique aux frayères potentielles est également calculée.

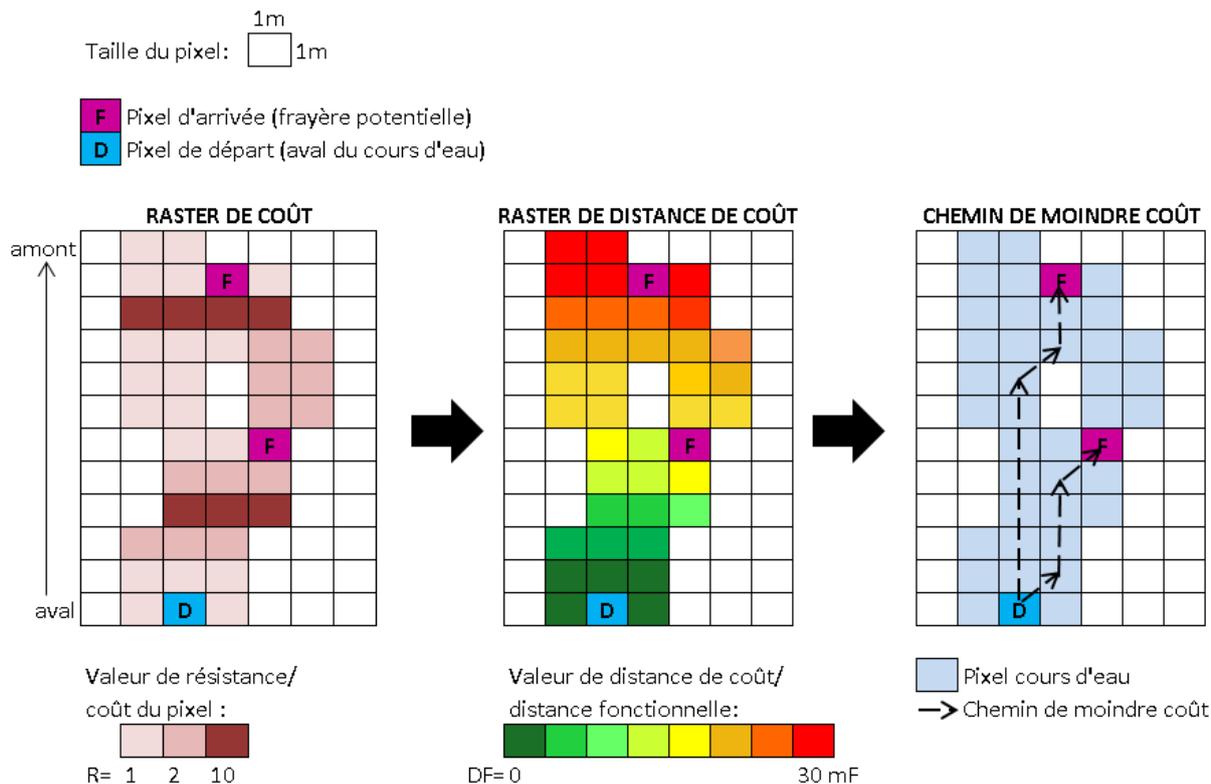


Figure 37: Schéma simplifié des étapes de calcul du chemin de moindre coût

7.3. Classement des frayères potentielles par classe d'accessibilité

La distance fonctionnelle nécessaire pour atteindre chaque frayère est ensuite comparée aux distances hydrographiques seuil, qui séparent les classes d'accessibilité (Figure 34), corrigées par un coefficient de coût moyen de nage en conditions naturalisées. On compare ainsi une DF à une DF seuil naturalisée et non pas à une DH. Cela permet de prendre en compte le coût « naturel » de la migration.

Exemple : Si le coût moyen de nage en conditions naturalisées sur le trajet estuaire-Austreberthe pendant le flot pour LPM est de $R=1,2$ m/1m (voir 6.1), les distances hydrographiques seuils depuis l'estuaire (Figure 34) seront multipliées par 1,2. Ainsi, si la distance fonctionnelle pour accéder à une frayère donnée est de 350 km, alors l'accessibilité à cette frayère sera classée « partiellement accessible » car $240 \times 1,2 < DF < 530 \times 1,2$ km.

8. Scénarios de restauration de la continuité écologique

8.1. Choix des scénarios "ouvrages"

Les ouvrages et les types de restauration de la continuité écologique à intégrer dans les scénarios ont été choisis en concertation avec les acteurs locaux (syndicats de bassin, DDT) (Tableau 15). Les scénarios correspondent à l'enlèvement/l'équipement successif des ouvrages de l'aval vers l'amont. Ainsi sur l'Austreberthe 6 scénarios (+1 scénario situation initiale) ont été construits en additionnant successivement les travaux sur les 6 ouvrages prioritaires.

Tableau 15: Ouvrages ROE prioritaires et type de travaux choisis pour les scénarios de restauration de la continuité écologique. Les ouvrages sont triés de l'aval vers l'amont sur chaque cours d'eau.

Cours d'eau	Code ROE	Nom de l'ouvrage	Franchissabilité salmonidés (>50cm)	Travaux envisagés	Nombre de scénarios
Austreberthe	ROE25951	Moulin Larson	Impact limité ^{1,2} (significatif pour LPM)	Arasement	6 x 2 espèces
	ROE25946	Chute pépinière DUVAL	Impact majeur ^{1,2} (barrière totale pour LPM)	Arasement	
	ROE25943	Chute du pont des vieux	Impact significatif ² (majeur pour LPM)	Arasement	
	ROE25937	Chute SMEN	Barrière totale ^{1,2}	Arasement	
	ROE25925	Décharge moulin de Paulu	Barrière totale ^{1,2}	Arasement	
	ROE25872	Seuil du Paulu	Barrière totale ^{1,2}	PAP	
Eure	ROE4688	Centrale le Vaudreuil	Barrière totale ²	PAP	4 x 1 espèce
	ROE18489	Moulin Flicaux	Barrière totale ²	PAP	
	ROE18525	Autheuil	Impact limité*	Arasement	
	ROE19467	Chambray	Impact majeur ²	Arasement	
Andelle	ROE535	Moulin de Bétillé	Barrière totale ²	Arasement	8 x 2 espèces
	ROE104867	Moulin de la Besle	Barrière totale ²	Arasement	
	ROE552	Bacqueville	Barrière totale*	Arasement	
	ROE675	St Paul	Barrière totale*	Arasement	
	ROE64203	Linandelle	Barrière totale*	RC	
	ROE61275	Pont de l'Andelle	Barrière totale*	RC	
	ROE1555	Transière	Barrière totale*	PAP	
	ROE1550	Moulin de l'Église	Barrière totale*	RC	
Epte	ROE56307	Moulin de Villez	Barrière totale*	RC	7x2 espèces
	ROE56308	Isobox	Impact limité* (barrière totale pour LPM)	Arasement	
	ROE36717	Complexe Gommecourt	Barrière totale*	Arasement	
	ROE36735	Moulin de Gasny	Impact significatif* (majeur pour LPM)	PAP	
	ROE36754	Moulin de Fourges	Barrière totale*	Arasement	

	ROE36769	Bray et lu	Impact limité ² (significatif pour LPM)	Arasement	
	ROE43389	Complexe Berthenonville	Impact limité* (significatif pour LPM)	Arasement	
Mauldre	ROE57529	Moulin de la Ville	Barrière totale ^{2,3}	Arasement	5x1 espèce
	ROE105977	Seuil de la Chaussée	Impact significatif ²	Arasement	
	ROE105978	Moulin du Radet	Barrière totale ^{2,3}	Arasement	
	ROE105981	Seuil du Grand Moulin	Barrière totale ^{2,3}	Arasement	
	ROE57526	Seuil Etang de Beynes	Impact limité ²	Abaissement	
	ROE57527	Seuil de la Vallée d'Agnou		Arasement	
		Déversoir du pont noir		Arasement	
	ROE57525	Seuil de l'usine Prosynthèse		?	
	OCE064	Seuil Moulin de la Maladrerie		?	

PAP: passe à poissons

RC: rivière de contournement

Sources :

*: ICE; ¹: SIRAS 2019; ²: évaluation personnelle franchissabilité (photos+ hauteurs de chute); ³: COBAHMA 2010

8.1. Autres scénarios envisagés

Un scénario d'amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau sur la Mauldre est également envisagé. Des scénarios de changement climatique (vitesse et température) pourront également être envisagés sous réserve de disponibilité des données.

8.2. Test des scénarios

Pour chaque scénario, les matrices de coût et les distances fonctionnelles sont recalculées. Les distances fonctionnelles sont ensuite comparées aux distances fonctionnelles initiales (sans scénarios) afin d'évaluer l'effet de chaque scénario.

PARTIE 3: Résultats de la modélisation de la continuité écologique et effets des scénarios de restauration

9. Estuaire

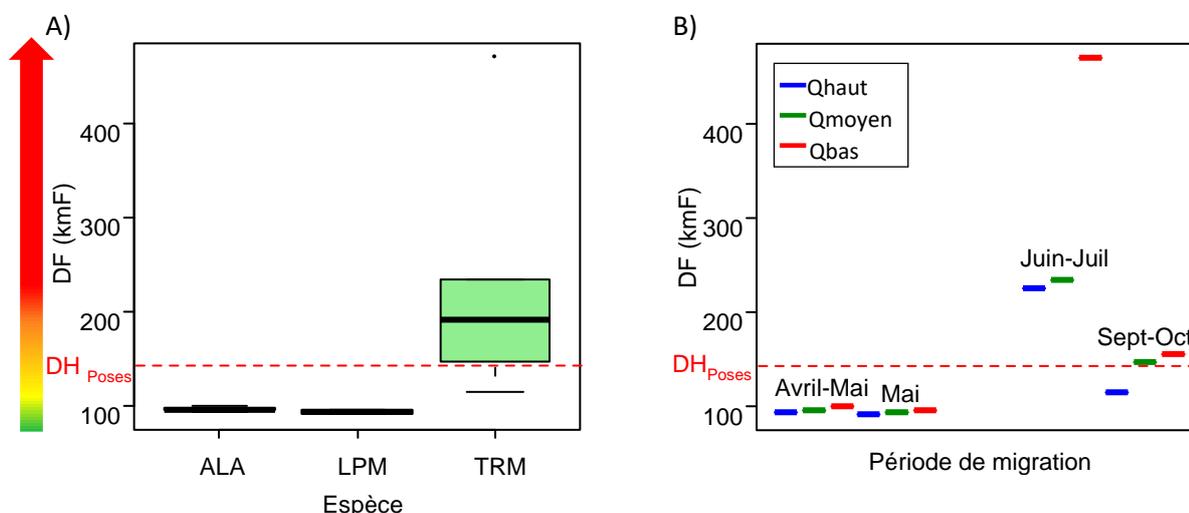


Figure 38: Distribution des distances fonctionnelles (DF – proxy du coût de migration) pour parcourir l'estuaire d'Honfleur à Poses en fonction A) des périodes de migration et des cas hydrologiques et B) des espèces.

Note: Avril-Mai: migration ALA; Mai: migration LPM ; Juin-Juil: migration TRM (1^{ère} vague); Sept-Oct: migration TRM (2^{ème} vague). La distance hydrographique (DH) pour rejoindre Poses depuis Honfleur est donnée à titre comparatif.

- *Y a-t-il des différences de coût de la migration pour traverser l'estuaire entre les espèces? Si oui, quelle(s) espèce(s) présente(nt) les coûts de migration les plus importants ?*

D'après la Figure 38 (A), le coût pour traverser l'estuaire varie significativement entre certaines espèces: TRM a une DF moyenne 2 fois supérieure à celles de LPM et ALA. **La migration de TRM semble donc plus coûteuse que celle de LPM et ALA.**

- *Y a-t-il une influence des périodes de migration sur le coût de la migration pour traverser l'estuaire? Si oui, quelle période est la plus coûteuse ?*

D'après la Figure 38 (B), les DF pour traverser l'estuaire varient en fonction de la période de migration. D'avril à mai (migration d'ALA et LPM) et de septembre à octobre (2^{ème} vague de migration de TRM), les DF pour rejoindre Poses sont inférieures à la DH, traduisant l'effet facilitant du flot lors de la remontée. La migration d'ALA et LPM sur les périodes d'avril à mai sont peu coûteuses. A l'inverse de mai à juillet (1^{ère} vague de migration de TRM) les DF sont jusqu'à 5 fois plus élevées que la DH. **La période de migration de Juin à Juillet (1^{ère} vague) semble donc plus coûteuse que la période de migration de septembre à octobre (2^{ème} vague).**

- *Y a-t-il une influence des cas hydrologiques sur le coût de la migration pour traverser l'estuaire? Si oui, quel cas hydrologique est le plus coûteux ?*

D'après la Figure 38 (B), pour une même période de migration, les DF pour traverser l'estuaire varient en fonction des cas hydrologiques: les DF sont plus élevées pour le cas "Qbas" que pour le cas "Qmoyen" et le cas "Qhaut". Cette différence est particulièrement marquée sur la période de juin à juillet. **Les années de bas débits semblent donc plus coûteuses pour la migration que les années à débit haut, particulièrement en période estivale.**

- *Quels sont les éléments du paysage qui expliquent les coûts de migration sur l'estuaire?*

L'exploitation des différentes données de physico-chimie nous a permis de conclure à l'absence de perturbations physico-chimiques chroniques dans l'estuaire qui compromettraient la migration des poissons étudiés. En effet, les valeurs moyennes relevées (O₂, NO₂, NO₃) restent éloignées des seuils

toxiques et létaux. Néanmoins, les sédiments de l'estuaire sont fortement contaminés par les PCB malgré leur interdiction depuis plus de 30 ans. Nous n'avons pas considéré ce paramètre ici, et avons fait l'hypothèse que les espèces étudiées, étant de passage dans l'estuaire, ne vivaient pas et ne se nourrissaient pas dans les sédiments et étaient donc moins exposées que les espèces résidentes et de fond.

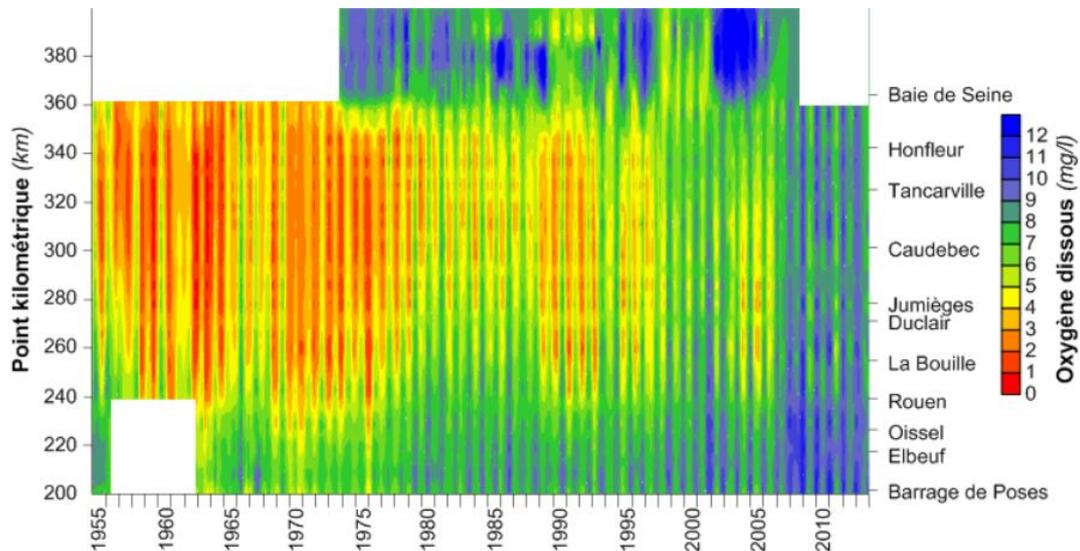


Figure 39: Modélisation de l'oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine de 1955 à 2017 (source : GIP Seine-Aval, 2014)

Bien que les valeurs d'oxygène soient satisfaisantes depuis quelques années (Figure 39) grâce à l'amélioration continue du traitement des eaux usées, l'estuaire reste un milieu fragile, et des situations proches de l'anoxie pourraient à nouveau se déclarer dans un contexte d'augmentation des températures et de diminution des débits.

Enfin, nous avons noté que la température de l'eau dans l'estuaire dépassait 20°C dans 50% du temps de la période de migration de la TRM lors de la 1^{ère} vague migratoire (Figure 40). **Ces conditions de température constituent une forte contrainte pour les salmonidés, qui arrêtent leur migration au-delà de 20°C et explique les coûts de migration plus élevés pour ces espèces en période estivale.**

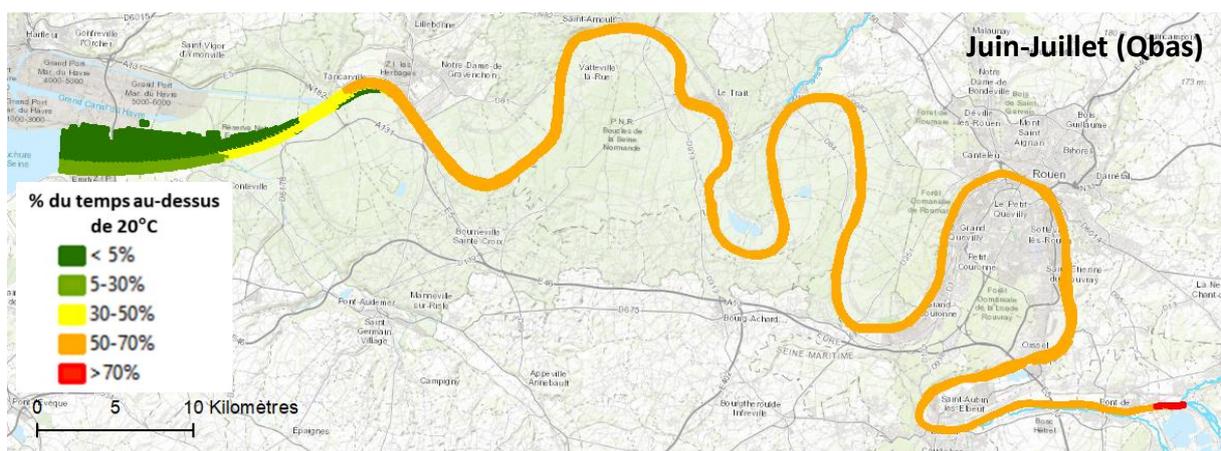


Figure 40: Pourcentage du temps où les températures dépassent 20°C dans l'estuaire sur la période Juin-Juillet (migration TRM) et comparaison des distributions de dépassement en fonction des cas hydrologiques. Données MARS3D 2010-2018.

10. Austreberthe

- *Quelle est la situation actuelle d'accès aux frayères potentielles ? Quelles sont les principaux obstacles qui contraignent l'accès aux frayères ?*

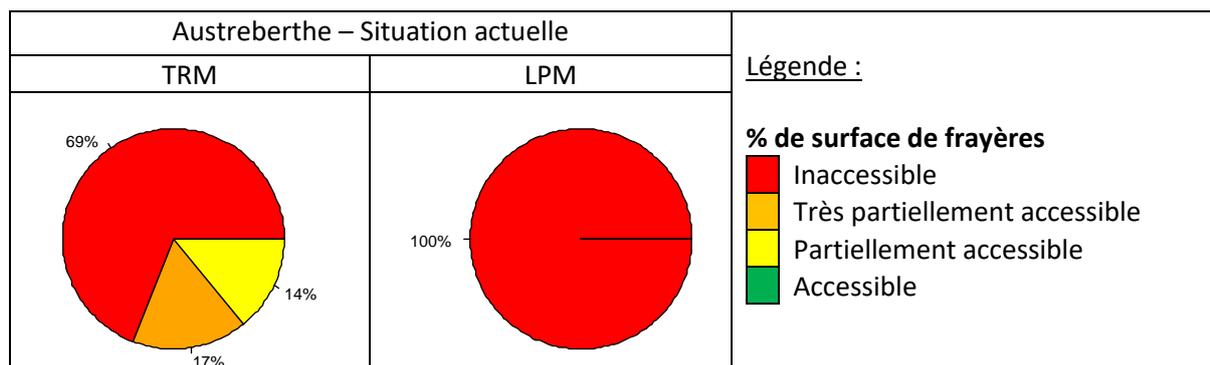
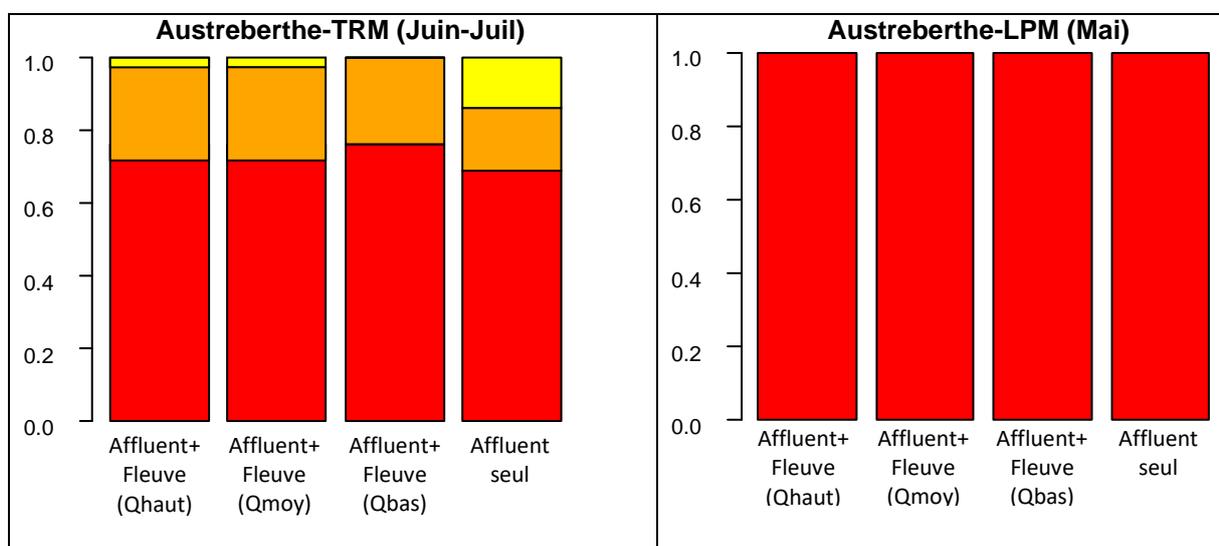


Figure 41 : Situation actuelle d'accès aux frayères potentielles sur l'Austreberthe

Actuellement, les frayères de LPM sont inaccessibles sur l'Austreberthe (Figure 41). En effet, l'ouvrage ROE115324 situé à moins de 100 m de l'embouchure avec l'estuaire est infranchissable pour cette espèce, ce qui pourrait expliquer l'absence de LPM sur le bassin de l'Austreberthe.

Pour la TRM, 31% des frayères sont accessibles mais leur accès reste partiel et susceptible d'être retardé de par la présence de deux seuils au niveau du point de la RD982 à l'embouchure avec la Seine, qui déconnectent le cours d'eau du fleuve à marée basse et d'une série de petits seuils à franchir. 69% des frayères potentielles restent inaccessibles en amont du seuil du Paulu à environ 7km en amont de l'embouchure avec l'estuaire, ce seuil marque d'ailleurs le front de colonisation actuel de la TRM (Figure 9).

- *La prise en compte des conditions dans l'estuaire modifie-t-elle l'accessibilité aux frayères ?*



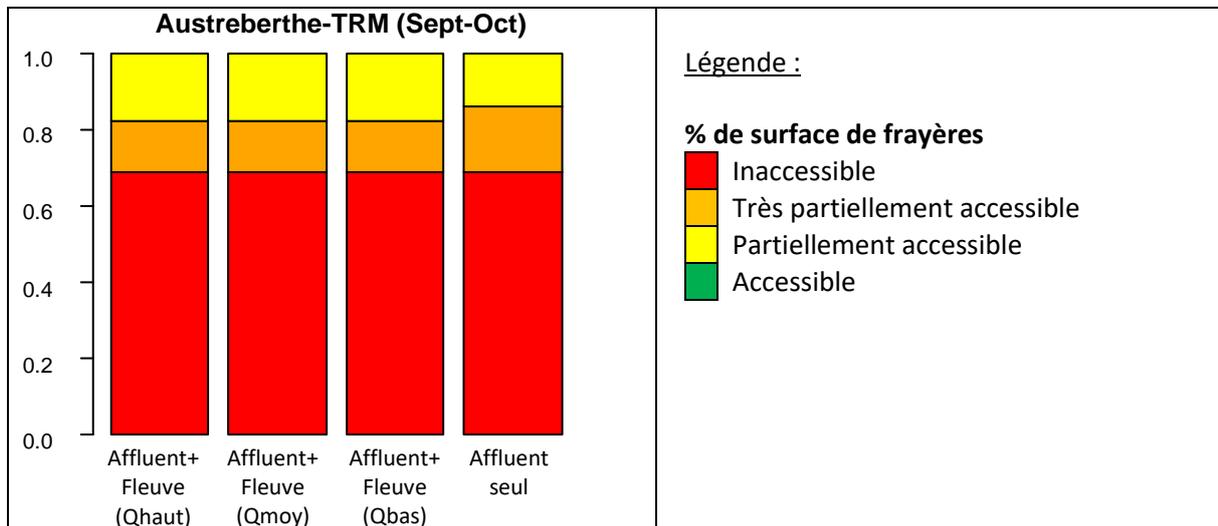


Figure 42 : Effet des conditions dans l'estuaire sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Austreberthe

La prise en compte du coût de traversée de l'estuaire dans la modélisation modifie l'accessibilité des frayères potentielles dans l'Austreberthe pour TRM (Figure 42). En Juin-Juillet, la proportion de frayères partiellement accessibles devient très partiellement accessibles et la proportion de frayères inaccessibles passe de 69% à 75%. Cette réduction d'accessibilité est liée aux conditions de températures contraignantes mises en évidence à cette période de l'année (Figure 38). Pour la période migratoire de septembre à octobre, la prise en compte des conditions dans l'estuaire est plus favorable. On constate même une amélioration de l'accessibilité liée à la prise en compte du flot, facilitant la remontée dans l'estuaire. Pour les deux périodes de migration, on ne constate pas d'effet des cas hydrologiques. Pour LPM, la prise en compte du coût de traversée de l'estuaire ne modifie pas les conditions d'accès aux frayères.

- *Comment les scénarios de restauration de la continuité écologique influencent-ils l'accessibilité aux frayères ? Quel est le gain de surface de frayères accessibles en fonction des scénarios ?*

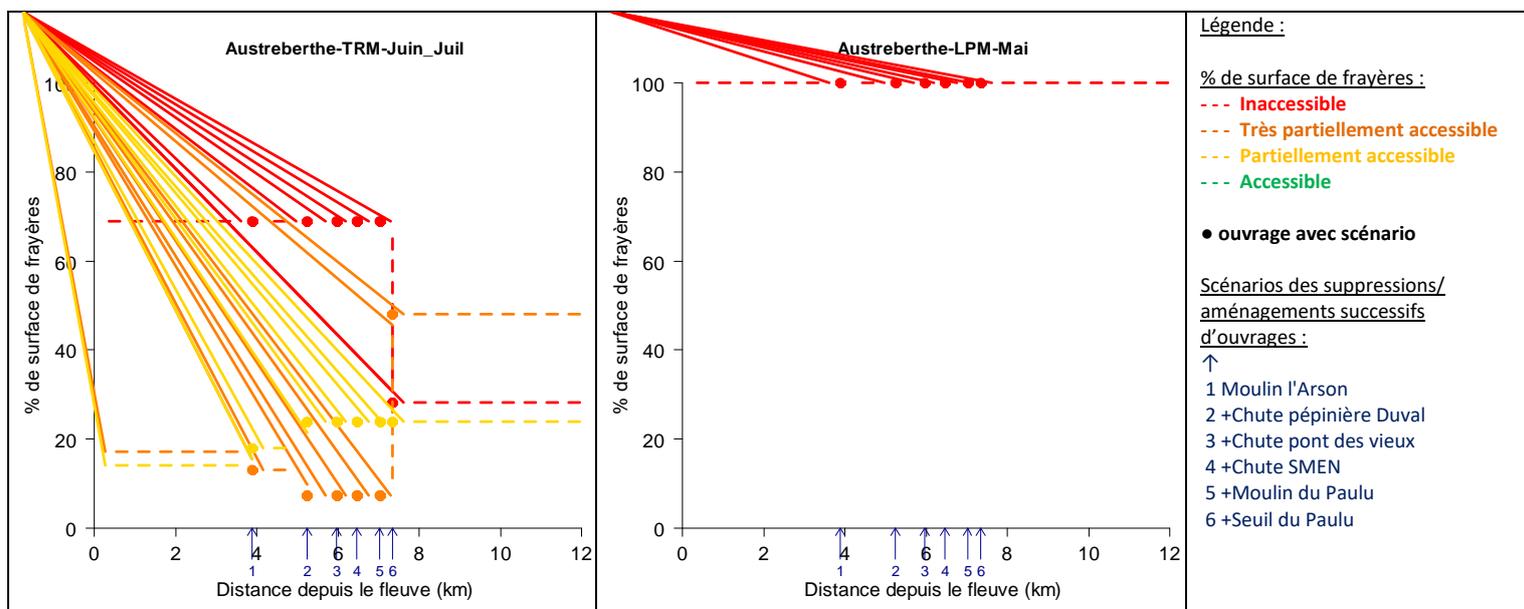


Figure 43 : Effet des scénarios de restauration sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Austreberthe

La Figure 43 montre l'évolution du % de surface de frayères accessibles pour les 4 classes d'accès en fonction de la distance depuis le fleuve et des scénarios de suppressions/d'aménagements successifs d'ouvrages. En complément, la Figure 44 permet de visualiser sur une carte la localisation des ouvrages

avec scénarios ainsi que les gains (en %) d'accessibilité aux frayères en fonction des classes d'accessibilité.

L'effacement successif de l'ouvrage du Moulin l'Arson (1) puis de la chute de la pépinière Duval (2) (à ≈4km et ≈5km de l'embouchure) permet un gain respectif de +4% et +6% de frayères accessibles. L'accès à ces frayères sont toujours potentiellement retardé par les 2 premiers ouvrages au niveau de l'embouchure. Ensuite, l'effacement successif de la chute du pont des vieux (3), de la chute Smen (4) et de l'ouvrage du moulin du Paulu (5) ne modifie pas les profils d'accessibilité aux frayères: certains ouvrages ne sont en effet pas bloquant pour TRM (chute pont des vieux et Smen) ou certains peuvent être contournés par un bras secondaire (décharge du Moulin du Paulu). Enfin, la suppression du seuil du Paulu (6) permet un gain d'accessibilité aux frayères amont de +41%, mais ces dernières restent très partiellement accessibles. Malgré la suppression successive de tous les ouvrages prioritaires (6), 28% des frayères potentielles restent toujours inaccessibles, 48% très partiellement accessibles et 24% accessibles partiellement.

Pour LPM, les scénarios d'effacement successifs ne modifient pas le profil d'accès aux frayères: 100% des frayères restent inaccessibles sur tout le linéaire de l'Austreberthe (Figure 43 et Figure 44).

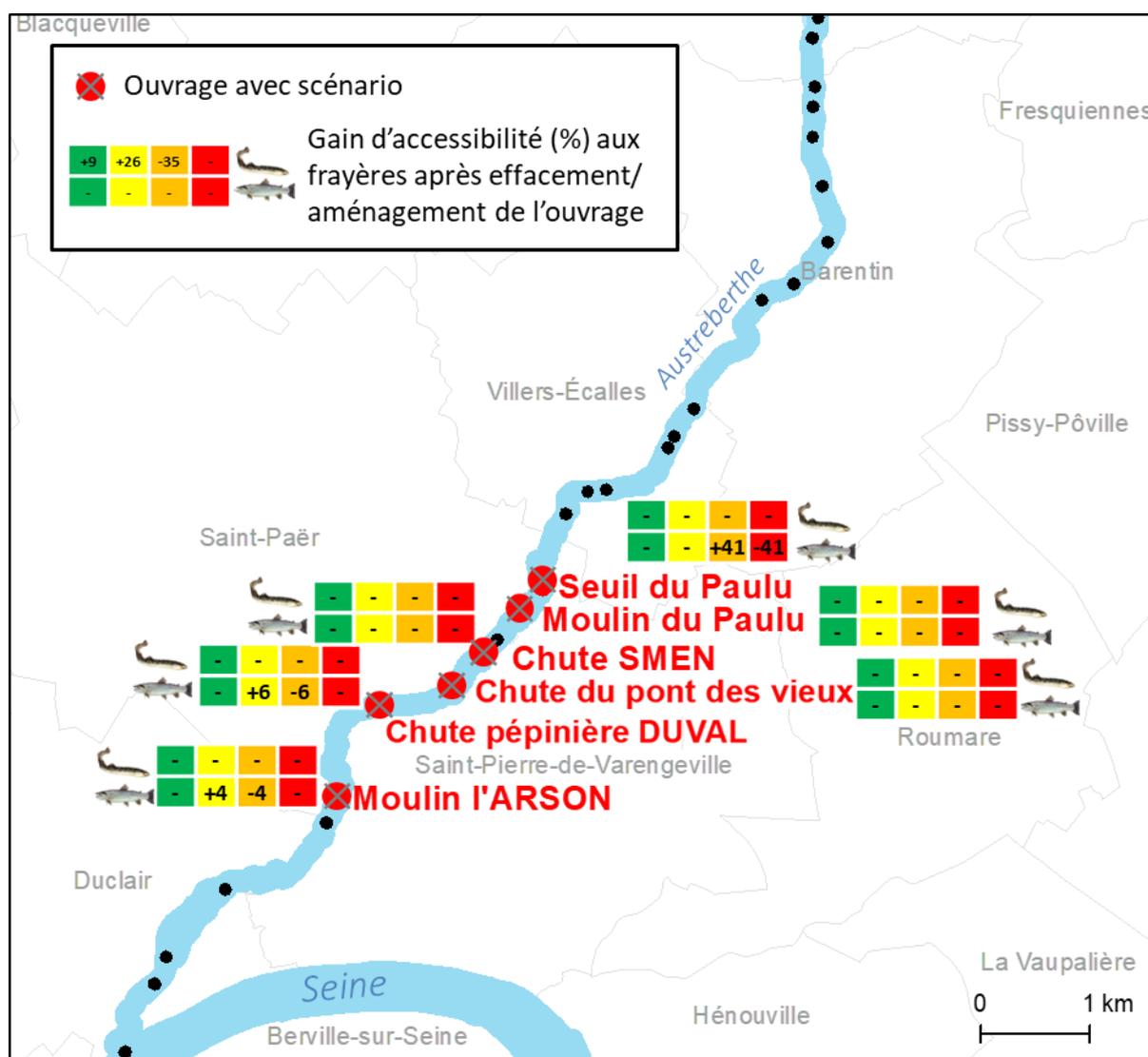
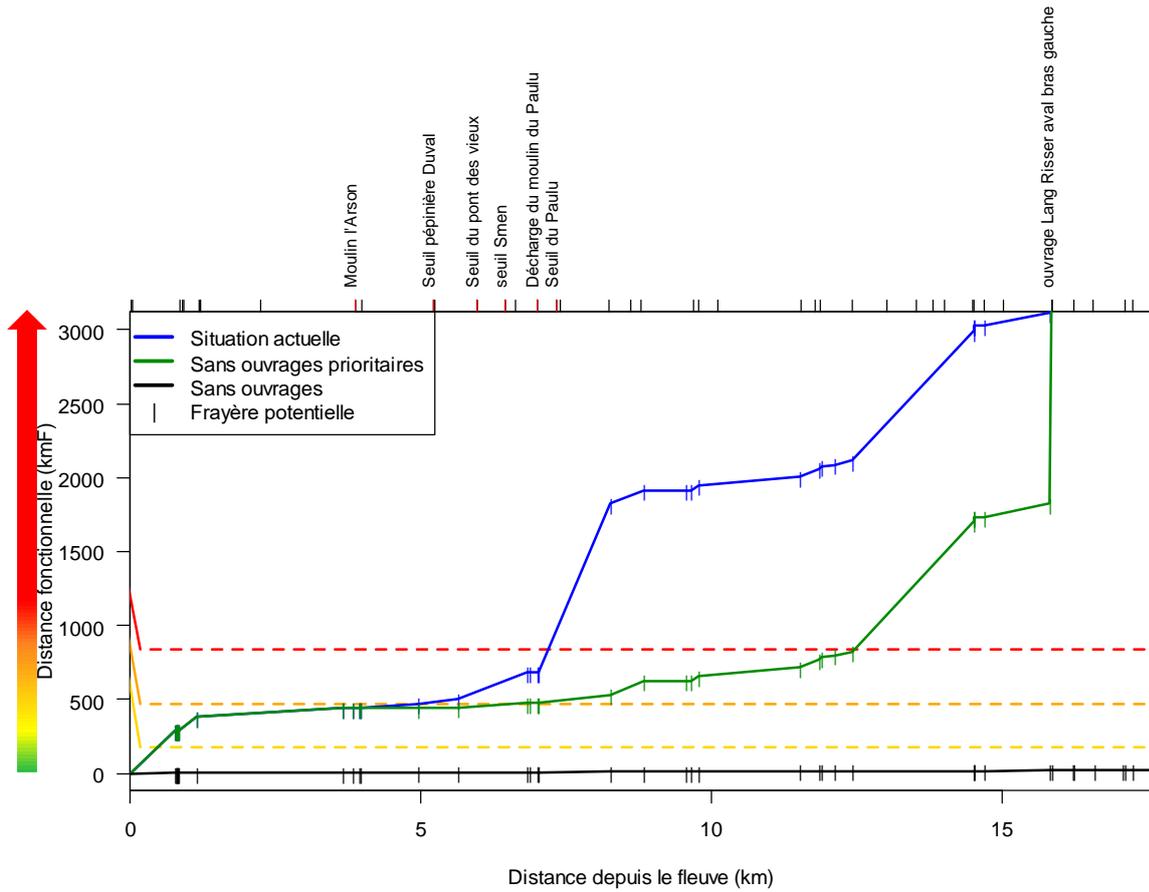


Figure 44 : Gain d'accessibilité (en %) aux surfaces de frayères potentielles sur l'Austreberthe en fonction des ouvrages avec scénarios

Note : Les couleurs vert, jaune, orange et rouge indiquent les classes d'accessibilité aux frayères

- *Comment le coût de la migration évolue-t-il le long du linéaire hydrographique ?*

Austreberthe - TRM



Austreberthe - LPM

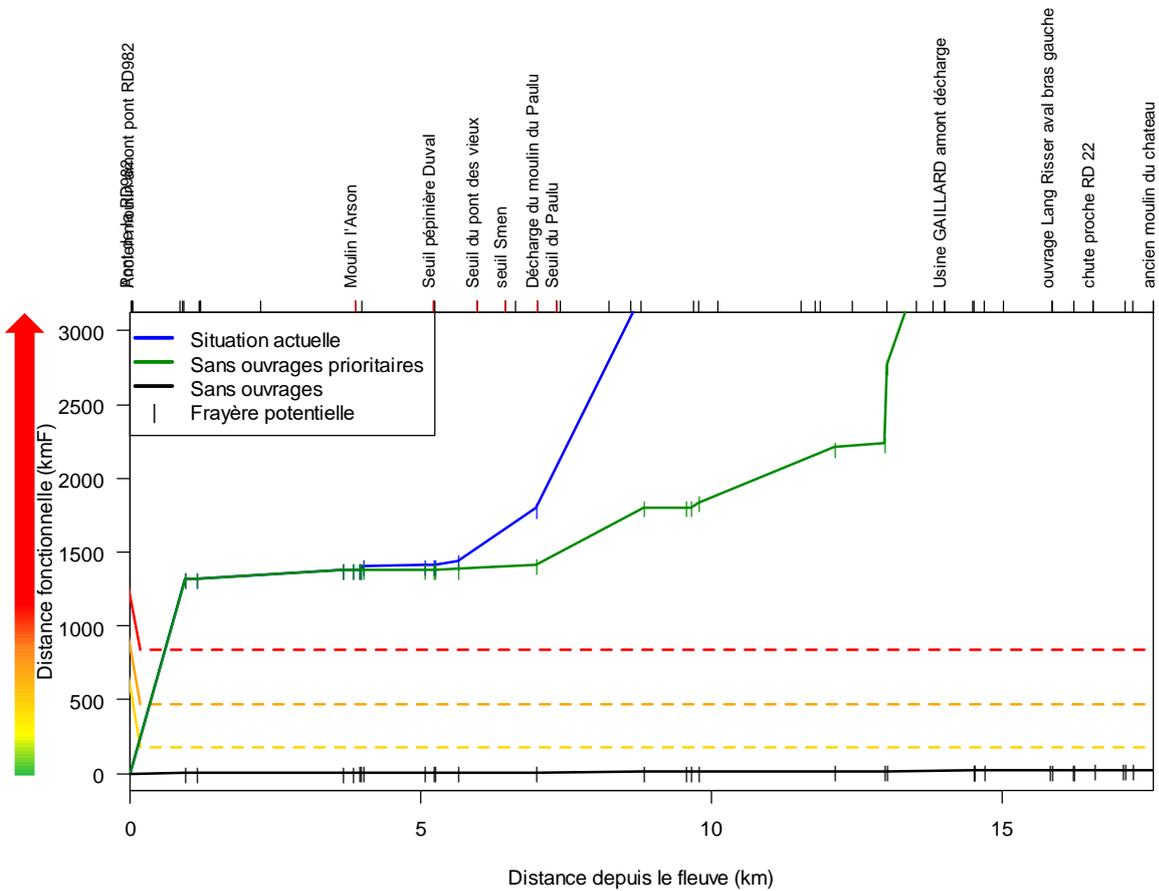


Figure 45: Evolution du coût de la migration (distance fonctionnelle) pour accéder aux frayères potentielles de LPM et TRM sur l'Austreberthe en fonction de la distance depuis le fleuve pour 3 cas : situation actuelle (en bleu), situation fictives sans les ouvrages prioritaires (en vert) et une situation fictive sans ouvrages.

Note: La position kilométrique des ouvrages bloquant et prioritaires (trait rouge) figure sur l'axe du haut. La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration. Les traitillés horizontaux indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

La Figure 45 représente l'évolution de la distance fonctionnelle, proxy du coût de la migration, pour accéder aux frayères potentielles en fonction de la distance depuis le fleuve. 3 cas y sont représentés : le coût de migration en situation actuelle (en bleu), après suppression/aménagement des ouvrages prioritaires (en vert) et sans ouvrage (en noir).

Pour TRM, la suppression des ouvrages prioritaires permet de réduire considérablement le coût de la migration, permettant l'accès à des frayères initialement inaccessibles. Cependant, ce profil de coût sans ouvrages prioritaires reste très éloigné du profil sans ouvrage et reste donc encore contraignant pour la migration. En effet, les deux premiers ouvrages au niveau du pont de la RD982 (≈100 m de l'embouchure) augmentent considérablement le coût de migration dès l'entrée dans l'affluent. De plus, la succession de nombreux petits ouvrages en amont du seuil du Paulu contribue à l'augmentation progressive du coût de la migration et enfin, l'ouvrage de Lang Risser (≈15 km) reste un point de blocage majeur sur l'Austreberthe.

Pour LPM, la suppression des ouvrages prioritaires permet de réduire le coût de la migration, mais sans que cela ne permettent l'accès aux frayères.

- *Existe-t-il d'autres obstacles qui pourraient compromettre l'accès aux frayères?*

Sur l'Austreberthe, l'Eure, l'Andelle et l'Epte les moyennes des paramètres physico-chimique pour les différentes périodes de migration **ne témoignent pas de pollutions chroniques** qui pourraient contraindre la migration des poissons (Exemple pour la période de migration de TRM - Figure 46).

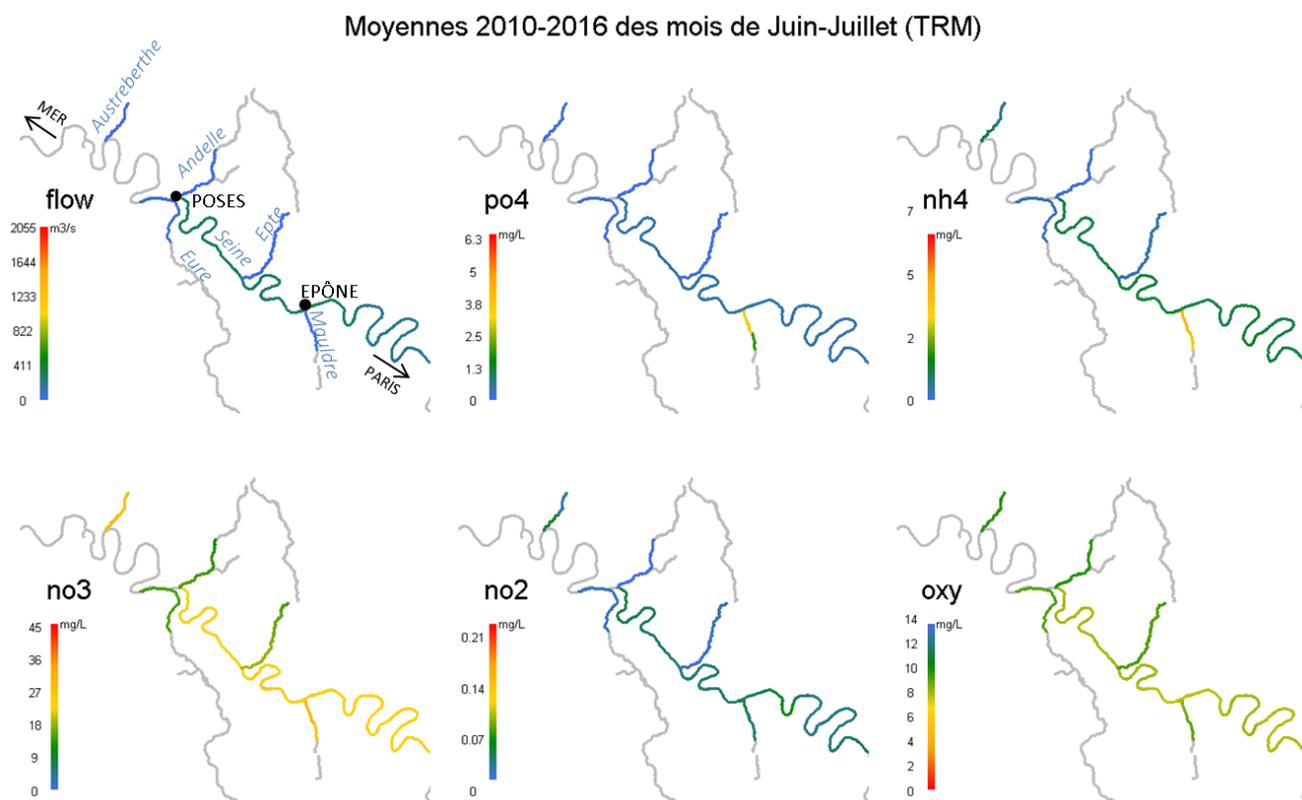


Figure 46: Moyennes des paramètres physico-chimiques issus des données modélisées par le modèle pyNuts-Riverstrahler sur 2010-2016 pour la période de migration Juin-Juillet (période de migration de la

truite de mer). Les linéaires en gris sont sans données. Les graphiques pour les autres périodes de migration sont en Annexe 5

11. Eure

- *Quelle est la situation actuelle d'accès aux frayères potentielles ? Quelles sont les principaux obstacles qui contraignent l'accès aux frayères ?*

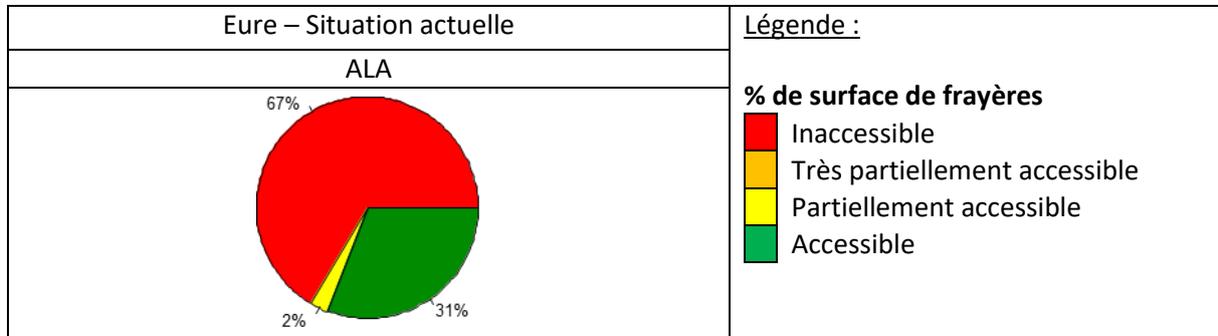


Figure 47 : Situation actuelle d'accès aux frayères potentielles sur l'Eure

Actuellement, 33% des frayères de ALA sont accessibles sur l'Eure, dont 2% avec partiellement accessible (Figure 47) et 67% des frayères sont inaccessible. En effet, la chute du moulin de Flicaux (ROE18489), situé à environ 40 km de l'embouchure avec l'estuaire, est infranchissable pour cette espèce et empêche l'accès aux frayères potentielles en amont.

- *La prise en compte des conditions dans l'estuaire modifie-t-elle l'accessibilité aux frayères ?*

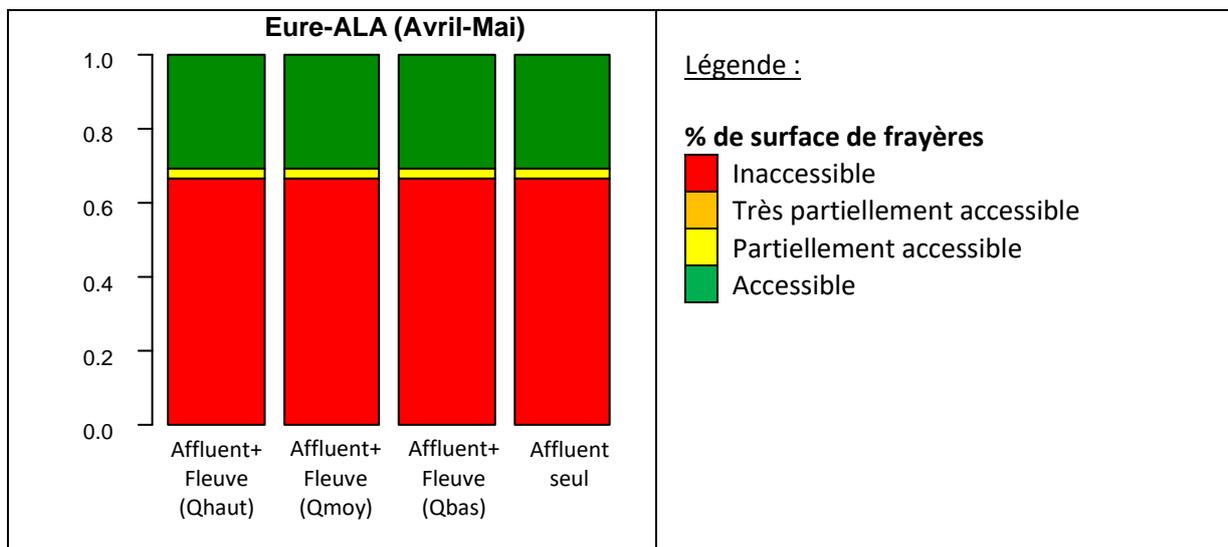


Figure 48 : Effet des conditions dans l'estuaire sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Eure

La prise en compte du coût de traversée de l'estuaire ne modifie pas les conditions d'accès aux frayères potentielles d'ALA sur l'Eure (Figure 48). L'estuaire ne constitue donc pas un milieu contraignant à traverser pour ALA pendant sa période de migration.

- *Comment les scénarios de restauration de la continuité écologique influencent-ils l'accessibilité aux frayères ? Quel est le gain de surface de frayères accessibles en fonction des scénarios ?*

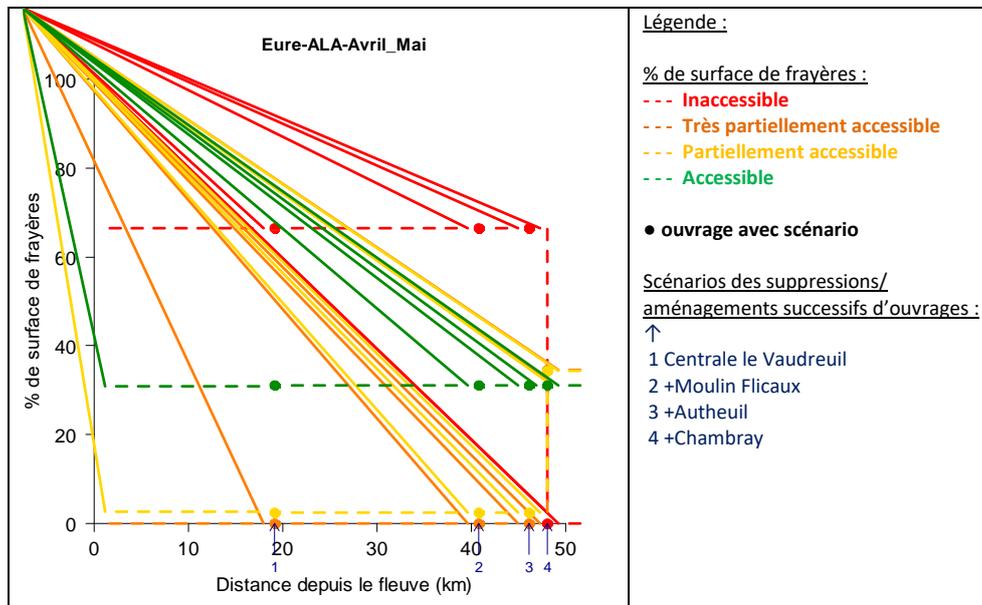


Figure 49 : Effet des scénarios de restauration sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Austreberthe

La Figure 49 montre l'évolution du % de surface de frayères accessibles pour les 4 classes d'accès en fonction de la distance depuis le fleuve et des scénarios de suppressions/d'aménagements successifs d'ouvrages. En complément, la Figure 50 permet de visualiser sur une carte la localisation des ouvrages avec scénarios ainsi que les gains (en %) d'accessibilité aux frayères en fonction des classes d'accessibilité.

L'effacement successif de l'ouvrage de la centrale le Vaudreuil (1) puis de la chute du moulin de Flicaux (2) et du seuil du moulin d'Autheuil (3) ne modifie pas les profils d'accessibilité aux frayères car aucune frayère potentielle n'a été identifiée. La suppression du clapet de dérivation du moulin du château de Chambray (4) permet un gain d'accessibilité aux frayères amont de +67% dont 32% accessibles partiellement et 35% très partiellement accessibles. Grâce à la suppression successive de tous les ouvrages prioritaires (4), 100% des frayères potentielles d'ALA sont accessibles ; cependant 35% restent très partiellement et 34% partiellement accessibles.

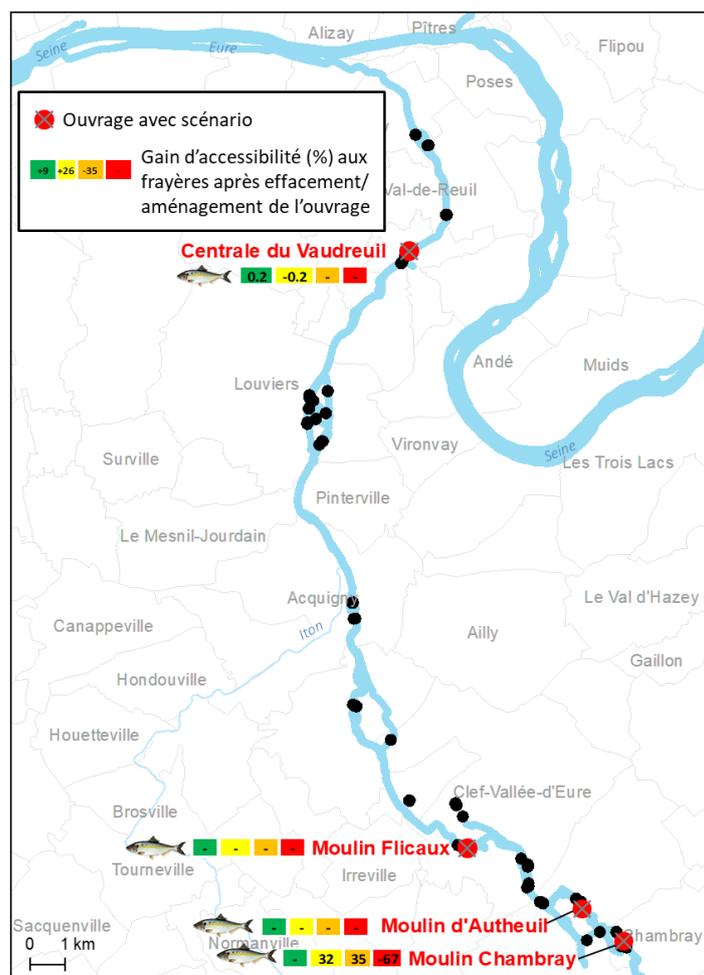


Figure 50 : Gain d'accessibilité (en %) aux surfaces de frayères potentielles sur l'Eure en fonction des ouvrages avec scénarios

Note : Les couleurs vert, jaune, orange et rouge indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

- *Comment le coût de la migration évolue-t-il le long du linéaire hydrographique ?*

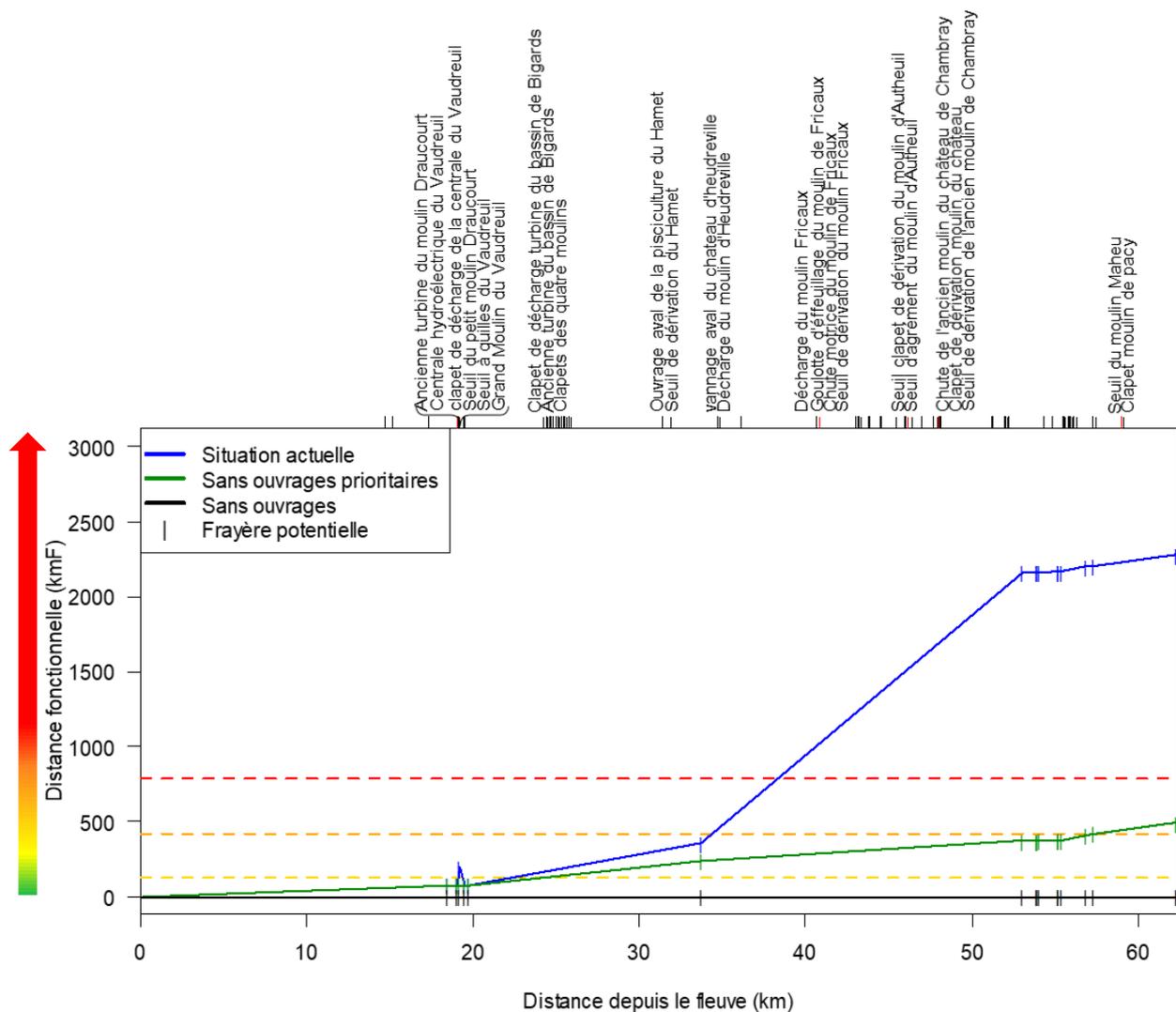


Figure 51: Evolution du coût de migration (distance fonctionnelle) pour accéder aux frayères potentielles LPM et TRM sur l'Eure en fonction de la distance depuis le fleuve pour 3 cas : situation actuelle (en bleu), situation fictive sans les ouvrages prioritaires (en vert) et une situation fictive sans ouvrages.

Note: La position kilométrique des ouvrages bloquant et prioritaires (trait rouge) figure sur l'axe du haut. La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration. Les traitillés horizontaux indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

La Figure 51 représente l'évolution de la distance fonctionnelle, proxy du coût de la migration, pour accéder aux frayères potentielles en fonction de la distance depuis le fleuve. 3 cas y sont représentés : le coût de migration en situation actuelle (en bleu), après suppression/aménagement des ouvrages prioritaires (en vert) et sans ouvrage (en noir).

Pour ALA, la suppression des ouvrages prioritaires permet de réduire considérablement le coût de la migration, permettant l'accès à des frayères initialement inaccessibles. Ce profil de coût sans ouvrages prioritaires ne témoigne plus de la présence d'ouvrage bloquant et se rapproche du profil sans ouvrage. Cependant, la migration reste contraignant à partir du kilomètre 50. En effet, la forte densité d'ouvrages (même franchissables) contribue à l'augmentation progressive du coût de la migration.

- *Existe-t-il d'autres obstacles qui pourraient contraindre l'accès aux frayères?*

Sur l'Eure, les moyennes des paramètres physico-chimique pour la période de migration d'ALA (Avril-Mai) **ne témoignent pas de pollutions chroniques** qui pourraient contraindre la migration des poissons.

12.Andelle

- *Quelle est la situation actuelle d'accès aux frayères potentielles ? Quelles sont les principaux obstacles qui contraignent l'accès aux frayères ?*

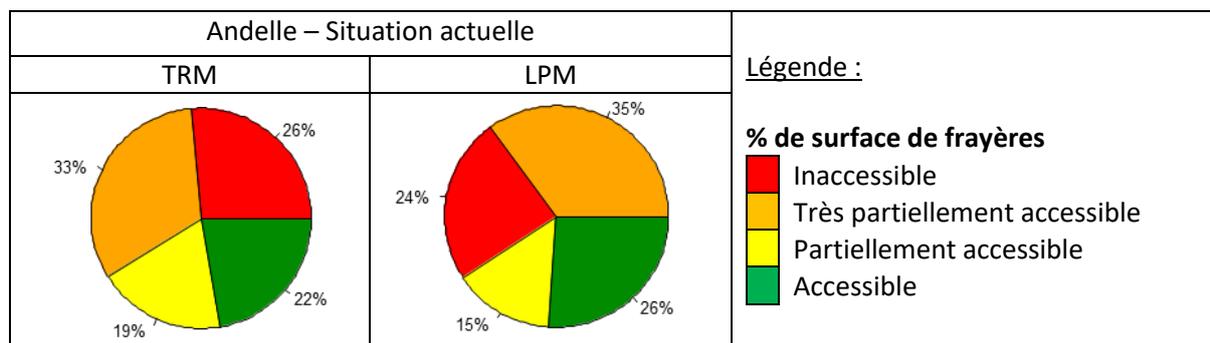
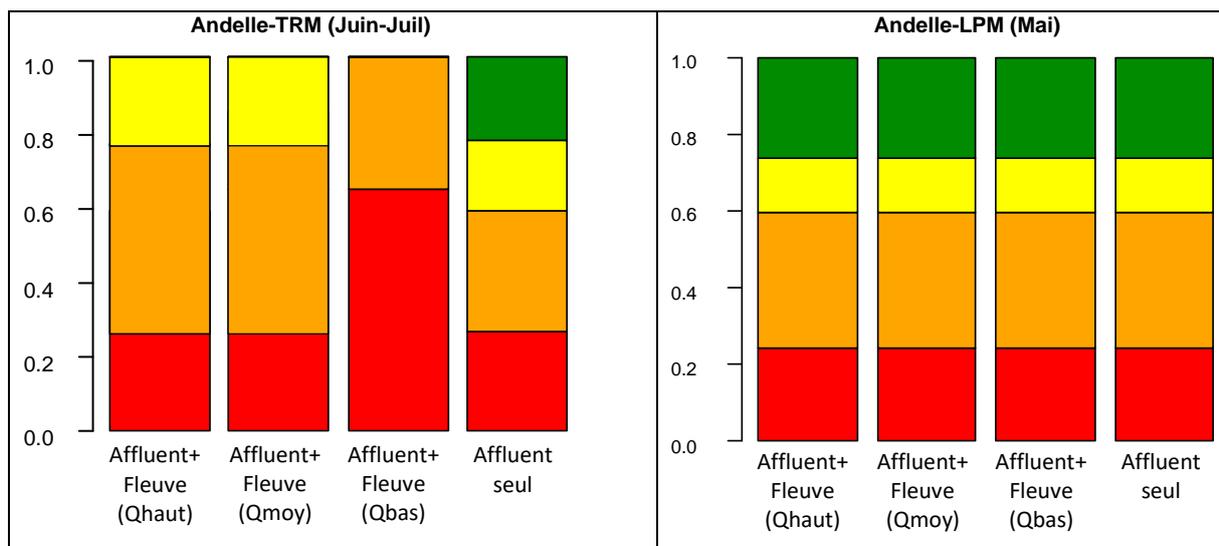


Figure 52 : Situation actuelle d'accès aux frayères potentielles sur l'Andelle

D'après la Figure 52, actuellement, 74% et 76 % des frayères potentielles sont accessibles pour TRM et LPM respectivement, dont 33% (TRM) et 35% (LPM) très partiellement accessibles et 19% (TRM) et 15% (LPM) partiellement accessibles; 26% (TRM) et 24% (LPM) des frayères potentielles sont inaccessibles car le seuil de dérivation de l'usine Linandelle est infranchissable pour les deux espèces.

- *La prise en compte des conditions dans l'estuaire modifie-t-elle l'accessibilité aux frayères ?*



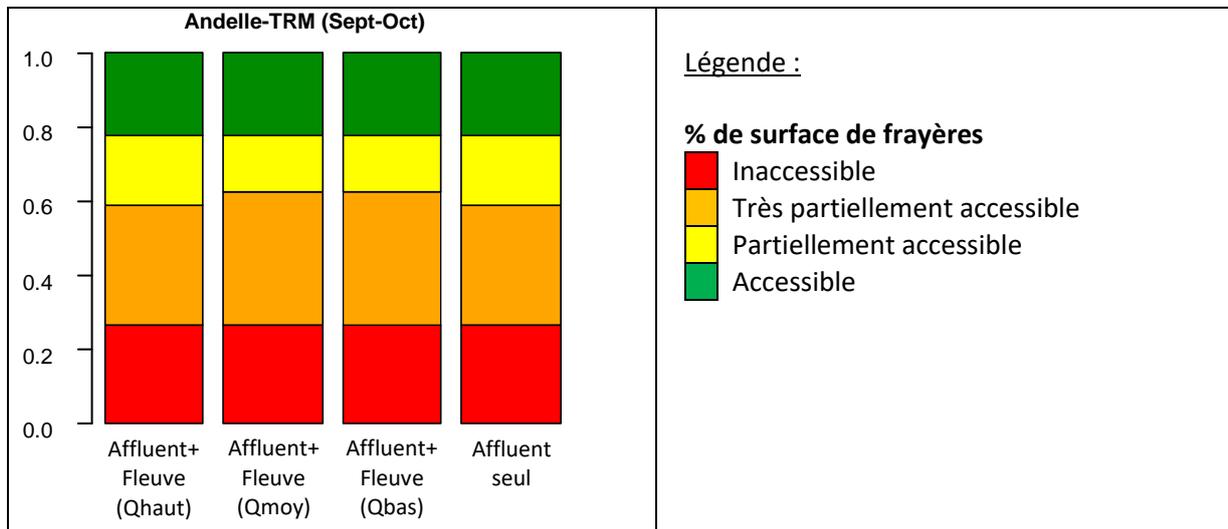


Figure 53 : Effet des conditions dans l'estuaire sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Andelle

La prise en compte du coût de traversée de l'estuaire dans la modélisation modifie l'accessibilité des frayères potentielles dans l'Andelle pour TRM (Figure 53). En Juin-Juillet, la proportion de frayères partiellement accessibles devient très partiellement accessibles et la proportion de frayères inaccessibles passe de 69% à 75%. Cette réduction d'accessibilité est liée aux conditions de températures contraignantes mises en évidence à cette période de l'année (Figure 38). Pour la période migratoire de septembre à octobre de TRM et pour la période migratoire de LPM en mai, la prise en compte des conditions dans l'estuaire ne modifie pas les conditions d'accès aux frayères.

- *Comment les scénarios de restauration de la continuité écologique influencent-ils l'accessibilité aux frayères ? Quel est le gain de surface de frayères accessibles en fonction des scénarios ?*

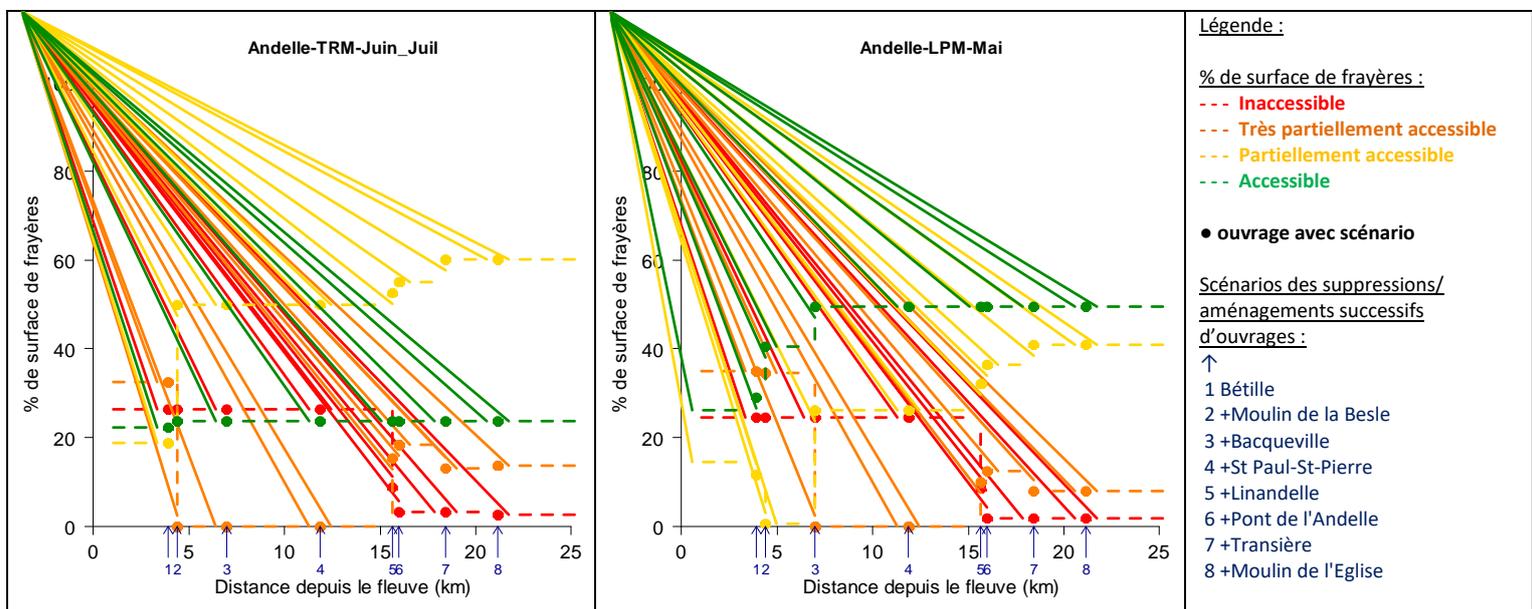


Figure 54 : Effet des scénarios de restauration sur l'accès aux frayères potentielles sur l'Andelle

La Figure 54 montre l'évolution du % de surface de frayères accessibles pour les 4 classes d'accès en fonction de la distance depuis le fleuve et des scénarios de suppressions/d'aménagements successifs d'ouvrages d'aval en amont. En complément, la Figure 55Figure 50 permet de visualiser sur une carte la localisation des ouvrages avec scénarios ainsi que les gains (en %) d'accessibilité aux frayères en fonction des classes d'accessibilité.

L'effacement successif du seuil du moulin de Bétillé (1), de l'ouvrage de décharge du Moulin de la Besle (2) et du seuil de Bacqueville (5) permet un gain d'accès aux frayères de + 50% (dont 26% partiellement accessibles) pour LPM et de + 32% (dont 31% partiellement accessibles) pour TRM. L'effacement du moulin de Saint Paul (4) ne modifie pas le profil d'accès aux frayères car aucune frayère potentielle de LPM et TRM n'a été identifiée entre cet ouvrage et le prochain en amont (complexe de Linandelle). L'effacement successif du seuil de l'usine de Linandelle (5), du seuil du pont de l'Andelle (6), du seuil de décharge de l'usine de Transières (7) et du moulin de l'Eglise (8) permet un gain de +28% d'accès aux frayères de LPM (dont 18% qui restent très partiellement accessibles) et de +30% pour TRM (dont 19% très partiellement accessibles). Grâce à la suppression successive de tous les ouvrages prioritaires (8), 98% des frayères potentielles de TRM sont accessibles (dont 60% partiellement accessibles et 14% très partiellement accessibles) ; 2% des frayères potentielles identifiées sur le secteur restent inaccessibles car le seuil de décharge du moulin de Perruel reste un obstacle bloquant.

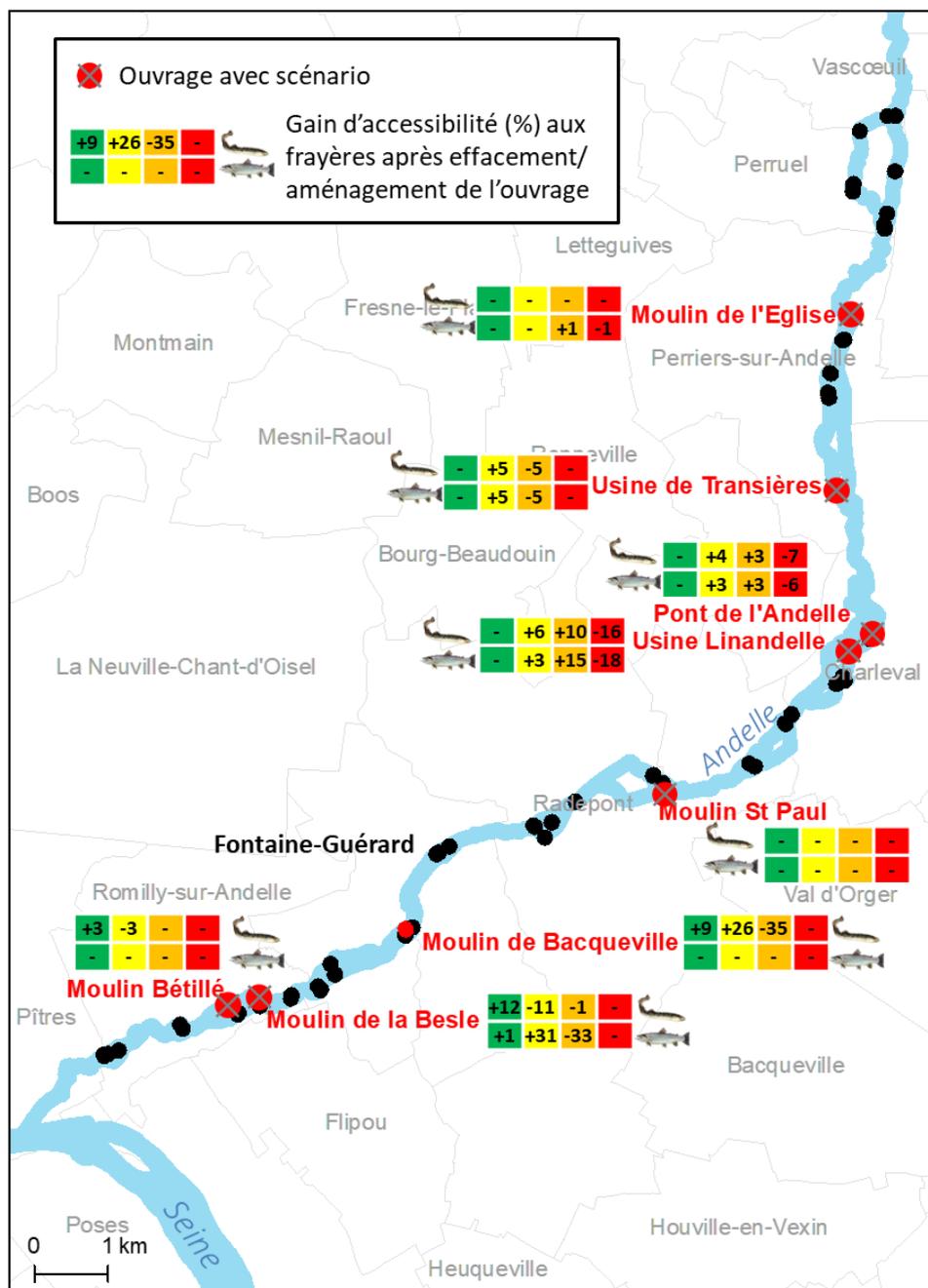
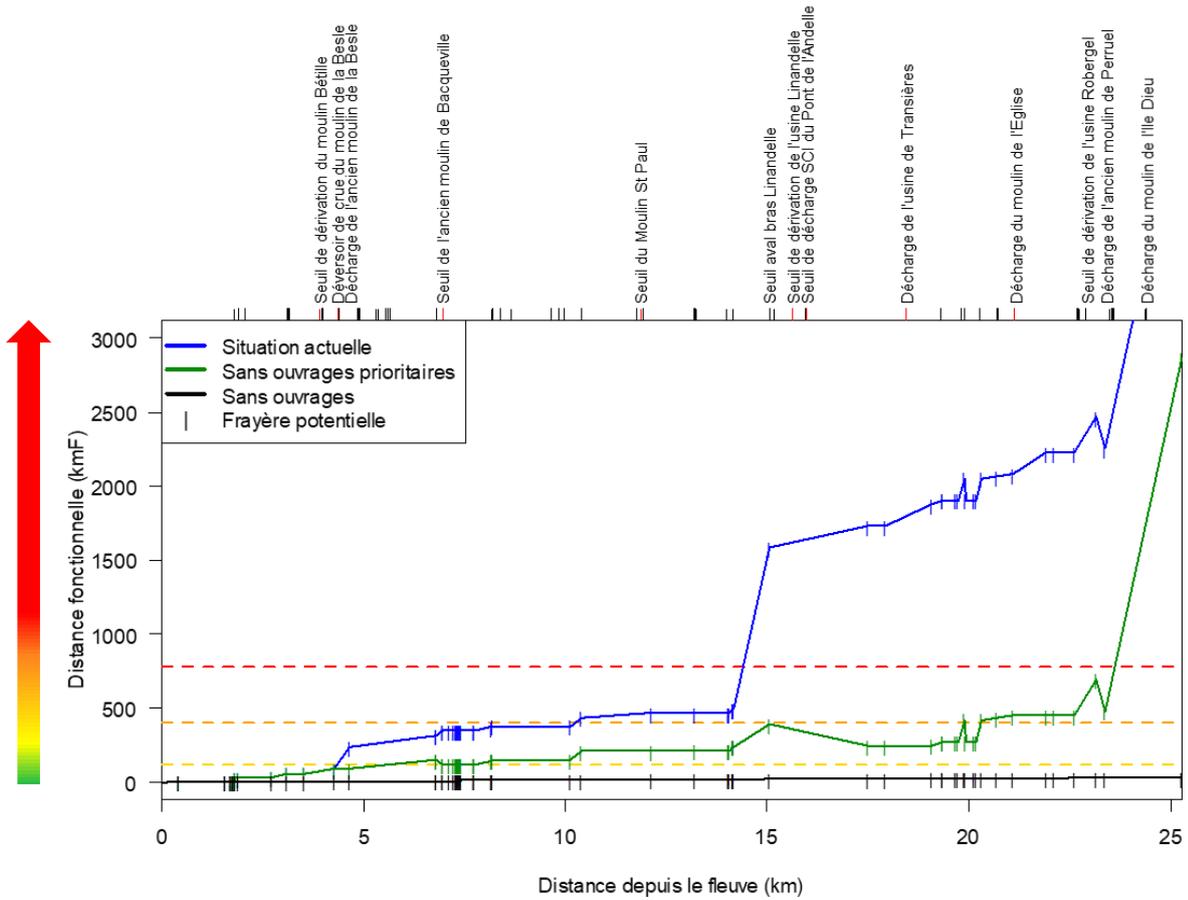


Figure 55 : Gain d'accessibilité (en %) aux surfaces de frayères potentielles sur l'Andelle en fonction des ouvrages avec scénarios

Note : Les couleurs vert, jaune, orange et rouge indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

- Comment le coût de la migration évolue-t-il le long du linéaire hydrographique ?



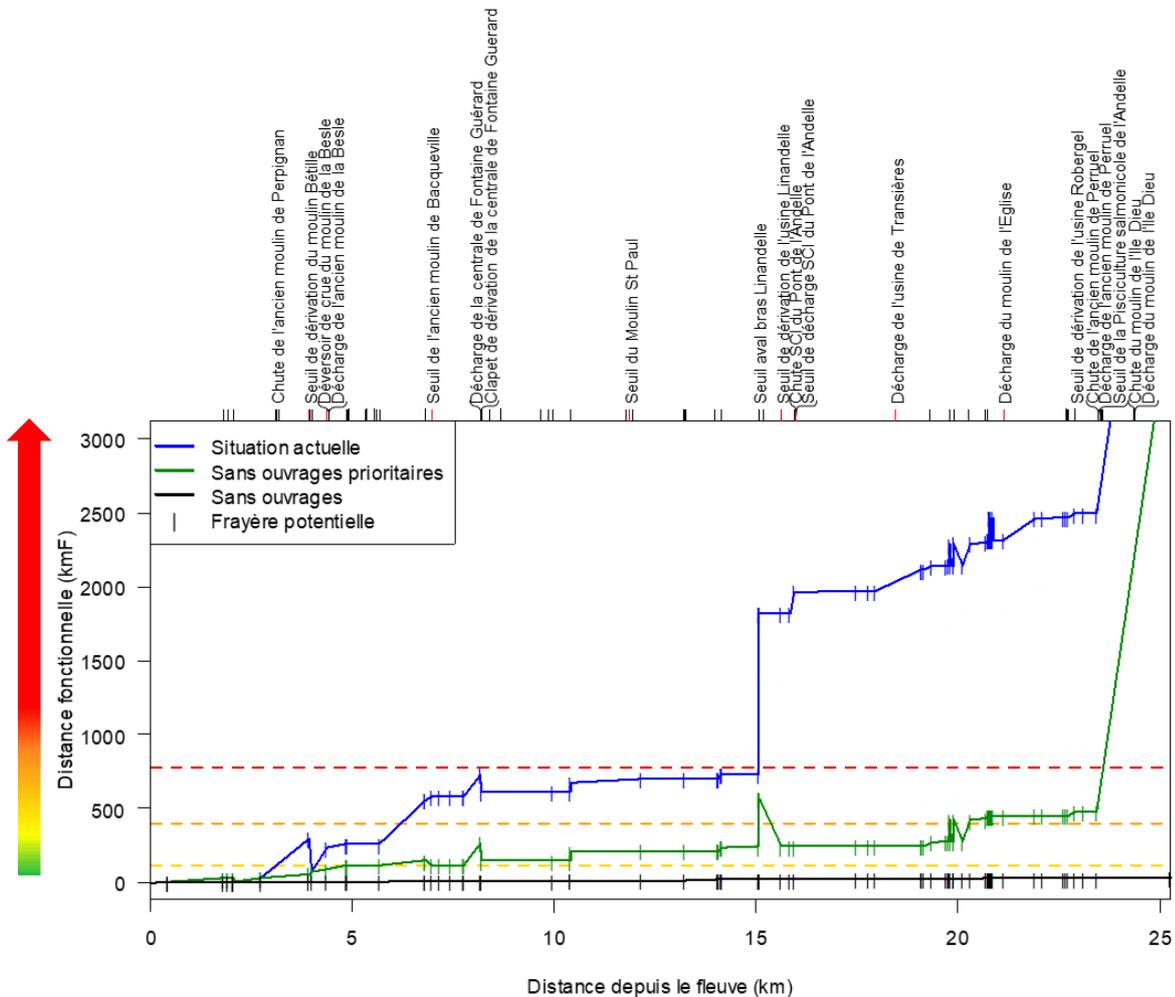


Figure 56: Evolution du coût de migration (distance fonctionnelle) pour accéder aux frayères potentielles LPM et TRM sur l'Andelle en fonction de la distance depuis le fleuve pour 3 cas : situation actuelle (en bleu), situation fictives sans les ouvrages prioritaires (en vert) et une situation fictive sans ouvrages.

Note: La position kilométrique des ouvrages bloquants et prioritaires (trait rouge) figure sur l'axe du haut. La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration. Les traitillés horizontaux indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

La Figure 56Figure 45 représente l'évolution de la distance fonctionnelle, proxy du coût de la migration, pour accéder aux frayères potentielles en fonction de la distance depuis le fleuve. 3 cas y sont représentés : le coût de migration en situation actuelle (en bleu), après suppression/aménagement des ouvrages prioritaires (en vert) et sans ouvrage (en noir).

Les profils d'évolution du coût de la migration sont assez similaires pour LPM et TRM. La suppression des ouvrages prioritaires permet de réduire considérablement le coût de la migration, permettant l'accès à des frayères initialement inaccessibles, notamment en amont de l'ouvrage de Linandelle (vers le kilomètre 15). Cependant, ce profil de coût réaugmente vers le kilomètre 20, ce secteur reste donc encore fortement contraignant pour la migration et devient inaccessibles en amont de l'ouvrage de Perruel vers le kilomètre 24.

- *Existe-t-il d'autres obstacles qui pourraient contraindre l'accès aux frayères?*

Sur l'Andelle, les moyennes des paramètres physico-chimique pour les périodes de migration respectives de TRM et LPM **ne témoignent pas de pollutions chroniques** qui pourraient contraindre la migration des poissons.

13.Seine

- *Y a-t-il des différences de coût de la migration pour traverser la Seine entre les espèces? Si oui, quelle(s) espèce(s) présente(nt) les coûts de migration les plus importants ?*
- *Y a-t-il une influence des périodes de migration sur le coût de la migration pour traverser l'estuaire? Si oui, quelle période est la plus coûteuse ?*

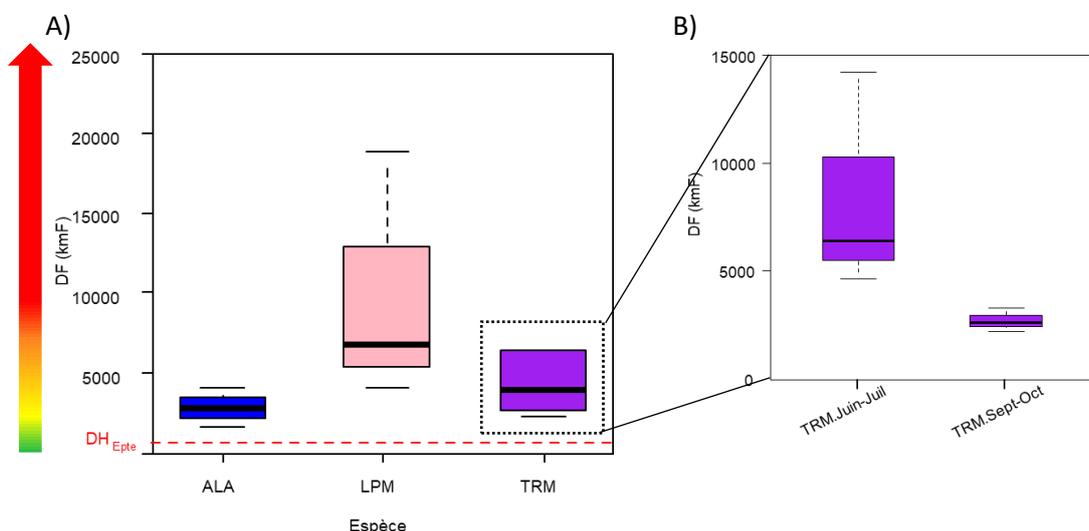


Figure 57: Distribution des distances fonctionnelles (DF) pour parcourir la Seine de Poses à Limetz (confluence avec l'Epte) en fonction A) des espèces et B) des périodes de migration de TRM.

Note: La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration ; Juin-Juillet: migration TRM (1^{ère} vague); Sept-Oct: migration TRM (2^{ème} vague). La distance hydrographique (DH) pour rejoindre l'Epte depuis Poses est donnée à titre comparatif.

D'après la Figure 57 (A), on constate que quel que soit l'espèce considérée le coût pour traverser la Seine de Poses à Limetz est en moyenne 30 à 100 fois supérieur à la DH, ce qui révèle la présence de contraintes fortes dans le fleuve. Ce coût varie néanmoins entre les espèces: LPM a une DF moyenne 3 fois supérieure à celle d'ALA et 1.5 fois supérieure à la DF moyenne de TRM. Le coût varie également entre les périodes de migration de TRM: le coût de migration est 3 fois plus élevé lors de la première vague migratoire de Juin à Juillet que lors de la deuxième en automne. **La migration de LPM en Mai et la migration de TRM de Juin à Juillet semblent plus coûteuses que celles d'ALA en Avril-Mai et celle de TRM en automne.**

- *Y a-t-il une influence des cas hydrologiques sur le coût de la migration pour traverser la Seine ? Si oui, quel cas hydrologique est le plus coûteux ?*

La comparaison des distances fonctionnelles entre cas hydrologiques ne montre pas de corrélation particulière des débits bas/haut sur la distance fonctionnelle. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que nous n'avons considéré qu'une seule année par cas hydrologique. Ainsi, les résultats traduisent d'avantage une variabilité interannuelle de coût de migration, qu'un effet des bas/hauts débits sur le coût de la migration.

- *Quels sont les éléments du paysage qui expliquent ces coûts de migration ?*

L'exploitation des données a montré que:

- **L'oxygène dissous** reste en moyenne supérieur à 6 mg/L (seuil pour les salmonidés) pour les différentes périodes migration. Toutefois, ponctuellement, la concentration passe sous le seuil de tolérance des salmonidés et peuvent chuter à 4 mg (O₂)/L. En 2011, les valeurs d'oxygène étaient inférieures à 6 mg (O₂)/L dans plus de 70% du temps en amont du barrage de Poses,

dans plus de 50% du temps en amont du barrage de Notre Dame de la Garenne/Port-Mort et dans 30% du temps en amont du barrage de Méricourt (Figure 58 A).

- la **température médianes de l'eau en juin-juillet** (période de migration des salmonidés) à Poses est de 21,5°C (données Naiades 2008-2010), seuil de bon état pour les salmonidés, avec des températures qui peuvent ponctuellement atteindre 25°C (seuil léthal). En 2007, sur la Seine, les températures dépassaient les 20°C dans 30 à 60% du temps entre juin et juillet (Figure 58 B).

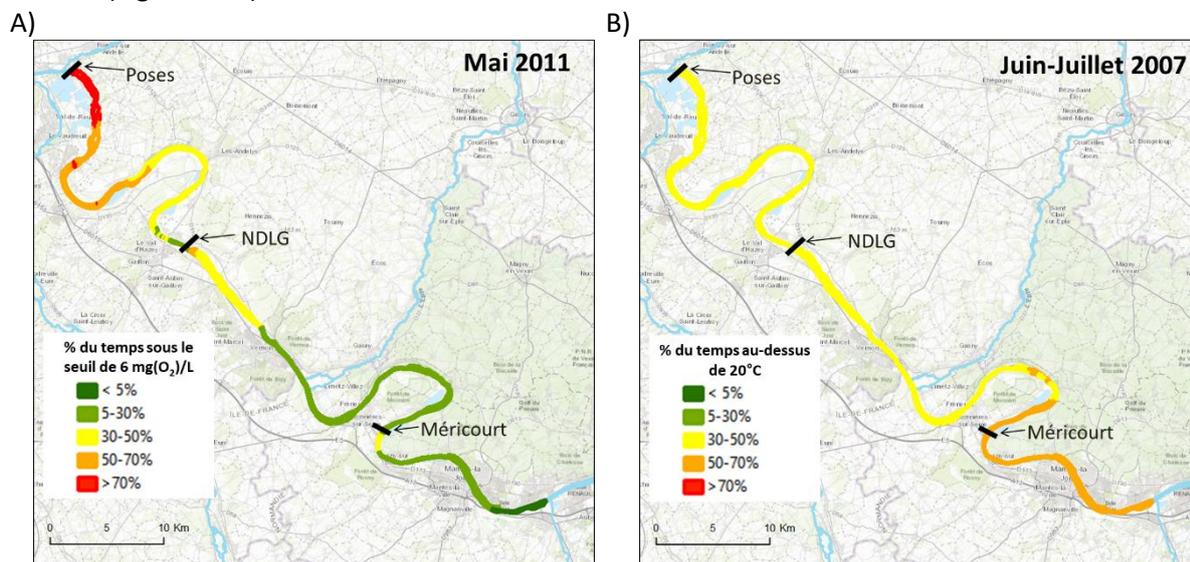


Figure 58: Pourcentage du temps sous le seuil de 6 mg(O₂)/L en Mai 2011 (A) et au-dessus de 20°C en Juin-Juillet 2007 (B). Données: PROSE-PA (Wang et al., 2022)

- **les concentrations en nitrites (NO₂⁻)** dépassent systématiquement le seuil de bon état (0.3 mg (NO₂⁻)/L) pour les différentes périodes migration et peuvent atteindre des valeurs de 1 mg (NO₂⁻)/L (données Prose-PA). A l'inverse, pour cette période, les données Pynuts-RIVERSTRAHLER témoignent de valeurs moyennes inférieures à 0.1 mg (NO₂⁻)/L.
- Les autres paramètres étudiés (NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄²⁻) ne semblent pas, en moyenne, présenter de problème pour la migration avec des valeurs moyennes sous le seuil de bon état (données Naiades). Remarque : les données Pynuts-RIVERSTRAHLER, qui n'ont finalement pas été intégrées dans la modélisation, témoignent de valeurs moyennes bien plus élevées (Figure 46).

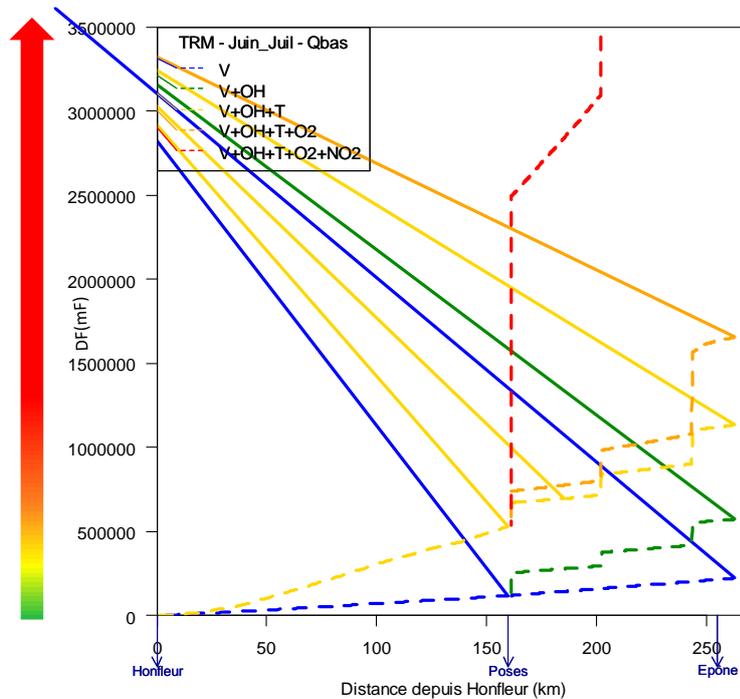


Figure 59 : Evolution du coût de migration (distance fonctionnelle) entre Honfleur (dans l'estuaire) et Epône (sur la Seine) en fonction des variables du milieu. Ce graphique permet ainsi de voir la contribution de chaque variable dans le coût de la migration sur l'axe estuaire-Seine pour l'espèce TRM pour la période de migration de Juin à Juillet dans un cas de bas débit.

La Figure 59 permet de voir la contribution de chaque variable dans le coût de la migration sur l'axe estuaire-Seine pour l'espèce TRM pour la période de migration de Juin à Juin dans un cas de bas débit. On constate donc que 1) les ouvrages physiques (OH) contribue a augmenté ponctuellement le coût de la migration dans la Seine (- - -). **Au coût des ouvrages physiques s'ajoute le coût des conditions physico-chimiques défavorables.** En effet, même ponctuellement, des températures de l'eau supérieures à 20°C (- - -), des valeurs d'oxygène dissous inférieures à 6 mg/L (- - -) et des concentrations en nitrites supérieures à 0.3 mg (NO₂)/L (- - -) augmentent progressivement et considérablement le coût de la migration.

14.Epte

- *Quelle est la situation actuelle d'accès aux frayères potentielles? Quelles sont les principaux obstacles qui contraignent l'accès aux frayères ?*

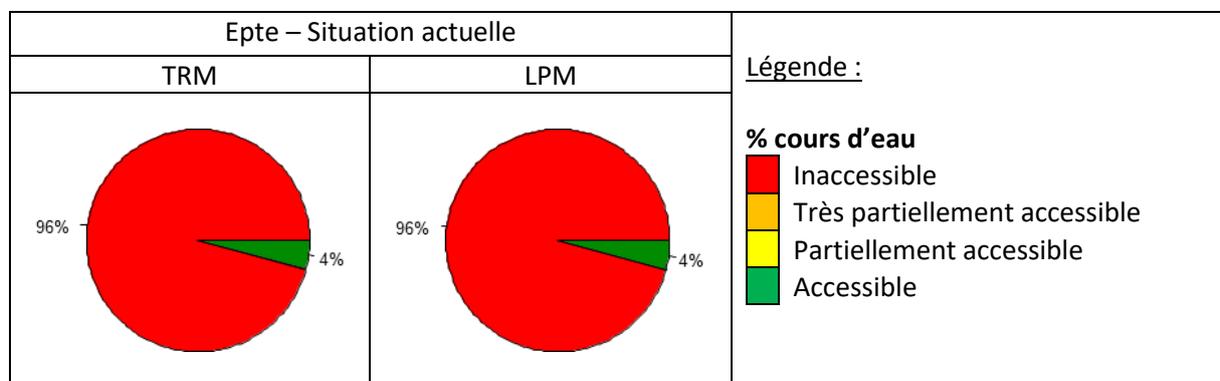


Figure 60 : Situation actuelle d'accès aux frayères potentielles sur l'Epte

D'après la Figure 60Figure 52, actuellement, 4% des frayères potentielles sont accessibles pour TRM et LPM respectivement et 96% sont inaccessibles. Le seuil du moulin de Giverny (bras droit) et le seuil

du lavoir de Villez (bras gauche) sont infranchissables et empêchent l'accès aux zones amont. Cependant, les relevés de frayères de l'AAPPMA27, suggèrent la présence de frayères réelles de LPM en amont de ces ouvrages et jusqu'en aval du seuil de Gasny. Cela suppose que le franchissement de l'un de ces deux ouvrages est bien possible au cours de la période migratoire de l'espèce. En effet, la note ICE a été déterminée à partir de relevés en période d'étiage. La profondeur à l'étiage de la fosse en aval de ces ouvrages ne permet pas le franchissement ; en période de plus hautes eaux, on peut supposer que le franchissement devient possible. Le modèle sous-estime ici l'accessibilité aux zones amont du cours d'eau.

- *La prise en compte des conditions dans l'estuaire et dans le fleuve modifie-t-elle l'accessibilité aux frayères ?*

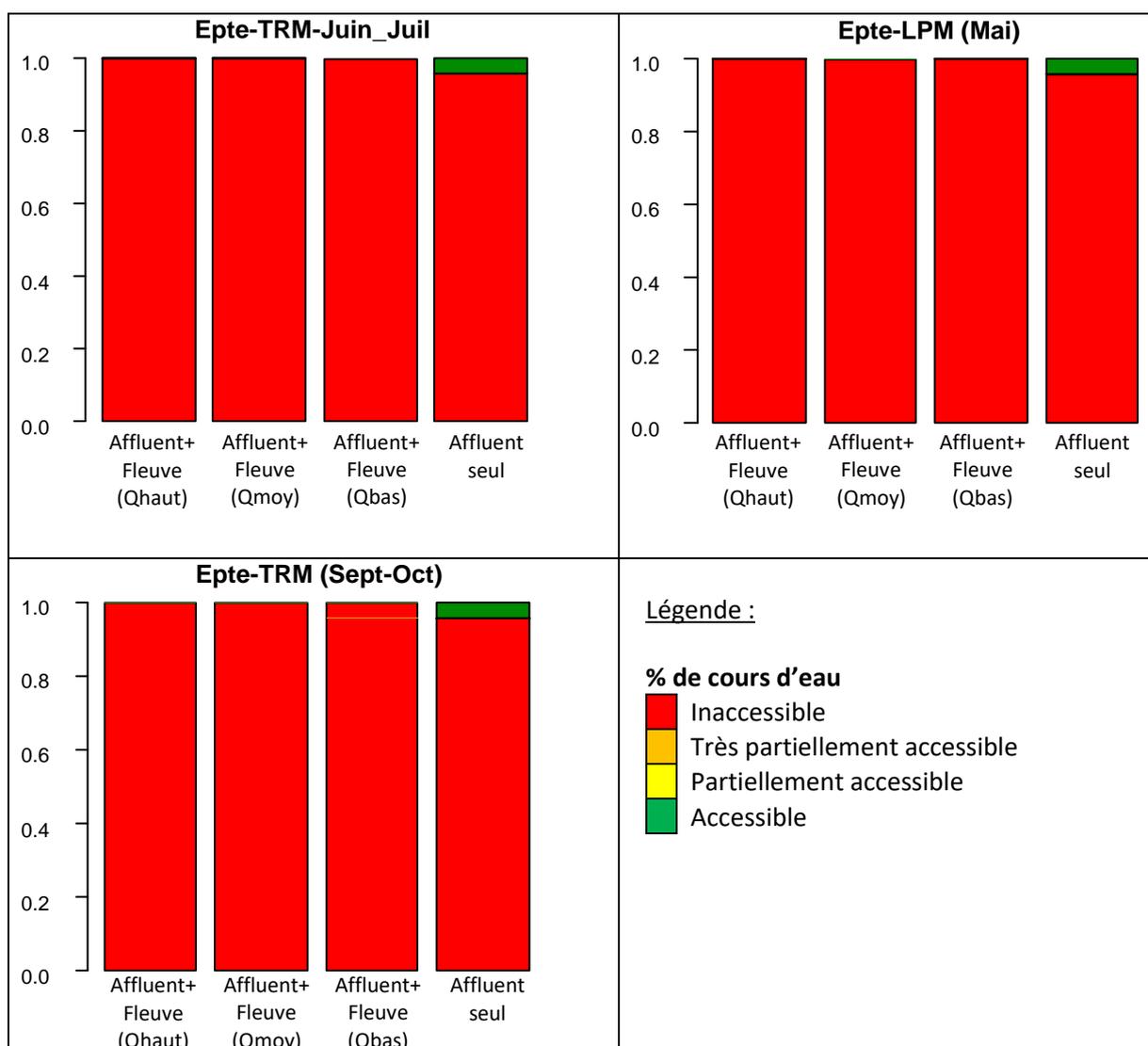


Figure 61 : Effet des conditions dans l'estuaire et le fleuve sur l'accessibilité de l'Epte

La prise en compte du coût de traversée dans l'estuaire et le fleuve modifie l'accessibilité des frayères potentielles dans l'Epte pour TRM et LPM (Figure 61). En effet, la proportion de frayères initialement accessibles devient dans certains cas partiellement ou très partiellement accessibles voire inaccessible. Cette réduction d'accessibilité est liée au cumul des conditions contraignantes de température dans l'estuaire et dans le fleuve (de Mai à Juillet), aux concentrations élevées en nitrites dans le fleuve, et à l'impact des ouvrages de navigation de Poses et Port-Mort à franchir qui augmentent le coût de migration pour accéder à l'affluent. En affichant, une inaccessibilité du cours d'eau pour LPM et TRM après intégration des conditions de l'estuaire et de la Seine, le modèle sous-

estime l'accessibilité du cours d'eau. En effet, les relevés de frayères réelles suggèrent bien la présence d'individus de ces espèces dans la partie aval de l'Epte.

- *Comment les scénarios de restauration de la continuité écologique influencent-ils l'accessibilité aux zones amont? Quel est le gain de surface de cours d'eau accessible en fonction des scénarios ?*

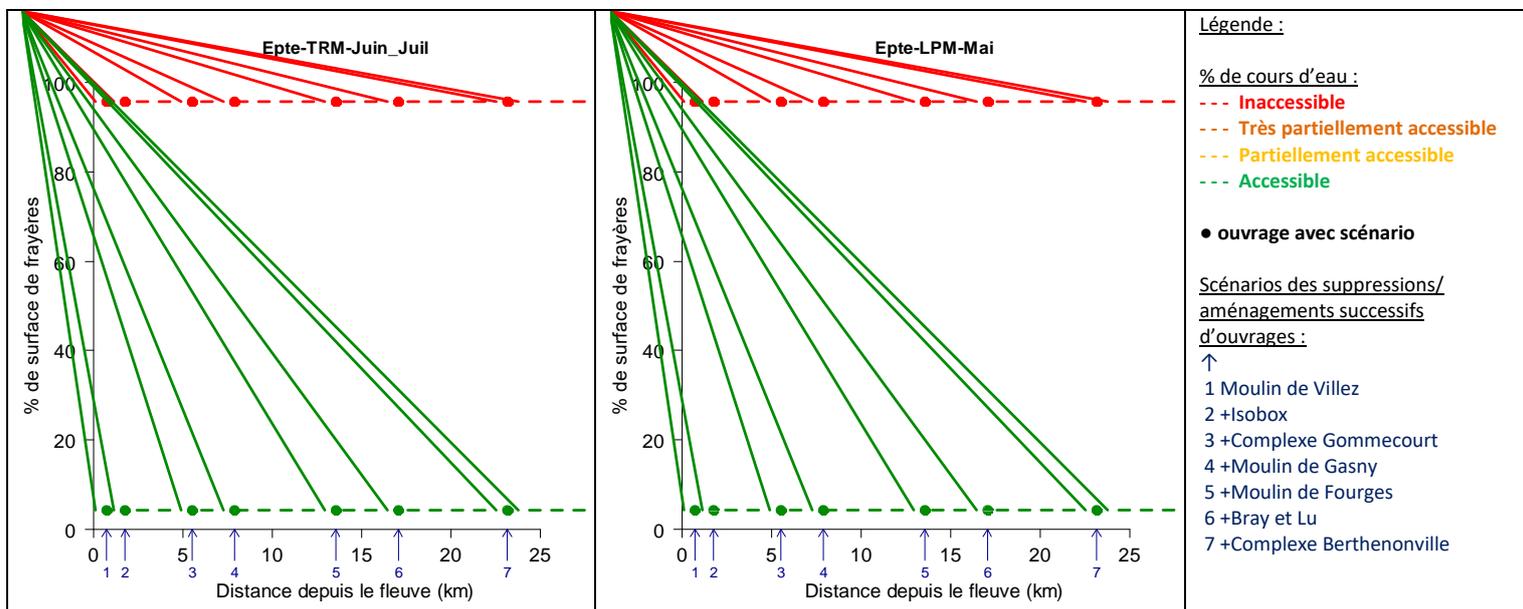


Figure 62 : Effet des scénarios de restauration sur l'accessibilité à l'Epte

La Figure 62 montre l'évolution du % de surface de frayères accessibles pour les 4 classes d'accès en fonction de la distance depuis le fleuve et des scénarios de suppressions/d'aménagements successifs d'ouvrages. En complément, la Figure 63 permet de visualiser sur une carte la localisation des ouvrages avec scénarios ainsi que les gains (en %) d'accessibilité aux frayères en fonction des classes d'accessibilité.

Pour TRM et LPM, les scénarios d'effacement successifs ne modifient pas le profil d'accès aux frayères: 96% des frayères restent inaccessibles sur tout le linéaire de l'Epte. Aucun gain d'accès n'est à noter.

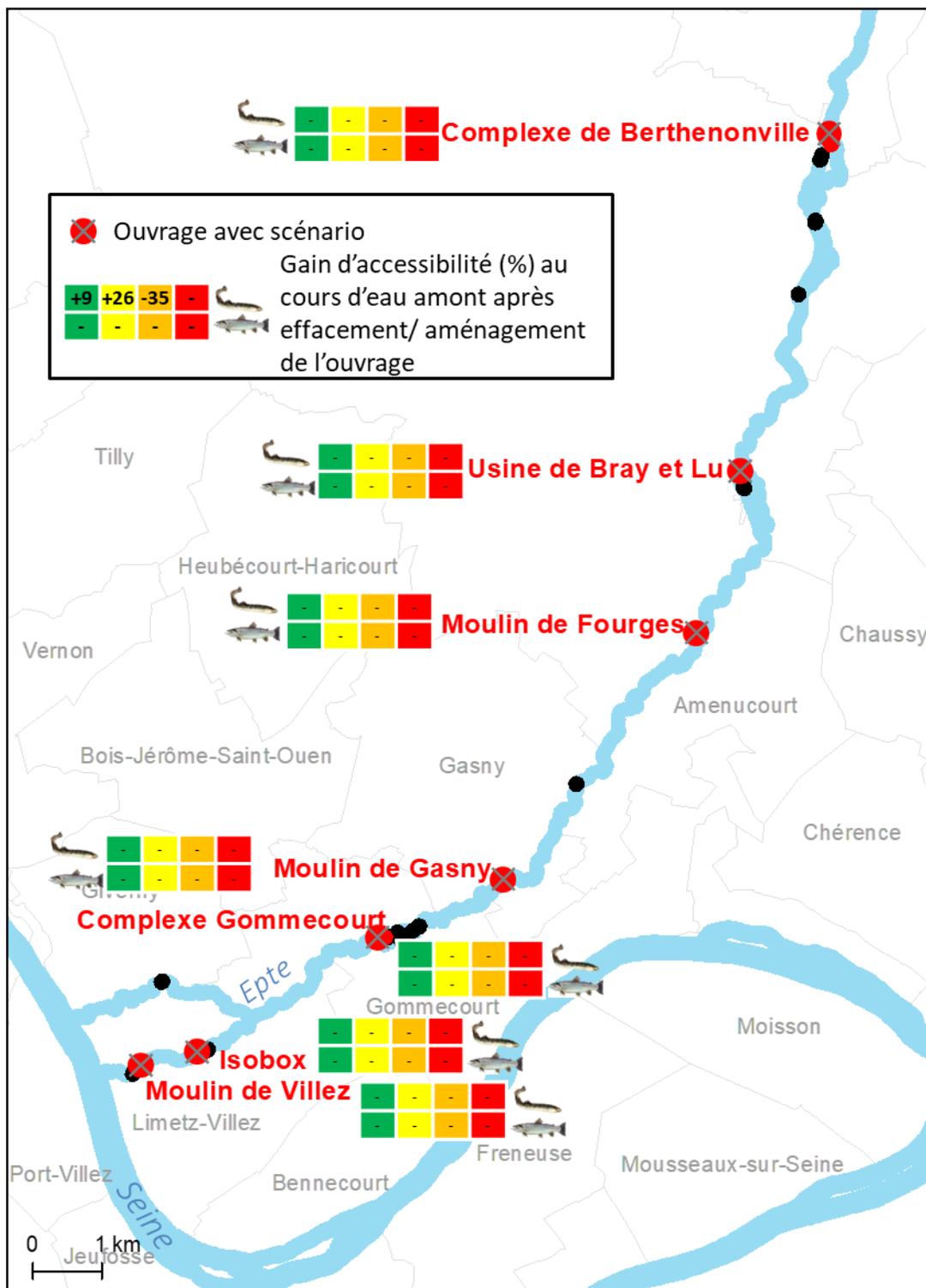
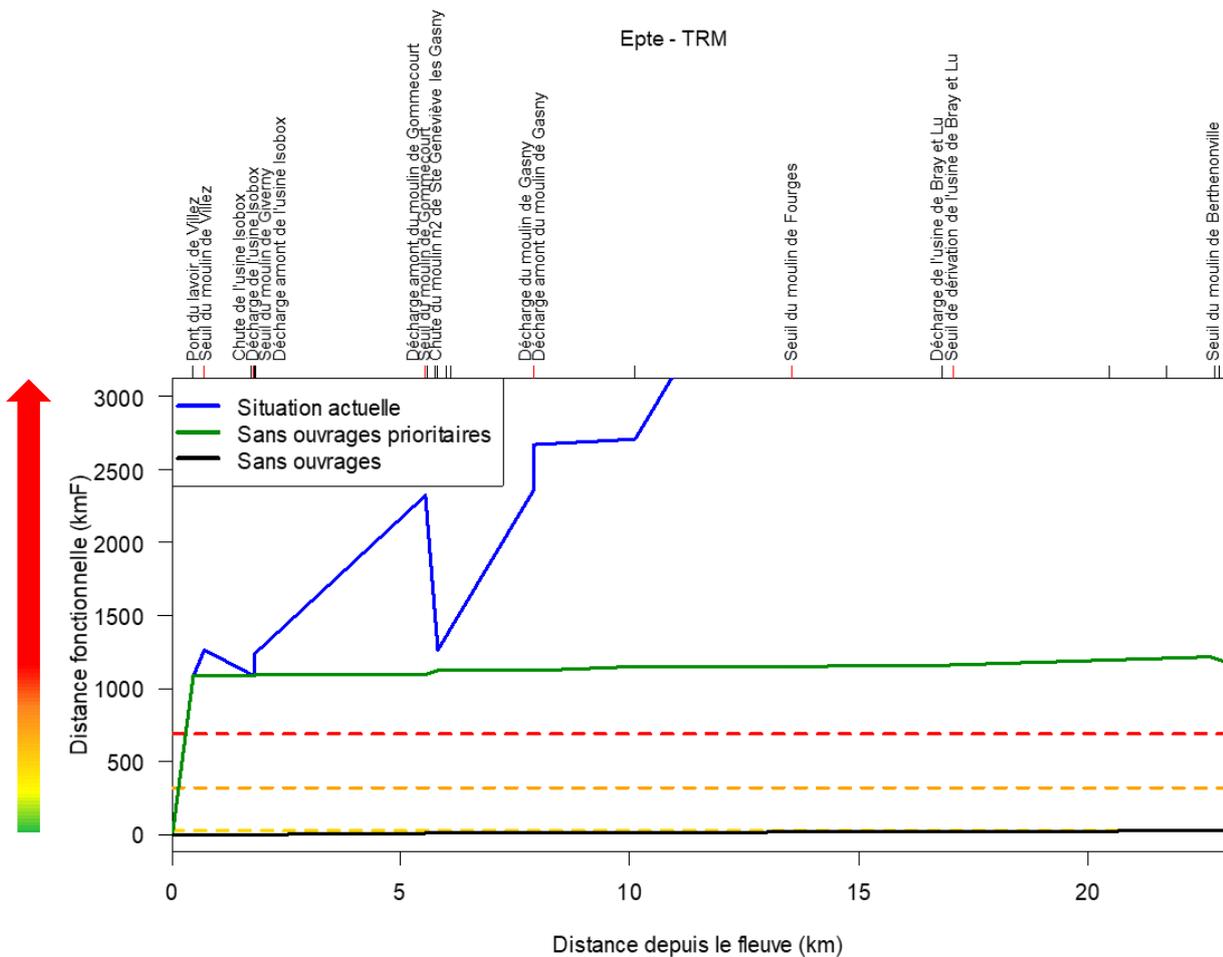


Figure 63 : Gain d'accessibilité (en %) au cours d'eau amont sur l'Epte en fonction des ouvrages avec scénarios

Note : Les couleurs vert, jaune, orange et rouge indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

- *Comment le coût de la migration évolue-t-il le long du linéaire hydrographique ?*

Epte - TRM



Epte - LPM

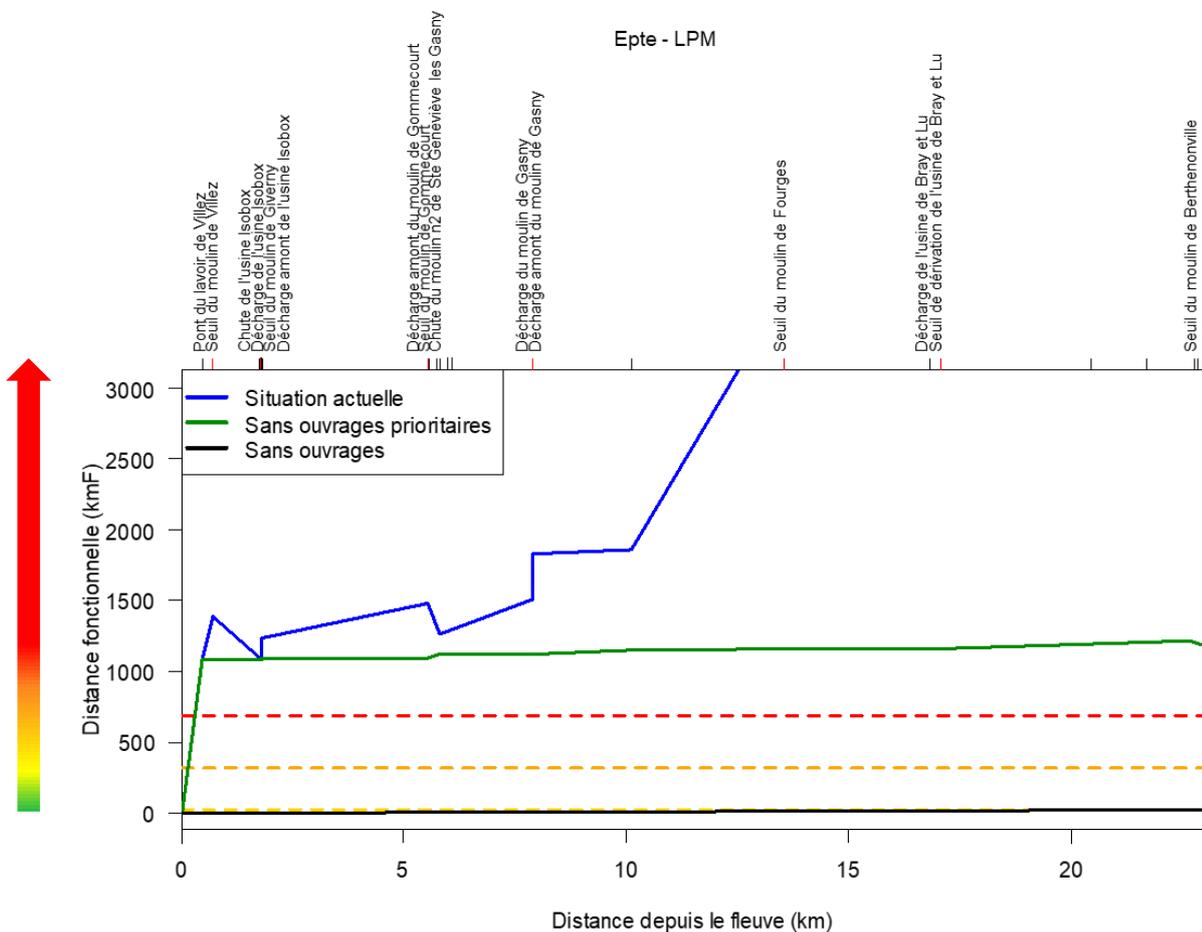


Figure 64: Evolution du coût de migration (distance fonctionnelle) pour parcourir l'Epte pour LPM et TRM en fonction de la distance depuis le fleuve pour 3 cas : situation actuelle (en bleu), situation fictives sans les ouvrages prioritaires (en vert) et une situation fictive sans ouvrages.

Note: La position kilométrique des ouvrages bloquant et prioritaires (trait rouge) figure sur l'axe du haut. La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration. Les traitillés horizontaux indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

La Figure 56 Figure 45 représente l'évolution de la distance fonctionnelle, proxy du coût de la migration, pour accéder aux frayères potentielles en fonction de la distance depuis le fleuve. 3 cas y sont représentés : le coût de migration en situation actuelle (en bleu), après suppression/aménagement des ouvrages prioritaires (en vert) et sans ouvrage (en noir).

Les profils d'évolution du coût de la migration sont similaires pour LPM et TRM. Le coût de la migration augmente rapidement le premier kilomètre en amont de la confluence avec la Seine pour dépasser le seuil de la classe « inaccessible ». Cependant, on constate que la suppression des ouvrages prioritaires permet à partir du kilomètre 1, de réduire considérablement le coût de la migration. L'aménagement de l'ouvrage du pont du Lavoir de Villez et du seuil de Giverny en complément de l'aménagement des ouvrages prioritaires devrait permettre 100% d'accessibilité sur le secteur étudié de l'Epte.

- *Existe-t-il d'autres obstacles qui pourraient contraindre l'accès aux frayères?*

Sur l'Epte, les moyennes des paramètres physico-chimique pour les périodes de migration respectives de TRM et LPM **ne témoignent pas de pollutions chroniques** qui pourraient contraindre la migration des poissons.

15. Mauldre

- *Quelle est la situation actuelle d'accès aux frayères potentielle sur l'affluent ? Quelles sont les principaux obstacles qui contraignent l'accès aux frayères ?*

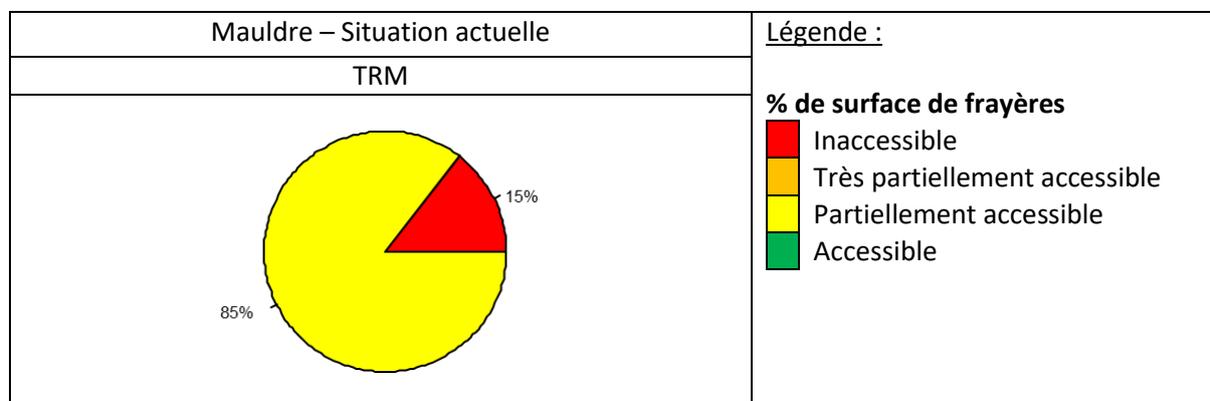


Figure 65 : Situation actuelle d'accès aux frayères potentielles sur la Mauldre

Pour accéder à la Mauldre à Epône, un poisson doit parcourir 260 km depuis Honfleur. Le coût « naturel » de migration pour accéder à cet affluent (sans autres contraintes) est donc plus élevé que pour atteindre un affluent qui serait plus proche de l'estuaire. Ce coût naturel est intégré à la modélisation, c'est pourquoi, l'accès à la Mauldre est classé partiellement accessibles plutôt qu'accessibles. Actuellement, 85% des frayères de TRM sont partiellement accessibles sur la Mauldre et 15% des frayères sont inaccessibles (Figure 65). En effet, le seuil du moulin de Beynes, situé à environ 17 km de l'embouchure avec la Seine, est infranchissable et empêche l'accès aux frayères potentielles en amont.

- *La prise en compte des conditions dans l'estuaire et dans le fleuve modifie-t-elle l'accessibilité aux frayères ?*

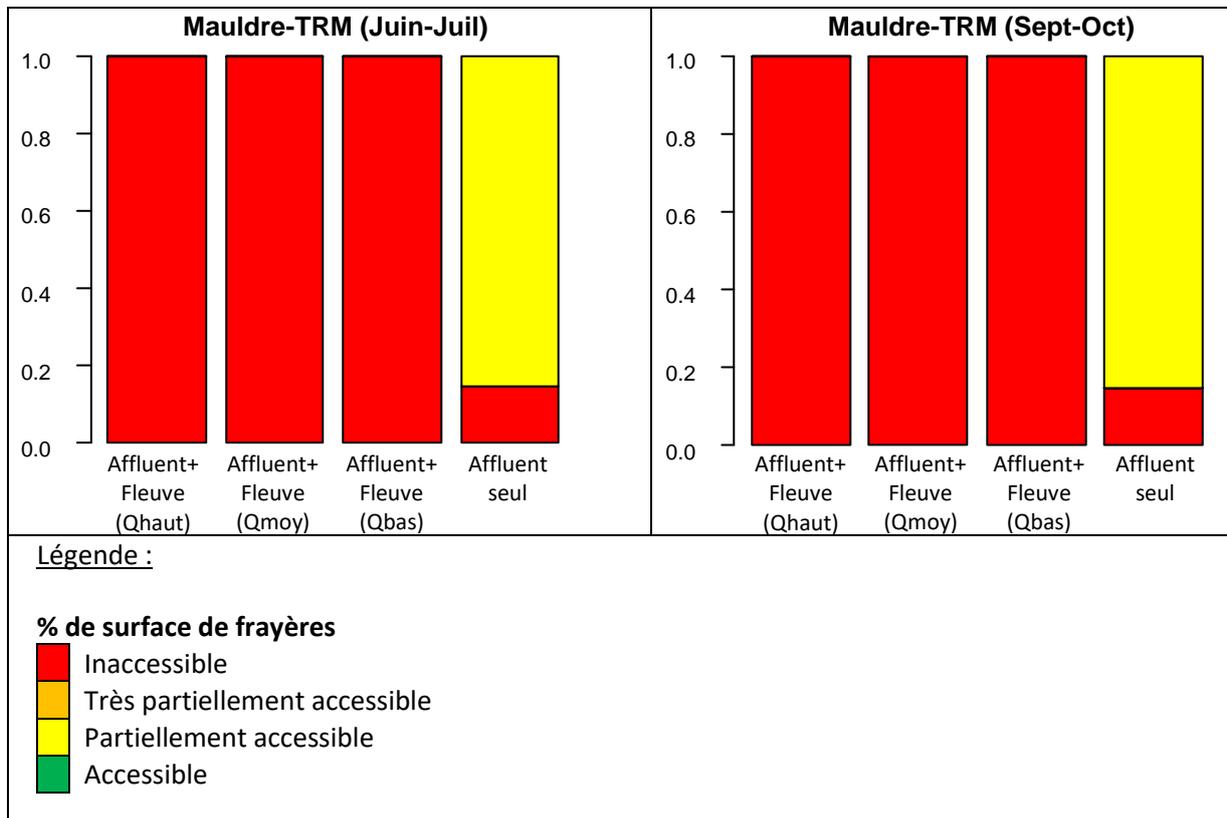


Figure 66 : Effet des conditions dans l'estuaire et du fleuve sur l'accès aux frayères potentielles sur la Mauldre

La prise en compte du coût de traversée dans l'estuaire et le fleuve modifie l'accessibilité des frayères potentielles dans la Mauldre (Figure 66). En effet, la proportion de frayères initialement accessible devient inaccessible. Cette réduction d'accessibilité est liée au cumul des conditions contraignantes de température dans l'estuaire et dans le fleuve (de Juin à Juillet), aux concentrations élevées en nitrites dans le fleuve, et à l'impact des ouvrages de navigation de Poses, Port-Mort et Méricourt à franchir qui augmentent le coût de migration pour accéder à l'affluent (Figure 59) et pourrait expliquer l'absence de l'espèce sur le bassin de la Mauldre.

- *Comment les scénarios de restauration de la continuité écologique influencent-ils l'accessibilité aux frayères ? Quel est le gain de surface de frayères accessibles en fonction des scénarios ?*

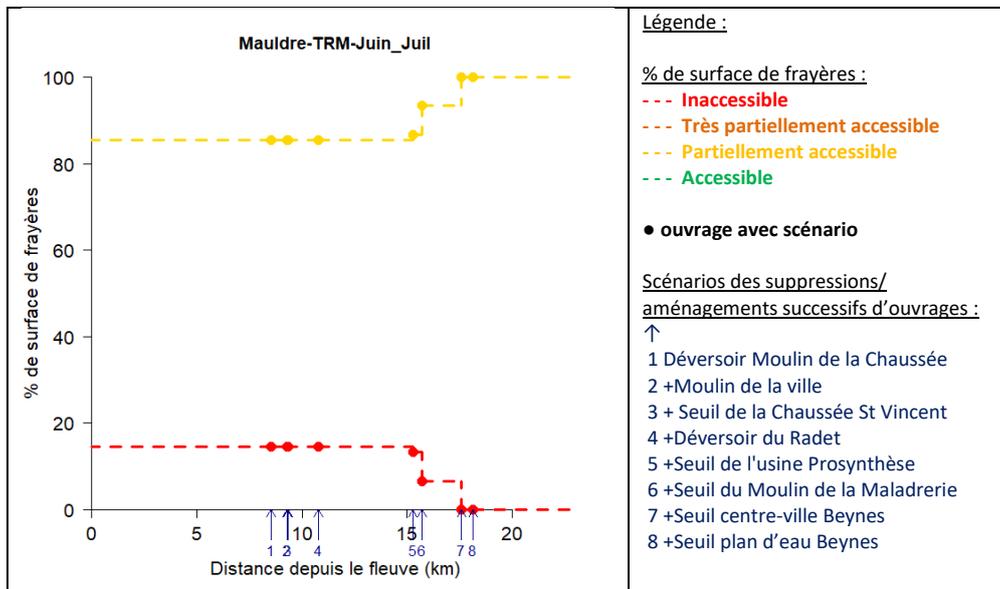


Figure 67 : Effet des scénarios de restauration sur l'accès aux frayères potentielles sur la Mauldre

La Figure 54 montre l'évolution du % de surface de frayères accessibles pour les 4 classes d'accès en fonction de la distance depuis le fleuve et des scénarios de suppressions/d'aménagements successifs d'ouvrages d'aval en amont. En complément, la Figure 68Figure 50 permet de visualiser sur une carte la localisation des ouvrages avec scénarios ainsi que les gains (en %) d'accessibilité aux frayères en fonction des classes d'accessibilité.

L'effacement du déversoir du Moulin de la Chaussée (1), du Moulin de la Ville (2), du seuil de la Chaussée St-Vincent (3) et du déversoir du Radet (4) ne modifie pas le profil d'accès aux frayères car ces ouvrages peuvent être soit contournés par les bras droit sans coût supplémentaire, soit l'ouvrage est franchissable à faible coût. L'effacement successif du seuil de l'usine Prosynthèse (5), du seuil de la Maladrerie (6) et du seuil du grand moulin à Beynes (7) permet un gain d'accessibilité pour 15% des frayères. Enfin, l'effacement du seuil du plan d'eau de Beynes ne modifie pas le profil d'accessibilité car il peut être franchi par TRM sans dépasser la limite de coût supérieur.

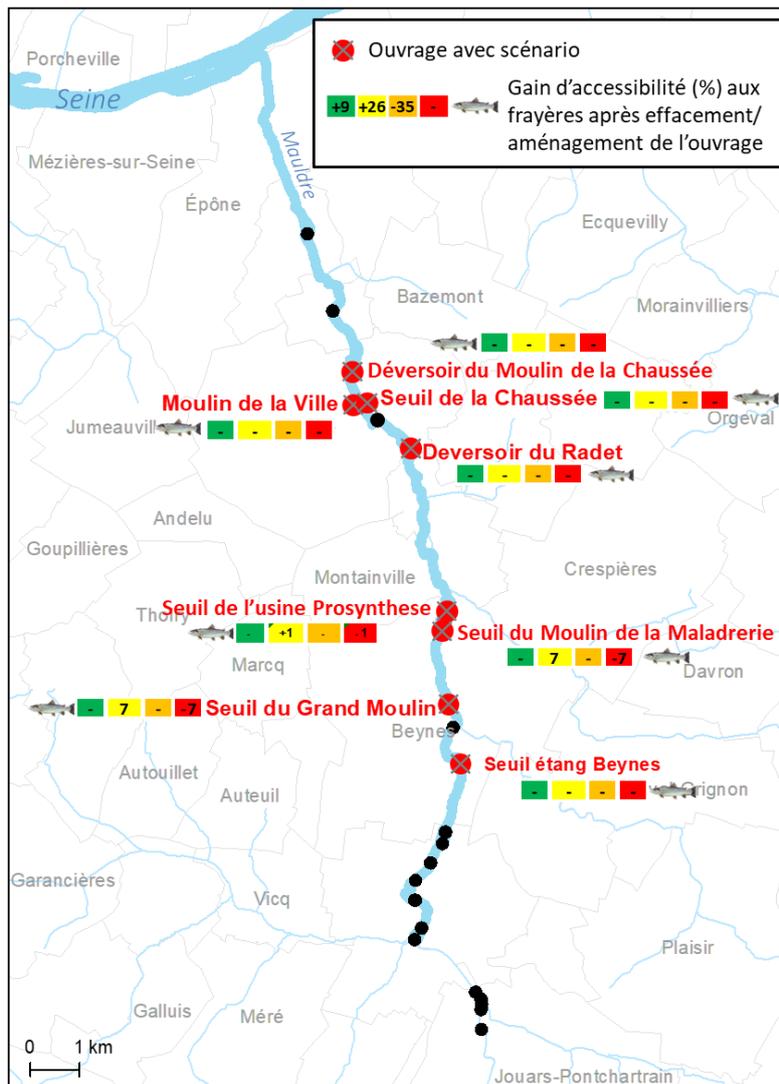


Figure 68 : Gain d'accessibilité (en %) aux surfaces de frayères potentielles sur la Mauldre en fonction des ouvrages avec scénarios

Note : Les couleurs vert, jaune, orange et rouge indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

- *Comment le coût de la migration évolue-t-il le long du linéaire hydrographique ?*

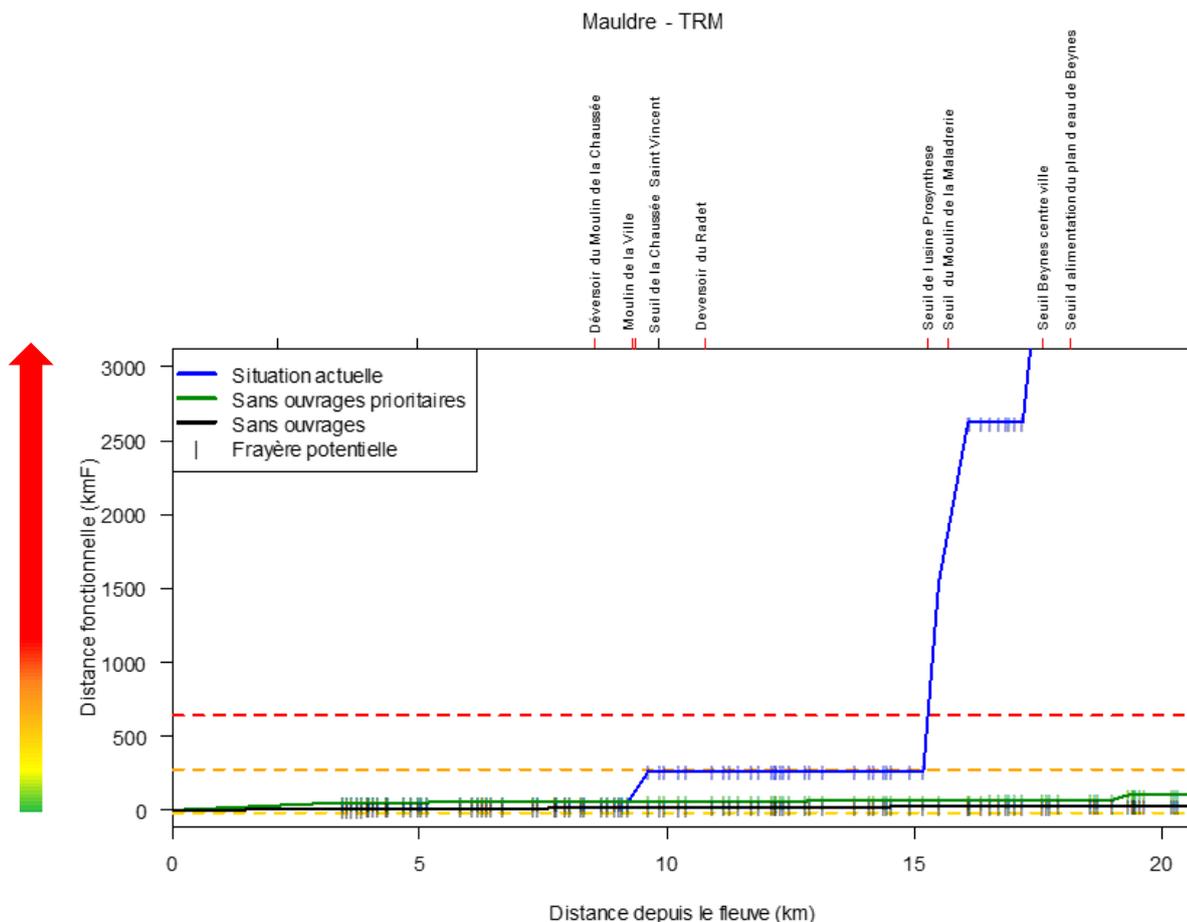


Figure 69: Evolution du coût de migration (distance fonctionnelle) pour accéder aux frayères potentielles TRM sur la Mauldre en fonction de la distance depuis le fleuve pour 3 cas : situation actuelle (en bleu), situation fictives sans les ouvrages prioritaires (en vert) et une situation fictive sans ouvrages.

Note: La position kilométrique des ouvrages bloquant et prioritaires (trait rouge) figure sur l'axe du haut. La flèche à gauche indique le coût croissant de la migration. Les traitillés horizontaux indiquent les classes d'accessibilité aux frayères.

D'après la Figure 69, le profil de coût de migration actuelle suit le profil sans ouvrages prioritaires les 9 premiers kilomètres. Il augmente ensuite à Maule du fait de la présence de plusieurs seuils (seuil du moulin de la ville, seuil de la Chaussée et seuil de la résidence cœur de Maule). Il se stabilise ensuite pour réaugmenter fortement après le kilomètre 15, du fait de la présence des seuils de l'usine Prosynthèse et du moulin de la Maladrerie. Le coût dépasse alors le seuil d'inaccessibilité des frayères en amont de ces deux ouvrages. L'effacement des ouvrages prioritaires permet de réduire considérablement le coût d'accès aux frayères puisque le profil de coût est quasi similaire au profil sans ouvrage, permettant ainsi 100% d'accès aux frayères sur la Mauldre.

- *Existe-t-il d'autres obstacles qui pourraient contraindre l'accès aux frayères?*

La Mauldre comprend 3 stations de suivi physico-chimique. L'exploitation des données Naïades ainsi que celles issues du modèle pyNuts-RiverStrahler, témoigne d'une pollution chronique aux composés phosphatés et azotés (Figure 46). Les concentrations en nitrites dépassent régulièrement le seuil de 0.5 mg (NO₂)/L (mauvais état) au niveau de la station d'Épône (Figure 70). À noter aussi, que les MES dépassent ponctuellement 150 mg/L (équivalent à ce qu'on peut rencontrer dans l'estuaire!). **Ces pollutions ponctuelles et chroniques rendent donc peu attractive l'entrée dans la Mauldre** depuis le fleuve et peuvent générer des coûts supplémentaires pour la migration et contraindre voire compromettre la migration dans l'affluent.

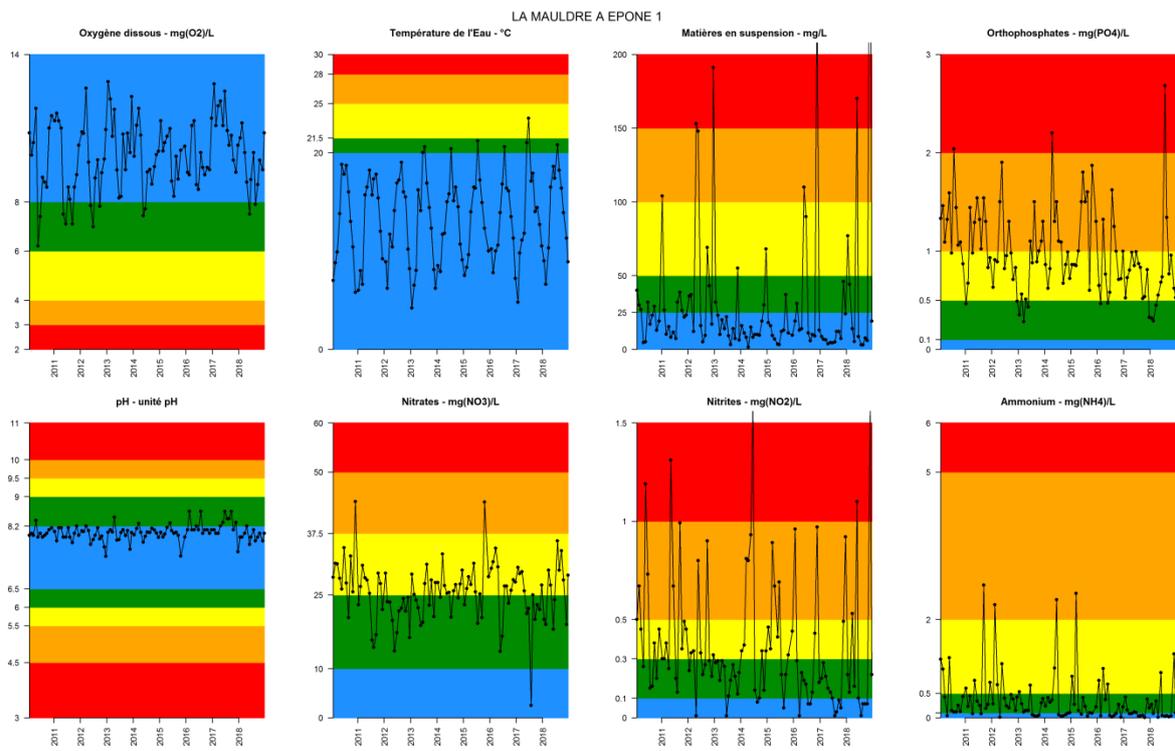


Figure 70: Évolution temporelle des valeurs des paramètres physico-chimiques sur la Mauldre à Épône. Les seuils utilisés sont ceux définis par l'arrêté du 27 juillet 2018. Données: Naiades.

Bibliographie

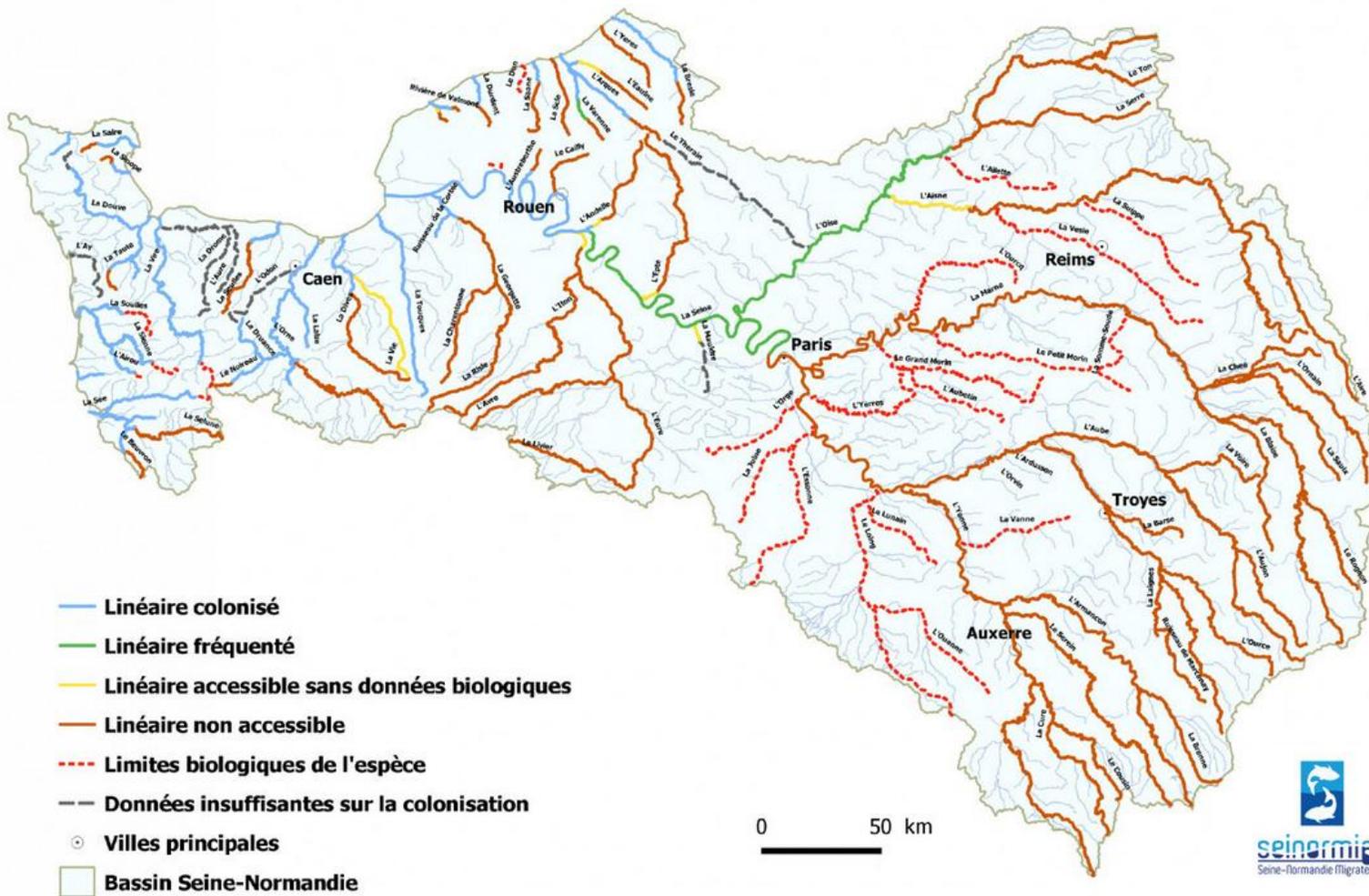
- ADRIAENSEN, F., CHARDON, J., DE BLUST, G., SWINNEN, E., VILLALBA, S., GULINCK, H. & MATTHYSEN, E. 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and urban planning*, 64, 233-247.
- BAGLINIERE, J. & CHAMPIGNEULLE, A. 1982. Population density of brown trout (*Salmo trutta* L.) and atlantic salmon (*Salmo salar* L.) juveniles on the river Scorff (Brittany): habitat selection and annual variations (1976-1980)[France]. *Acta Oecologica. Oecologia Applicata (France)*.
- BAGLINIÈRE, J. & PORCHER, J. 1994. Caractéristiques des stocks de reproducteurs et comportement lors de la migration génésique. IFREMER.
- BAUDOIN, J. M., BURGUN, V., CHANSEAU, M., SREMSKI, W., STEINBACH, P. & VOEGTLE, P. 2014a. Informations sur la Continuité Ecologique - ICE. Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. . *Comprendre pour agir*, 204 p.
- BAUDOIN, J. M. & KREUTZENBERGER, K. 2016. Indicateur de fragmentation théorique des milieux aquatiques SYRAH compatible. Contexte, méthodologie et descriptif du contenu. . Onema.
- BAUDOIN, J. M., VINCENT, B., MATTHIEU, C., LARINIER, M., OVIDIO, M., WILLIAM, S., PIERRE, S. & BRUNO, V. 2014b. *Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes*.
- BELLIARD, J., BESLAGIC, S., DELAIGUE, O. & TALES, E. 2018. Reconstructing long-term trajectories of fish assemblages using historical data: the Seine River basin (France) during the last two centuries. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 23430-23450.
- BELLIARD, J., GORGES, G., LE PICHON, C. & TALÈS, E. 2009. *Le peuplement de poissons du bassin de la Seine. Comprendre son évolution sous l'impact des changements générés par l'homme ou la nature*, Agence de l'eau Seine-Normandie.
- BOURGEOIS, M., COSSART, É. & FRESSARD, M. 2017. Mesurer et spatialiser la connectivité pour modéliser les changements des systèmes environnementaux. Approches comparées en écologie du paysage et en géomorphologie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 23, 289-308.
- CARNIE, R., TONINA, D., MCKEAN, J. A. & ISAAK, D. 2016. Habitat connectivity as a metric for aquatic microhabitat quality: application to Chinook salmon spawning habitat. *Ecohydrology*, 9, 982-994.
- FDAAPPMA27 2000. Plan Départemental pour la Protection du milieu aquatique et la Gestion des ressources piscicoles de l'Eure.
- FDAAPPMA27 2013. Suivi 2012 de la reproduction de la Lamproie marine (*Petromyzon marinus* L.) dans le département de l'Eure – Rivière Andelle, Epte et Eure. 51p. BARAULT A. & SANSON G.
- FDAAPPMA27 2019. Etude de la reproduction de la Lamproie marine dans le département de l'Eure - Année 2018 26p. M. Bonnet.
- FDAAPPMA27 2020. Suivi de la reproduction de l'Alose sur le bassin de l'Eure, première recherche-2020. BONNET M. .
- FISSON, C. 2014. Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.2.
- GIP SEINE-AVAL 2011. Cartographie des zones riveraines de l'estuaire de la Seine. Rapport d'études réalisé par RIVE & CS.
- GISKE, J., HUSE, G. & FIKSEN, O. 1998. Modelling spatial dynamics of fish. *Reviews in fish biology and fisheries*, 8, 57-91.
- GRALL, S., GAROT, G., MARTIN, B. & DESHAYES, F. 2018. Contrôle des migrations des poissons grands migrateurs sur la Seine au barrage de Poses-Amfreville-sous-les-Monts, année 2018. Seinormigr.
- GRASSO F., BISMUTH E. & R., V. 2021. Projet ARES « Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6.
- KEELEY, A. T. H., BEIER, P. & JENNESS, J. S. 2021. Connectivity metrics for conservation planning and monitoring. *Biological Conservation*, 255, 109008.
- KEITH, P. & ALLARDI, J. 2001. Atlas des poissons d'eau douce de France. *Collection patrimoines naturels*.
- KNAAPEN, J. P., SCHEFFER, M. & HARMS, B. 1992. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and urban planning*, 23, 1-16.

- LARINIER, M., COURRET, D. & GOMES, P. 2006. *Guide technique pour la conception des passes «naturelles»*. irstea.
- LARINIER, M. & TRAVADE, F. 1992. La conception des dispositifs de franchissement pour les aloses. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 125-133.
- LE PICHON, C. & ALP, M. 2018. Projet Seine-Aval 5 : ANACONDHA «Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire».
- LE PICHON, C., GORGES, G., BAUDRY, J., BOUSSARD, H., GOREAUD, F., FAURE, T. & BOËT, P. 2007. Méthodes et outils d'analyse spatiale des habitats des poissons en contexte fluvial anthropisé. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, p. 21-p. 33.
- LE PICHON, C., GORGES, G., FAURE, T. & BOUSSARD, H. 2006. Anaqualand 2.0: Modelling connectivity in riverscapes. *Rapport d'activité*.
- LE PICHON, C., LESTEL, L., COURSON, E., MERG, M.-L., TALES, E. & BELLIARD, J. 2020. Historical Changes in the Ecological Connectivity of the Seine River for Fish: A Focus on Physical and Chemical Barriers Since the Mid-19th Century. *Water*, 12, 1352.
- LEWIS, J. 2021. leastcostpath: Modelling Pathways and Movement Potential Within a Landscape (version 1.8.4). Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/leastcostpath/index.html>
- MCRAE, B. H., DICKSON, B. G., KEITT, T. H. & SHAH, V. B. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 89, 2712-24.
- MCRAE, B. H. & SHAH, V. B. 2009. Circuitscape user's guide. *The University of California, Santa Barbara*.
- MENESSON-BOISNEAU, C., APRAHAMIAN, M., SABATIÉ, M. & CASSOU-LEINS, J. 2000. Remontée migratoire des adultes. *Les aloses (Alosa alosa et Alosa fallax spp.): Ecobiologie et vulnérabilité des populations*. Paris: CEMAGREF-INRA.
- MERG, M.-L., DÉZERALD, O., KREUTZENBERGER, K., DEMBSKI, S., REYJOL, Y., USSEGLIO-POLATERA, P. & BELLIARD, J. 2020. Modeling diadromous fish loss from historical data: Identification of anthropogenic drivers and testing of mitigation scenarios. *PLOS ONE*, 15, e0236575.
- MERRIAM, G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. Methodology in landscape ecological research and planning: proceedings, 1st seminar, International Association of Landscape Ecology, Roskilde, Denmark, Oct 15-19, 1984/eds. J. Brandt, P. Agger, 1984. Roskilde, Denmark: Roskilde University Centre, 1984.
- OFB Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE). OFB.
- PLAGEPOMI SEINE NORMANDIE 2016. PLAGEPOMI Seine Normandie 2016-2021.
- PUISSAUVÉ, R., LEGROS, B. & POULET, N. 2015. Fiches d'information sur les espèces aquatiques protégées: Truite commune, *Salmo trutta* (Linnaeus,1758). . Service du patrimoine naturel du MNHN & Onema.
- RAY, N. 2005. PATHMATRIX: a geographical information system tool to compute effective distances among samples. *Molecular Ecology Notes*, 5, 177-180.
- ROCHARD, E., MARCHAL, J., PELLEGRINI, P., BÉGUER, M., OMBREDANE, D., GAZEAU, C., BAGLINIÈRE, J. L., CROZE, O., MENVIELLE, E. & LASSALLE, G. 2007. Identification éco-anthropologique d'espèces migratrices, emblématiques de la reconquête d'un milieu fortement anthropisé, la Seine. Cemagref EPBX – Rennes Agrocampus et Muséum National d'histoire Naturelle.
- ROY, M. L. & LE PICHON, C. 2017. Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: A case study for prioritizing restoration actions targeting brown trout. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 27, 927-937.
- SCE 2012. Révision du SAGE de la Mauldre. Actualisation de l'état initial et du diagnostic. Rapport pour la commission locale de l'eau du comité du bassin hydrographique de la Mauldre et de ses affluents.
- SIRAS 2019. Etude de définition d'un programme de gestion et de restauration des rivières Austreberthe et Saffimbec. Rapport de phase 2 : Diagnostic et caractérisation par tronçons homogènes.
- TAYLOR, P. D., FAHRIG, L., HENEIN, K. & MERRIAM, G. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 571-573.
- TÉTARD, S., FEUNTEUN, E., BULTEL, E., GADAIS, R., BÉGOUT, M.-L., TRANCART, T. & LASNE, E. 2016. Poor oxic conditions in a large estuary reduce connectivity from marine to freshwater habitats of a diadromous fish. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 216-226.

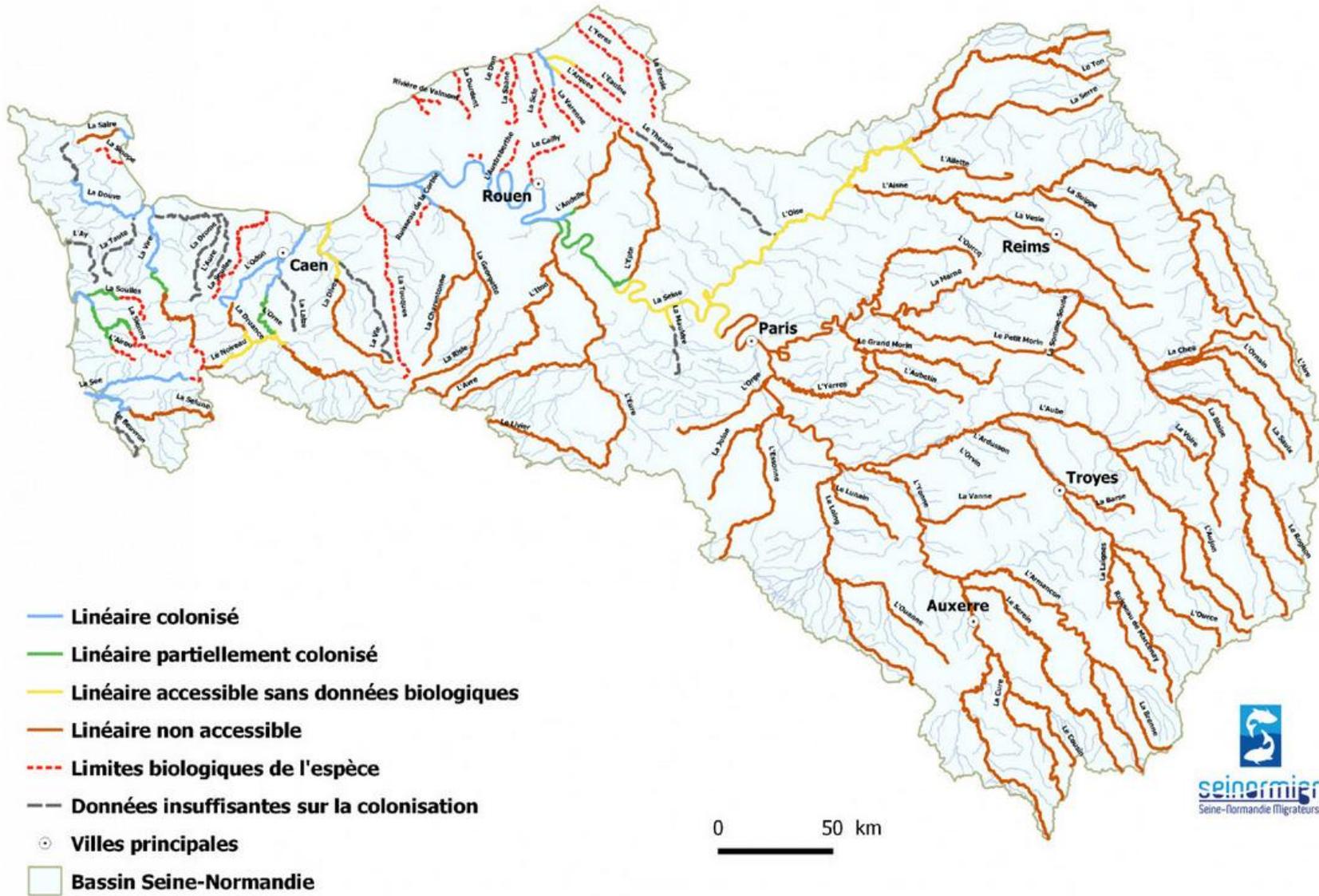
- WANG, S. 2019. *Simulation du métabolisme de la Seine par assimilation de données en continu*. Paris Sciences et Lettres (ComUE).
- WANG, S., FLIPO, N., ROMARY, T., HASANYAR, M. 2022. High frequency oxygen data assimilation in the Seine River system: strengths and challenges. *Environmental Modelling and Software*, 151

Annexe 1 : Cartes de répartition des grands migrateurs dans le bassin de la Seine (source SEINORMIGR)

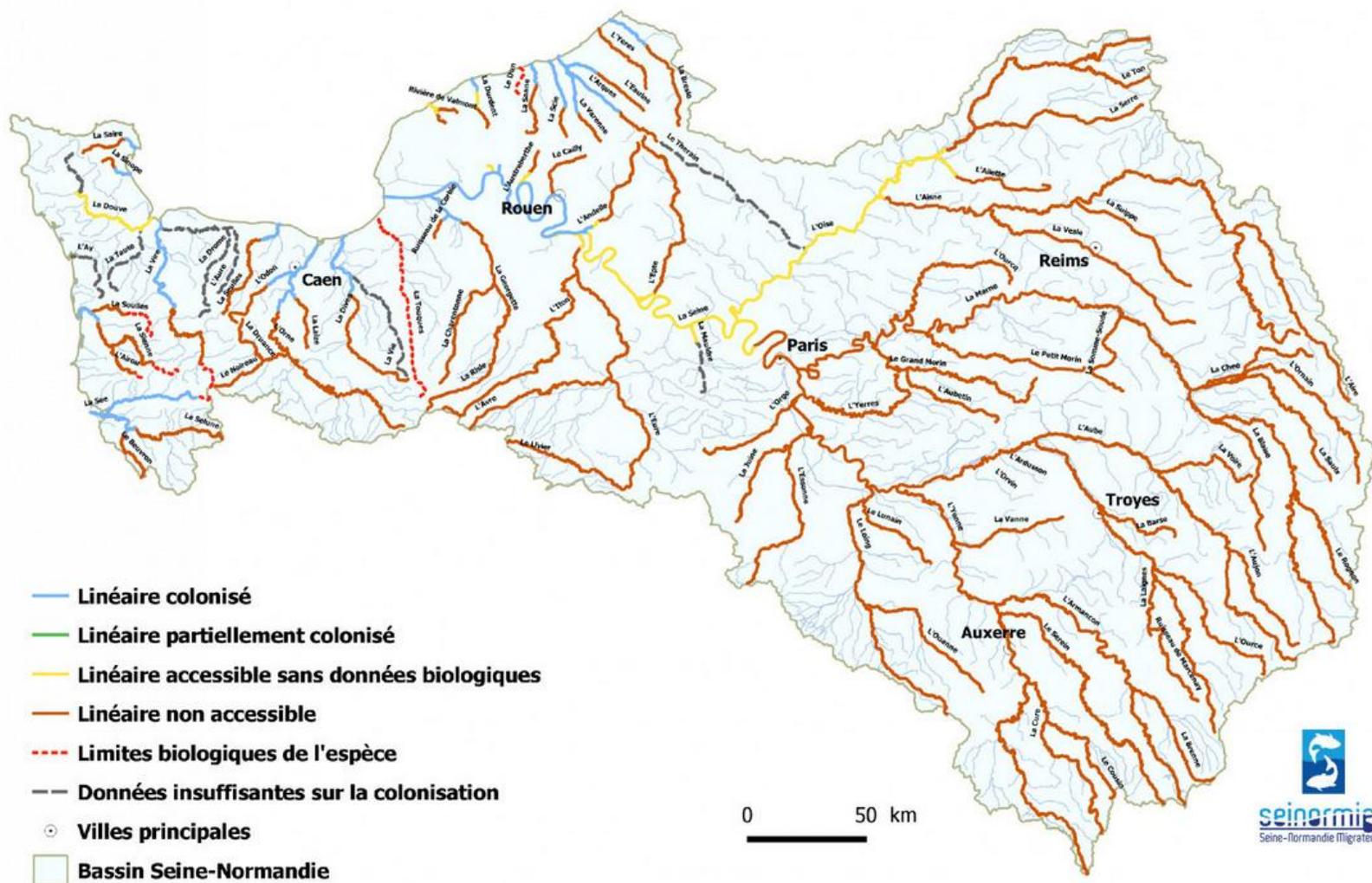
Saumon Atlantique



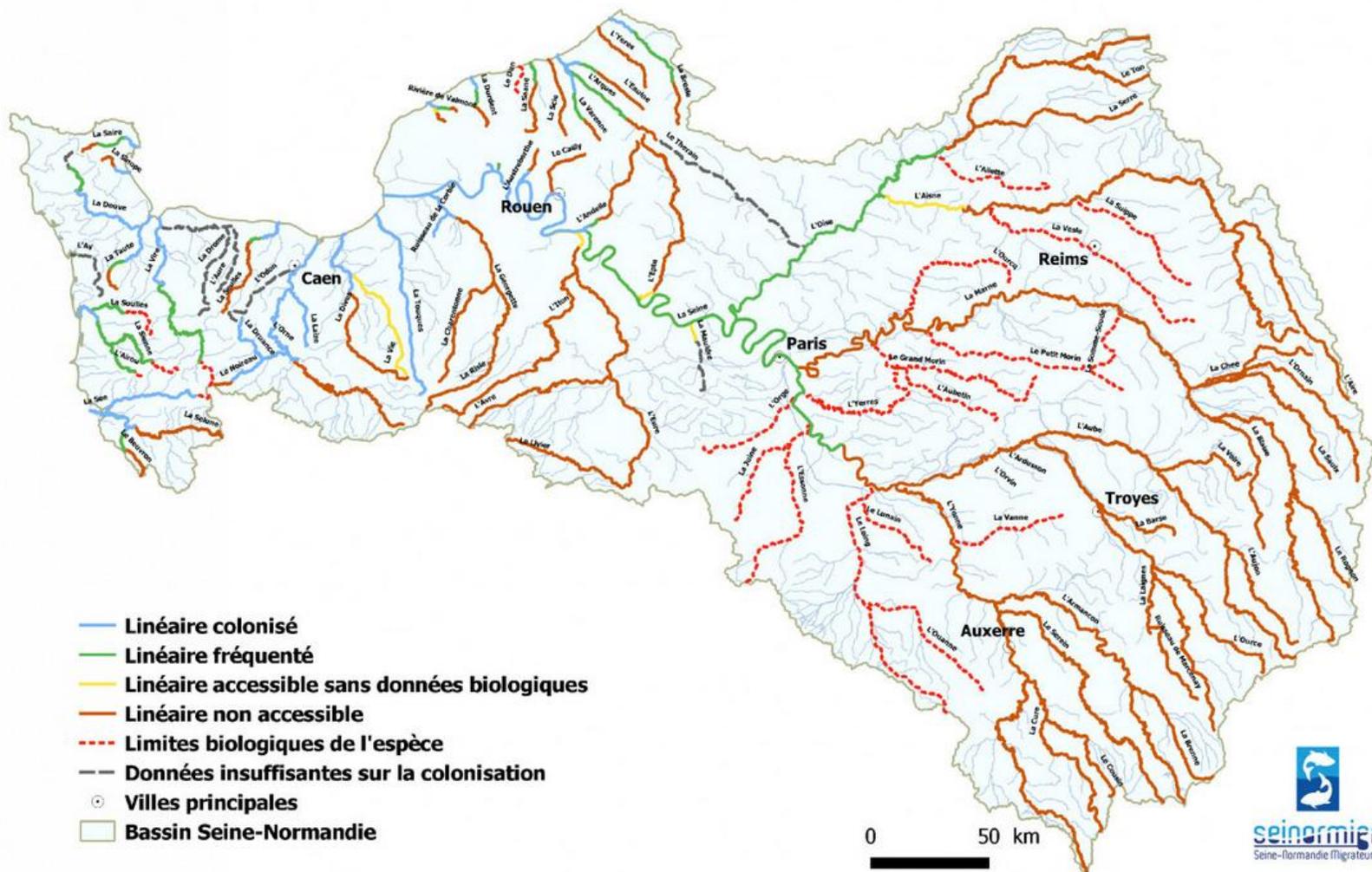
Lamproie marine



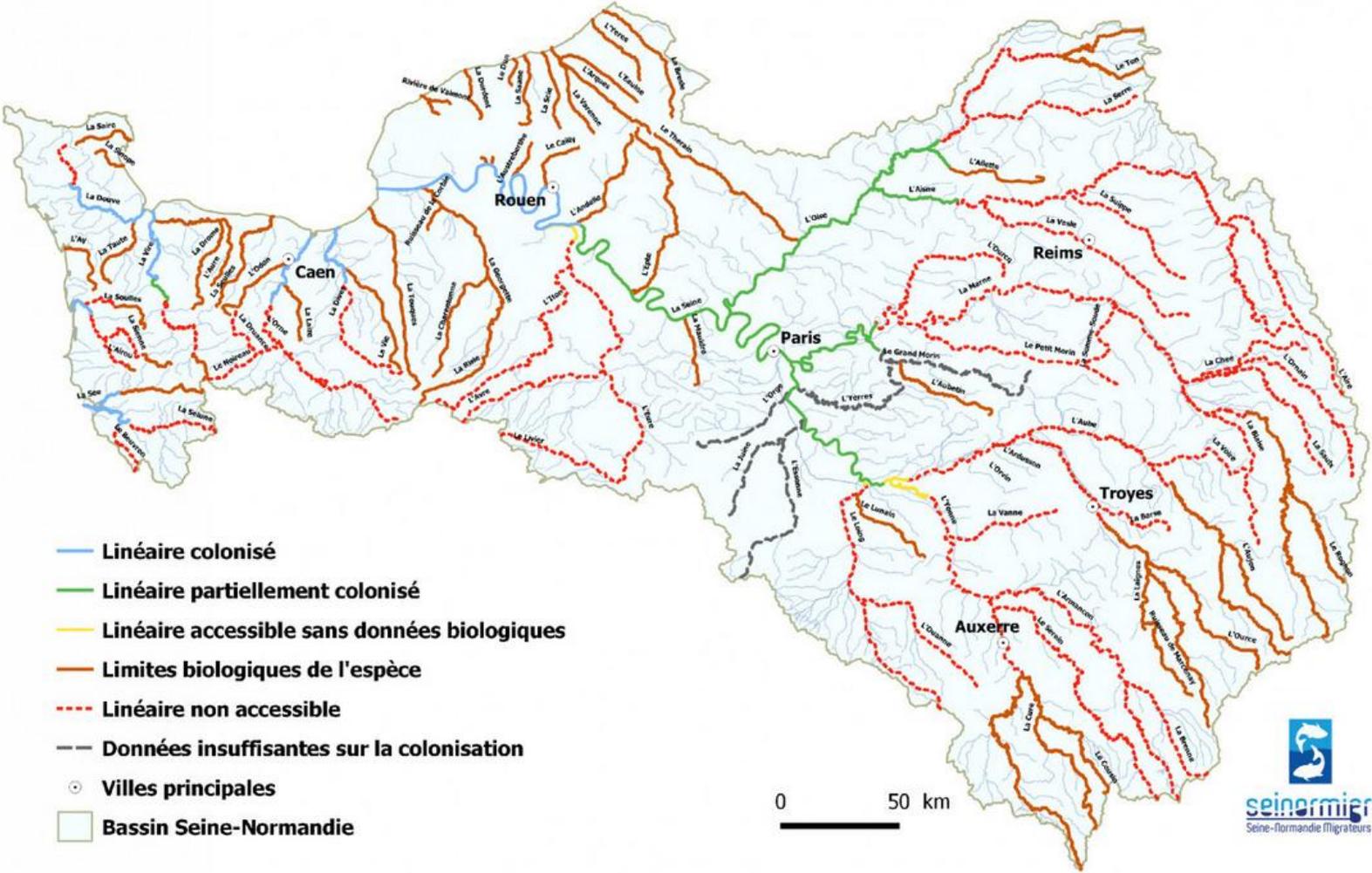
Lamproie fluviatile



Truite de mer



Grande alose



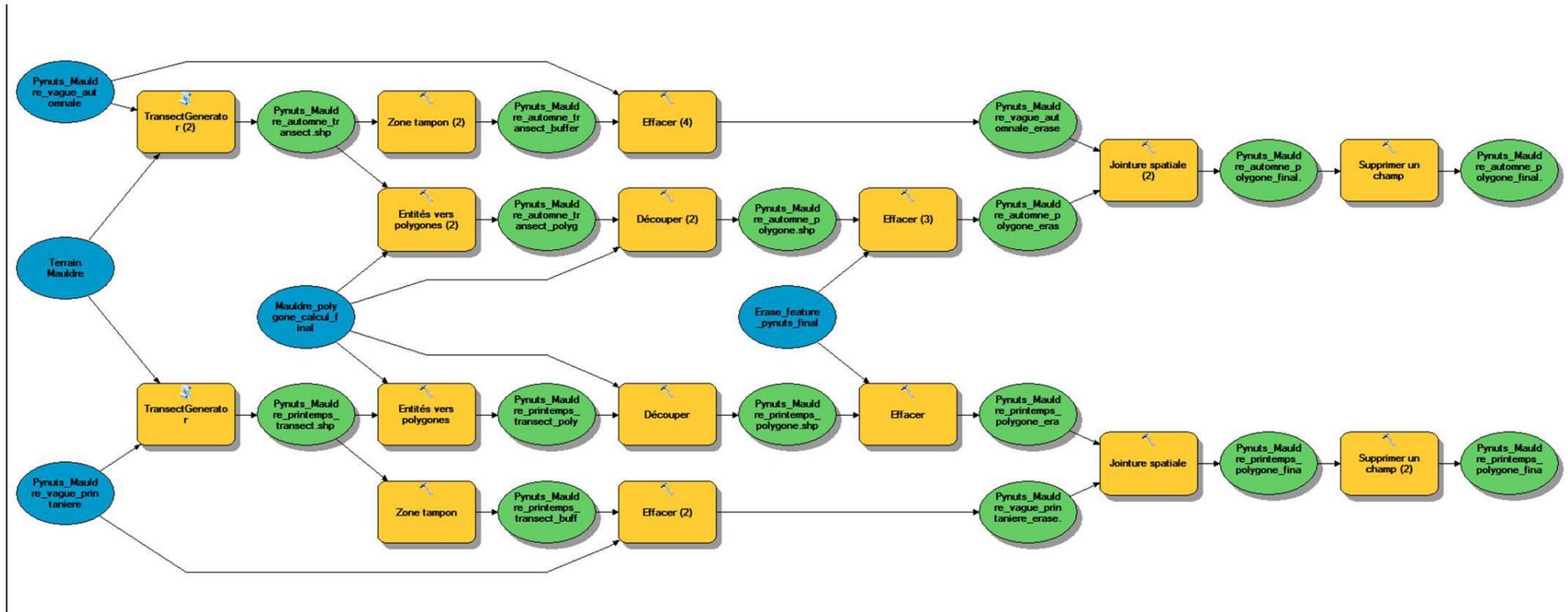
Annexe 2: Tableau des dénominations des substrats faciès initiales et harmonisées

Cours d'eau	Variable	Nom_colonne	Modalité_initiale	Modalité_harmonisées
Andelle	Facies	Facies_MA	Chenal_lent	Chenal_lent
Andelle	Facies	Facies_MA	Chenal_lot	Chenal_lot
Andelle	Facies	Facies_MA	Mouille	Mouille
Andelle	Facies	Facies_MA	Plat_courant	Plat_courant
Andelle	Facies	Facies_MA	Plat_lent	Plat_lent
Andelle	Facies	Facies_MA	Radier	Radier
Andelle	Facies	Facies_MA	Radier-Plat_courant	Radier_plat_courant
Andelle	Substrat	Substrat_P	Blocs	Blocs
Andelle	Substrat	Substrat_P	Cailloux	Cailloux
Andelle	Substrat	Substrat_P	Graviers	Graviers
Andelle	Substrat	Substrat_P	Limons	Limons
Andelle	Substrat	Substrat_P	Pierres	Pierres
Andelle	Substrat	Substrat_P	Sables	Sables
Andelle	Substrat	Substrat_P	Substrat	Substrat
Andelle	Substrat	Substrat_P	Vases	Vase
Epte	Facies	Facies_ec	Inconnu	NC
Epte	Facies	Facies_ec	Pc	Plat_courant
Epte	Facies	Facies_ec	Pl	Plat_lent
Epte	Facies	Facies_ec	Prc	Chenal_lot
Epte	Facies	Facies_ec	Prl	Chenal_lent
Epte	Facies	Facies_ec	Rd	Radier
Epte	Facies	Facies_ec	Rd-Pc	Radier_plat_courant
Epte	Facies	Facies_ec	Rd-Rapide	Rapide
Eure	Substrat	Substrat	Blocs	Blocs
Eure	Substrat	Substrat	Graviers	Graviers
Eure	Substrat	Substrat	Pierres	Pierres
Eure	Substrat	Substrat	Sables	Sables
Eure	Substrat	Substrat	Substrat	Substrat
Eure	Substrat	Substrat	Vase	Vase
Eure	Substrat	Substrat	NA	NC
Eure	Substrat	Granulo_do	<Nul>	NC
Eure	Substrat	Granulo_do		NC
Eure	Substrat	Granulo_do	Blocs	Blocs
Eure	Substrat	Granulo_do	Cailloux	Cailloux
Eure	Substrat	Granulo_do	Cailloux-Graviers	Cailloux
Eure	Substrat	Granulo_do	Graviers	Graviers
Eure	Substrat	Granulo_do	Graviers-Sables	Graviers
Eure	Substrat	Granulo_do	Limons	Limons
Eure	Substrat	Granulo_do	Pierres	Pierres
Eure	Substrat	Granulo_do	Pierres-Cailloux	Pierres
Eure	Substrat	Granulo_do	Pierres-Sables	Pierres
Eure	Substrat	Granulo_do	Sables	Sables
Eure	Substrat	Granulo_do	Sables-Limons	Sables

Eure	Substrat	Granulo_do	Substrat	Substrat
Eure	Substrat	Granulo_do	Vase	Vase
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Argilo-limoneux	Limons
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Beton	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Blocs	Blocs
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Cailloux	Cailloux
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Dalles	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Enrochement non lie	Blocs
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Enrochement non lie - DSub	Blocs
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Galets	Pierres
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Graviers	Graviers
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Limoneux-argileux	Limons
Estuaire	Substrat	Substrat_P	palplanche metal	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Pierres	Pierres
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sable coquille	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sables	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sables fins	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sables grossiers	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sables moyens	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Sablo-vaseux	Sables
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Shorre	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Substrats durs	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Substrats durs intertidaux	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Tufs	Substrat
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Vases	Vase
Estuaire	Substrat	Substrat_P	Vaso-sableux	Vase
Austreberthe	Facies	TYPE	Alternance radier-mouille	Radier
Austreberthe	Facies	TYPE	Alternance radier-plat courant	Radier_plat_courant
Austreberthe	Facies	TYPE	Chenal lentique	Chenal_lent
Austreberthe	Facies	TYPE	Chenal lotique	Chenal_lot
Austreberthe	Facies	TYPE	Plat courant	Plat_courant
Austreberthe	Facies	TYPE	Plat lentique	Plat_lent
Austreberthe	Facies	TYPE	Radier	Radier
Austreberthe	Facies	TYPE	Rapides	Rapide
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Blocs	Blocs
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Cailloux	Cailloux
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Dalle	Substrat
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Gaviers	Graviers
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Graviers	Graviers
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Limons	Limons
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	NC	NC
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Non observable	NC
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Pierres	Pierres
Austreberthe	Substrat	GRANULO_DO	Sable	Sables
Eure	Facies	Facies_tot	NC	NC
Eure	Facies	Facies_tot	Busé	Souterrain
Eure	Facies	Facies_tot	Chenal lentique	Chenal_lent

Eure	Facies	Facies_tot	Lénitique	Eau_stagnante
Eure	Facies	Facies_tot	Plat courant	Plat_courant
Eure	Facies	Facies_tot	Radier	Radier
Eure	Facies	Facies_tot	Rapide	Rapide
Eure	Facies	Facies_tot	Alt profond courant-plat courant	Plat_courant
Eure	Facies	Facies_tot	Alt radier-plat courant	Radier_plat_courant
Eure	Facies	Facies_tot	Assec	Assec
Eure	Facies	Facies_tot	Plat lentique	Plat_lent
Eure	Facies	Facies_tot	Profond courant	Chenal_lot
Eure	Facies	Facies_tot	Profond lentique	Chenal_lent
Eure	Facies	Facies_tot	Stagnant	Eau_stagnante

Annexe 3: Projection des données linéaires substrat/faciès sur les polygones surface en eau de la BD TOPO



Annexe 4: Valeurs des limites des classes d'état pour les paramètres physico-chimiques généraux pour les cours d'eau

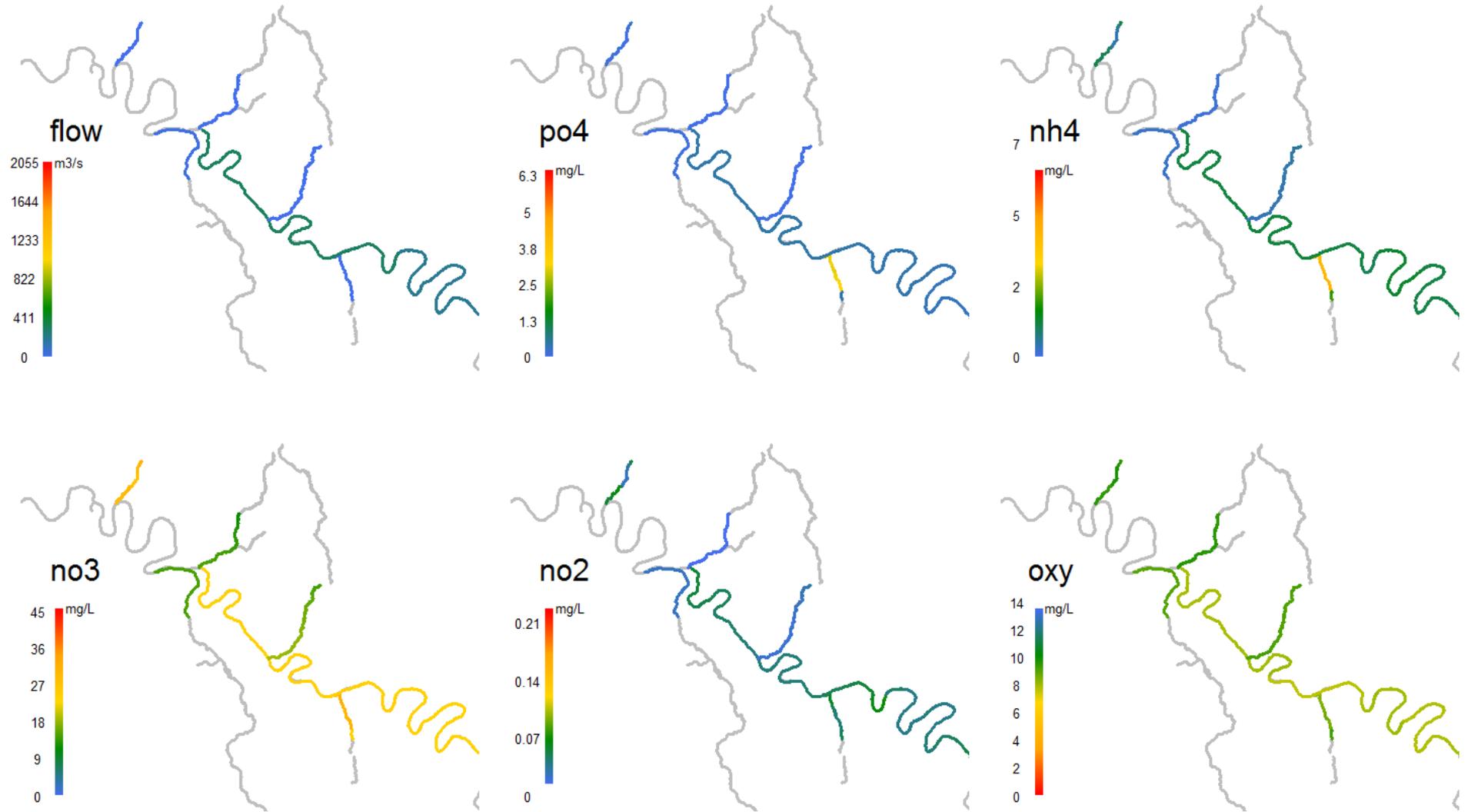
Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

Paramètres par élément de qualité (unités)	Code	Limites des classes d'état			
		Très bon/ Bon	Bon/ Moyen	Moyen/ Médiocre	Médiocre/ Mauvais
Bilan de l'oxygène 1					
Oxygène dissous (mg O ₂ / l)	1311	8	6	4	3
Taux de saturation en O ₂ dissous (%)	1312	90	70	50	30
DBO ₅ (mg O ₂ / l)	1313	3	6	10	25
Carbone organique dissous (mg C/ l)	1841	5	7	10	15
Température²					
Eaux salmonicoles	1301	20	21,5	25	28
Eaux cyprinicoles		24	25,5	27	28
Nutriments					
PO ₄₃ -(mg PO ₄₃ -/ l)	1433	0,1	0,5	1	2
Phosphore total (mg P/ l)	1350	0,05	0,2	0,5	1
NH ₄ + (mg NH ₄ +/ l)	1335	0,1	0,5	2	5
NO ₂ -(mg NO ₂ -/ l)	1339	0,1	0,3	0,5	1
NO ₃ -(mg NO ₃ -/ l)	1340	10	50	*	*
Acidification¹					
pH minimum	1302	6,5	6	5,5	4,5
pH maximum		8,2	9	9,5	10
Salinité					
Conductivité	1303	*	*	*	*
Chlorures	1337	*	*	*	*
Sulfates	1338	*	*	*	*
<p>1 Acidification : en d'autres termes, à titre d'exemple, pour la classe bon état, le pH min est compris entre 6,0 et 6,5 ; le pH max entre 9,0 et 8,2.2 Pour l'élément de qualité température, un paramètre supplémentaire « intermédiaire » non référencé ici est également utilisé. Pour ce dernier, il est recommandé d'utiliser les limites de classe du paramètre « salmonicoles ». * : les connaissances actuelles ne permettent pas de fixer des seuils fiables pour cette limite.</p>					

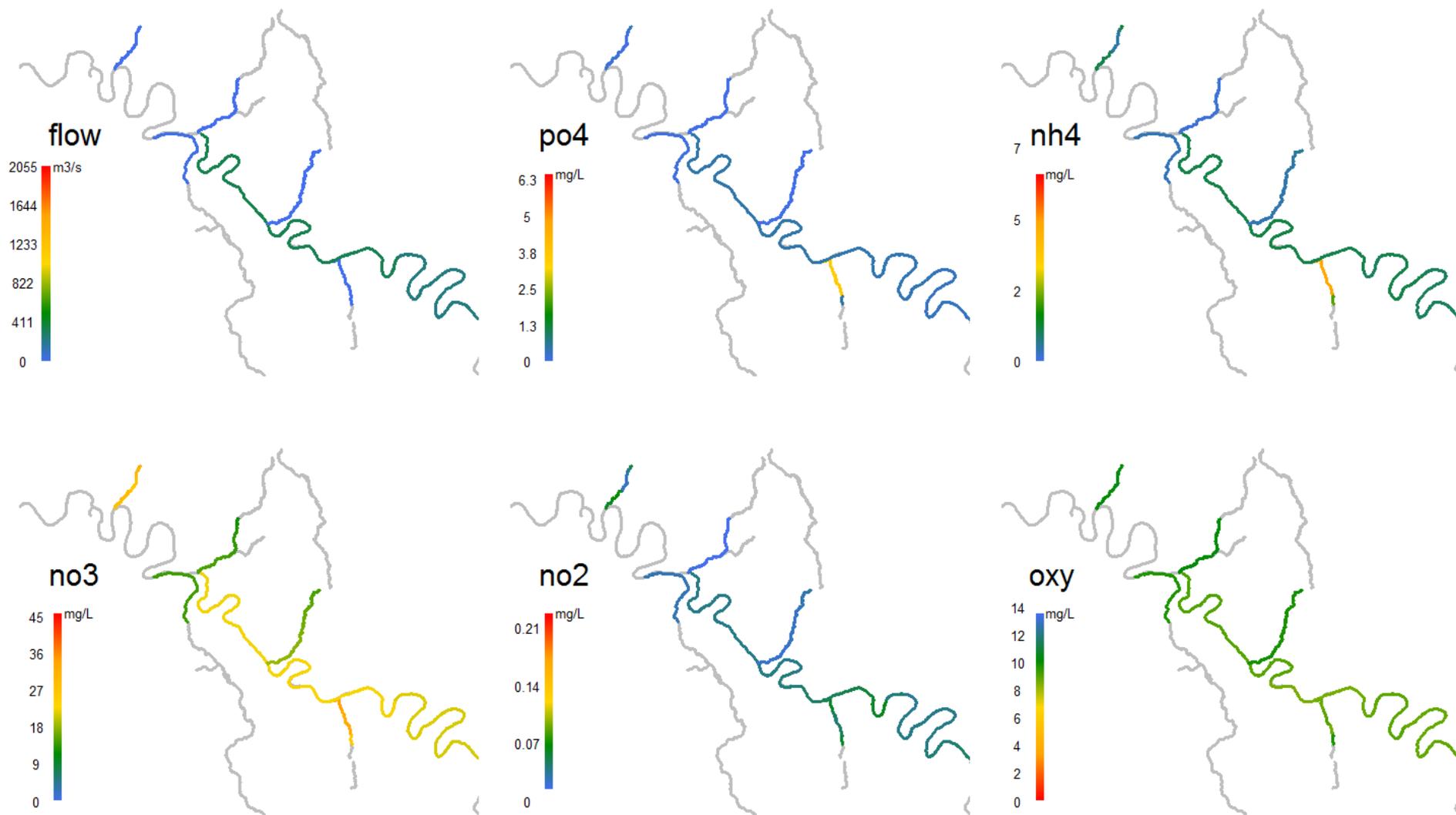
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037347756&categorieLien=id>

Annexe 5: Moyennes des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2016 pour les 6 périodes de migration
Les données sont issues du modèle Pynuts-RiverStrahler

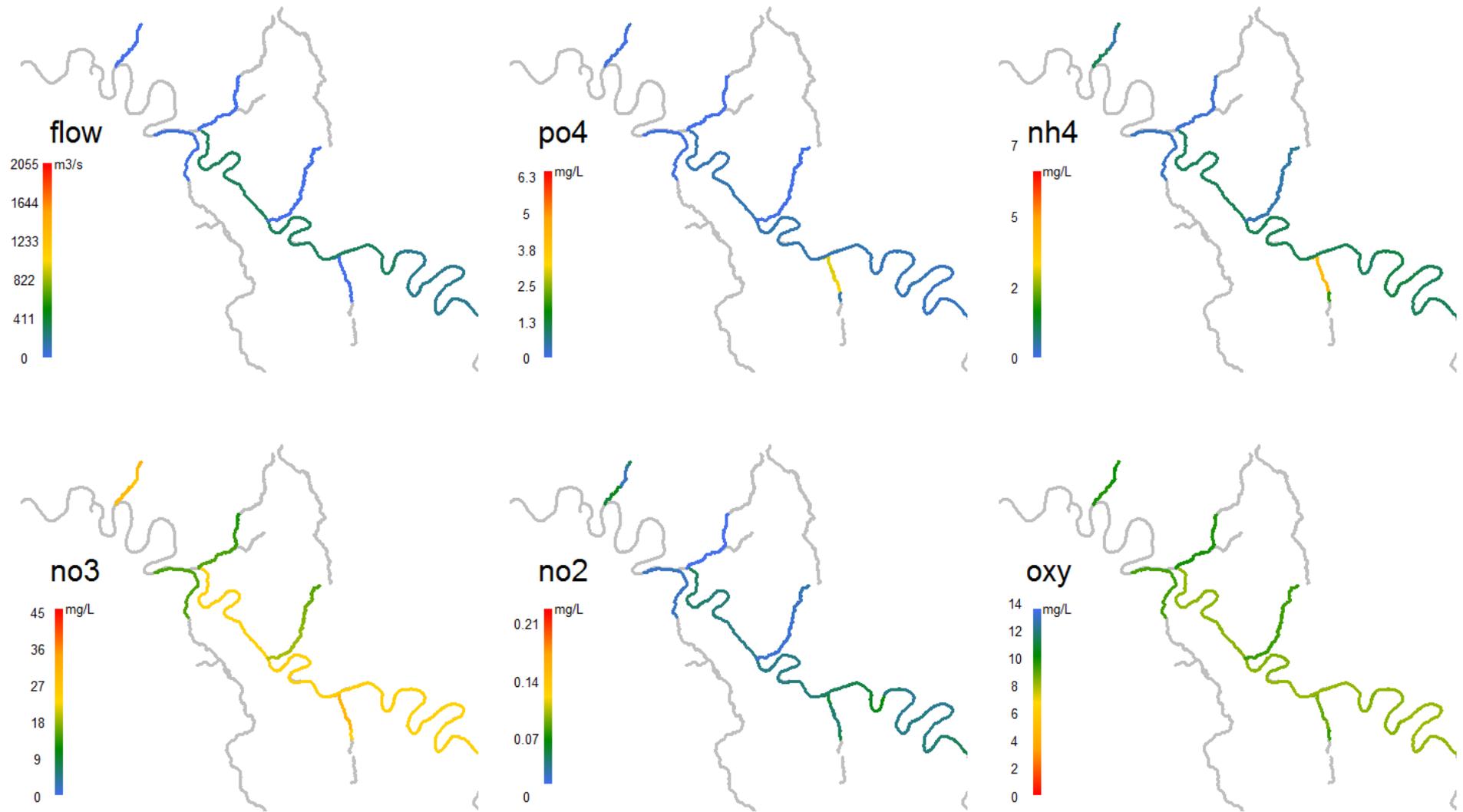
Moyennes 2010-2016 des mois de Juin-Juillet (TRM)



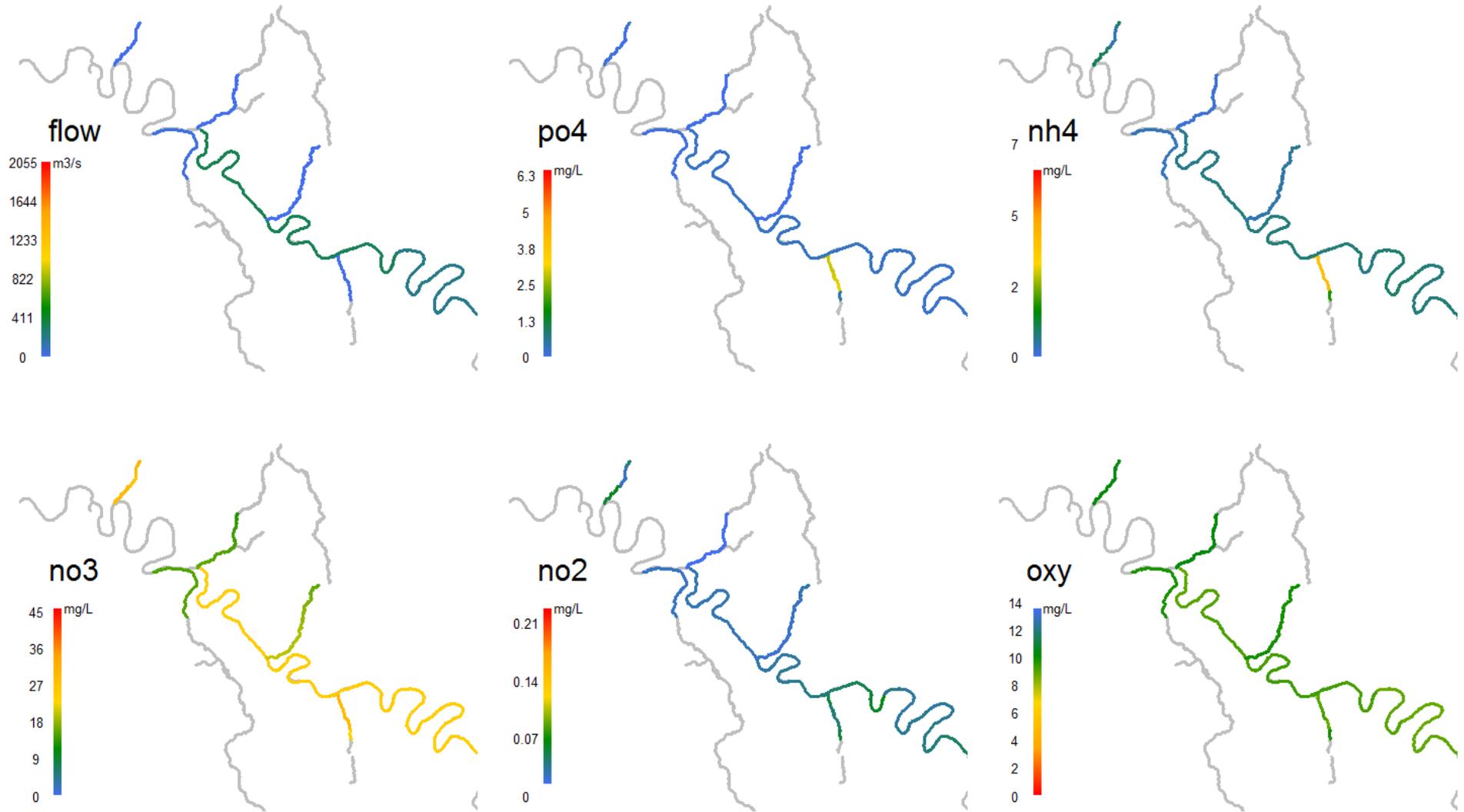
Moyennes 2010-2016 des mois de Septembre-Octobre (SAT)



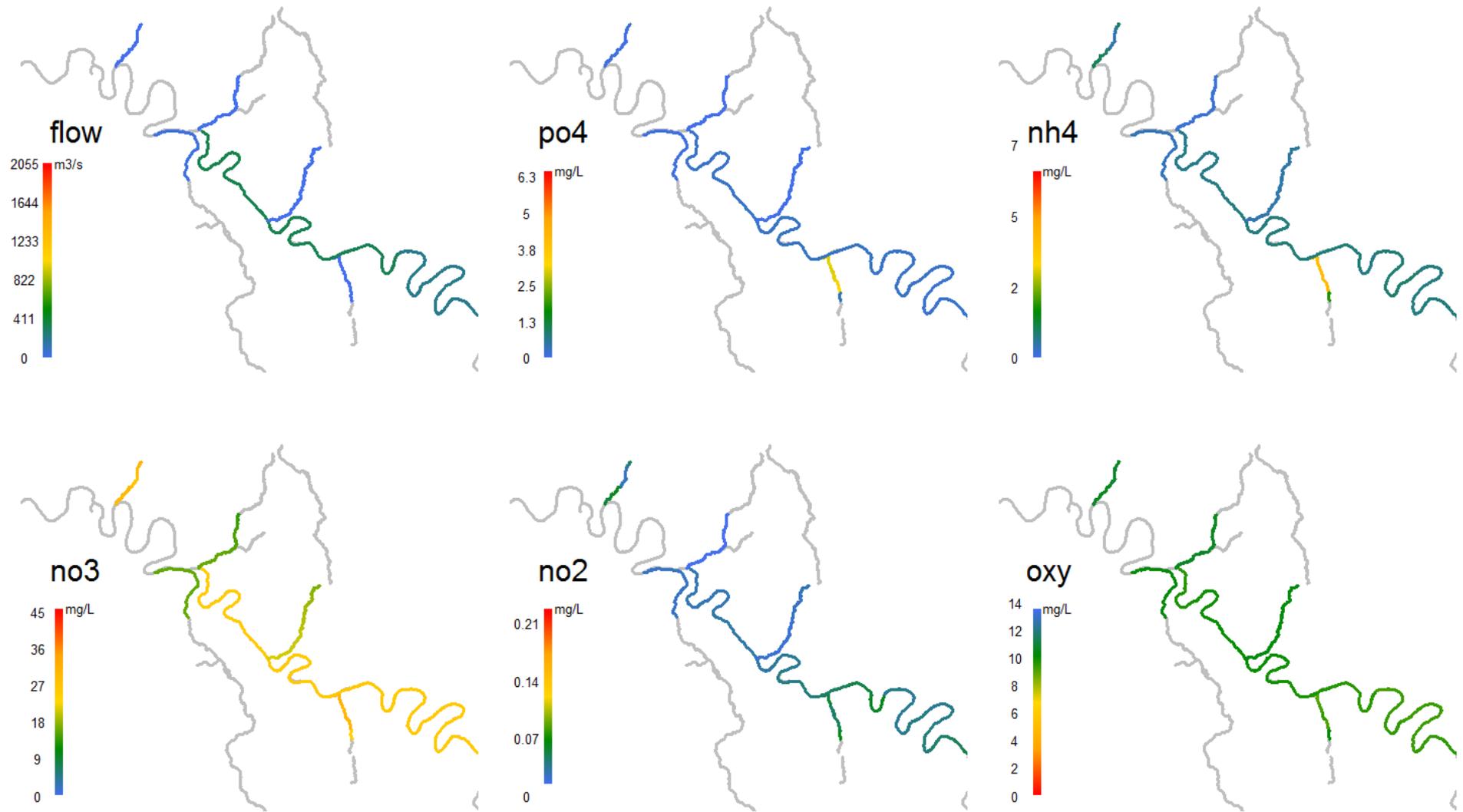
Moyennes 2010-2016 des mois de Mai-Juillet (SAT)



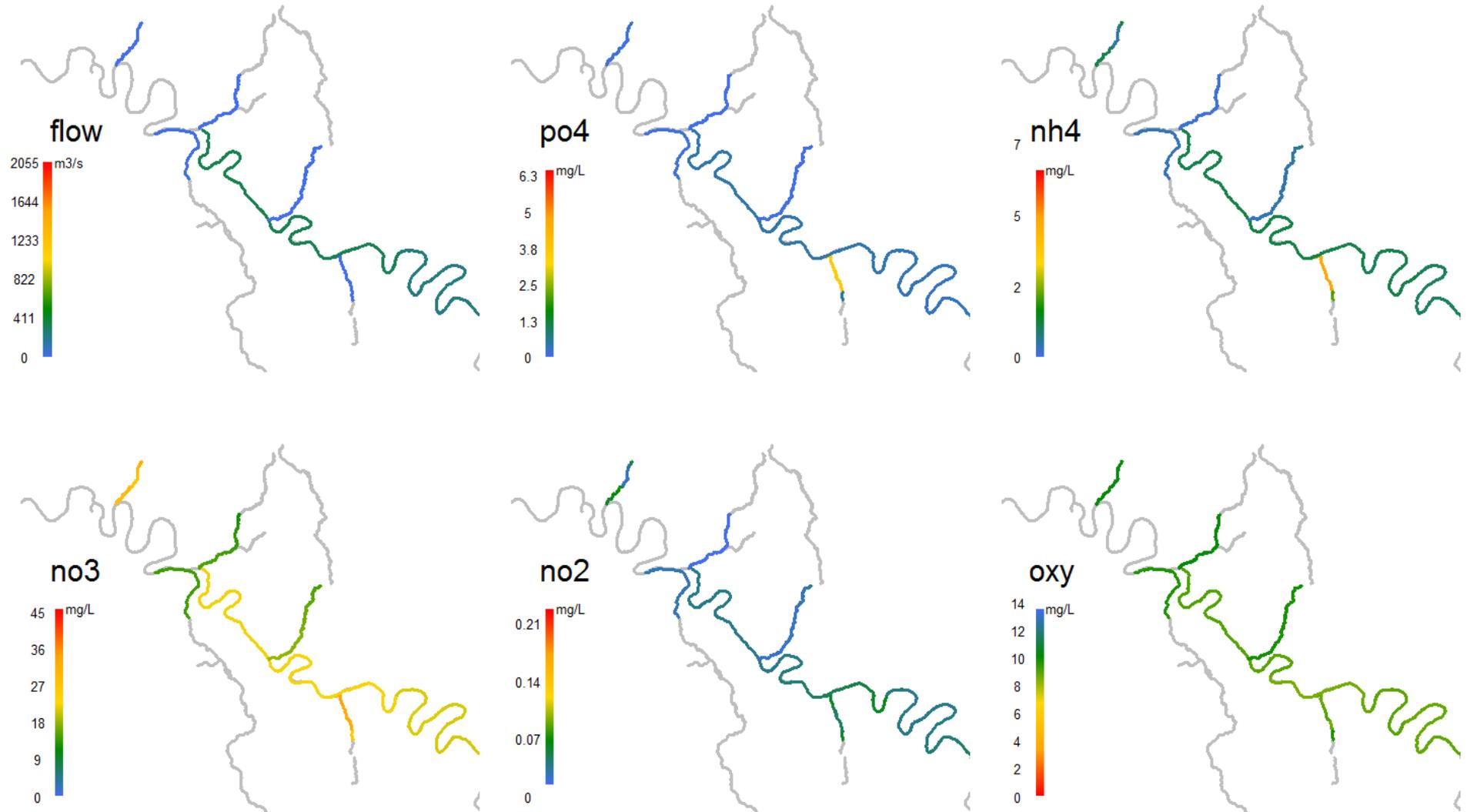
Moyennes 2010-2016 des mois de Mai (LPM)



Moyennes 2010-2016 des mois de Avril-Mai (ALA)



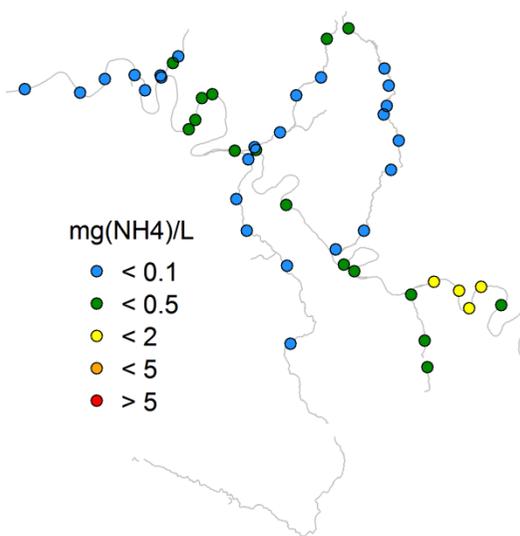
Moyennes 2010-2016 des mois de Septembre-Octobre (TRM)



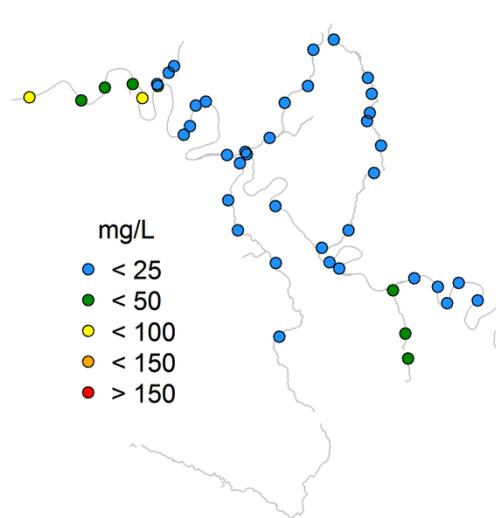
Annexe 6: Moyennes des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 pour les 6 périodes de migration
Les données sont issues de Naïades

Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - ALA_Avril_Mai

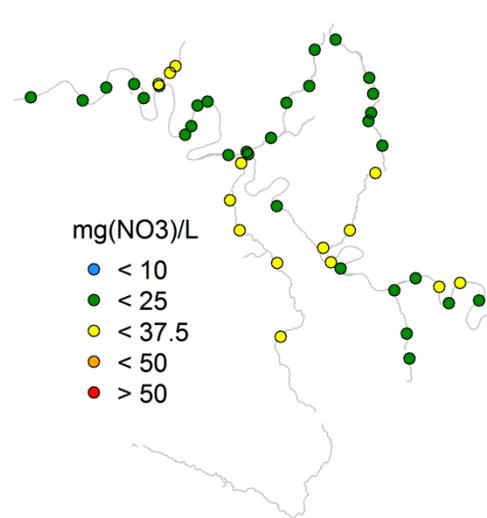
Ammonium



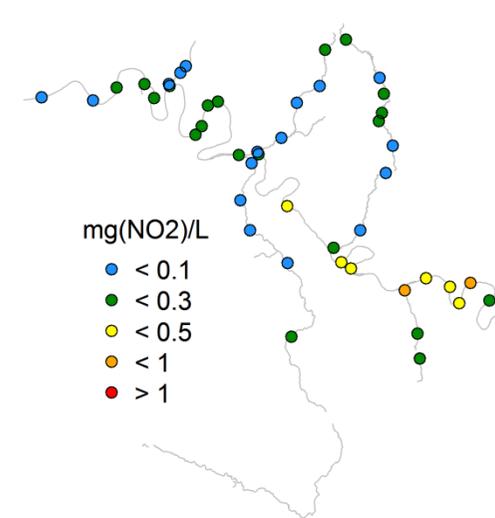
Matières en suspension



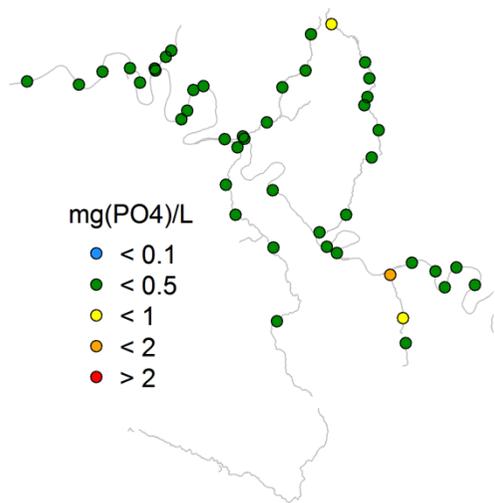
Nitrates



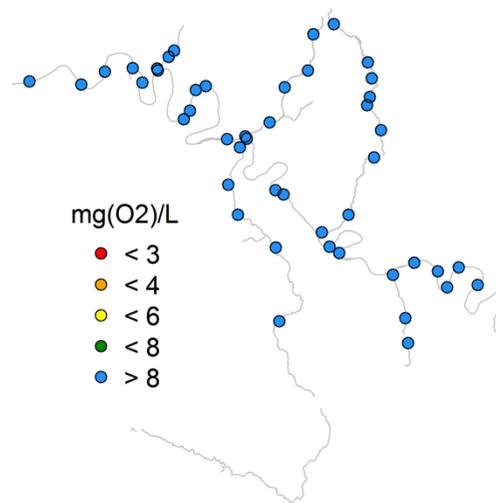
Nitrites



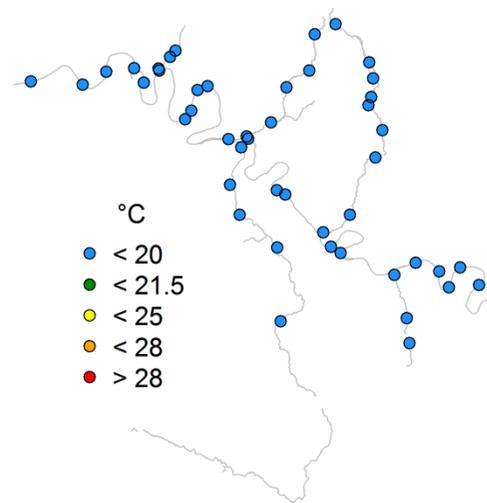
Orthophosphates



Oxygène dissous

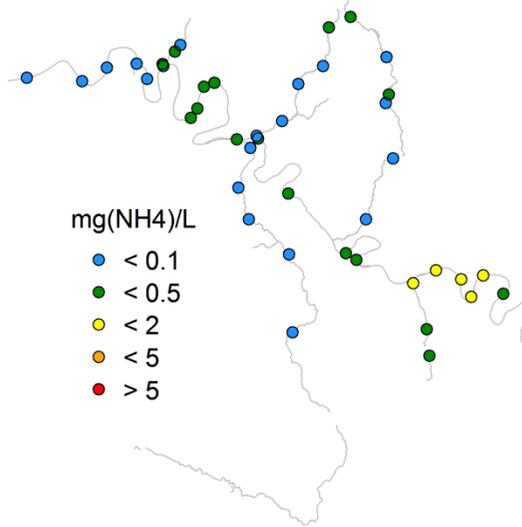


Température de l'Eau

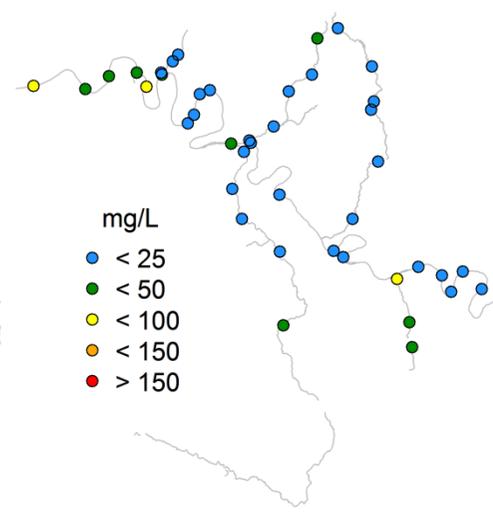


Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - LPM_Mai

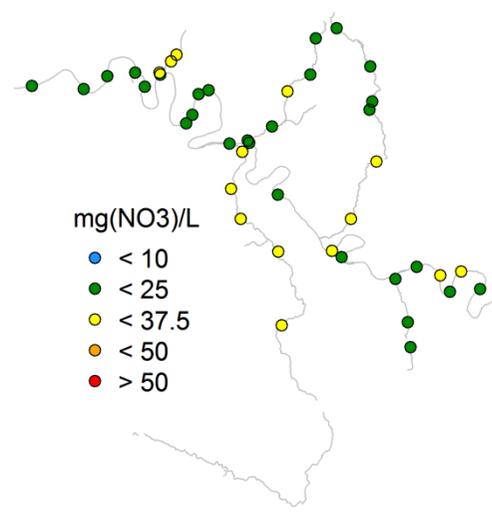
Ammonium



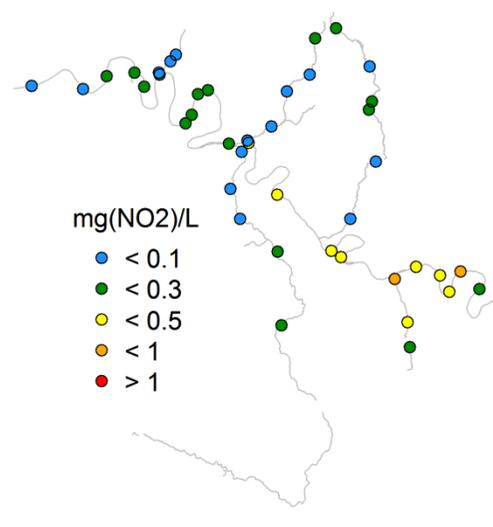
Matières en suspension



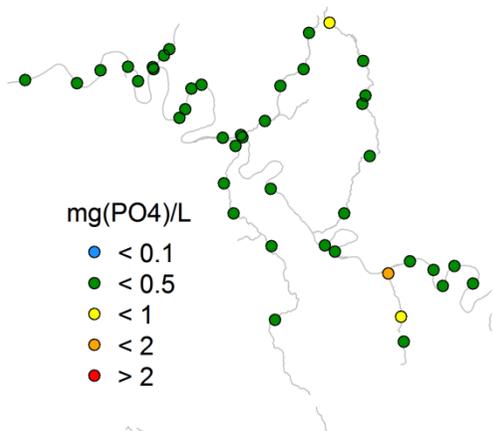
Nitrates



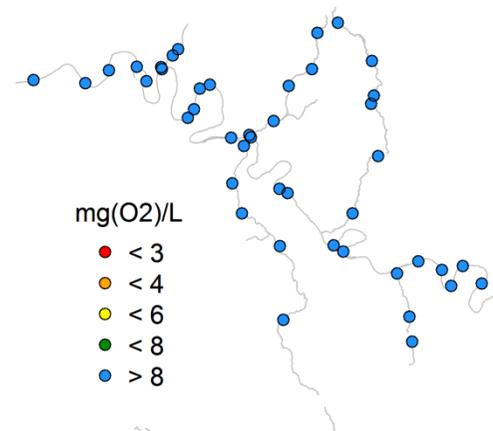
Nitrites



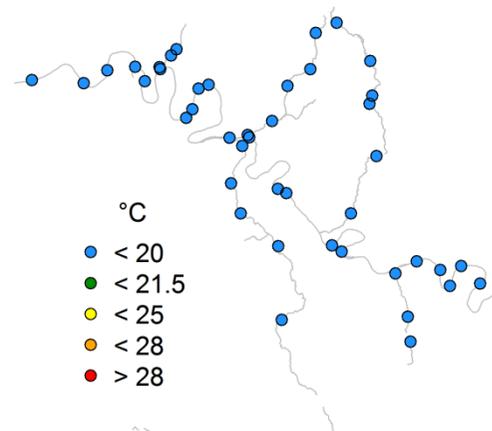
Orthophosphates



Oxygène dissous



Température de l'Eau



Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - SAT_Mai_Juin_Juil

Ammonium

Matières en suspension

Nitrates

Nitrites

mg(NH₄)/L

- < 0.1
- < 0.5
- < 2
- < 5
- > 5

mg/L

- < 25
- < 50
- < 100
- < 150
- > 150

mg(NO₃)/L

- < 10
- < 25
- < 37.5
- < 50
- > 50

mg(NO₂)/L

- < 0.1
- < 0.3
- < 0.5
- < 1
- > 1

Orthophosphates

Oxygène dissous

Température de l'Eau

mg(PO₄)/L

- < 0.1
- < 0.5
- < 1
- < 2
- > 2

mg(O₂)/L

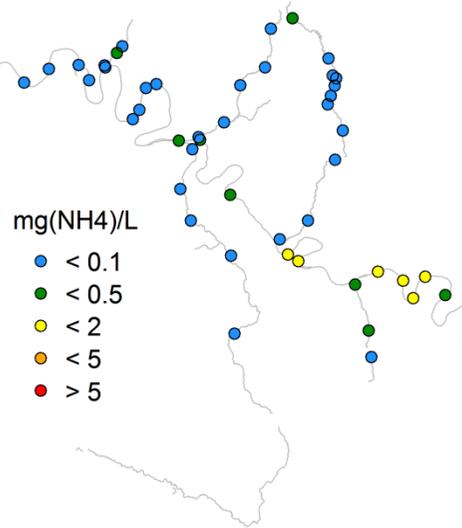
- < 3
- < 4
- < 6
- < 8
- > 8

°C

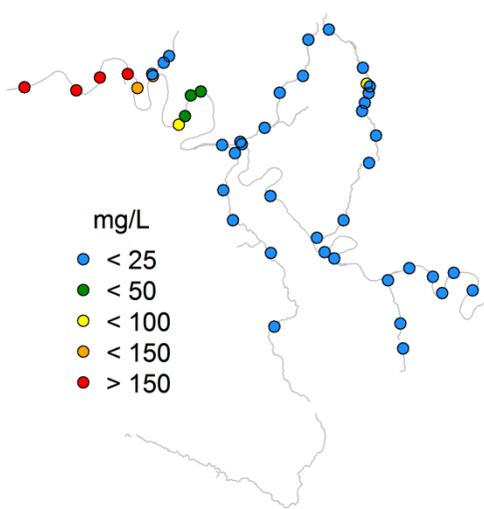
- < 20
- < 21.5
- < 25
- < 28
- > 28

Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - TRM_Sept_Oct

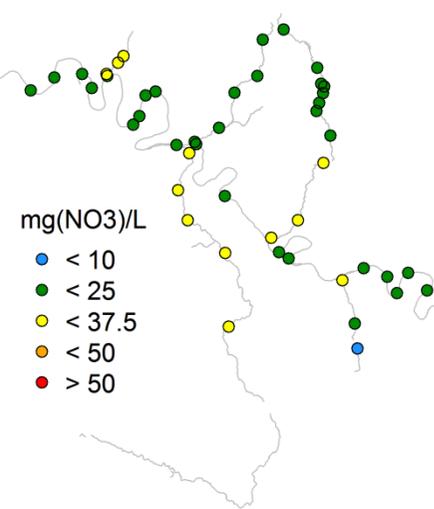
Ammonium



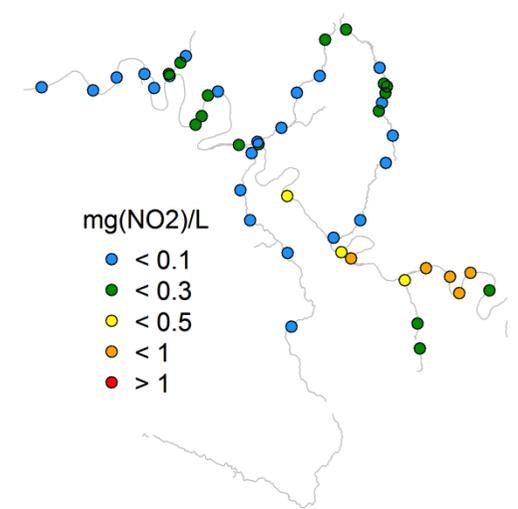
Matières en suspension



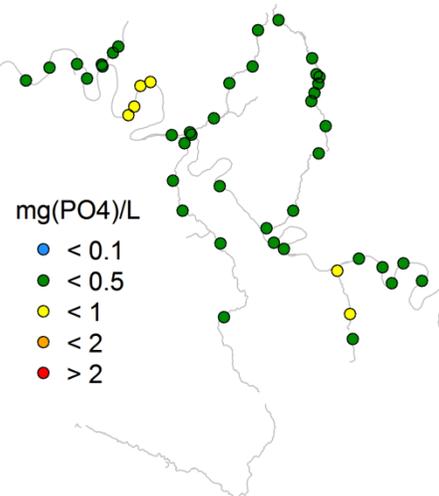
Nitrates



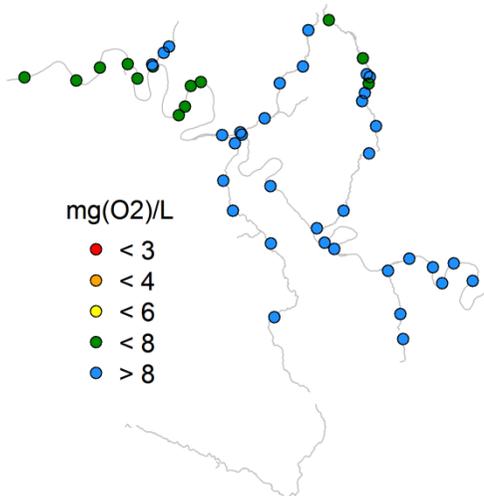
Nitrites



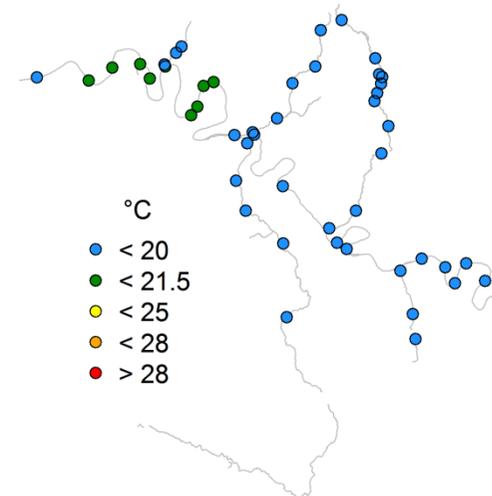
Orthophosphates



Oxygène dissous

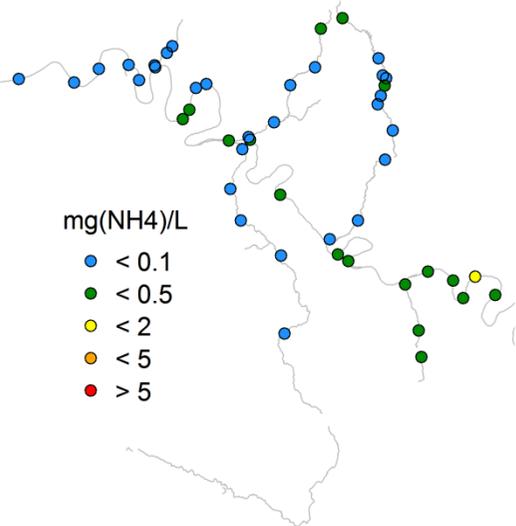


Température de l'Eau

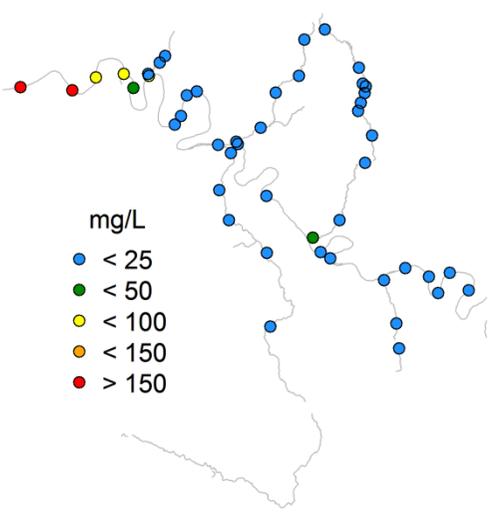


Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - TRM_Juin_Juil

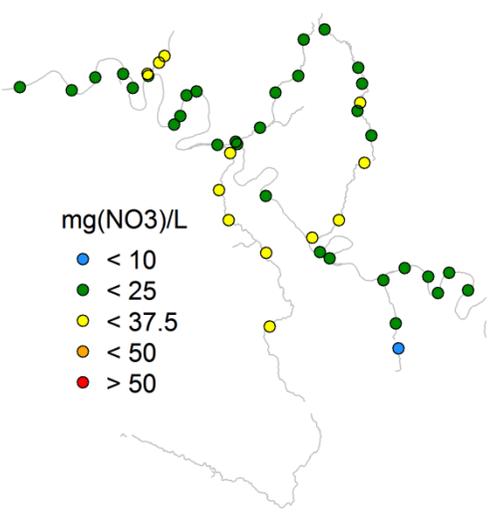
Ammonium



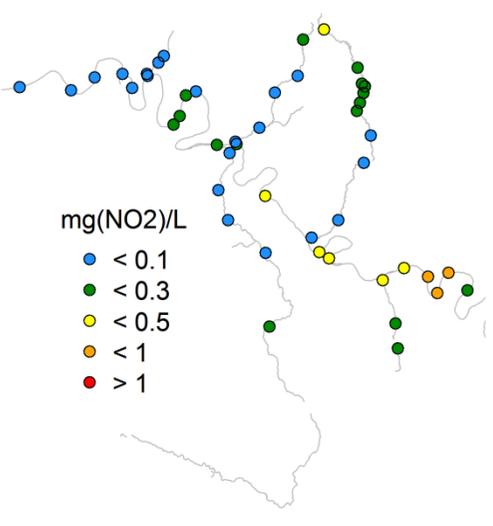
Matières en suspension



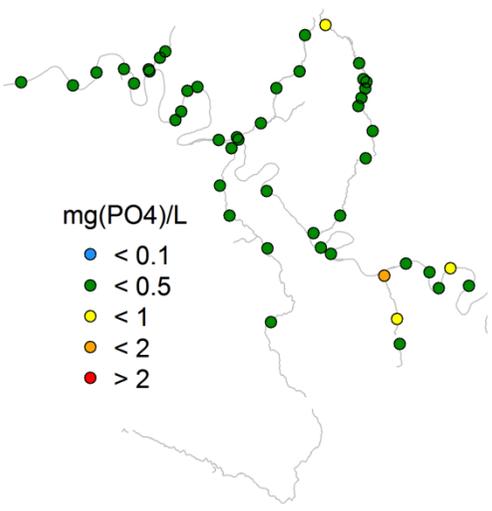
Nitrates



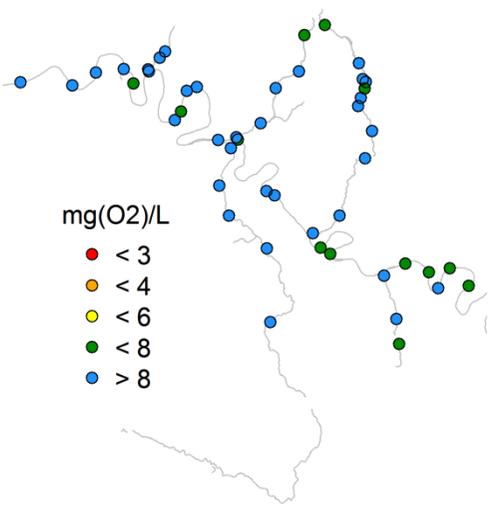
Nitrites



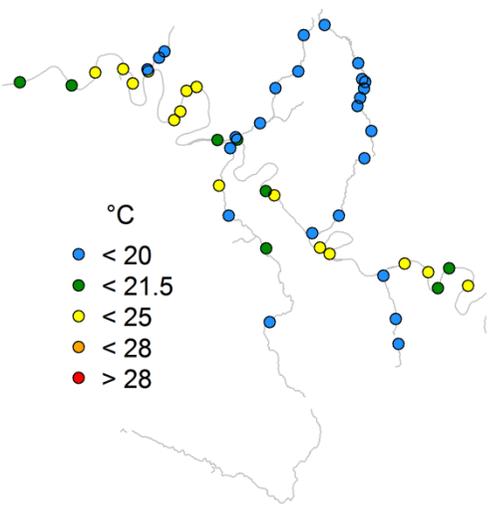
Orthophosphates



Oxygène dissous

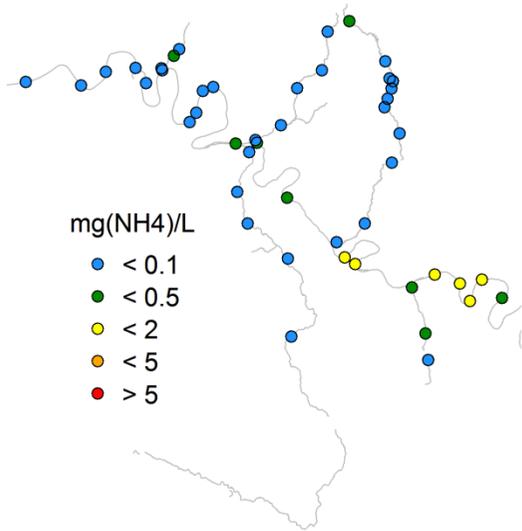


Température de l'Eau

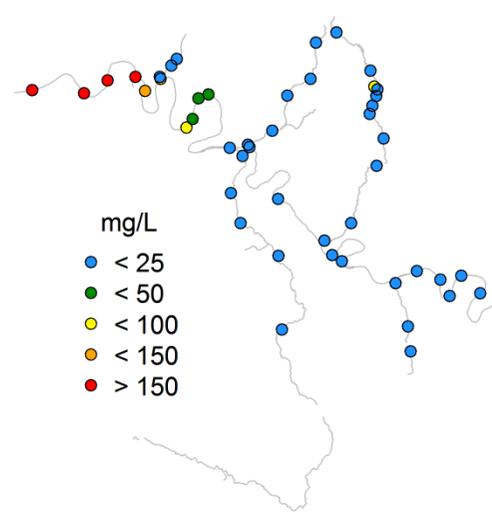


Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2010 à 2020 - SAT_Sep_Oct

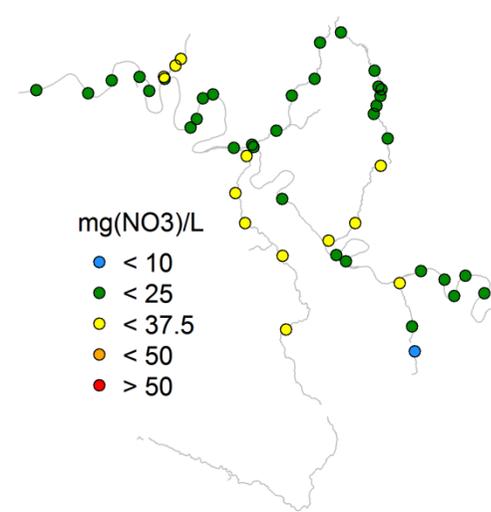
Ammonium



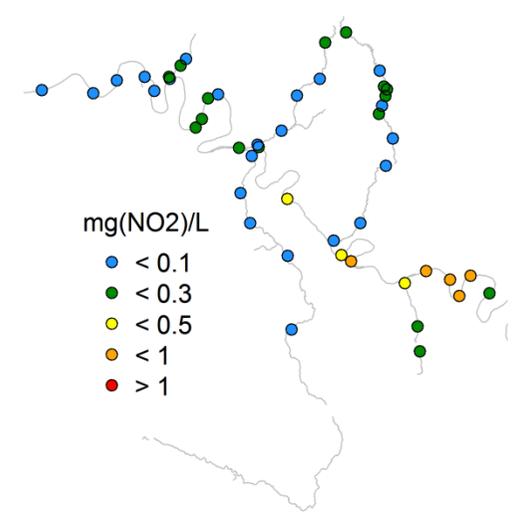
Matières en suspension



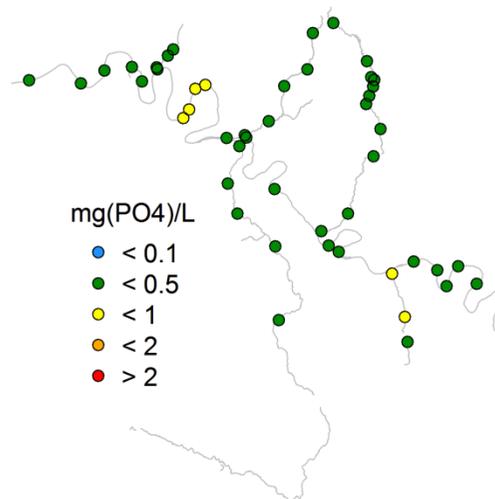
Nitrates



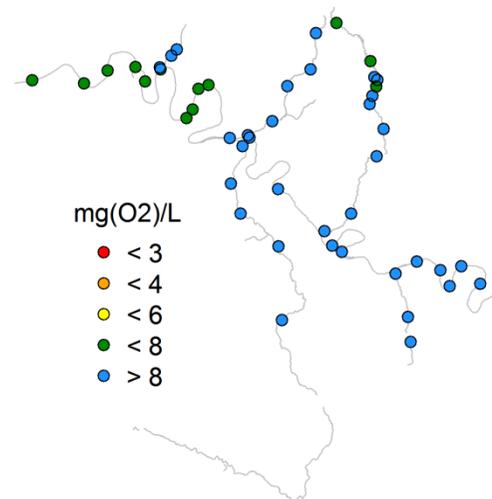
Nitrites



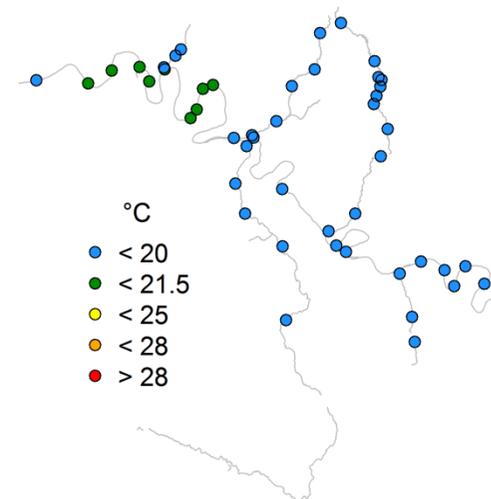
Orthophosphates



Oxygène dissous



Température de l'Eau





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

Merg M. et Le Pichon C., 2022. *Projet CONSACRE : Modélisation de la continuité écologique sur la Seine et ses affluents, Rapport technique final. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6 et de la Zone Atelier Seine*, 112 p.

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

