



**HAL**  
open science

# “ Riverscape ecology ” : une opportunité pour améliorer la préservation des peuplements de poissons

Céline Le Pichon

## ► To cite this version:

Céline Le Pichon. “ Riverscape ecology ” : une opportunité pour améliorer la préservation des peuplements de poissons. Biodiversité. Université Paris-Saclay, 2022. tel-03888073

**HAL Id: tel-03888073**

**<https://hal.inrae.fr/tel-03888073>**

Submitted on 7 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« Riverscape ecology » : une opportunité pour  
améliorer la préservation des peuplements de  
poissons



**Composition du jury**

**Teresa FERREIRA**

Professeur, Université de Lisbonne

Rapporteuse

**Michaël OVIDIO**

Professeur, Université de Liège

Rapporteur

**Yorick REYJOL**

Chef d'équipe à Patrinat (OFB-MNHN-CNRS)

Rapporteur

**Emmanuelle BAUDRY**

Professeur, Université Paris-Saclay

Présidente du jury

**Christine ARGILLIER**

Directrice de Recherche, INRAE

Examinatrice

**Jean-Marc ROUSSEL**

Directeur de Recherche, INRAE

Examineur



## Avant-propos

Arrivée à un certain nombre d'année de recherche, on pose forcément un regard rétrospectif sur son parcours, sur ses motivations initiales et comment elles ont évolué. Comme dans beaucoup de cas, cette évolution est le résultat de rencontres avec d'autres chercheurs qui ont orienté nos idées, qui ont discuté nos travaux, qui nous ont encouragé et fait confiance. Mais pas que. C'est le résultat d'un cheminement personnel, de lectures, de discussions avec des personnes de divers horizons et aussi d'expériences profondes avec la Nature. Un chercheur en écologie qui expérimente dans les milieux naturels, qui observe son « terrain » et la biodiversité qui s'y trouve affine ses sens et sa compréhension des écosystèmes. On a beau [laisser] croire que c'est l'objectivité qui guide tout sujet de recherche mais en réalité la lecture des processus observés est renvoyée par divers prismes : celui de la grande Histoire des idées scientifiques de son temps, de la formation initiale, des expériences de jeunesse, et celui de la *spiritualité* du chercheur (*au sens* de (Bourg 2018): réalité fondamentale et universelle des relations de l'humain avec son environnement naturel). Le premier aspect de cette spiritualité est le regard que chacun porte sur la nature et la façon de s'y projeter (Blondel 2020).

J'ai un émerveillement *englobant* de la Nature qui n'a fait que s'amplifier avec le temps. J'y ai toujours puisé une grande partie de mon énergie avec le sentiment d'appartenir à un tout. Cela doit s'approcher de ce qu'on nomme une conception de type « [sym]biosphère » ou de *l'hypothèse Gaïa* de James Lovelock (1970). J'ai commencé mes études supérieures dans un contexte de début de prise en compte des menaces sur la biodiversité avec le 3ème sommet de la Terre à Rio en 1992, la ratification des textes fondateurs sur le développement durable et la convention sur la diversité biologique (CDB). C'était aussi le début des études sur « l'effet de serre » avec le premier rapport d'évaluation du GIEC (1990), ayant abouti à ce même sommet, à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Dans ce contexte d'une actualité où la préservation de la biodiversité devient une « préoccupation commune à l'humanité », j'ai été marquée profondément par mes études universitaires, empreintes de théories de l'évolution, de stratégies d'adaptation des plantes et des animaux, de la compréhension des mécanismes complexes des écosystèmes et de leur évolution face aux pressions humaines. Ce mémoire est l'occasion de voir si j'ai suivi mon fil rouge initial, si ma recherche s'accorde à mes motivations personnelles. Ce qui est sûr, c'est que j'ai toujours aimé la recherche, que je reconnais la chance d'avoir pu faire ce métier et que je le classerais parmi les plus épanouissant à recommander aux étudiants !

## Remerciement

Il y a beaucoup de personnes que je souhaite remercier depuis mon arrivée à 25 ans au Cemagref/Irstea/INRAE. Tout d'abord, ceux qui m'ont fait confiance lors du concours d'Ingénieur d'Etudes au Cemagref de Nogent-sur-Vernisson, Michel Cazet mon premier chef d'Unité de Recherche forestière et Michel Verger de l'INRA d'Orléans qui m'appelait « son erreur de recrutement » ! Les deux Vincent, Bourlon et Breton qui ont accompagné mes premiers pas de forestière. Un immense et chaleureux merci à l'équipe d'hydro-écologie qui m'a accueillie en 1999 à Antony (et dans laquelle je suis toujours), Evelyne, Philippe et Guillaume, alors que j'arrivais en mobilité, ne connaissant presque rien aux milieux aquatiques... Quelle patience et quel soutien ils m'ont témoigné, en particulier lorsque je me suis engagée dans une thèse en formation continue. Merci à Claude Amoros de m'avoir encouragée à démarrer cette thèse et à Jacques Baudry d'avoir bien voulu tenter l'aventure du paysage « subaquatique » comme co-directeur de thèse. Et jusqu'à aujourd'hui, le soutien de toute l'équipe Hydro-Ecologie Fluviale m'a permis d'aller au bout de cette HDR, mille merci de m'avoir accompagnée et supportée ! Plutôt qu'une liste de nom, j'ai rassemblé quelques photos page suivante.

Je dois mon plongeon dans la télémétrie aux collègues de l'Irstea Bordeaux, merci à Frédérique, Eric, Julien, Thomas et Marie-Laure pour toutes ces expériences de suivi des comportements individuels des poissons, ouvrant la porte de l'écologie comportementale et du « behaviorscape » !! Ces études sur la Seine et son estuaire n'auraient pas pu avoir lieu sans un soutien fort du Groupement d'Intérêt Public Seine Aval : Nicolas, Stéphanie, Cédric, Manuel et Elise soyez en remerciés.

Merci à Hervé de m'avoir proposé de rejoindre le groupe « vers une nouvelle génération de modèles d'habitats » de la 63<sup>ème</sup> [CPCFQ](#) à Québec, point de départ d'une expérience enrichissante de collaboration France-Québec. Cela m'a donné la chance de co-encadrer la thèse d'Aline avec Marc et Frédéric de la direction de la Faune du Québec et de collaborer avec Normand, Mathieu et Steve à l'INRS. Merci à tous pour votre accueil si chaleureux à Québec un 1<sup>er</sup> mars 2015, où le -15°C posait les bases de 4 mois de mission scientifique et de vie à la québécoise avec mon fils de 7ans, qui lui se souvient d'avoir patiné à la descente de l'avion...

Enfin, je remercierai chaleureusement tout le groupe de « Riverscapers ! » pour le séminaire riche d'échanges en juin 2016 à Antony suivi de celui à Friday Harbor en 2017 et les cinq années d'écriture et de discussions qui m'ont inspiré pour ce manuscrit (page photo dédiée !).



MERCI  
à TOUS



# Table des matières

## Table des matières

<b>Préambule</b> .....	<b>10</b>
<b>Un préambule forestier formateur (1996-2000)</b> .....	<b>10</b>
Diffusion du matériel forestier amélioré par bouturage .....	10
Amélioration de la qualité morphologique et physiologique des plants forestiers .....	15
<b>Une reconversion thématique vers les milieux aquatiques : le plongeon vers l'invisible</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Contribution au développement d'une approche paysage aquatique opérationnelle</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Rendre perceptible l'habitat du poisson</b> .....	<b>23</b>
1.1.1 Un point de vue habitat « orienté cycle de vie », une prise en compte de la dynamique temporelle multi-échelle et de l'accessibilité chronologique .....	24
1.1.2 Une représentation cartographique spatialement explicite .....	28
<b>1.2 Une boîte à outil pour visualiser et analyser la disponibilité et l'accessibilité des habitats</b> ....	<b>30</b>
1.2.1 Configuration, fragmentation.....	30
1.2.2 Connectivité longitudinale et latérale .....	33
<b>1.3 Acquisition de données biologiques haute résolution</b> .....	<b>34</b>
1.3.1 Echantillonnage spatialement intensif des peuplements de poissons.....	34
1.3.2 Dynamique individuelle de mouvement et d'utilisation des habitats par télémétrie.....	37
<b>1.4 Conclusion du chapitre</b> .....	<b>39</b>
<b>2 Applications scientifiques : une meilleure compréhension des facteurs de distributions spatio-temporelles des espèces de poisson dans les cours d'eau</b> .....	<b>40</b>
<b>2.1 Dynamique et imprévisibilité des patrons de distribution d'habitats en contexte anthropique</b>	<b>40</b>
2.1.1 Disponibilité et relations spatiales des habitats.....	40
2.1.2 Connectivité des habitats .....	46
<b>2.2 Détection des patrons spatio-temporels de distribution des espèces</b> .....	<b>49</b>
2.2.1 Tendances dans les distributions longitudinales d'espèces .....	49
2.2.2 Variables environnementales locales et variables de contexte spatial .....	52
2.2.3 Mouvements, trajectoires individuelles et accessibilité des habitats .....	53
<b>2.3 Conclusion du chapitre</b> .....	<b>58</b>
<b>3 Établir un contexte spatial et temporel pour les actions de préservation et de restauration des milieux aquatiques et de leur diversité piscicole</b> .....	<b>59</b>

<b>3.1</b>	<b>Cibler les milieux prioritaires à préserver</b> .....	<b>59</b>
3.1.1	Préserver les milieux à forte potentialité d'accueil .....	59
3.1.2	Préserver les centres principaux d'activités .....	62
<b>3.2</b>	<b>Hiérarchiser les actions de restauration</b> .....	<b>63</b>
3.2.1	Mise en perspective historique et sociétale .....	63
3.2.2	Mise en perspective future : des scénarios prospectifs .....	65
<b>3.3</b>	<b>Conclusion du chapitre</b> .....	<b>66</b>
<b>4</b>	<b><i>Perspectives : De l'approche « paysage aquatique » à une écologie spatiale des cours d'eau ou «Riverscape Ecology»</i></b> .....	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Poursuivre la modélisation de la continuité écologique en intégrant des échelles adaptées aux enjeux actuels et futurs de préservation de la biodiversité.</b> .....	<b>67</b>
4.1.1	Combiner des modèles estuariers, axe fluviaux et affluents pour accompagner la dynamique de recolonisation des bassins versants par les migrateurs amphihalins.....	67
4.1.2	Elaborer des modèles de connectivité à l'échelle du bassin versant pour proposer des métriques qui enrichissent les modèles de biodiversité. ....	68
4.1.3	Modéliser l'accessibilité chronologique des habitats.....	68
<b>4.2</b>	<b>Renforcer la perspective « behaviorscape/fishscape »</b> .....	<b>69</b>
<b>4.3</b>	<b>Participer à la formalisation d'une « Riverscape Ecology »</b> .....	<b>70</b>
<b>5</b>	<b><i>Capacité à diriger des recherches</i></b> .....	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Bilan des publications</b> .....	<b>72</b>
<b>5.2</b>	<b>Encadrement, animation et financement de la recherche</b> .....	<b>74</b>
	Choisir et orienter.....	74
	Collaborer et animer .....	76
	<b><i>Références</i></b> .....	<b>78</b>
	<b><i>CV détaillé</i></b> .....	<b>92</b>
	<b>Formation initiale et parcours professionnel</b> .....	<b>92</b>
	<b>Expérience d'encadrement et de formation</b> .....	<b>93</b>
	<b>Activités administratives et d'intérêt collectif</b> .....	<b>96</b>
	<b>Publications</b> .....	<b>97</b>
	<b><i>Annexes</i></b> .....	<b>103</b>

## Liste des acronymes

### [format dans le texte]

AFOCEL : Association FOForêt-CELLulose

AFS : American Fisheries Society

AGU : American Geophysical Union

[Anacondha](#) : Analyse spatiale de la connectivité des d'habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire Seine (projet GIP Seine Aval, 2013-2017).

[CONSACRE](#) : Continuité écologique de la Seine et intérêt des acteurs pour sa restauration (projet Contrat de Plan Etat-Région Vallée de la Seine 2018-2022)

CPCFQ : Commission permanente de coopération France – Québec

[CPiER](#): Le Contrat de Plan Interrégional Vallée de la Seine 2015-2020

CRPF : Centre régional de la propriété forestière

CSP/Onema/AFB/OFB : Conseil Supérieur de la pêche devenu Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques devenu Agence Française de la Biodiversité puis Office Français de la Biodiversité.

DERF : Direction de l'Espace Rural et de la Forêt, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

DFA : Direction Faune Aquatique du MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs)

DIREN IDF : Direction Régionale de l'Environnement Ile-de-France, devenue Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

EDF : Electricité de France

[FCSA](#) : Fédération pour la Conservation du Saumon Atlantique, Canada Atlantique et Québec

FFN : Fond Forestier National

GIP Seine Aval : Groupement d'Intérêt Public Seine Aval

HCÉRES : Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur

[HYCAR](#) : Unité de Recherche INRAE - Hydrosystèmes Continentaux Anthropisés – Ressources, Risques, Restauration

IDF : Institut pour le Développement Forestier

INRA SAD Armorique : Institut National de de recherches Agronomique, Systèmes Agraires et Développement

INRS-CETE : Institut National de la Recherche Scientifique (Québec, Canada), Centre Eau Terre Environnement

[PIREN Seine](#) : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine

PNR Vallée de Chevreuse : Parc Naturel Régional Vallée de Chevreuse

REVE : Reconstruction des tactiques de vie de l'esturgeon européen *Acipenser sturio* : Focus sur l'utilisation des habitats estuariens et marins par les individus ré-introduits en Nouvelle-Aquitaine (projet Région Nouvelle Aquitaine et Agence de l'eau Adour Garonne, 2021-2023).

RFID : Radio Frequency Identification Distribution

SAGE : Schéma d'Aménagement et de gestion des eaux

[Thalassotok](#) : Colonisation et utilisation des habitats estuariens par les poissons migrateurs thalassotoques : approche comparative Seine-Gironde (projet GIP Seine Aval, 2008-2010)

USGS : United Service of Geological Survey

## *Synthèse des activités*

### **Préambule**

#### *Un préambule forestier formateur (1996-2000)*

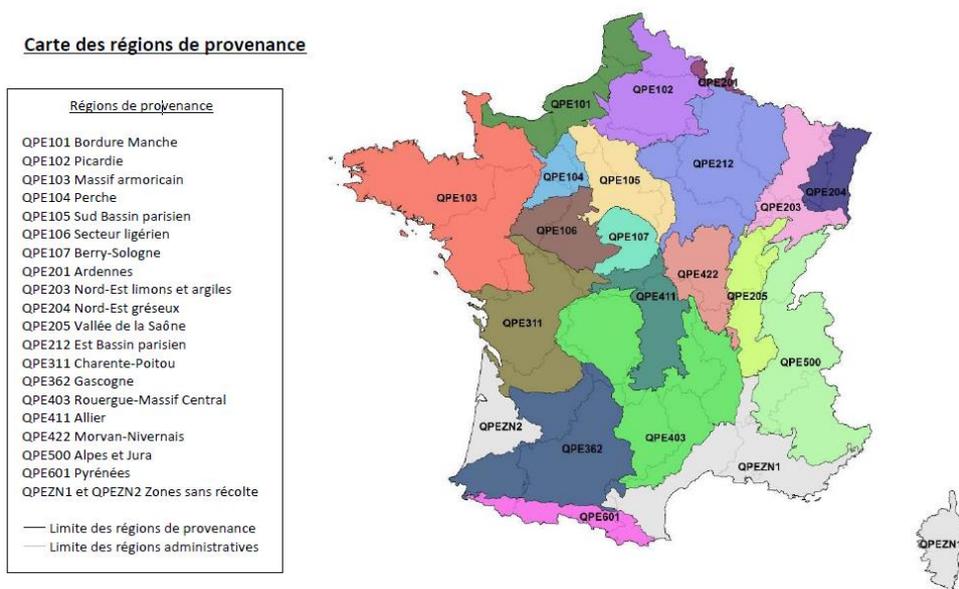
Recrutée au Cemagref (puis Irstea et aujourd'hui INRAE) comme ingénieure d'études sur un profil « Pépinière forestière » en mars 1996, j'ai contribué au programme "Création de peuplements forestiers". Ses objectifs étaient de mettre à disposition des reboiseurs des matériels forestiers conciliant les fonctions de production et de conservation de la diversité génétique, et fournir aux sylviculteurs des plants de qualité, permettant une reprise rapide de leur croissance et une résistance aux conditions climatiques. D'une part, pour diffuser des plants forestiers de variétés performantes aux meilleurs coûts, j'ai utilisé la multiplication végétative (bouturage) qui permet d'amplifier le nombre de plants produits pendant plusieurs années à partir d'un nombre réduit de plants issus de semis. Il s'agissait de fournir des itinéraires techniques optimisés pour produire des plants issus de boutures qui respectent les normes classiques de qualité des plants issus de semis et transférables aux pépiniéristes forestiers. D'autre part, des expérimentations ont été menées pour améliorer la qualité morphologique et physiologique des plants avant leur plantation en forêt (Chêne sessile et sapin de Douglas). En parallèle de ces expérimentations, j'ai assuré la gestion technique de la plateforme d'expérimentation forestière de l'Etat située dans le Limousin, en coordination avec la gestionnaire locale, Jacqueline Brando (DERF, Service Forêt Bois). Cette pépinière fournissait des plants pour le reboisement mais accueillait surtout annuellement une soixantaine d'expérimentations de divers organismes (Cemagref, INRA, AFOCEL, IDE, Universités). La décision de clôture de l'activité « pépinière forestière », liée aux réorientations du plan stratégique en 1998, a conduit ces problématiques vers la synthèse, le transfert et la valorisation.

#### *Diffusion du matériel forestier amélioré par bouturage*

Concernant la première problématique, mon activité a consisté (i) à terminer la mise au point d'itinéraires techniques fournissant des plants forestiers issus de boutures pour 3 espèces (Sapin de Douglas, Mélèze hybride et Chêne sessile) ; (ii) à évaluer la faisabilité de nos itinéraires par une estimation des coûts de production et (iii) à transférer les connaissances vers les acteurs de la filière graines et plants. Il s'agit d'optimiser globalement l'itinéraire de production de la bouture au plant final et non plus d'améliorer chaque étape individuellement. Pour nous aider dans cette démarche un outil de calcul a été développé pour simuler le coût de production d'un plant à partir de divers

choix et résultats techniques et aussi d'apprécier l'influence de certaines étapes dans le résultat final (Vergier *et al.* 2000).

Pour le Chêne sessile, le reboisement se fait sur le territoire métropolitain en respectant l'utilisation de provenances locales. Ainsi dans une région de provenance (Figure 0-1), on reboisera en priorité avec des plants issus de glands récoltés sur des peuplements préalablement sélectionnés par des experts. La diversité génétique est très élevée à l'intérieur des peuplements, la récolte de glands se fait sur de nombreux arbres pour protéger cette diversité et faire bénéficier les plantations du potentiel adaptatif. Certaines provenances ont des fructifications irrégulières, notamment dans le Nord-Est où elles ne surviennent que tous les 7-10 ans, ce qui oblige à utiliser d'autres régions de provenance moins adaptées. Pour éviter la perte de diversité génétique de ces provenances irrégulières, il a été proposé d'utiliser la multiplication végétative en vrac. Elle amplifie le nombre de plants produits pendant plusieurs années à partir de pieds mères issus de semis, conservant ainsi la diversité génétique initiale.



*Figure 0-1: Régions de provenance du chêne sessile. Département Santé des Forêts et Institut pour le développement Forestier, J.L. Flot, D. Piou, O. Baubet, B. Boutte, L.-M. Nageleisen, F.-X. Saintonge et C. Robin.*

Deux conventions de recherches successives avec l'ONF (Office National des Forêts, 1997-2000) avaient pour objectif de mettre au point un itinéraire technique transférable aux pépiniéristes privés. Des connaissances ont été acquises tout d'abord sur l'élevage des pieds-mères et sur le bouturage, en particulier les facteurs conditionnant l'enracinement des boutures, puis sur la croissance après l'enracinement, la survie hivernale des boutures enracinées et l'obtention de plants

de qualité (Figure 0-2) (Le Pichon & Bourlon 2000). Un schéma bilan de l'itinéraire technique optimisé est proposé (Figure 0-3).



---

*Figure 0-2 Plants issus des boutures enracinées dans l'ambiance à l'étouffée avec subirrigation*

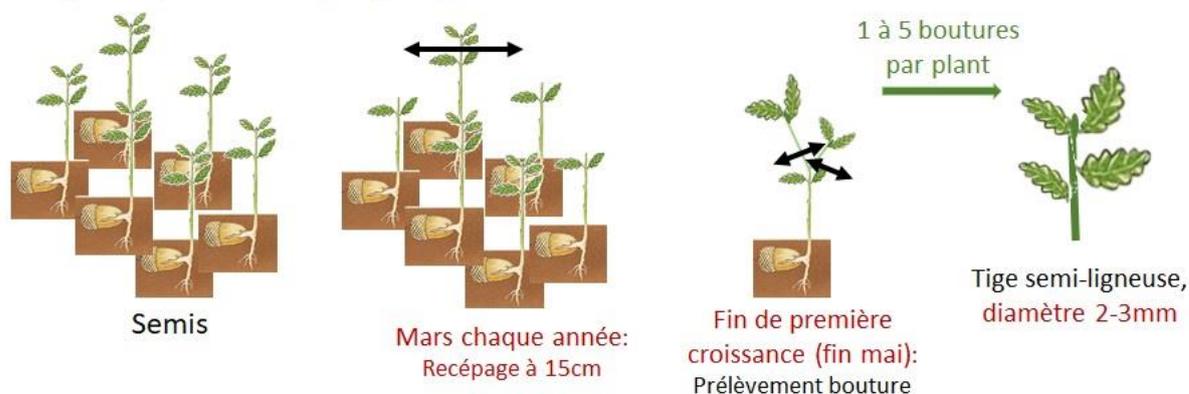
---

En parallèle, l'outil de calcul des coûts de production a été utilisé à l'occasion d'un stage d'ingénieur en horticulture (2<sup>ème</sup> année) et a permis d'apprécier quelles étapes de l'itinéraire de production jouaient le plus grand rôle dans le coût final du plant de chêne sessile (du Laurens d'Oiselay 1999). Il s'avère que de mauvais résultats techniques en fin d'itinéraire de production augmentent le coût final du plant. En pratique, on peut donc tolérer de faibles taux d'enracinement (25%) à partir du moment où presque toutes ces boutures enracinées donneront un plant forestier à l'automne suivant (taux de survie et taux de plants conformes aux normes forestières proches de 90%).

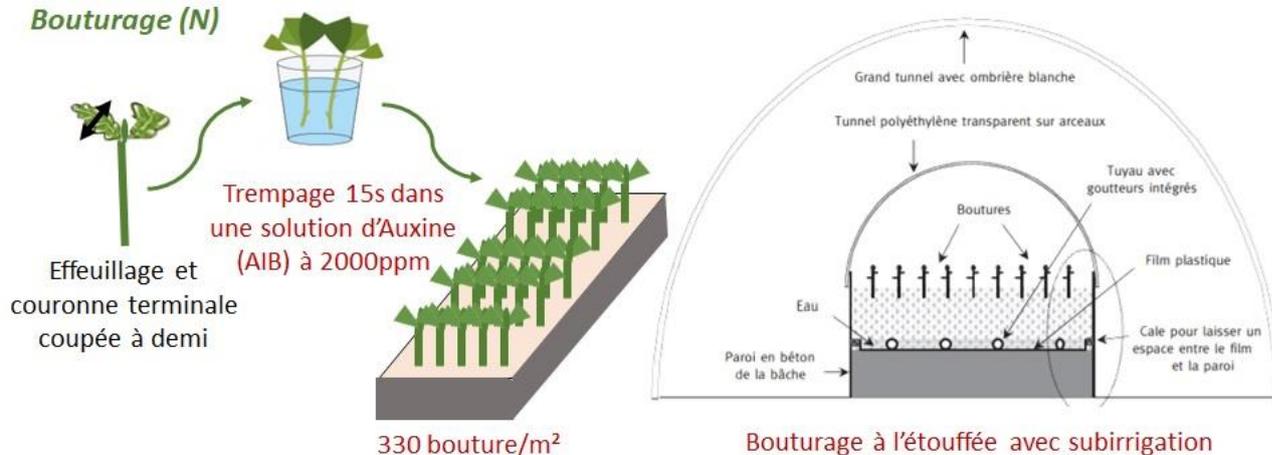
Pour le sapin de Douglas, le programme français d'amélioration génétique génère des sources de graines très performantes (familles de demi ou plein-frères) mais en quantité insuffisante pour être une source importante de matériel forestier de reboisement. La multiplication végétative en vrac permet de prendre le relais en amplifiant ces lots de graines élevées en pieds mères. Comme pour le chêne, nous avons mis au point un itinéraire technique rustique en collaboration avec Michel Verger de l'INRA d'Orléans, testé via des productions « pilotes » d'environ 20 000 boutures à la pépinière forestière expérimentale d'Etat (projet européen EUDIREC 1996-1999: *Towards a sustainable productive Douglas-fir forest of high quality raw materiel in Europe*, [FAIR950909](#)). Les taux d'enracinement sont de 60% mais l'enracinement correct tombe à 25% (nombre et longueur suffisantes des racines néoformées). Le taux de multiplication au final est de 47 (nombre de plants issus de bouture par pied mère) mais avec de fortes différences entre les familles sélectionnées. L'évaluation des coûts de production indique un plant 5 fois plus cher que ceux issus de semis, qui

ne peut se justifier que pour ces familles « élites » de Douglas. Un article de synthèse sur l'élevage des pieds-mères a été publié (Verger *et al.* 1998).

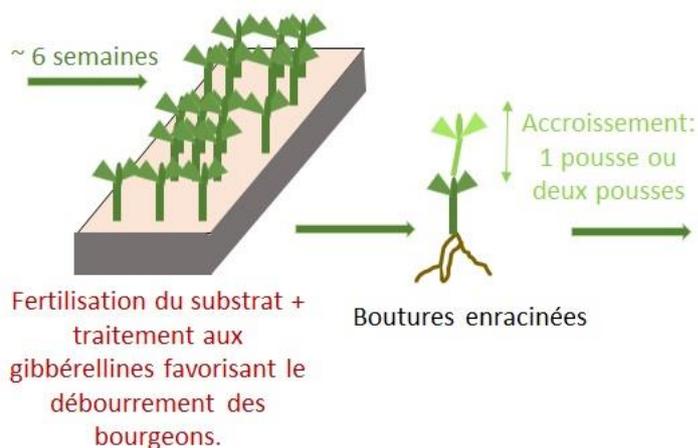
### Elevage des pieds mères (N-2, N-3)



### Bouturage (N)



### Elevage et sevrage des boutures (N-N+1)



### Repiquage en pépinière (mars N+1)

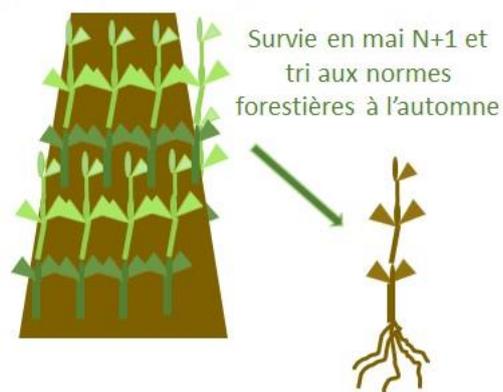


Figure 0-3 Schéma de synthèse de l'itinéraire technique pour amplifier les semis de chêne sessile par multiplication végétative en vrac.

Pour le Mélèze hybride, ce sont des familles sélectionnées de pleins frères issues d'une hybridation naturelle entre le Mélèze d'Europe (*Larix decidua*) et le Mélèze du Japon (*Larix kaempferi*) qui sont utilisées pour le reboisement. Grâce aux résultats d'une thèse sur les déterminants de l'enracinement des boutures de Mélèze hybride (Pellicer 1997), l'ambiance de bouturage avec irrigation par capillarité a été optimisée pour cette espèce. L'ensemble de l'itinéraire technique permettant d'obtenir des plants de bonne qualité a été étudié dans le cadre du projet européen *Toward a European larch wood chain 1998-2002* ([FAIR 5CT98-3354](#)). Nous avons constaté en particulier que la symétrie du système racinaire à la fin de la phase d'enracinement joue un rôle important sur la survie, la hauteur et le pourcentage de plants commercialisables en fin d'élevage. Les itinéraires optimaux obtenus ont été décrits dans un article et un chapitre d'ouvrage sur le mélèze (Le Pichon & Verger 2001; Verger & Le Pichon 2001 ) et quelques photos illustratives des étapes principales sont présentées (Figure 0-4).



*Figure 0-4 Illustration de l'itinéraire technique pour amplifier les semis de mélèze hybride par multiplication végétative en vrac. 1) Elevage des familles de pleins frères en pépinière de plein champs. 2) Boutures préparées avant insertion en ambiance de bouturage. 3) Bouture enracinée avec croissance. 4) Elevage en pépinière des boutures enracinées.*

Afin de préparer le transfert à la profession, 1000 boutures enracinées ont été confiées pour un élevage d'un an à divers pépiniéristes privés et les coûts de production de cette technique ont été évalués (Le Bouler *et al.* 1998). Le suivi en forêt des plants issus de boutures a été mise en place à travers un réseau de plantations forestières expérimentales installées par l'INRA et l'ONF en 1999. Dans une optique de valorisation, pour faire connaître le mélèze hybride et en particulier celui issu de multiplication végétative auprès des divers acteurs de la filière, des Journées d'informations « Mélèze » ont été organisées en septembre 1999 avec l'aide de l'INRA, du CRPF, de l'IDF et du Syndicat des pépiniéristes forestiers. L'ensemble des articles ont été publiés par l'IDF sous forme d'un ouvrage de synthèse « Le mélèze » (Riou-Nivert *et al.* 2001).

#### *Amélioration de la qualité morphologique et physiologique des plants forestiers*

Mes travaux ont porté sur l'amélioration de la qualité morphologique et physiologique des glands et plants de chêne et sur l'amélioration des techniques de pépinière pour produire des plants de sapin de Douglas. Les taux de reprise et de croissance après plantation en forêt dépendent des potentialités de régénération et de croissance des racines. Les études sur le chêne sessile ont été réalisés en 1998 dans le cadre d'une convention de recherche avec la DERF puis relayée en 1999 par l'ONF. Il s'agissait de mieux comprendre les étapes de germination, en relation avec le mode de conservation des glands, et l'effet sur la morphologie de la tige du plant de chêne. Le service graines et plants de l'ONF souhaitant pouvoir mieux gérer leurs lots de semences, j'ai proposé un nouveau test de germination des glands et une mesure rapide de leur viabilité. Le test de germination débutant à 16°C puis à 20°C permet une sortie correcte de la tige et évite une grande partie du défaut « tige multiples » constaté à 20°C constant (Guibert & Le Pichon 2001). En parallèle, une mesure de drainage ionique obtenue à partir des axes embryonnaires des glands s'est avérée pertinente pour prédire leur capacité à donner un plant (la levée). Cette mesure rapide (24h) est corrélée avec le taux de levée après 8 semaines, donnant une estimation de la viabilité du lot de glands (Le Pichon & Guibert 2001).

Les études de l'amélioration des itinéraires de production du sapin de Douglas en pépinière ont consisté à évaluer une technique alternative au repiquage des plants d'un an. Ce repiquage favorise la croissance en diamètre et la division des racines mais augmente le taux de déformations racinaires (10-20%). Cette technique alternative, le cernage, utilisée dans les pays anglo-saxons, consiste à réaliser un semis de précision puis à passer une lame horizontale tranchante dans le sol pour couper les racines, favorisant la ramification du système racinaire. Le meilleur itinéraire technique, testé à la pépinière sableuse Naudet (Préchac), est l'élevage à 80 plants/m<sup>2</sup> avec un

cernage en seconde année associé à un soulèvement. Il permet de fournir des plants de morphologie conforme aux normes de qualité du FFN. Nos études ont ensuite montré que les plants cernés ont un comportement après plantation, et avec ou sans stress hydrique, tout à fait comparable à celui des plants repiqués (Le Pichon 1998).

Ces premières années ont été très formatrices de plusieurs points de vue. J'ai collaboré à plusieurs projets européens tout en participant à la gestion technique de la plateforme d'expérimentation forestière de l'Etat. Ce grand écart m'a appris l'autonomie et la capacité à travailler avec diverses catégories de personnels techniques et scientifiques, ce qui s'est avéré très enrichissant.

## Une reconversion thématique vers les milieux aquatiques : le plongeon vers l'invisible

La clôture des activités de l'équipe *Pépinière forestière*, suite à des choix de réorientations stratégiques de notre département de recherche, m'a conduit à envisager une mobilité interne. En novembre 1999, j'ai fait le choix de rejoindre l'équipe d'hydro-écologie de l'unité *Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques* à Antony. Ce passage du milieu terrestre au milieu aquatique et des végétaux aux animaux a été une rupture importante après seulement quelques années de carrière. Il a nécessité un travail d'acquisition de connaissances scientifiques, techniques et de terrain (pêche électrique, reconnaissance des poissons d'eau douce, alevins et adultes, permis bateau fluvial, géomatique, etc.), ainsi qu'un changement complet des interlocuteurs scientifiques et techniques. En parallèle de l'acquisition de connaissances sur la biodiversité piscicole des cours d'eau dans les bassins versants fortement anthropisés, je me suis impliquée dans les travaux en cours de l'équipe. J'ai participé à l'étude de faisabilité pour reconnecter un méandre de la Seine (La grande bosse en Seine et Marne) au chenal navigué dans le cadre de la restauration fonctionnelle de la connectivité latérale du fleuve. C'était une première expérience de modélisation de l'habitat piscicole et de suivi scientifique du peuplement de jeunes poissons de l'année par pêche électrique. Maintenir la connectivité fonctionnelle entre les habitats de vie et de reproduction des espèces résidentes est un enjeu important dans la partie aménagée de la plaine alluviale de la Seine. Un objectif opérationnel était d'accompagner cet enjeu en proposant des outils et méthodes définissant les secteurs où des habitats vitaux doivent être préservés ou restaurés.

Pour appréhender ces questions de connectivité des habitats à des échelles spatiales pertinentes selon les phases du cycle de vie, il m'est apparu pertinent d'utiliser les concepts et outils de l'écologie du paysage (Burel & Baudry 1999), notamment le concept de dynamiques de taches d'habitats « patch dynamics » (Pickett & White 1985) et son application dans les milieux d'eau courante (Pringle *et al.* 1988). Ce concept de dynamique des taches a été appliqué dans les eaux courantes (Townsend 1989) permettant de considérer l'hétérogénéité du milieu non plus comme du « bruit » mais comme un facteur écologique crucial (Fausch *et al.* 2002). Sur la base du concept de « Hierarchical Patch Dynamics » (Wu & Loucks 1995), concevant l'hydrosystème comme un système emboîté (hiérarchique) de taches dynamiques (Figure 0-5), Schlosser propose un 'dynamic landscape model of stream life history' (Schlosser 1991a; Schlosser 1995) qui intègre les caractéristiques spatio-temporelles du mouvement des animaux à différentes échelles pour mieux prendre en compte l'ensemble de leur cycle de vie. L'article publié avec Angermeier (Schlosser &

Angermeier 1995) résonnait d'autant plus pour moi qu'il faisait le lien avec les problématiques de préservation et de gestion des populations piscicoles.

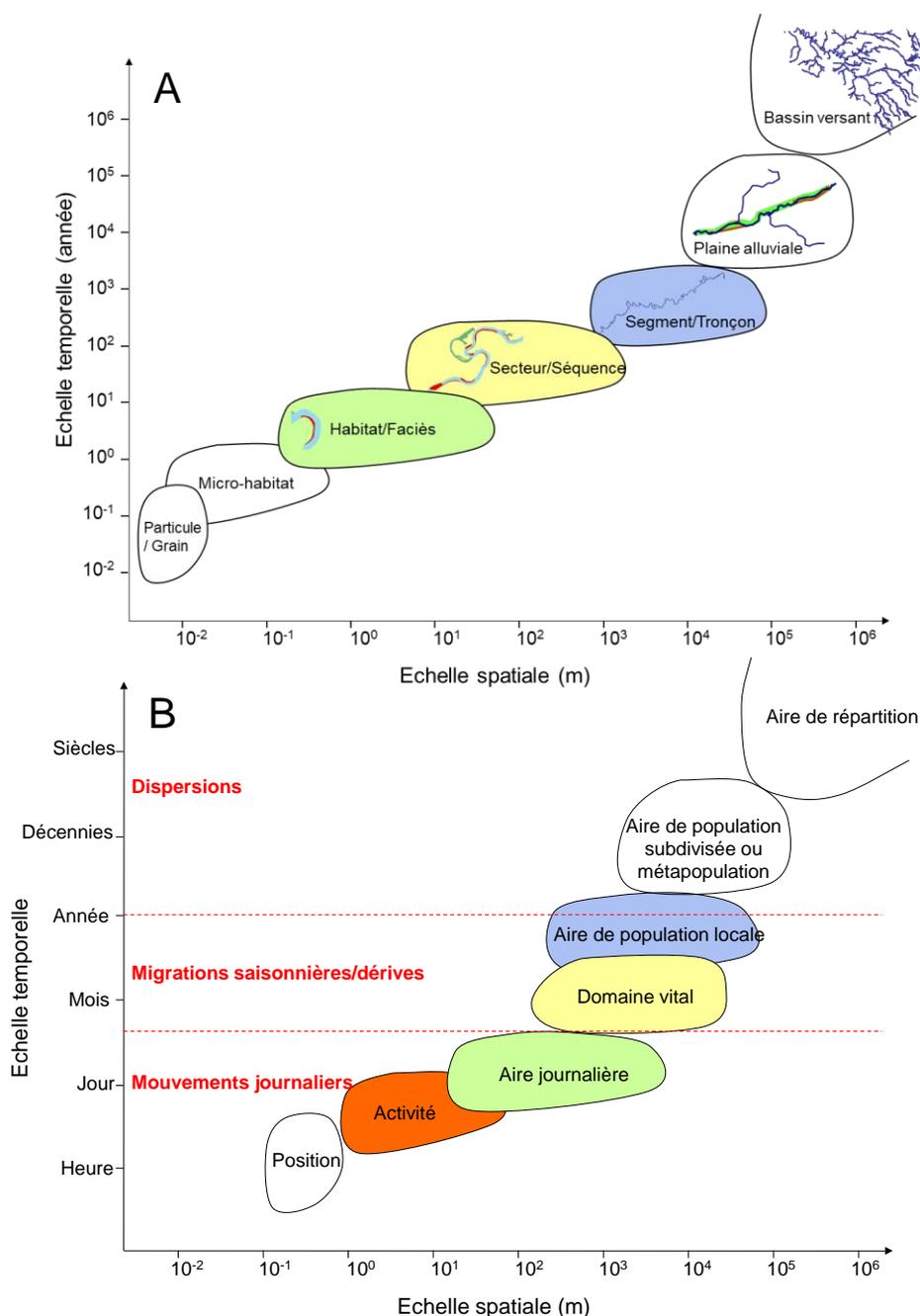


Figure 0-5 – A - Hiérarchie spatio-temporelle de la structure des hydrosystèmes d'eau courante. B- Hiérarchie spatio-temporelle de la sélection des ressources chez les poissons d'eau courante et types de mouvements impliqués. Schémas inspiré de Frissell et al. (1986) ; Schmutz et Jungwirth (1999); et Habersack (2000). En couleur, les échelles privilégiées dans ce manuscrit.

Certains réseaux hydrographiques étant structurés en « îles », les populations peuvent être spatialement structurées et fonctionner en métapopulation, notamment en population sub-divisée, source/puits ou fragmentée (Rieman & Dunham 2000; Falke & Fausch 2010) (Figure 0-6). Les

implications opérationnelles sont ainsi de connaître et préserver les secteurs portant des populations sources et de favoriser les mouvements et les migrations (Schlosser & Angermeier 1995).

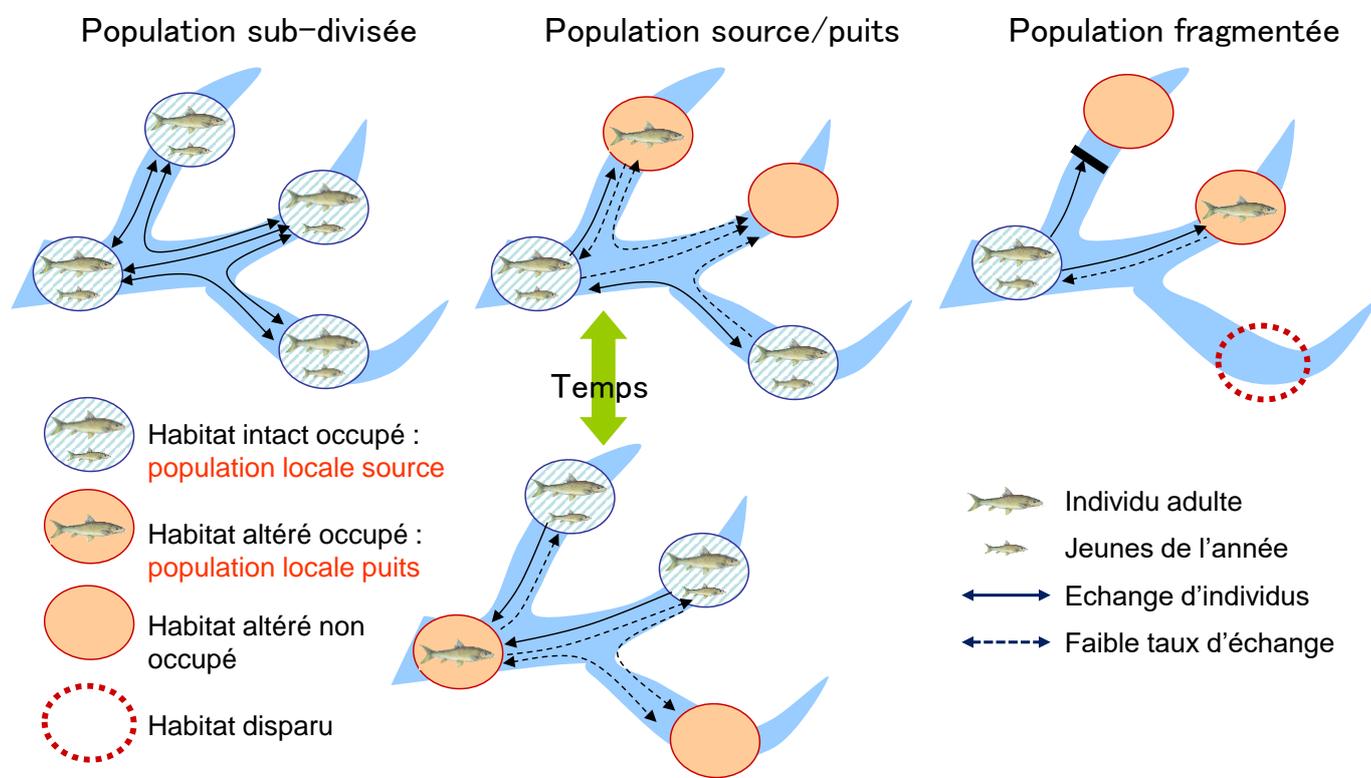


Figure 0-6 – Type de métapopulation en fonction du degré d'altération de l'habitat et de la connectivité (habitat = toutes les ressources nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie selon la définition de Hall et al. (1997)) et du taux d'échange d'individus entre ces habitats.

Pour aller dans le sens de ces propositions de recherche en émergence pour la conservation des espèces de poissons d'eau courante, j'ai développé des collaborations en 2001 avec Jacques Baudry (INRA SAD Armorique) et Isabelle Poudevigne (Université de Rouen), spécialistes en écologie du paysage. L'objectif était d'adapter des outils et des méthodes permettant d'étudier l'influence de l'arrangement spatial des habitats vitaux (nourricerie, habitat de repos ou d'alimentation, frayères) et leur connectivité sur l'organisation des populations de poissons d'eau courante. Ces outils et méthodes devaient en particulier être adaptés aux cours d'eau fortement anthropisés, comme ceux du bassin de la Seine, où les discontinuités physiques et chimiques sont nombreuses et impactent les communautés aquatiques (Belliard *et al.* 2009).

Un projet, débuté en 2002 et financé par la DIREN-IDF, m'a donné l'occasion d'adopter une approche « paysage aquatique » sur la Seine, fortement inspirée par deux thèses réalisées cette année-là aux Etats-Unis (Baxter 2002; Torgersen 2002). Le couplage de l'écologie du paysage avec

l'écologie aquatique nécessitait de relever un certain nombre de défis et de tester la pertinence de cette approche innovante pour améliorer la compréhension des facteurs de structuration des espèces aquatiques. Encouragée par Claude Amoros, évaluateur de notre collectif de recherche, je me suis engagée fin 2003 dans une thèse en formation continue grâce au soutien de l'équipe d'hydro-écologie (2002-2006). Depuis 2007, cette approche a été mise « à l'épreuve » sur d'autres types de milieux aquatiques (cours d'eau de tête de bassin, lac fluviaux, estuaires) et d'autres espèces (poissons migrateurs ou petites espèces peu mobiles).

Suite à la loi Grenelle II de 2010, les objectifs de diminution de la fragmentation et de l'isolement des habitats aquatiques et de restauration de la biodiversité pour les cours d'eau, se sont concrétisés par la mise en place de réseaux écologiques nationaux ou « trames vertes et bleues ». Cette dynamique de gestion a renforcé ma thématique actuelle de recherche, dont les enjeux majeurs sont de :

- décrire, caractériser et modéliser la relation habitat-organisme fondée sur la fonctionnalité écologique de tous les habitats vitaux du cycle de vie,
- poursuivre le développement des outils et méthodes d'analyse spatiale faisant le lien entre l'occupation de l'espace et la fonctionnalité des habitats à diverses échelles (mouvements journaliers, migrations saisonnières, colonisation),
- contribuer aux enjeux de société en fournissant aux gestionnaires une analyse cartographique des potentialités de préservation et de restauration de la fonctionnalité des habitats piscicoles.

En 2016, un séminaire co-organisé avec Christian Torgersen (USGS, Seattle) à Antony, intitulé « Putting the riverscape perspective into practice: State of the science and future », a rassemblé des chercheurs de divers horizons. Il a initié de riches réflexions sur l'évaluation critique des avantages et des coûts de cette approche pour parvenir à une gestion durable des bassins versants et à la conservation des espèces. Toutes les discussions avec les co-auteurs depuis 5 ans m'ont beaucoup aidé pour rédiger ce manuscrit.

Ainsi, je présenterai la partie synthèse de mes activités actuelles en trois parties : la première présente en quoi mes travaux ont contribué au développement d'une approche « paysage aquatique » opérationnelle, en adoptant une perspective spatio-temporelle explicite des rivières et en proposant des méthodes et des outils pour les conceptualiser, les cartographier et mieux comprendre leur dynamique et leur évolution. Cette contribution s'insère dans une volonté de nombreux écologistes aquatiques depuis 30 ans de faire évoluer l'écologie des cours d'eau en lui

permettant de faire un pont entre la recherche et la conservation de la biodiversité aquatique (Fausch *et al.* 2002). La deuxième partie montre en quoi l'application de cette approche « paysage aquatique » fournit des éléments pour mieux comprendre les facteurs de distribution spatio-temporelle des espèces piscicoles dans les cours d'eau. La troisième partie présente l'utilité de cette approche pour établir le contexte spatial et temporel des actions de préservation et de restauration des milieux aquatiques et de leur diversité piscicole. Une quatrième partie proposera des perspectives à mes travaux et une cinquième partie des éléments concernant ma capacité à diriger des recherches.

# 1 Contribution au développement d'une approche paysage aquatique opérationnelle

" *Les progrès dans notre capacité à cartographier les paysages aquatiques [...] ont transformé les façons dont les rivières peuvent être lues et interprétées. Ces techniques ont mûri et révolutionné ce qu'il est possible de comprendre et de quantifier* " (Wheaton *et al.* 2017) ; "*nous pouvons maintenant mesurer la variabilité à de multiples échelles allant du mètre au kilomètre et, ainsi, faire passer le concept de paysage aquatique du domaine de la théorie à celui de la pratique et de la réalité* " (Carbonneau *et al.* 2012).

De la longue imprégnation de l'écologie aquatique par les concepts d'écologie du paysage a émergé l'approche scientifique de « paysage aquatique » (Torgersen *et al.* 2021), avec deux perspectives majeures : (1) conceptualiser le cours d'eau comme un système complexe et interconnecté, intégré dans un paysage socio-écologique au sens large (Allan 2004; Hand *et al.* 2018), et/ou (2) considérer le cours d'eau lui-même comme un "paysage", une mosaïque d'habitats support de processus écologiques en interaction (Fausch *et al.* 2002; Wiens 2002; Carbonneau *et al.* 2012). Cette seconde perspective s'est exprimée à travers des points de vue complémentaires : « aquatic landscape » (Schlosser 1991b), « fluvial stygoscape » (Ward 1997), « Riverine landscape » (Ward 1998), *mettre l'écologie du paysage dans l'eau* (Wiens 2002), « riverscape » (Malard *et al.* 2000), « fluvial landscape » (Poole 2002), « underwater riverscape » (Le Pichon *et al.* 2006a) et plus récemment avec le « behaviorscape » qui relie le comportement des poissons aux paysages aquatiques (White *et al.* 2014), et le « streambed landscape » ou « benthiscape » qui s'adapte à l'échelle du cycle de vie des macroinvertébrés (Palmer *et al.* 2000; Olden 2007).

Ces points de vue incorporent les principes centraux de l'écologie du paysage : la hiérarchie, la dépendance au contexte, la dynamique des taches, les perturbations (Pringle *et al.* 1988; Reeves *et al.* 1995), l'hétérogénéité, l'échelle (Poole 2002) et la connectivité (Schlosser 1995; Wiens 2002). Dans les systèmes socio-écologiques les activités humaines ont modifié depuis des siècles les processus hydro-géomorphologiques et écologiques (Dunham *et al.* 2018). Pour ces systèmes, il est pertinent de considérer que la valeur d'un habitat n'est pas absolue ; que le même habitat peut avoir une valeur différente en fonction de sa position spatiale ; que changer un habitat change le tout et que changer le contexte change la qualité d'un habitat (Antrop 2000).

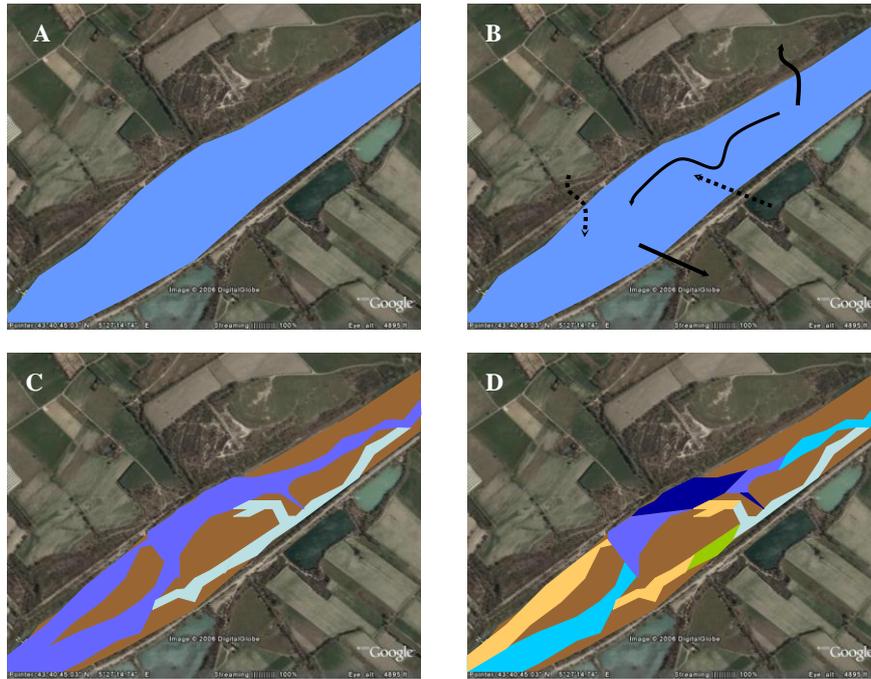
L'approche paysage aquatique apporte ainsi des connaissances complémentaires sur la façon dont les cours d'eau et les populations se structurent (Carbonneau *et al.* 2012; Steel *et al.* 2017). Elle fournit un cadre conceptuel pertinent pour détecter des patrons complexes et/ou inattendus

de distribution des habitats et des organismes, les "surprises" écologiques, qui s'écartent des hypothèses attendues pour les tendances et phénomènes écologiques (Lindenmayer *et al.* 2010). La relation entre patron et processus y est déclinée à double sens : détecter des patrons d'habitats et leurs conséquences sur les processus écologiques, comprendre les processus écologiques qui expliquent les patrons de distribution des espèces.

Toutes ces perspectives ont pris en compte le potentiel important de cette approche pour une gestion et une conservation efficace des cours d'eau et des organismes aquatiques (Fausch *et al.* 2002 ; Benda *et al.* 2011 ; Erős *et al.* 2011). Ainsi, pour rendre opérationnelle cette approche paysage aquatique, j'ai proposé un cadre de réflexion intégrant les concepts de dépendance au contexte, d'échelles emboîtées, d'hétérogénéité et de connectivité (Le Pichon *et al.* 2006a). Il repose sur trois principes : (i) adopter « le point de vue » des espèces étudiées pour définir les habitats vitaux pertinents de la(des) phase(s) du cycle de vie étudié(es), (ii) adapter la portée spatio-temporelle du projet (rapport étendue/résolution) à la question écologique et à la gamme de mobilité des espèces et (iii) représenter de façon spatialement explicite, à l'aide de données haute résolution, la distribution spatio-temporelle des habitats et des espèces.

### 1.1 Rendre perceptible l'habitat du poisson

La prise en compte croissante de l'hétérogénéité et des discontinuités physiques et chimiques dans les milieux aquatiques a permis d'appréhender les cours d'eau comme des mosaïques d'habitats dynamiques (Bretschko 1995; Ward & Stanford 1995) avec une distribution spatio-temporelle non uniforme des habitats fluviaux (Benda *et al.* 2004), soulignant la singularité ou « uniqueness » de chaque tronçon de cours d'eau (Poole 2002). Le regard porté sur les rivières a ainsi évolué, d'un simple élément homogène du paysage terrestre (Figure 1-1 A), à l'hétérogénéité de l'environnement sub-aquatique tel que le poisson peut le « percevoir » (Figure 1-1 B->C->D) mais peu visible pour un observateur terrestre (Torgersen 2002).



*Figure 1-1 – Différentes perceptions d'un cours d'eau. A : un élément homogène du paysage; B : connecté au milieu terrestre par des flux longitudinaux ou latéraux à travers les écotones; C : un paysage hétérogène pour un observateur terrestre; D : un paysage hétérogène dans sa composante sub-aquatique (Le Pichon 2006).*

### 1.1.1 Un point de vue habitat « orienté cycle de vie », une prise en compte de la dynamique temporelle multi-échelle et de l'accessibilité chronologique

La persistance des métapopulations (Fahrig 1992; Keymer *et al.* 2000) est liée à la correspondance entre les échelles spatio-temporelles de la dynamique du paysage et les changements de domaines vitaux entre stades du cycle de vie (Falke & Fausch 2010). En outre, à l'intérieur du domaine vital de chaque stade, des mouvements quotidiens ou saisonniers entre un ou différents types d'habitats peuvent également se produire (Figure 1-2). Plusieurs auteurs insistent sur le caractère dynamique de la disponibilité et de l'accessibilité des habitats du cycle de vie et mentionnent le besoin d'adopter des approches de conservation plus dynamiques. Sheaves (2009) utilise le terme "connectivité fractale" pour décrire "la hiérarchie des migrations à diverses échelles qui relient divers habitats de manière complexe". Zeigler and Fagan (2014) proposent la notion de « fenêtres transitoires de connectivité » et Bull *et al.* (2013) de "cibles mobiles", à la fois pour les espèces migratrices et les paysages aux fluctuations rapides.

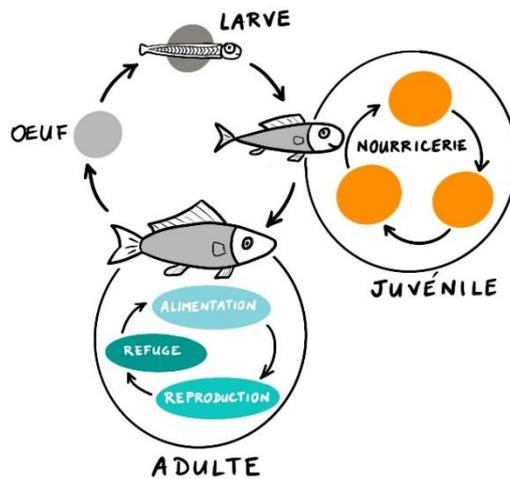


Figure 1-2 – Exemple de cycle de vie avec les mouvements entre stades ontogéniques et des exemples de déplacements quotidiens (juvénile) ou saisonniers (adulte) entre divers habitats vitaux.

La succession des phases du cycle de vie se déroule dans un certain ordre non aléatoire et non réversible et nécessite une approche chronologique pour évaluer la "connectivité du cycle de vie" dans un paysage donné (Figure 1-2). J'ai pu tester cette modélisation chronologique fonctionnelle à l'occasion du projet Anacondha, financé par le GIP Seine Aval, dont l'objectif est de restaurer les fonctionnalités de nurserie de l'estuaire de la Seine. La connectivité des habitats quotidiens (nurserie et habitats de repos) des juvéniles du bar commun (*Dicentrarchus labrax*) au cours de cycles de marée a ainsi été modélisée avec une procédure itérative qui calcule avec un pas de temps de 15 min (t1 à t49) la connectivité des habitats (Figure 1-3) (Alp & Le Pichon 2021).

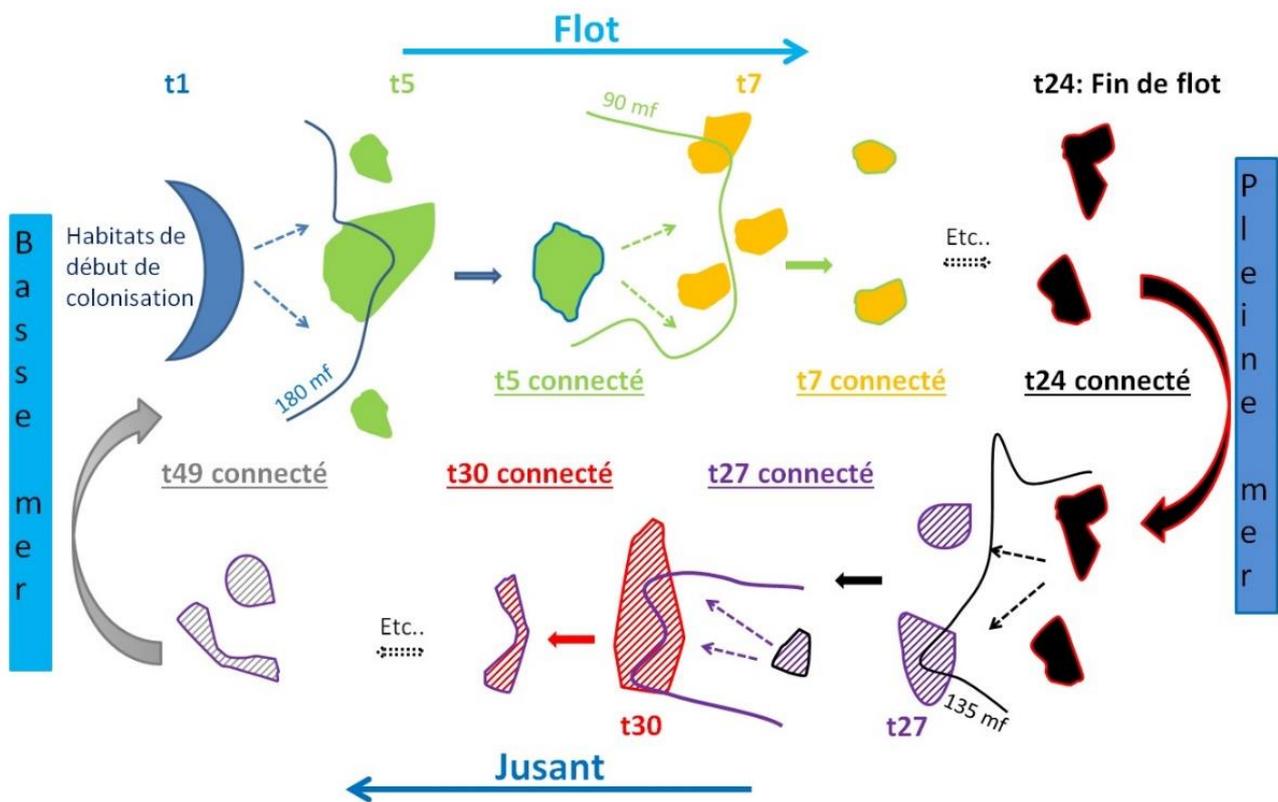


Figure 1-3 – Schéma de principe de la modélisation chronologique de la connectivité des habitats au cours d'une marée (flot de t1 à t24 et jusant de t27 à t49). En plein, les habitats de nurserie, en hachuré les habitats de repos. mf : seuil limite de distance (en mètres fonctionnels) utilisé pour définir les habitats connectés à chaque pas de temps en fonction des scénarios de mobilité des juvéniles (exemple pour  $0.05 \text{ m.s}^{-1}$ ) (Le Pichon & Alp 2018b).

La seconde échelle que j'ai étudiée pendant ma thèse, en complément des habitats quotidiens, est celle de la connectivité des habitats saisonniers d'individus adultes de barbeau fluviatile (*Barbus barbus*) (Le Pichon 2006). Dans ce cas, la connectivité fonctionnelle entre deux habitats vitaux établit des relations de voisinage : supplémentation et complémentation, qui rendent compte des mouvements que les espèces doivent effectuer pour accéder à des ressources non substituables (Dunning *et al.* 1992). Ces relations de voisinage définissent le niveau supérieur au sens de (Kotliar & Wiens 1990) (habitats vitaux, aires d'activités journalières, domaines vitaux, aires de population locale, Figure 0-5). Pour représenter cette structure spatiotemporelle hiérarchique d'une population de poissons, avec des niveaux spatialement imbriqués, j'ai adapté le principe d'agrégation des aires fonctionnelles (Leuven & Poudevigne 2002). Chaque niveau hiérarchique est défini à l'aide d'un outil géomatique qui cartographie la structure spatiale de populations animales fragmentées en utilisant des données de mouvement et de dispersion (Pain *et al.* 2000 ; Leuven *et al.* 2002). Ces données de mouvement et de dispersion peuvent être très variables selon les espèces

et au sein des espèces selon la fraction résidente ou mobile (Radinger & Wolter 2014), la représentation de cette structure hiérarchique doit pouvoir s'adapter à diverses échelles spatiales. La Figure 1-4 montre un exemple de représentation qui peut s'appliquer autant à des espèces aux domaines vitaux restreints qu'à des espèces migratrices.

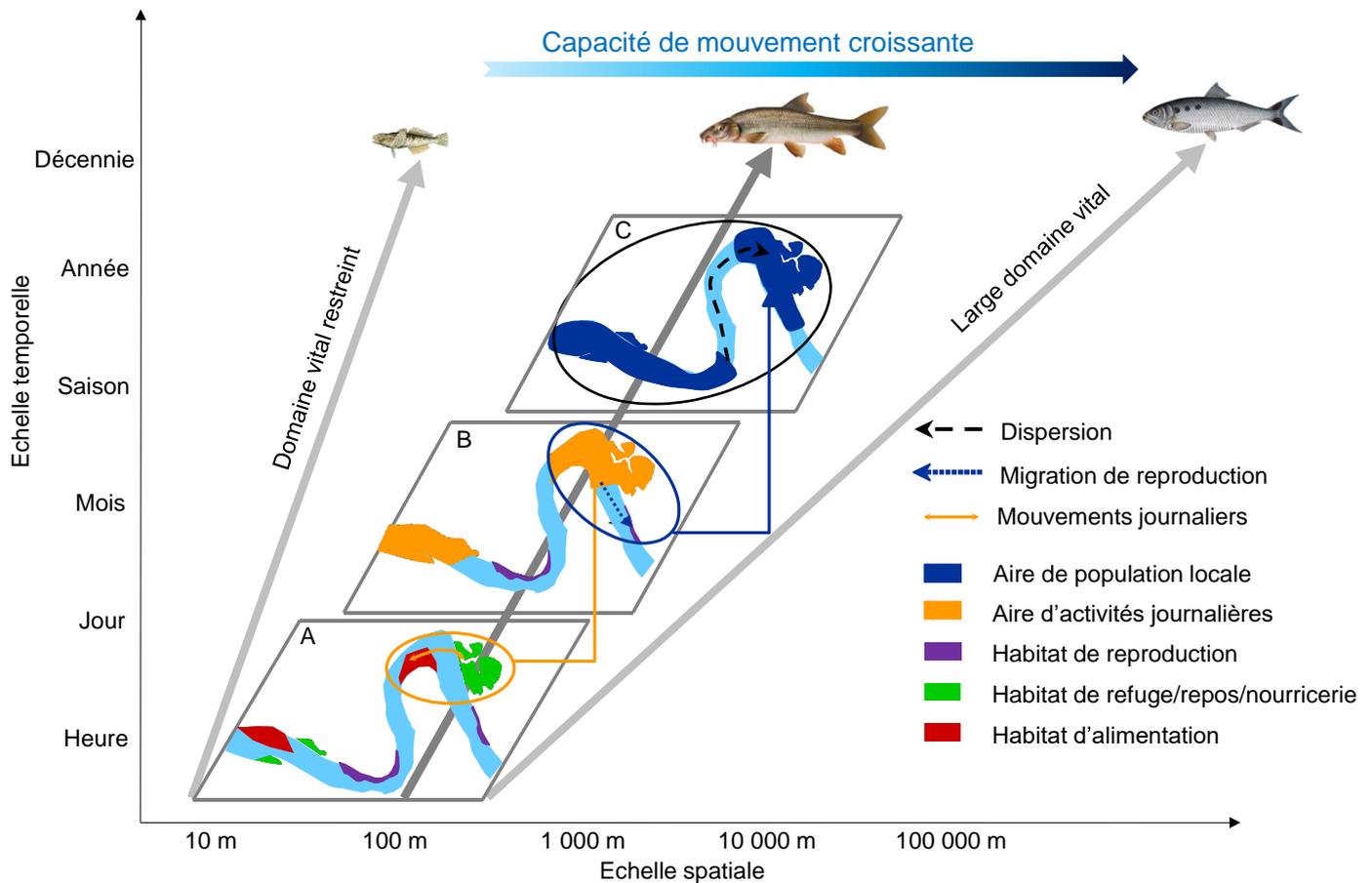


Figure 1-4 – Hiérarchie spatio-temporelle d'utilisation des habitats, les relations spatiales d'un niveau conditionnent le niveau supérieur. Inspiré de (Frissell et al. 1986 ; Schmutz & Jungwirth 1999).

Ces relations de voisinage sont à considérer lorsqu'il s'agit d'évaluer la qualité globale de l'habitat ou la capacité d'accueil d'un cours d'eau pour une espèce (Kocik & Ferreri 1998; Fausch et al. 2002). A l'occasion d'une mission longue que j'ai effectuée à l'INRS-CETE en 2015, notre objectif était de proposer une nouvelle méthode d'évaluation de la capacité d'accueil des rivières à saumon Atlantique (*Salmo salar*) au Québec, financée par la FCSA. La collaboration avec Normand Bergeron et Mathieu Roy a formalisé une modélisation de la connectivité fonctionnelle chronologique de tout le cycle de vie de cette espèce (Figure 1-5).

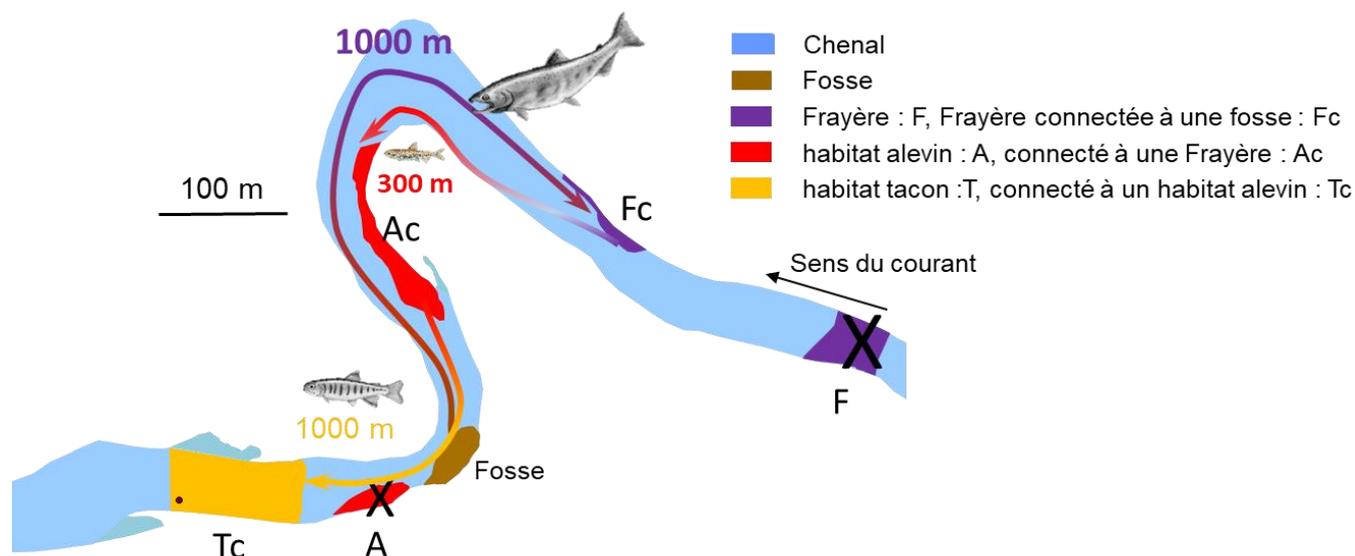


Figure 1-5 – Exemple de modélisation chronologique pour le saumon Atlantique (Bergeron et al. 2016).

### 1.1.2 Une représentation cartographique spatialement explicite

Dans les hydrosystèmes fluviaux, la dépendance au contexte spatial et temporel est particulièrement cruciale en raison de leur structure linéaire et hiérarchique, de la connectivité hydrologique avec les masses d'eau adjacentes et des multiples écotones avec les écosystèmes terrestres et marins. Ces aspects sont d'autant plus importants dans les milieux fortement anthropisés où la localisation des impacts humains est guidée par des processus différents des processus naturels agissant d'ordinaire dans les cours d'eau. Les patrons de distribution des habitats et des espèces aquatiques sont ainsi modifiés par un jeu d'impacts souvent imprévisibles, à plus ou moins longue distance et long terme. La dépendance aux conditions passées et aux perturbations historiques est en effet importante pour expliquer les conditions actuelles, notamment les modifications historiques d'usage du sol ou l'évolution des obstacles physiques et chimiques (Haidvoogl et al. 2015 ; Belliard et al. 2018).

Pour comprendre et intégrer le rôle du contexte spatio-temporel dans la distribution des espèces (Torgersen et al. 2012), l'échantillonnage de nombreux secteurs ( $10^1$ - $10^3$  m) dans un bassin versant ne suffit pas (White et al. 2014). La cartographie de la variabilité et de l'hétérogénéité des cours d'eau doit être abordée d'une manière spatialement explicite sur de longues périodes, comme des mosaïques continues et dynamiques d'habitats longitudinaux et latéraux.

Cela peut s'avérer complexe, notamment en raison de l'existence d'une interface plus ou moins fluctuante, la surface de l'eau, et à l'hétérogénéité spatio-temporelle combinée des milieux terrestres et aquatiques. Traverser cette interface, barrière transparente mais aussi parfois opaque pour représenter l'habitat aquatique, a été rendu possible dans les 20 dernières années grâce aux progrès significatifs dans les technologies et les méthodes de cartographie des composantes physiques et chimiques des rivières (Carbonneau & Piégay 2012; Palmer *et al.* 2015; Dauwalter *et al.* 2017). Représenter l'hétérogénéité longitudinale et latérale des habitats vitaux nécessite d'utiliser une résolution fine, associée à une large étendue pour tenir compte de la taille des domaines vitaux des espèces en lien avec leurs capacités de déplacements (Figure 1-4). Cette augmentation de la portée (large étendue/résolution fine) amène potentiellement à détecter des relations entre les organismes aquatiques et leur environnement qui reflète mieux leurs façons réelles de percevoir et de répondre à l'hétérogénéité environnementale, sans a priori par rapport aux échelles imposées par la perception humaine (Torgersen *et al.* 2021). De fortes portées ont permis de détecter des relations inattendues entre les poissons et leur environnement à des échelles où elles n'avaient pas été quantifiées auparavant. Par exemple, l'association entre le gradient amont/aval et l'abondance relative des salmonidés peut s'inverser selon le contexte thermique et l'étendue spatiale de l'analyse (Torgersen 2002).

Pour représenter les habitats aquatiques et les données biologiques à de fortes portées, l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) permet de combiner tous les types de données disponibles et d'augmenter les capacités d'analyse spatiale (Fisher & Rahel 2004). Trois catégories de données sont généralement utilisées en fonction de leur disponibilité ou accessibilité : les données recueillies sur le terrain, les données de télédétection et les simulations de modèles.

L'approche la plus abordable, avec laquelle j'ai débuté mon projet de thèse en 2001, est de cartographier les composantes physiques en les géocalisant à l'aide de récepteurs GPS lors de prospections à pied ou en bateau (Dauwalter *et al.* 2006 ; Le Pichon *et al.* 2009). Ces approches de terrain prennent du temps mais nécessitent peu d'investissement en matériel et peuvent raisonnablement être mises en œuvre dans les petits et moyens cours d'eau à l'échelle de segments (10<sup>4</sup>m) (Annexe 1 (Torgersen *et al.* 2021)). Elles permettent d'étudier la variabilité longitudinale et latérale des paramètres de l'habitat physique et la présence d'obstacles, difficilement visibles avec les données de télédétection (Torgersen & Close 2004; Gresswell *et al.* 2006; Le Pichon *et al.* 2017b).

Lorsque les échelles d'études sont larges (segments, Figure 0-5), le recours à la télédétection s'avère indispensable mais requiert en général une haute technicité pour l'acquisition de données

et le traitement d'images. À ce jour, elle a été utilisée pour cartographier la plupart des variables de l'habitat physique communément requises par les scientifiques et les gestionnaires des milieux aquatiques : la taille du substrat (Carbonneau *et al.* 2005), les matières en suspension et la qualité de l'eau (Pavelsky & Smith 2009), la bathymétrie du chenal (Dietrich 2017), la température de l'eau (Torgersen *et al.* 2001), la végétation aquatique submergée (Flynn & Chapra 2014), les débris ligneux (MacVicar *et al.* 2009) et les caractéristiques de la bande riveraine (Loicq *et al.* 2018).

Pour étudier des dynamiques temporelles, les modèles hydrodynamiques 2D/3D génèrent des cartes spatialement explicites de la hauteur d'eau, de la vitesse de courant à haute résolution temporelle ainsi que des paramètres de qualité de l'eau tels que la température (Dugdale *et al.* 2017) et la chimie de l'eau (Nguyen *et al.* 2019). L'utilisation de ces modèles de haute résolution (souvent infra-horaire) oblige à mieux définir les échelles temporelles pertinentes à étudier, selon les variables hydrodynamiques modélisées et les processus considérés. La disponibilité croissante de tels modèles ces dernières années a permis d'étudier les dynamiques spatio-temporelles rapides des habitats vitaux. Notamment, dans certains milieux aux fortes perturbations hydrologiques naturelles ou anthropiques : comme les estuaires soumis à marée (Seine et Gironde), les plaines alluviales inondables (Fleuve Saint-Laurent, Canada) ou les fleuves soumis à un régime d'écluse (Le Rhône) (Annexe 2).

Les trois catégories de données (mesures de terrain, télédétection, simulation) ne s'excluent pas mutuellement et peuvent être utilisées de manière complémentaire car chaque technique ne « voit pas tout », selon les habitats ciblés (abris, obstacles, substrats...) ou les milieux aquatiques étudiés (fleuve, petit cours d'eau forestier...). Une étape cruciale est de faire un bilan des données haute résolution nécessaires et disponibles sur l'étendue d'étude et selon l'échelle des processus étudiés au sein du cycle de vie, ce qui relève parfois d'un défi en soi.

## 1.2 Une boîte à outil pour visualiser et analyser la disponibilité et l'accessibilité des habitats

### 1.2.1 Configuration, fragmentation

Les progrès des SIG ont permis de proposer des méthodes et des outils adaptés aux particularités des milieux d'eau courante (Welty *et al.* 2015). Selon la ou les variables, il peut être plus efficace de tracer les données longitudinalement (Figure 1-6 A,B), créer une carte (Figure 1-6 C), ou utiliser des techniques de modélisation et de visualisation graphique plus sophistiquées pour quantifier l'hétérogénéité dans l'espace (Figure 1-6 D,E) et dans le temps (Figure 1-6 F).

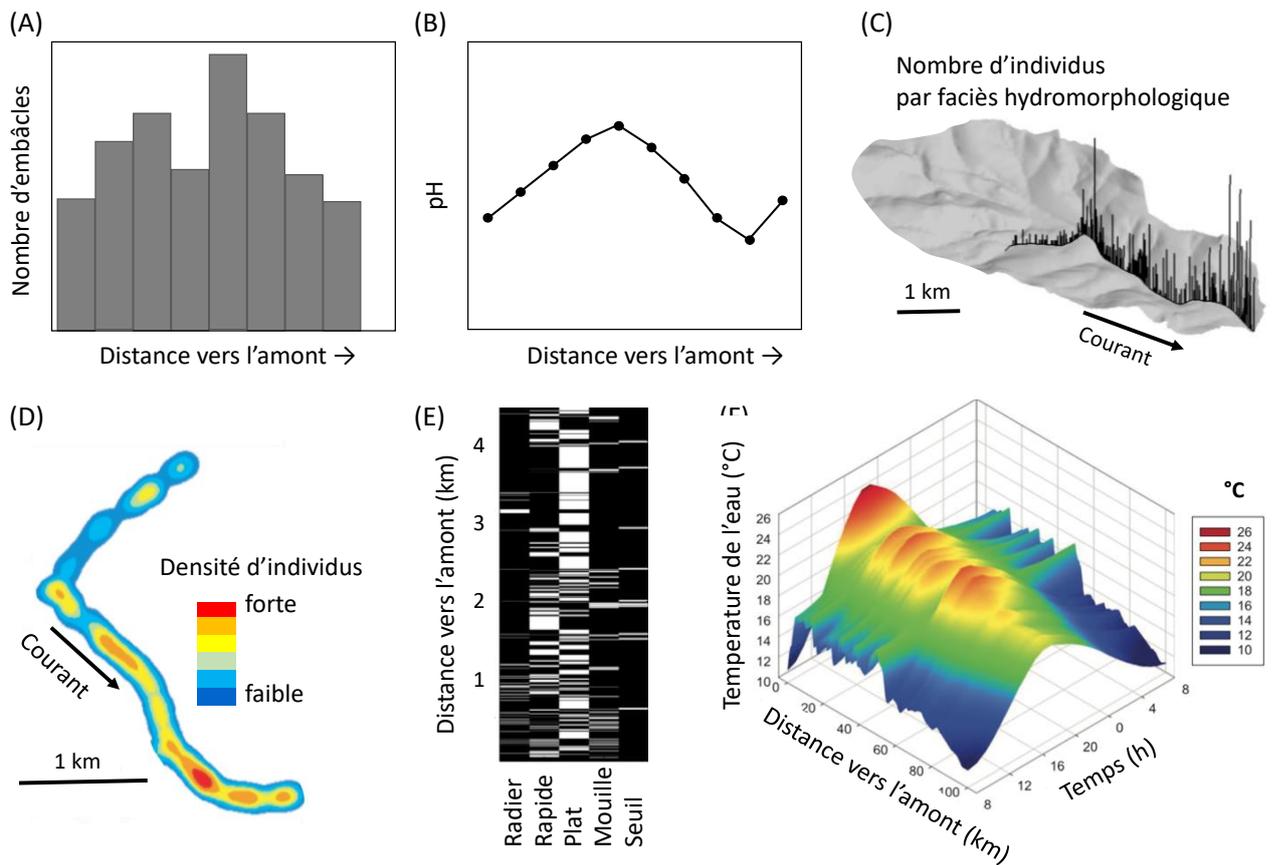


Figure 1-6 Diverses représentations spatialement explicite de l'hétérogénéité des habitats, des températures, pH et de la concentration de poissons. Données longitudinales (A,B), cartes (C, D) ou graphiques (E,F) (Torgersen, Le Pichon et al., 2021).

Pour aller plus loin dans l'analyse de l'hétérogénéité des paysages aquatiques, j'ai développé diverses métriques de composition et de configuration des habitats vitaux et de leurs relations spatiales à l'occasion de mon doctorat. J'ai adapté l'indice de proximité entre habitats vitaux de (Gustafson & Parker 1994) pour quantifier la fragmentation ou la complémentarité des habitats (Le Pichon *et al.* 2009) (Figure 1-7). Une méthode d'analyse d'image multi-échelle de la structure du paysage a été utilisée pour calculer dans une fenêtre glissante carrée avec Chloe 3.1 (Baudry *et al.* 2005) puis circulaire et fonctionnelle avec Chloe 4.0 (Boussard & Baudry 2017), l'indice d'hétérogénéité de Baudry-Burel, ainsi que des proportions de certains habitats. Ces proportions sont utilisées pour cartographier la complémentarité entre habitats d'alimentation et de repos et délimiter des aires d'activités journalières d'une espèce (Figure 1-8). La taille de fenêtre est choisie en fonction des capacités de mouvements de l'espèce.

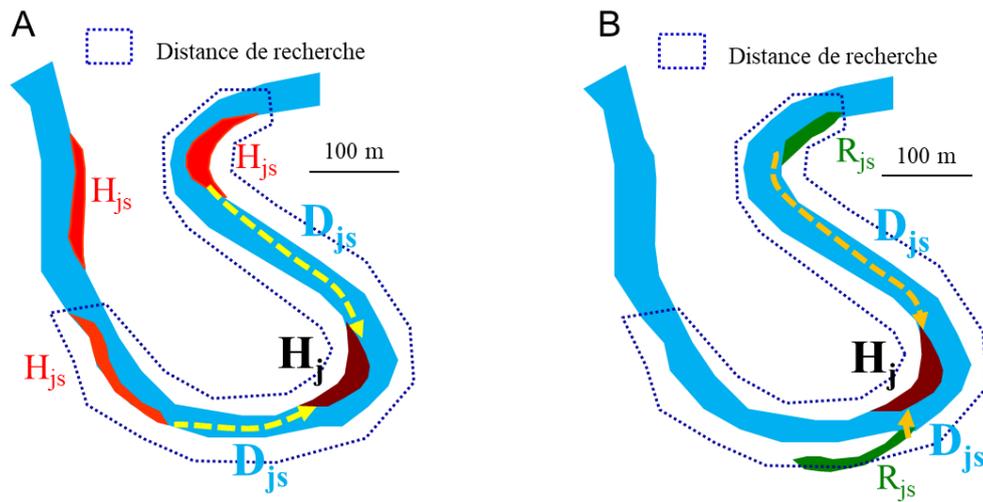


Figure 1-7 Deux indices de proximité calculés pour une tache d'habitat  $H_j$  ; la ligne pointillée délimite la distance de recherche à partir des bordures de la tache. A) Calcul de l'indice de proximité  $P_x(H_j)$  pour une tache d'habitat vital  $H_j$  par rapport aux autres taches  $H_{js}$ . B) Calcul de l'indice de proximité  $P_x(H_j)$  pour une tache d'habitat vital  $H_j$  par rapport à un habitat complémentaire  $R_j$ .

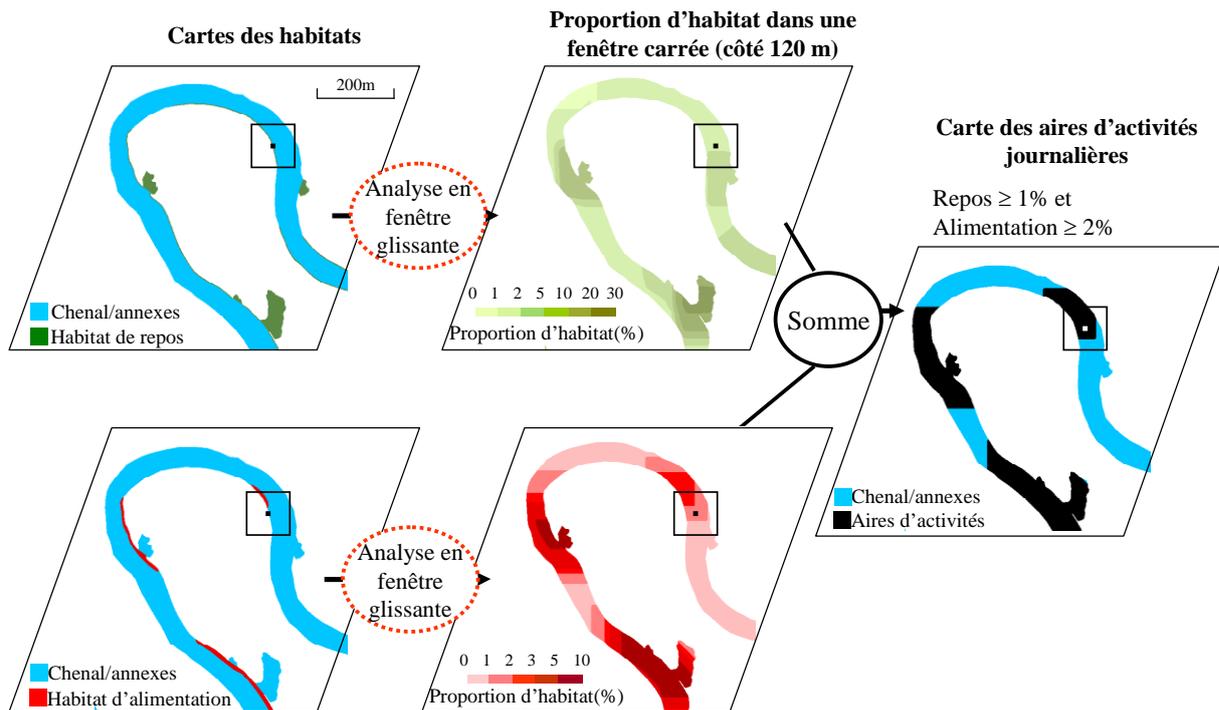


Figure 1-8 – Méthode d'analyse spatiale pour délimiter les aires d'activités journalières d'une espèce à partir des cartes d'habitats d'alimentation et de repos. Dans cet exemple, la taille de la fenêtre équivaut à une distance euclidienne de recherche de 60 m, compatible avec la gamme inférieure des mouvements journaliers du barbeau.

### 1.2.2 Connectivité longitudinale et latérale

Bien que la connectivité ait été largement étudiée dans les cours d'eau (Pringle 2003; Moilanen *et al.* 2008), les méthodologies de modélisation de la connectivité des habitats adaptées à la structure des réseaux hydrographiques et à la directionnalité imposée par le sens d'écoulement sont plus récentes (Fullerton *et al.*, 2010). Parmi les différentes méthodes, une approche fait appel à la modélisation individu-centrée à l'aide du cadriciel SimAqualife (Dumoulin 2007). Il nécessite divers paramètres de dynamique de population pour réaliser des simulations spatialisées des déplacements d'organismes aquatiques, comme par exemple la grande alose (*Alosa alosa*) (Rougier *et al.* 2014). La théorie des graphes s'est avérée efficace pour fournir une représentation schématique des interconnexions entre les habitats à l'échelle des grands réseaux fluviaux, fournissant des métriques globales de connectivité dans un réseau hydrographique (Eros *et al.* 2011). Pour tenir compte de l'hétérogénéité en 2D des cours d'eau et des capacités de mouvements longitudinaux et latéraux des espèces, il s'avère pertinent d'utiliser une approche bidimensionnelle définie comme « modélisation moindre coût » (Adriaensen *et al.* 2003). Cette approche utilise la distance hydrographique et le coût de déplacement d'une espèce dans un cours d'eau (Figure 1-9). Ce coût prend en compte des aspects énergétiques mais aussi d'exposition à des risques (Bonte *et al.* 2012).

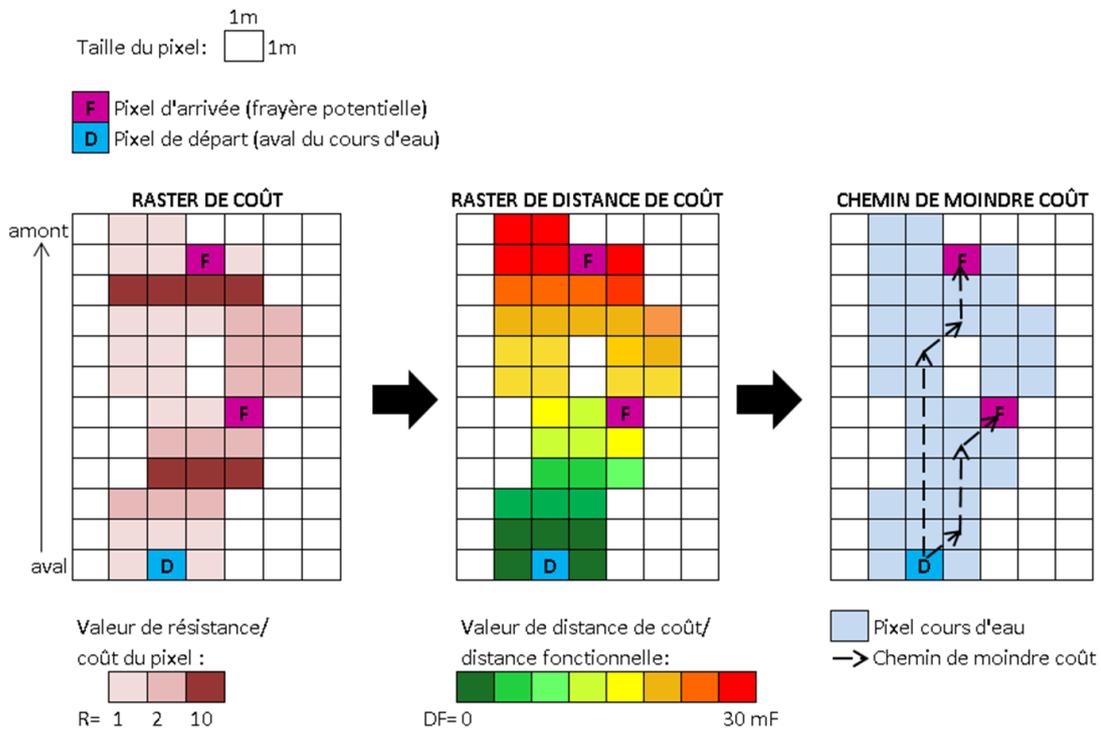


Figure 1-9 – Schéma illustratif du calcul de la distance fonctionnelle et du chemin de moindre coût (Merg & Le Pichon 2021).

Pour réaliser des calculs orientés (amont ou aval ou dans les deux sens) des distances fonctionnelles sur des cartes rasters 2D, j'ai participé au développement du logiciel Anaqualand en 2004 (Le Pichon *et al.* 2006b), testé en fleuve (Capra *et al.* 2011; Le Pichon *et al.* 2020), petit cours d'eau (Roy & Le Pichon 2017), estuaires (Le Pichon *et al.* 2018; Alp & Le Pichon 2021) et plaines alluviales (Foubert *et al.* 2019). Ces calculs de moindre coût sont aussi désormais disponibles dans un module d'ArcGis que nous avons utilisé à l'occasion du volet « modélisation de scénarios de la continuité écologique de la Seine » du projet CONSACRE (Merg & Le Pichon 2021).

### 1.3 Acquisition de données biologiques haute résolution

*“Thus, the problem of really adequate sampling of fishes, like most other problems of biological sampling in running water, remains to be solved.”* (Hynes 1975). *“Studies... have been done very often without much continuity... the lack of concerted effort on river investigations persists even today.”* (Hynes 1989)<sup>1</sup>.

Etant donné la complexité à appréhender la distribution et le comportement des espèces dans les milieux aquatiques, j'ai proposé de tester, au sein de notre équipe, de nouvelles techniques d'acquisition de données biologiques pour obtenir des observations spatio-temporelles intensives (échantillons spatialement ou temporellement proches et nombreux). Ces stratégies d'échantillonnage peuvent fournir la résolution nécessaire pour décrire l'hétérogénéité spatio-temporelle de structuration des peuplements de poissons et révéler les discontinuités dans la distribution des espèces (Baxter 2002; Bateman *et al.* 2005; Le Pichon *et al.* 2017b). Ces données biologiques haute résolution sont une opportunité pour discerner les processus derrière les patrons de distribution observés en contexte anthropique, ce qui facilite leur contribution à la conservation des espèces (White *et al.* 2014).

#### 1.3.1 Echantillonnage spatialement intensif des peuplements de poissons

Des méthodes d'échantillonnages à forte intensité spatiale, idéalement répétées dans le temps, répartissent l'effort sur de grands linéaires. La pêche électrique permet ce type d'échantillonnage sur de longs segments de rivière avec du matériel portatif mobile. Basées sur l'échantillonnage d'aires (pêche complète à un seul passage) ou de points (Echantillonnages Ponctuels d'Abondance ou EPA), elle permet de quantifier les distributions d'abondance d'espèce (Kruse *et al.* 1998;

---

<sup>1</sup> Merci à Christian Torgersen pour ces notes mentionnées dans la réponse aux relecteurs de Biological Review.

Torgersen & Close 2004; Bateman *et al.* 2005; Reid & Haxton 2017) ou de communautés (Le Pichon *et al.* 2017b).

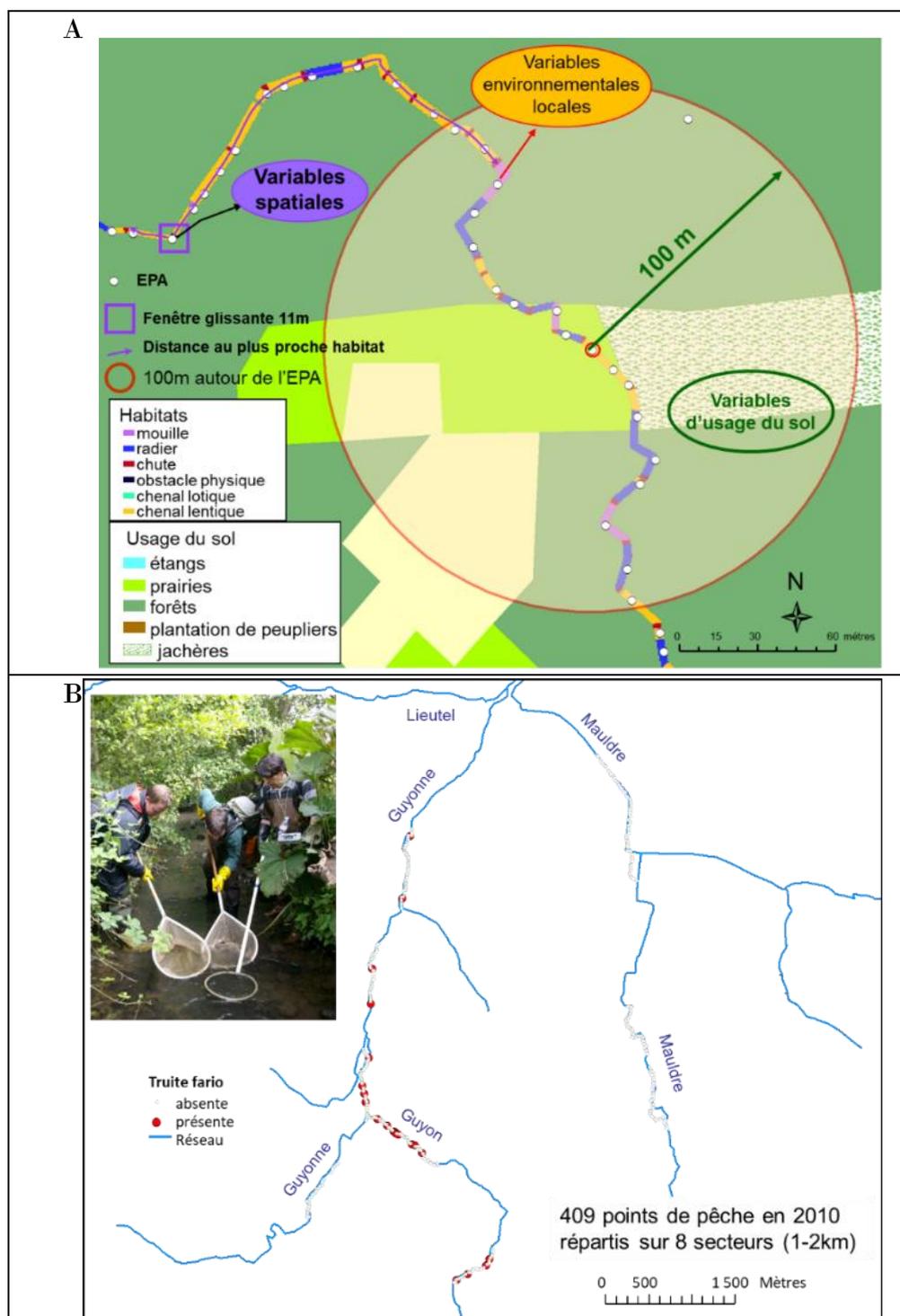
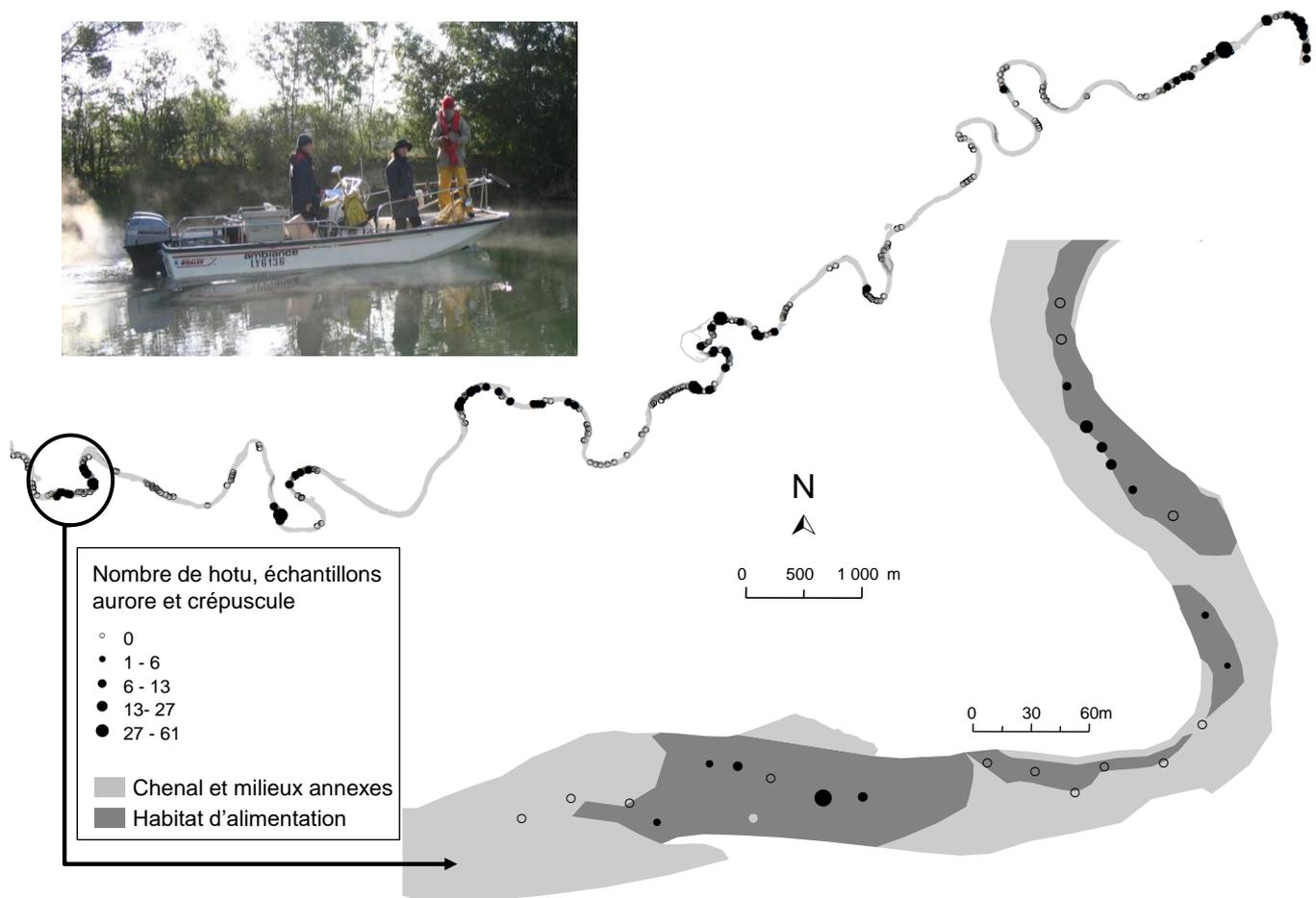


Figure 1-10 – A) Echantillonnage spatialement intensif réalisé sur le Rognon (Seine et Marne) Exemple de calcul des variables spatiales pour chaque EPA, en violet les variables spatiales liées aux habitats aquatiques, en vert, les variables spatiales liées au contexte d'usage du sol des milieux naturels terrestres. En orange, les variables environnementales locales relevées sur le terrain lors des pêches. B) Echantillonnage sur le bassin versant de la Mauldre (Yvelines) et présence de la truite commune.

Nous avons mis en œuvre un nouveau protocole d'échantillonnage spatialement intensif par pêche électrique utilisant les EPA dont le principe est de recueillir des poissons sur de nombreux échantillons de petite taille plutôt que peu d'échantillons de grande taille (Nelva *et al.* 1979; Persat & Copp 1990). En petit cours d'eau (largeur < 5m), nous avons testé cette approche en réalisant des EPA distants de 20 m afin de réduire la probabilité que des individus se déplacent dans les échantillons ponctuels suivants. Ce protocole nous a permis de couvrir des linéaires de plusieurs kilomètres que nous avons réalisé sur plusieurs petits bassins versants d'Ile-de-France (Figure 1-10).

En grand cours d'eau, une méthode multi-échelle a été testée, s'appuyant sur le principe d'un échantillonnage emboîté (Torgersen & Close 2004) et utilisant des unités d'échantillonnage de dimension réduite (12-15 m<sup>2</sup>) structurées par rapport à un habitat particulier appelé "focal patch study" (FPS, (Brennan *et al.* 2002)). Cet échantillonnage emboîté permet d'étudier la variable de réponse de l'espèce dans plusieurs taches d'habitat chacune étant caractérisée par son contexte spatial. L'échantillonnage est conduit à une période pertinente par rapport à l'habitat préalablement cartographié. Ainsi, sur la Seine, 48 taches d'habitat d'alimentation du barbeau et du hotu (*Chondrostoma nasus*) ont été échantillonnées à l'automne, après la reproduction, quand les poissons adultes occupent leurs aires d'activités journalières. A l'échelle d'une journée, il est aussi structuré par périodes: aurore et crépuscule, pendant lesquelles ces espèces s'alimentent activement, et de jour (Figure 1-11).

Avec ces données spatialement intensives, l'utilisation complémentaire de l'analyse longitudinale, des semi-variogrammes et de l'analyse par ondelettes permet de détecter des formes complexes de distribution des poissons liées à des influences naturelles et anthropiques. Ces méthodes ont été utilisées pour étudier la variabilité à plusieurs échelles simultanément, notamment pour détecter la variabilité de la température de l'eau en lien avec des barrages et l'influence des affluents sur la distribution de la truite (*Coastal cutthroat*) (Torgersen *et al.* 2004; Steel & Lange 2007).



*Figure 1-11 – Echantillonnage emboîté multi-échelle basé sur la cartographie préalable de l’habitat d’alimentation et abondance de hotus dans les unités d’échantillonnage géoréférencées.*

Ces échantillonnages géolocalisés, pendant lesquels des caractéristiques environnementales locales sont mesurées, servent au calcul des variables de contexte spatial à l’aide d’Anaqualand 2.0 (distances hydrographiques à certains habitats), du logiciel Chloe 3.1 (métriques dans une fenêtre glissante) et d’un logiciel SIG (variables d’usage du sol) (Figure 1-10).

### 1.3.2 Dynamique individuelle de mouvement et d’utilisation des habitats par télémétrie

La connaissance des paramètres quantitatifs de mouvements des poissons et leur variabilité sont indispensables pour estimer divers processus écologiques cruciaux pour la dynamique des peuplements de poissons (Radinger & Wolter 2014). L’étude des mouvements individuels par télémétrie est une façon d’obtenir de la donnée spatialement explicite à haute résolution temporelle. Ces études, qu’elles utilisent la télémétrie acoustique (estuaire, fleuve, Figure 1-12), la télémétrie radio ou la RFID (petit cours d’eau, franchissement d’ouvrages) fournissent des

détections issues de réseaux de récepteurs fixes, dont les enveloppes de détection peuvent se superposer, auxquels s'ajoutent dans certains cas des détections avec des récepteurs mobiles.

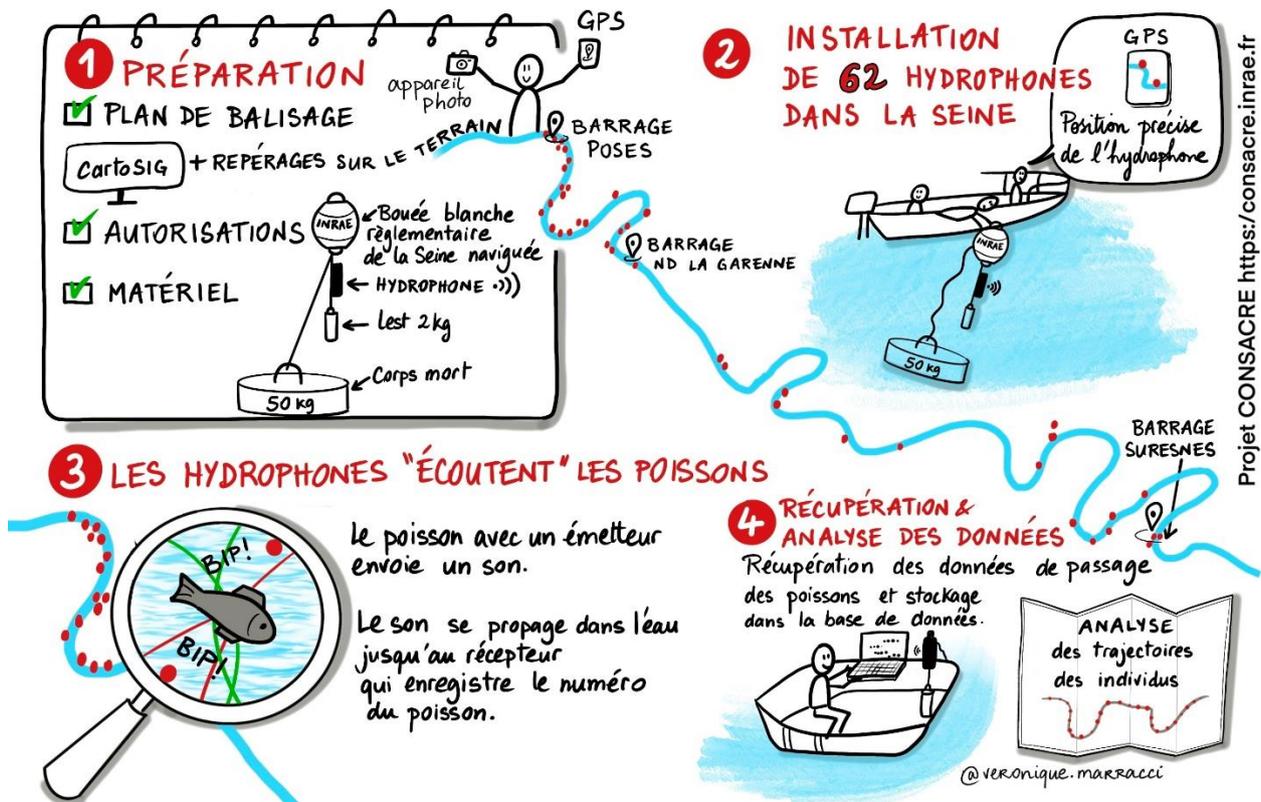


Figure 1-12 – Comment installer un réseau d'hydrophones acoustiques pour détecter le passage des poissons dans la Seine (illustration réalisée par Véronique Marracci pour communiquer sur l'expérimentation de télémétrie).

Pour analyser ce type de données, j'ai participé à l'adaptation d'outils et de méthodes pour :

- lisser les détections sur une courte période par un barycentre des positions sur quelques minutes (cas des récepteurs avec des enveloppes de détection superposées) en utilisant la méthode de *centre d'activité à court terme* (Simpfendorfer *et al.* 2002),
- calculer les trajectoires multi-segments orientées amont/aval et des distances hydrographiques à l'aide d'Anaqualand 2.0 (Le Pichon *et al.* 2006b),
- délimiter les domaines vitaux à l'aide de la méthode des noyaux Browniens (Brownian Bridge Movement Model) qui intègre l'orientation temporelle de la trajectoire et tient compte du temps passé (Calenge 2007; Horne *et al.* 2007).

Les positionnements spatio-temporels individuels permettent de reconstituer des trajectoires fines de déplacements et d'évaluer la composante mobile et résidente d'un groupe d'individus, comme on l'a observé à l'occasion de la dévalaison des juvéniles d'esturgeons européens (Acolas *et*

*al.* 2017a). Ces données individuelles de mouvements et de migration fournissent des estimateurs de la connectivité fonctionnelle et de sa variabilité (temps de parcours, vitesses de déplacement, temps de blocage sous des obstacles...) (Kanno *et al.* 2014). L'intégration des données de comportement des poissons avec celles de la cartographie dynamique des paysages fluviaux ("behaviorscape"), peut faire émerger des aspects nouveaux du comportement des poissons et de leur utilisation temporelle de divers types d'habitats. Cette approche améliore la compréhension des réponses des poissons aux impacts du changement global (White *et al.* 2014; Capra *et al.* 2017). L'utilisation des habitats étant dépendante de l'expérience et de la perception des conditions passés par chaque individu, la télémétrie est une méthode pertinente pour quantifier cette variabilité comportementale.

#### 1.4 Conclusion du chapitre

Pour rendre opérationnelle l'approche paysage aquatique, il a été nécessaire de cartographier la dynamique spatiale et temporelle des habitats des espèces de poissons en lien avec la séquence des stades ontogéniques à des échelles journalières et saisonnières. Notamment la correspondance entre les besoins de mobilité des espèces pour accomplir leur cycle de vie et les fenêtres transitoires de connectivité des milieux doit être abordée. Les méthodes d'écologie du paysage ont été adaptées aux milieux d'eau courante pour représenter au mieux comment les individus d'une espèce vont réussir à se déplacer dans le milieu et occuper leurs habitats vitaux de manière dynamique. Les indices calculés à l'échelle de chaque tache d'habitat quantifient leur contexte local, alors que les indices globaux caractérisent la configuration de toutes les taches d'un habitat. Enfin, les méthodes cartographiques (carte d'hétérogénéité des habitats, carte des aires d'activités journalières, carte d'accessibilité des habitats) fournissent une visualisation continue des potentialités des milieux aquatiques. Ces développements se sont appuyés sur la disponibilité des bases conceptuelles et l'existence de méthodes et d'outils opérationnels en Ecologie du Paysage. Mais aussi grâce à la disponibilité croissante de données haute résolution (cartographie terrain, imagerie ou modèles hydrodynamiques) pour diverses variables environnementales pertinentes décrivant les besoins des organismes aquatiques. Le recours à des protocoles originaux d'acquisition de données biologiques haute résolution et à la télémétrie permet d'accéder à de nouveaux patrons de distribution spatio-temporelle des espèces et des individus. Cependant, pour acquérir ces données haute résolution, de fortes contraintes logistiques peuvent exister nécessitant généralement des compromis techniques et financiers. Enfin, les avancées méthodologiques et techniques des SIG, le développement de logiciels d'analyse et de visualisation des données dédiés aux cours d'eau ont permis de proposer de

nouvelles façons d'interpréter et de quantifier ces données habitats et organismes à des portées jusqu'alors rarement explorées.

## **2 Applications scientifiques : une meilleure compréhension des facteurs de distributions spatio-temporelles des espèces de poisson dans les cours d'eau**

### 2.1 Dynamique et imprévisibilité des patrons de distribution d'habitats en contexte anthropique

#### 2.1.1 *Disponibilité et relations spatiales des habitats*

Après une phase d'adaptation des méthodes et outils de l'écologie du paysage, réalisée dans le cadre de ma thèse, puis une phase de test de leur pertinence dans divers types de milieux, il s'est avéré pertinent d'utiliser de façon conjointe les métriques de composition et de configuration des habitats. La cartographie continue associée à des métriques de composition (surface totale, fréquence relative) fournit un bilan quantitatif des habitats vitaux disponibles, tandis que les métriques de structure et de configuration (nombre de taches, surface médiane, distances de voisinages, indices de proximité, carte de complémentation...) sont pertinentes pour détecter la disponibilité spatio-temporelle d'un ou plusieurs habitats vitaux complémentaires et leurs relations spatiales.

Dans le cadre d'une étude sur les habitats vitaux du grand brochet (*Esox lucius* L.) dans un lac fluvial du Saint-Laurent (Québec), la cartographie des fréquences relatives des meilleurs habitats modélisés sur 50 ans a été réalisée. Ces cartes localisent les secteurs qui sont le plus souvent favorables à la fraie ou à la nourricerie en lien avec la topographie du lac et la variabilité hydrologique (Figure 2-1). Les deux habitats vitaux ne sont pas concentrés aux mêmes lieux et ne sont pas affectés de la même façon par la présence du réseau routier, ce qui fournit des éléments de contexte spatial pour comprendre le succès annuel du recrutement de cette espèce. Cette interaction entre la topographie des milieux aquatiques altérée par les activités humaines et le débit influence de façon peu prévisible la disponibilité des habitats vitaux et nécessite des approches spatio-temporelles dynamiques.

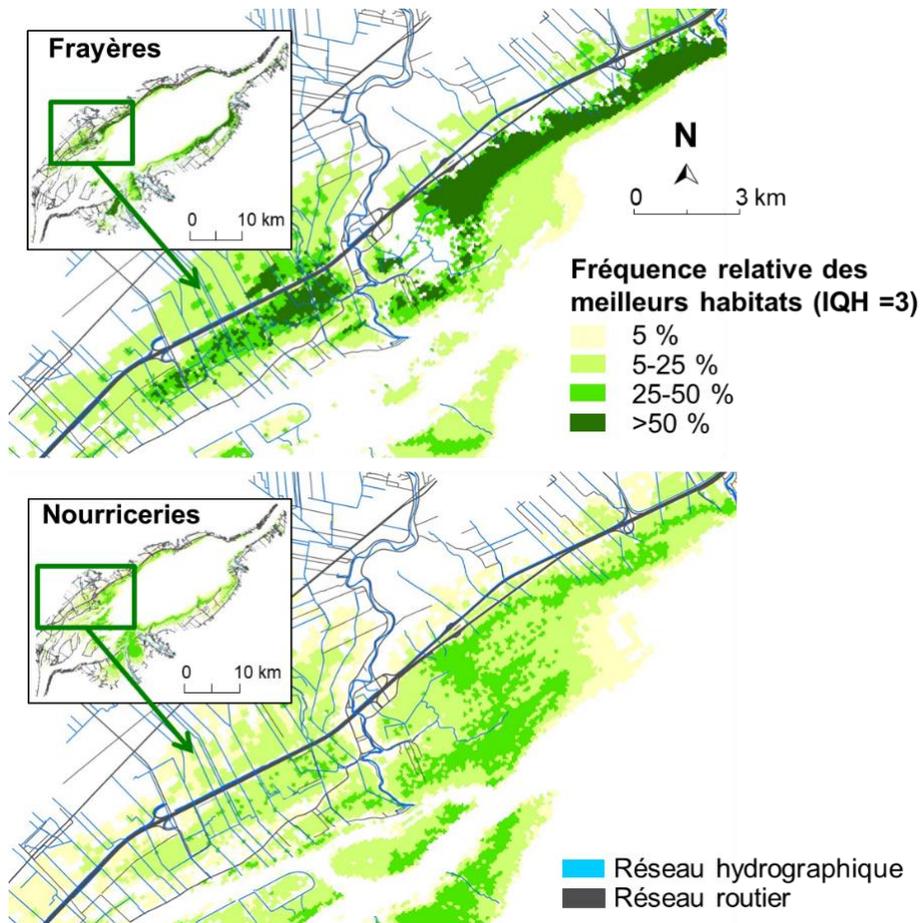
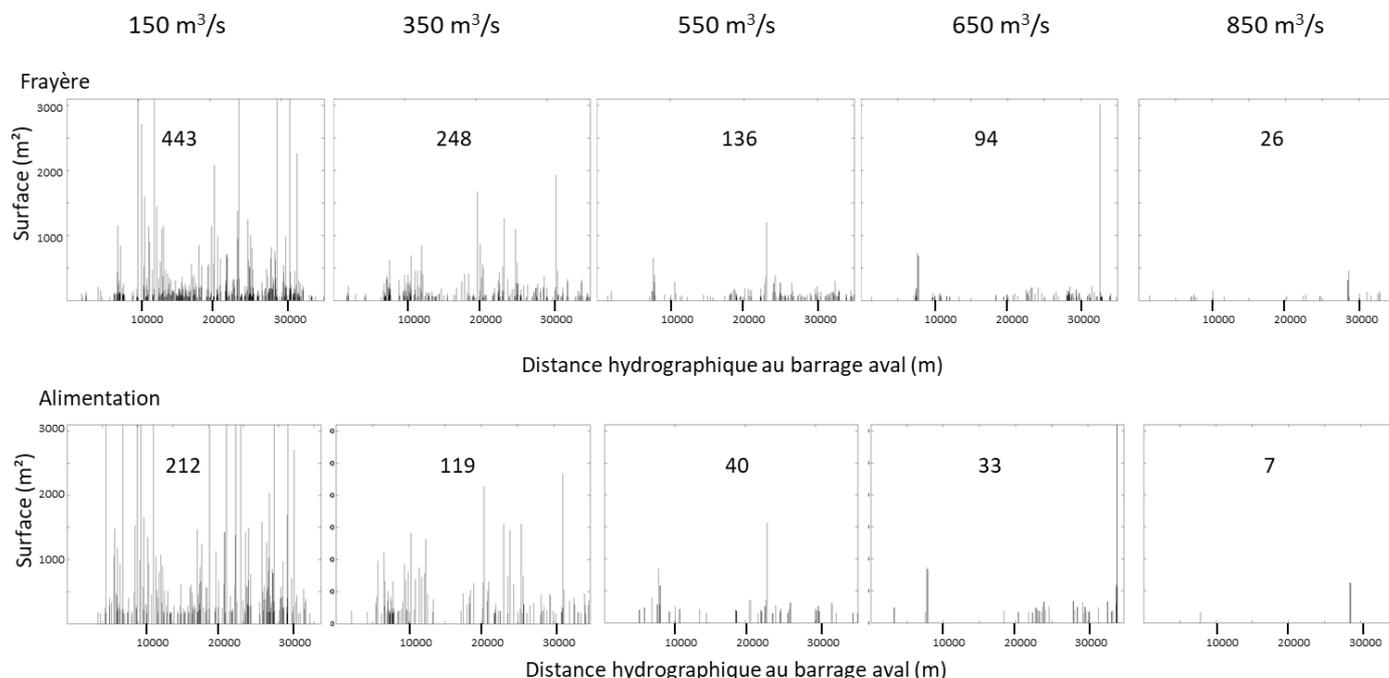


Figure 2-1 Carte de la fréquence relative des frayères et des nourriceries du grand brochet modélisés pour la période 1965-2013 (Lac St Pierre, Canada) (Le Pichon et al. 2018). (Le Pichon et al. 2018) (Le Pichon et al. 2018) (Le Pichon et al. 2018) La fréquence de 50% signifie que la localisation est favorable une année sur deux.

Ainsi, pour les fleuves chenalés où les profils de berges ont été modifiés, l'augmentation du débit diminue les potentialités d'accueil en termes de surface et de nombre de tache d'habitat vitaux pour certaines espèces rhéophiles étudiées (barbeau fluviatile, hotu, chevesne (*Squalius cephalus*), spirilin (*Alburnoides bipunctatus*)). Avec des berges souvent abruptes, les habitats peu profonds disparaissant progressivement, les vitesses de courants deviennent fortes et les substrats de fond ne sont plus favorables. Les métriques de composition et de configuration (surfaces totales, nombre de taches et surfaces moyennes) m'ont permis de quantifier les pertes de frayères et d'habitat d'alimentation pour le barbeau fluviatile sur deux biefs de la Seine (12-22 km) (Le Pichon et al. 2009), un bief du Rhône (35 km) (Figure 2-2) (Capra et al. 2010) et pour six groupes fonctionnels de poissons sur le bief parisien (15 km) (Tales et al. 2007). Dans ces milieux, où les régimes naturels de débits sont altérés, entraînant de fortes variabilités journalières du niveau de l'eau ou des décalages des périodes de basses eaux/hautes eaux (barrages réservoirs, production hydro-

électrique...), la possibilité de quantifier la variation de disponibilité des habitats vitaux est cruciale. Dans ces environnements stressants, des mouvements forcés plus fréquents et sur de plus longues distances, pour éviter des zones à risques ou trouver des habitats favorables, suggèrent une adaptabilité comportementale (Ebbesson & Braithwaite 2012; Capra *et al.* 2017).



*Figure 2-2 – Evolution de la distribution longitudinale des surfaces de frayères et des habitats d'alimentation potentiels du barbeau fluviatile avec le débit dans un secteur du Rhône (Sault-Brénaz - Jons). Le nombre de taches d'habitat est indiqué sur chaque graphe.*

Dans l'estuaire de la Seine, les zones intertidales peu profondes constituent des nourriceries pour diverses espèces et seraient naturellement accessibles au cours du flot dans les zones latérales de l'estuaire. La quantification des surfaces potentielles d'habitat de nourricerie pour des juvéniles de bar commun montre actuellement un résultat inattendu : au cours du flot, la surface totale des nourriceries chute et particulièrement au sud de la baie de Seine (Figure 2-3). La topographie, altérée pour les besoins de la navigation, a introduit des ruptures artificielles dans le profil transversal qui viennent interagir avec la phase de marée, selon les coefficients de marée et le débit. La répartition spatio-temporelle des zones intertidales peu profondes favorables aux juvéniles de bar est ainsi perturbée et leur accessibilité n'est pas continue au cours du flot (Alp & Le Pichon 2021).

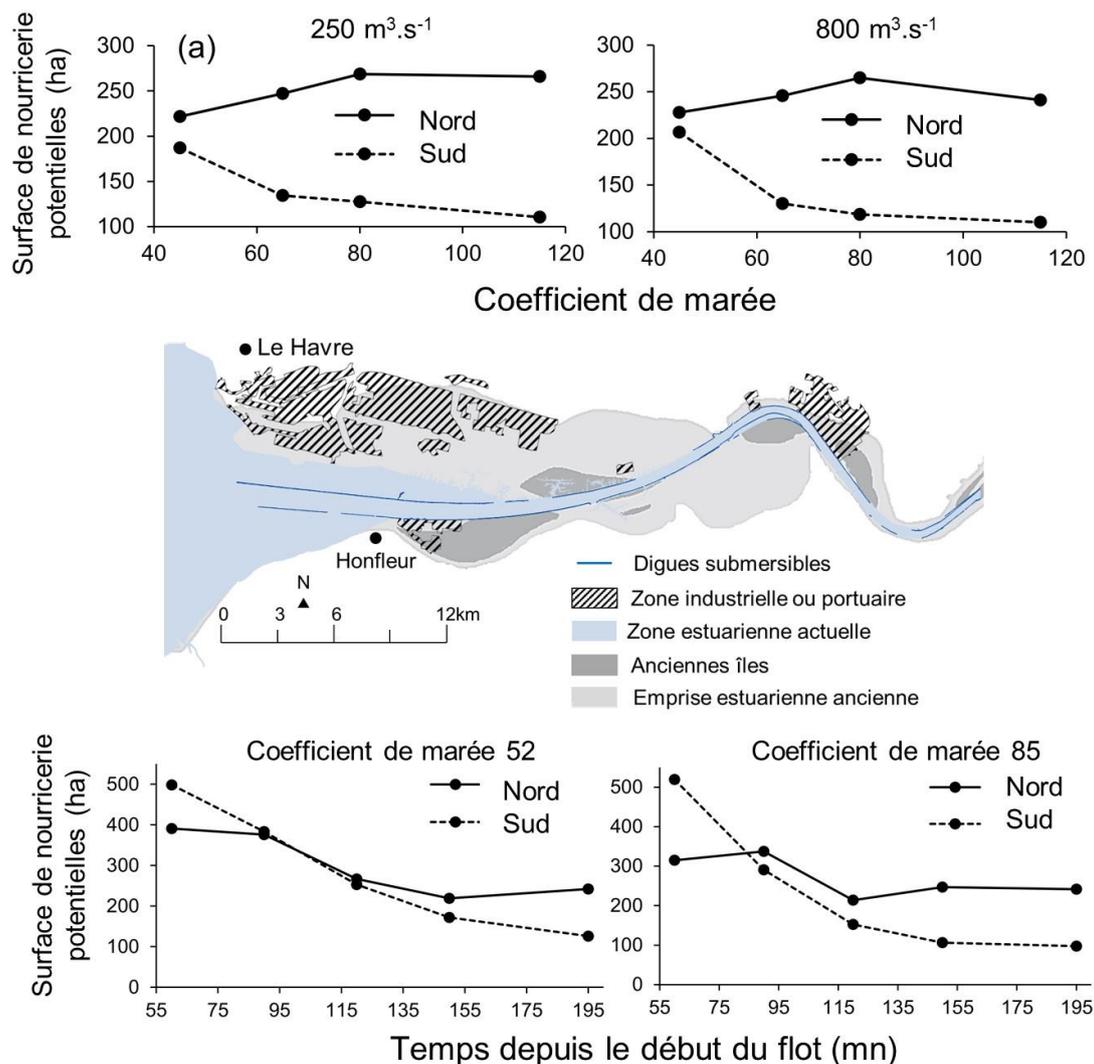


Figure 2-3 – Evolution des surfaces de nurricerie potentielle pour les bars juvéniles dans la partie aval de l’estuaire de la Seine (Alp & Le Pichon 2021).

De façon complémentaire, l’utilisation des indices de proximité s’est révélée pertinente pour quantifier la fragmentation globale d’un habitat et le degré d’isolement des taches d’habitat (Figure 2-4). Cet indice adimensionnel est d’autant plus élevé qu’une tache est à proximité d’autres taches de grandes tailles ; il est pertinent pour comparer l’évolution des paysages aquatiques dans différents contextes environnementaux. Le degré de fragmentation global des frayères et nurriceries du brochet au lac Saint-Pierre est variable selon les années hydrologiques (Figure 2-4 A) ; les faibles débits (P3) conduisant à une fragmentation moyenne plus élevée. Cependant, dans ces conditions, il y a moins de taches isolées comme l’indique l’évolution des valeurs de l’indice individuel (Figure 2-4 B).

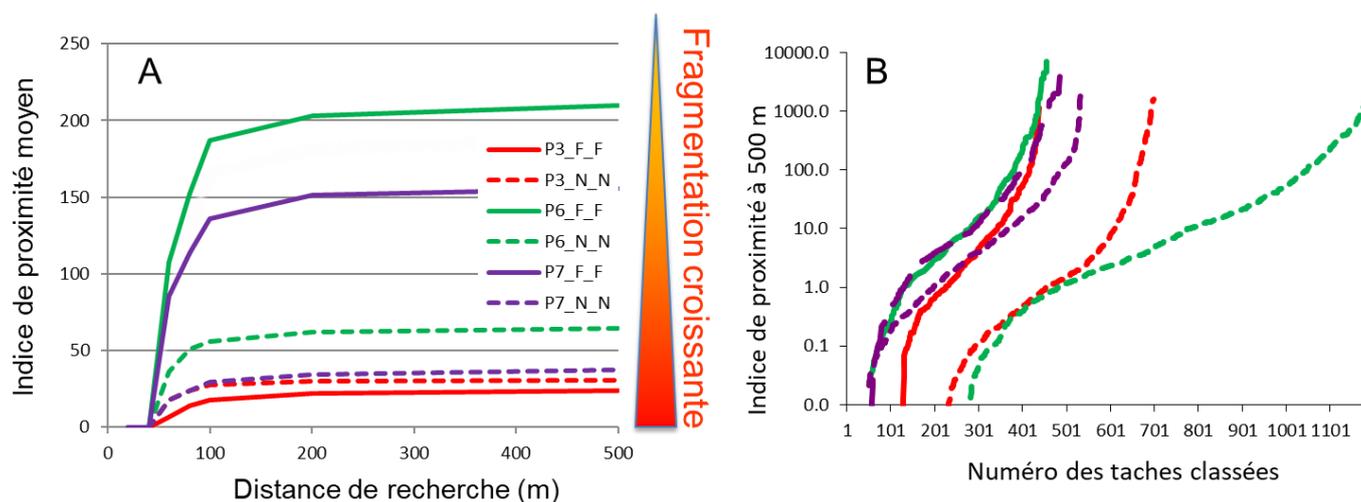


Figure 2-4 – Indices de proximités moyens (A) et indices pour chaque tache (B) calculés pour les habitats de frayère (F) et de nourricerie (N), pour 3 débits différents (P3, P6 et P7, Lac St Pierre, Canada). Pour B, les valeurs sont classées par ordre croissant sur l'axe des abscisses, le début des courbes indique le nombre de taches dont l'indice de proximité à 500 m est nul. L'axe des ordonnées est en échelle logarithmique (Capra et al. 2010).

Ces métriques évaluent l'interaction du débit et de la topographie de la plaine alluviale sur la fragmentation de certains habitats du cycle de vie et la localisation des taches d'habitats les plus fonctionnelles. Celles-ci fournissent un contexte spatial aux habitats ciblés lors des échantillonnages biologiques (section 2.2.2). Au-delà des indices, la cartographie des aires de complémentation fournit un support visuel global et spatialisé de la proximité entre deux habitats vitaux. Les cartes obtenues sur un tronçon du Rhône montrent les secteurs pour lesquels l'accroissement de débit permet la persistance de quelques zones potentiellement favorables même si elles diminuent en surface (Figure 2-5).

Les principales études que j'ai menées ont mis en évidence des dynamiques spatio-temporelles de la disponibilité et de l'accessibilité aux habitats potentiels, qui s'avèrent complexes et peu prévisibles sans recours à cette modélisation spatialement explicite. Ces dynamiques inattendues résultent de la combinaison d'une altération des régimes hydrologiques (cas de la régulation des débits du Rhône, du fleuve Saint-Laurent, de la Seine) couplée à des altérations anthropiques de la morphologie et des types de milieux aquatiques (notamment les sections transversales avec des berges abruptes, les types de végétation ou de substrat de fond). Ainsi dans ces trois fleuves, une situation paradoxale est apparue pour les espèces utilisant les habitats peu profonds en berges des chenaux lotiques: les forts débits sont maintenant souvent associés à un potentiel d'accueil inférieur à celui des débits faibles. En particulier, dans les plaines d'inondation du lac Saint-Pierre

(Saint-Laurent où s'est installée l'agriculture, les enveloppes d'inondation les plus efficaces (meilleur rapport support potentiel/support utile) à la reproduction du grand brochet sont observées à faibles débits de crues (Foubert *et al.* 2020).

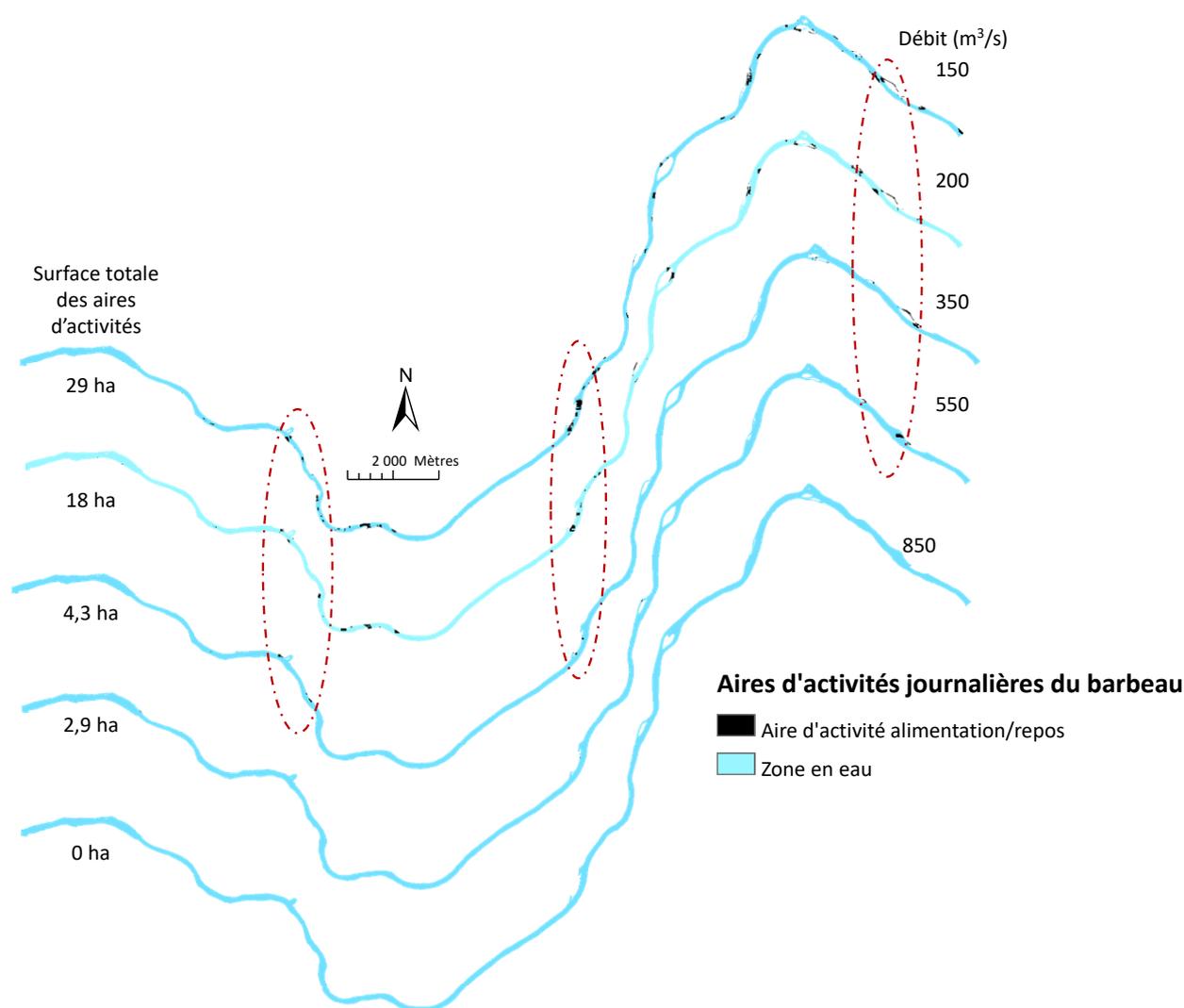


Figure 2-5 – Evolution des surfaces des aires d'activités du barbeau fluviale et de leur localisation en fonction du débit (Rhône) (Capra *et al.* 2010). En pointillés, les secteurs où des aires potentielles persistent avec l'augmentation du débit.

L'évolution de la disponibilité des habitats s'est avérée plus complexe encore dans un estuaire comme celui de la Seine, avec de forts contrastes entre la partie baie de Seine, les filandres (tidal creeks) et le secteur fluvial, essentiellement en lien avec les altérations morphologiques de l'estuaire, la position du chenal de navigation et des digues submersibles (Alp & Le Pichon 2021).

Ces études spatialement continues sur de grands milieux, impliquant un élargissement de l'échelle spatiale d'étude, identifient les facteurs et les processus critiques à l'échelle des paysages

aquatiques qui limitent la disponibilité de certains habitats vitaux et aide à mieux comprendre la productivité des milieux.

### 2.1.2 Connectivité des habitats

Les études concernant la connectivité des habitats ont débuté par une phase de test sur la plaine alluviale de la Bassée au cours de ma thèse. Elles se sont enrichies, selon le contexte des projets, grâce à l'intégration croissante de la dynamique spatio-temporelle des habitats, et à une prise en compte des phases du cycle de vie pour diverses espèces. Un schéma de synthèse est proposé pour résumer les divers contextes de ces études (Figure 2-6). Le bilan montre que l'approche de modélisation utilisant les distances fonctionnelles et les chemins de moindres coûts s'adapte à un large gradient de milieux aquatiques : des petits cours d'eau aux fleuves et estuaires.

Cette approche est aussi adaptée à des espèces aux cycles de vie plus ou moins complexes, impliquant des mobilités diverses : des espèces holobiotiques mobiles (Carré *et al.* 2012; Le Pichon *et al.* 2015b ; Roy & Le Pichon 2017; Foubert *et al.* 2019), aux grands migrateurs amphihalins (Le Pichon *et al.* 2020) et aux espèces marines utilisant les estuaires (Alp & Le Pichon 2021). Le recours à ce type de modélisation spatialement explicite s'est avéré très utile dans les grands milieux où les mesures expérimentales sont difficiles (échantillonnage des zones intertidales de l'estuaire de la Seine ou de lac fluviaux du St Laurent).

Elle donne un cadre pour tester des hypothèses sur la mobilité et le comportement des poissons (par exemple, les mouvements passifs des larves ou la nage active des juvéniles) et leurs conséquences en termes d'accessibilité des habitats disponibles. Elle s'adapte à l'étude d'échelles temporelles variées : celle du cycle de marée pour évaluer l'accessibilité des nourriceries de bar pendant un flot (Alp & Le Pichon 2021) ou celle de l'échelle historique (depuis le milieu du 19ème siècle) pour montrer l'effet cumulé des discontinuités chimiques et physiques de l'axe Seine sur la disparition de trois espèces de poissons migrateurs (Le Pichon *et al.* 2020).

La modélisation de la connectivité chronologique (section 1.1.1) explore divers aspects du cycle de vie des espèces. La connectivité spatio-temporelle d'un seul habitat du cycle vital dans un milieu très fluctuant met en lumière les goulets d'étranglement potentiels dans la dynamique de colonisation estuarienne des nourriceries par des juvéniles (Alp & Le Pichon 2021).

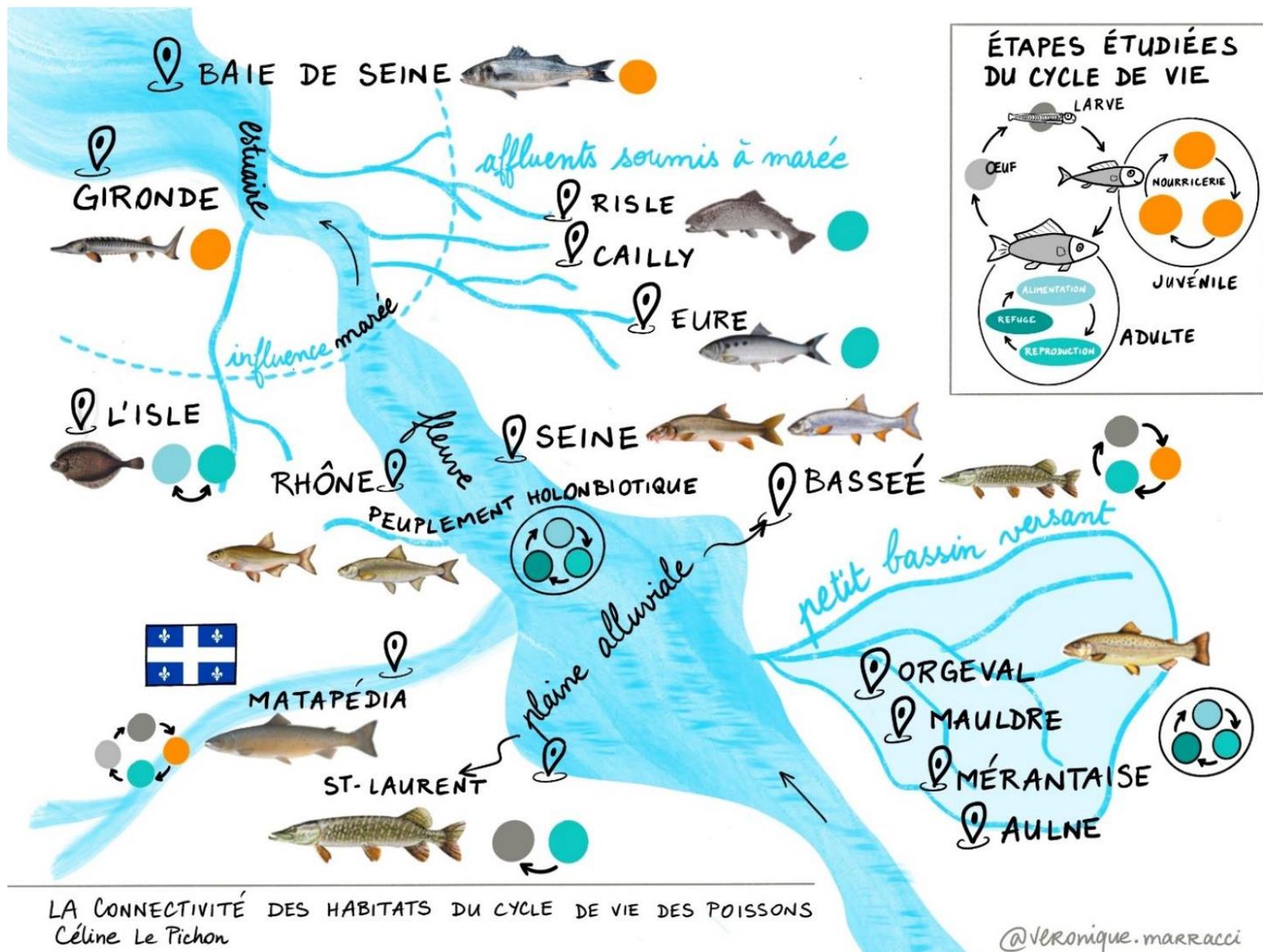


Figure 2-6 – Tour francophone (France - Québec) d'études menées sur la connectivité des habitats piscicoles (2004-2021).

La modélisation chronologique de quatre habitats du cycle de vie du saumon Atlantique sur la rivière Matapédia (Québec) a quantifié les aires de chaque habitat connecté au stade n-1 puis n-2 et n-3. L'étude met en lumière les pertes de surfaces d'habitats non connectés à chaque stade successif, impactant la capacité d'accueil réelle des cours d'eau (Figure 2-7).

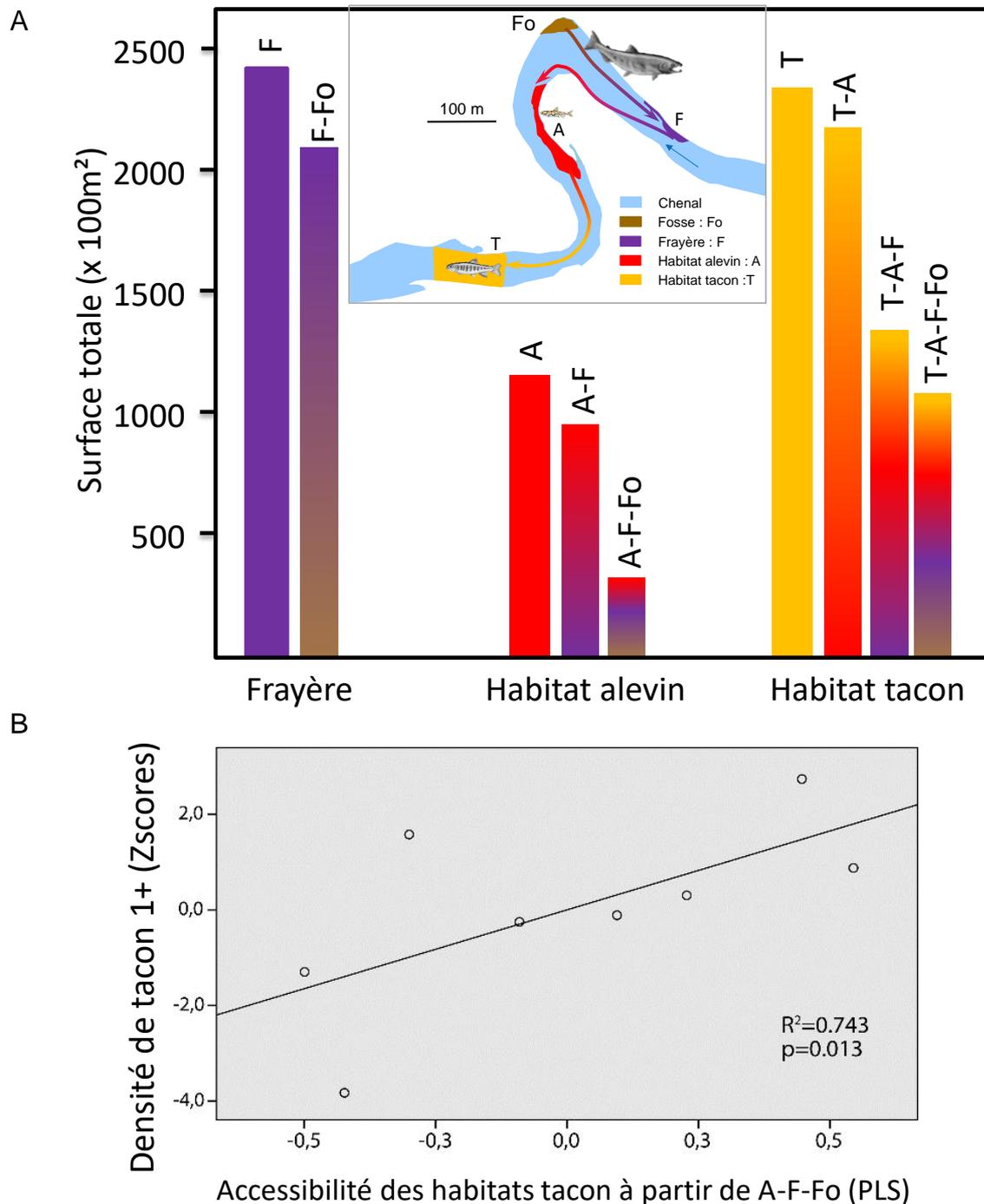


Figure 2-7 – A- Surfaces de fosses (Fo), frayères (F), habitats d’alevins (A) et de tacons (T) totales et connectés à un, deux ou trois habitats précédents du cycle de vie (probabilité d’accès > 0,7). La couleur des barres renvoie aux couleurs des habitats, les couleurs dégradées indiquant plusieurs habitats connectés. B - Régression des moindres carrés partiels (PLS) entre l’accessibilité chronologique des habitats tacons et la densité normalisée de tacons (1+) échantillonnés entre 2001 et 2012 (Données Fisheries and Oceans Canada, Matapédia, Québec).

La connectivité chronologique des habitats influence la densité de juvéniles. Notamment, l'abondance de juvéniles 1+ (tacons) est corrélée positivement aux habitats de tacons les plus connectés aux habitats d'alevins, connectés à des frayères, connectées à des fosses (T-A-F-Fo), tout en contrôlant la qualité de l'habitat (valeur > 0.7). Cette relation n'est plus significative lorsque les frayères ne sont pas connectées à une fosse d'attente (T-A-F) (Figure 2-7) (Bergeron *et al.* 2016).

## 2.2 Détection des patrons spatio-temporels de distribution des espèces

### 2.2.1 Tendances dans les distributions longitudinales d'espèces

L'échantillonnage spatialement intensif (SIS) par pêche électrique fournit des informations à une résolution et une étendue spatiale permettant d'étudier les distributions de présence et d'abondance des espèces sur de longues distances. Mené à de fortes portées (large étendue/résolution fine), il quantifie les lieux de fortes abondances pour certaines espèces (exemple du chabot, abondant en amont des étangs sur le Rognon (Figure 2-8 A,D), ou la distribution de richesse de certaines guildes, comme les poissons rhéophiles (Figure 2-8 B). Il met en lumière l'importance d'ouvrages ponctuels sur la distribution des peuplements de poissons : la présence d'obstacles et d'un étang proche du cours d'eau modifie la composition du peuplement dans le cours d'eau sur plusieurs kilomètres en aval (Figure 2-8 C).

Cet échantillonnage offre la possibilité d'étudier les variations d'abondance de certaines classes d'âges et les fronts de colonisation. Les fronts de colonisation de la truite commune résidente sont identifiables dans certains bassins versants franciliens que nous avons étudiés : l'Orgeval et la Mauldre (Figure 1-10). Associer cet échantillonnage avec des relevés spatialement continus de frayères pendant l'hiver et des échantillonnages spatialisés de juvéniles de truites sur les radiers/plats courants à l'automne (Prévost & Nihouarn 1999) fournit une analyse de la localisation des reproducteurs potentiels, de leurs lieux de fraye et des sites de recrutement fonctionnels.

L'échantillonnage « centré par habitat vital » sur une large étendue a permis de localiser des espèces peu abondantes, comme c'est le cas du barbeau fluviatile dans la Seine (Le Pichon *et al.* 2015b). Des agrégations spatiales d'individus utilisant des taches d'habitats d'alimentation contiguës (800 - 2000 m) sont observées, montrant le rôle de la supplémentation des habitats, illustrée par les pics de l'indice de proximité (Figure 2-9), pouvant correspondre à la taille de sous-populations (Le Pichon *et al.* 2015b). L'identification de la distribution spatiale des habitats potentiels occupés et vacants est importante dans la compréhension des dynamiques de population et la gestion conservatoire des espèces (Schtickzelle & Quinn 2007).

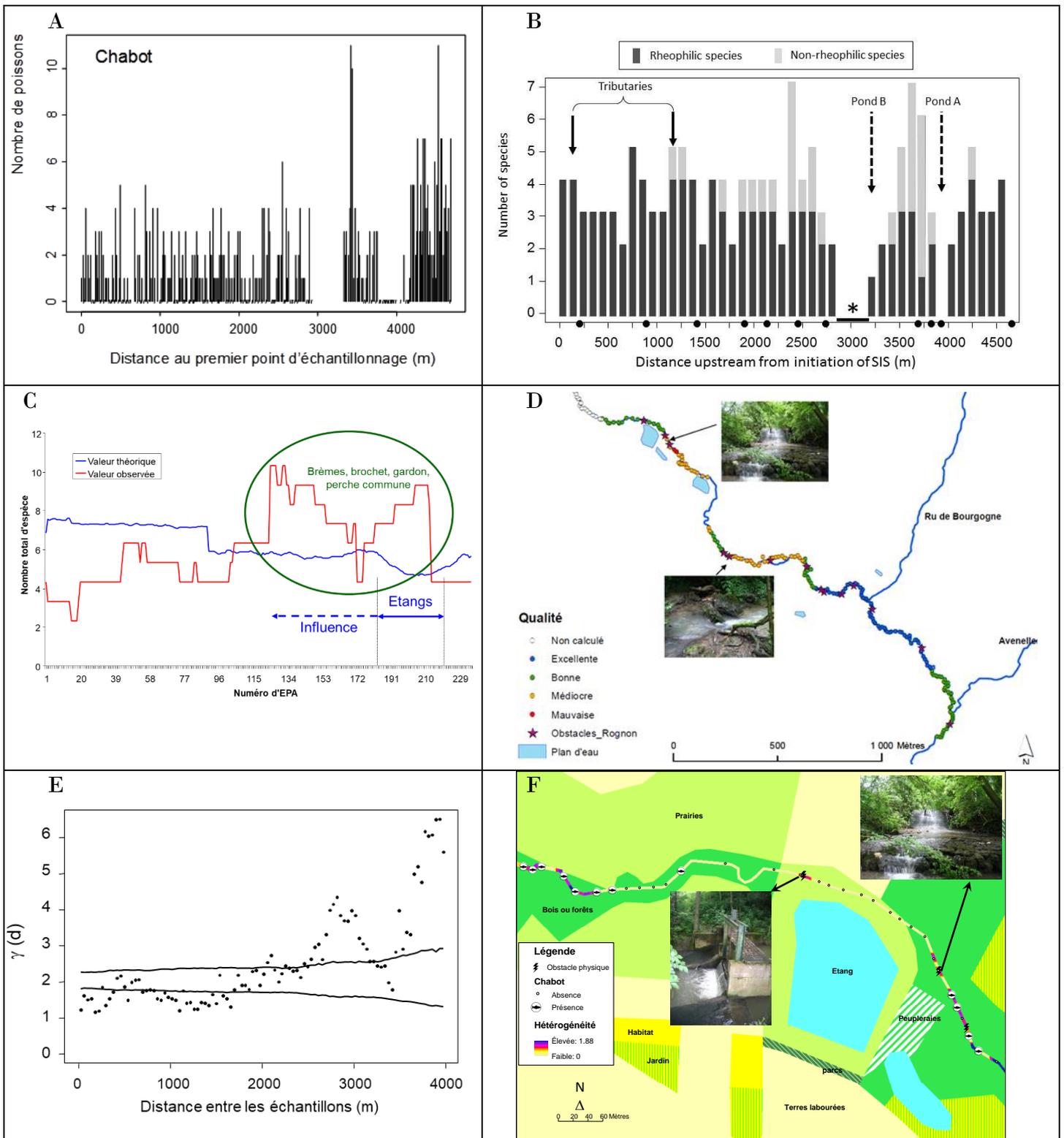


Figure 2-8 – Diverses analyses de la distribution longitudinale des espèces et du peuplement utilisant 265 EPA sur le Rognon (visible en D). A) Distribution longitudinale du chabot (*Cottus gobio*), B) Distribution du nombre d'espèces rhéophiles et autres espèces sur 100 m (5 EPA), C) Richesse observée et richesse théorique (indice IPR), D) Calcul de l'IPR sur une fenêtre glissante de 30 EPA à partir de l'aval, E) Semi-variogramme empirique pour le chabot, les lignes noires représentent les 10ème et 90ème percentiles, calculés sur 5000 permutations. F) Présence / absence du chabot, hétérogénéité des faciès et présence d'obstacles et d'étangs.

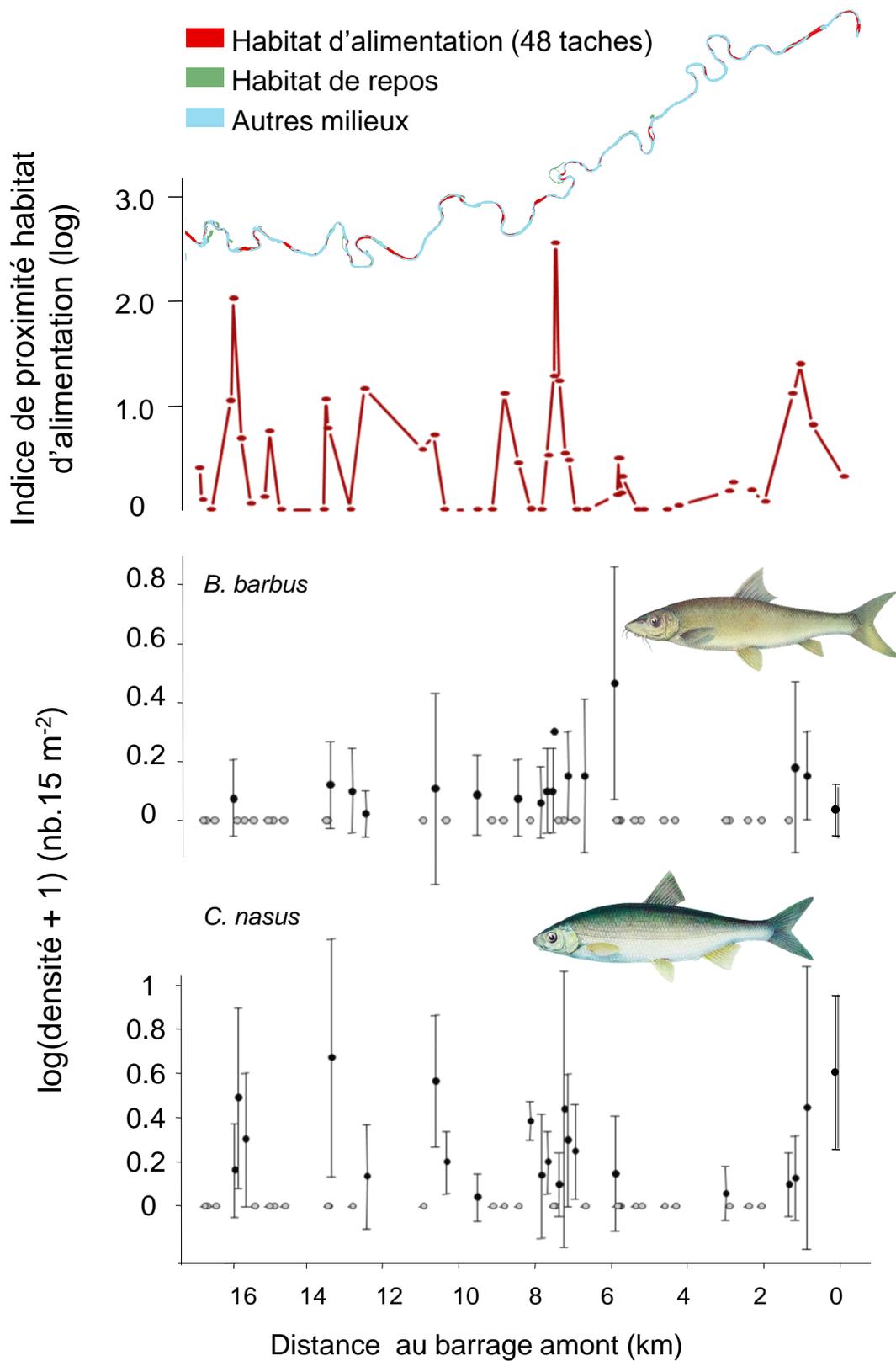


Figure 2-9 – Distribution longitudinale des indices de proximité à 60 m et de la densité de barbeaux et de hotus dans 48 taches d’habitat d’alimentation préalablement cartographiées dans un bief de la Seine. Les indices de proximité à zéro indiquent des taches isolées. Les densités à zéro indiquent qu’aucun individu n’est échantillonné dans la tache (voir Figure 1-11).

## 2.2.2 Variables environnementales locales et variables de contexte spatial

L'importance relative des facteurs environnementaux locaux (hauteur d'eau, vitesse de courant, présence d'abris, substrat de fond) et du contexte spatial dans la présence et l'abondance des espèces est testée en comparant des modèles linéaires généralisés. Les variables de contexte spatial, telles que la distance à des faciès hydromorphologiques, à des obstacles physiques, l'hétérogénéité des habitats aquatiques ou la fréquence relative de divers usages du sol, sont testées comme prédicteurs dans ces modèles (Belliard *et al.* 2011; Leclerc 2011). Un bilan de divers modèles construits sur l'Orgeval, la Mauldre et la Seine montre que certaines variables spatiales, comme la distance à un faciès hydromorphologique, à un habitat vital ou l'hétérogénéité expliquent en partie les distributions d'abondance ou de présence des espèces (Tales *et al.* 2008; Le Pichon *et al.* 2015b).

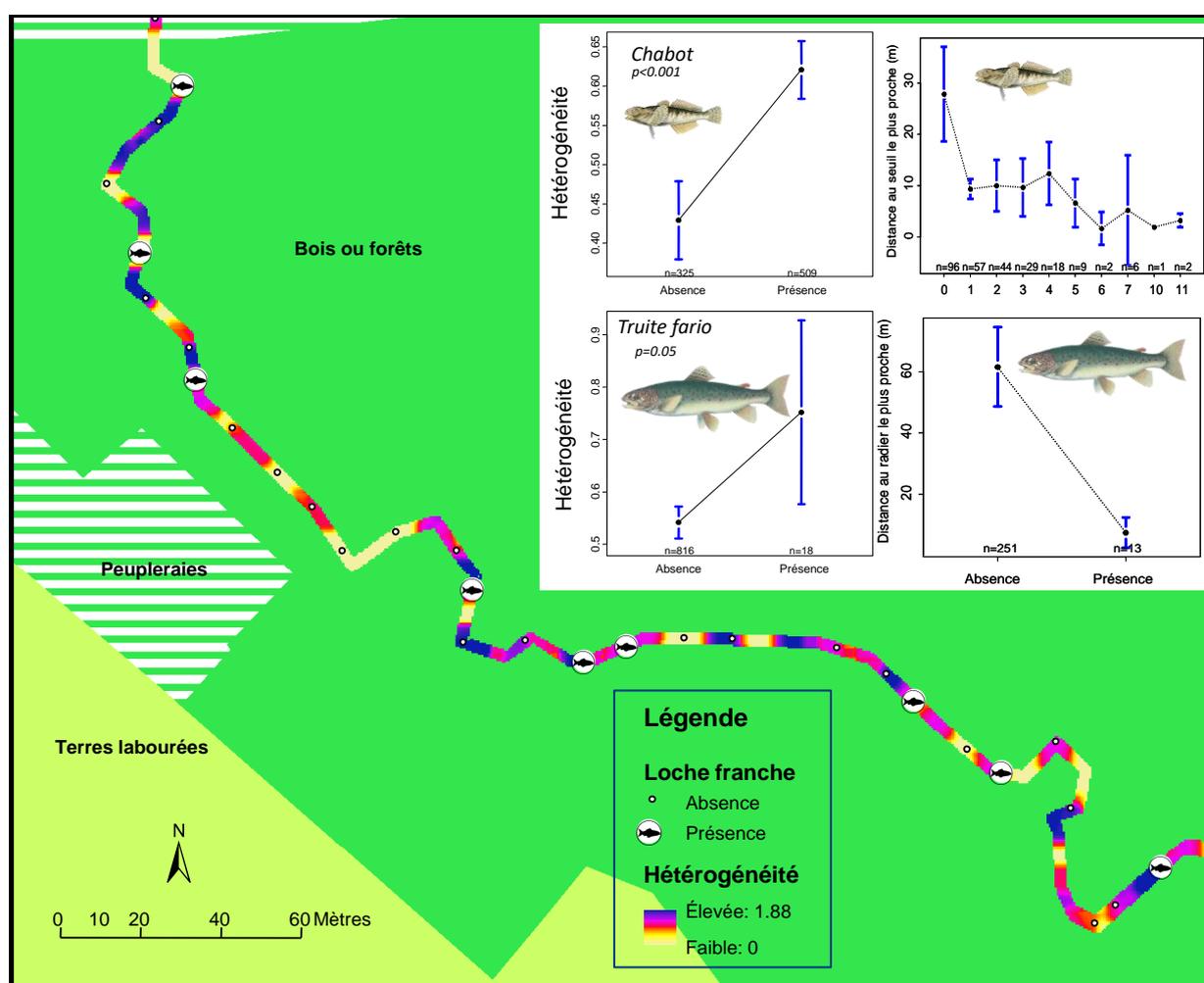


Figure 2-10 – Importance de l'hétérogénéité de l'habitat (Figure 2-8 F), calculé à l'aide d'une fenêtre glissante de 120 m<sup>2</sup>, et de la proximité à certains faciès hydromorphologiques dans la présence ou l'abondance des espèces (Figure 1-10).

L'hétérogénéité des faciès a une influence positive sur la présence de la truite qui nécessite à la fois des faciès type "mouille" et "radier" pour leur cycle de vie (Zweimuller 1995; Eros *et al.* 2003) mais aussi sur la présence et l'abondance du chabot (Figure 2-10).

Comme on l'a vu dans la Figure 2-9, les variables de contexte spatial, comme l'indice de proximité aux habitats d'alimentation, expliquent la probabilité de présence des barbeaux et hotus (Le Pichon *et al.* 2015b). On peut résumer ces effets emboîtés des variables locales et spatiales par le schéma de synthèse présenté Figure 2-11.

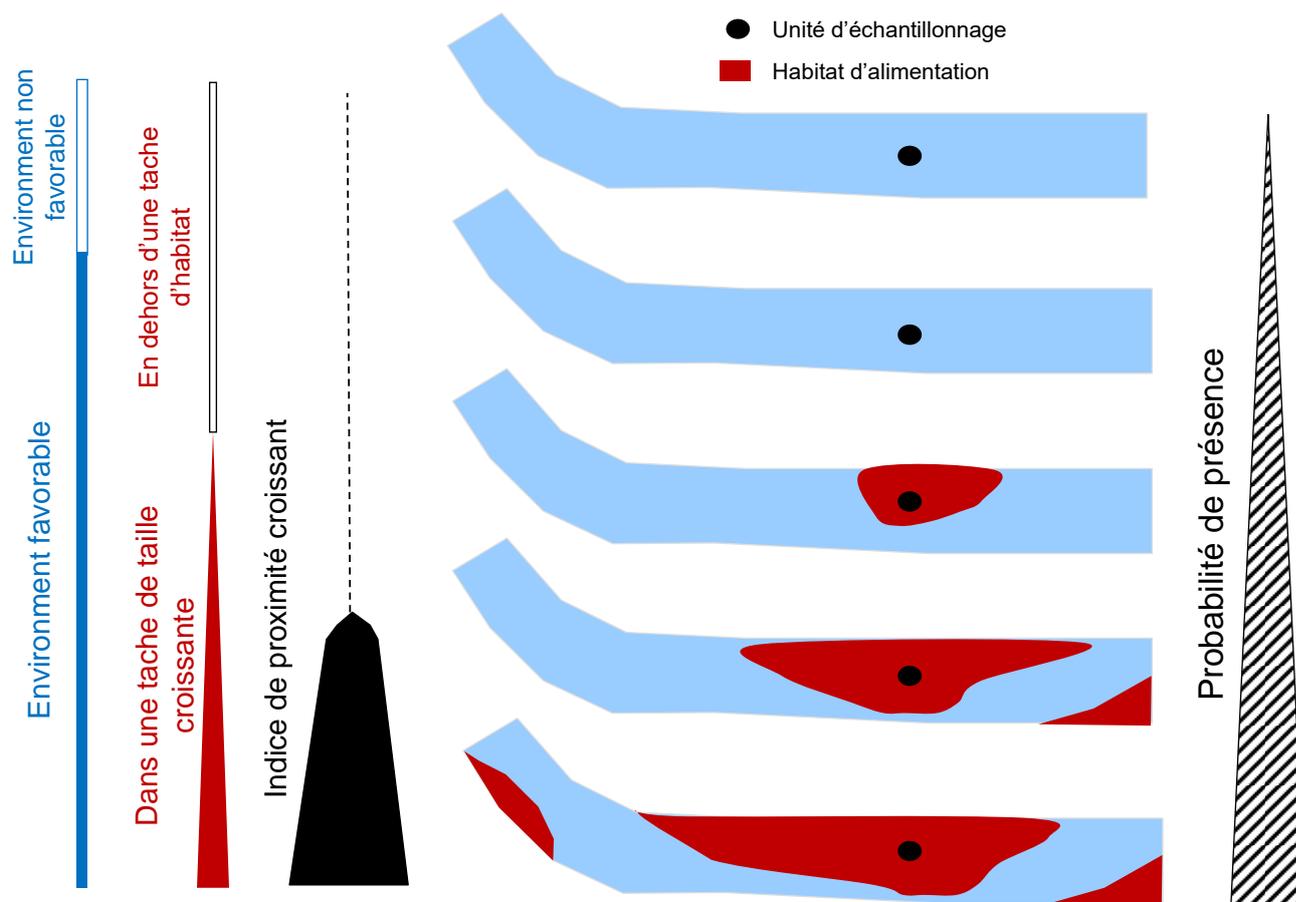


Figure 2-11 – Modèle conceptuel décrivant le rôle de l'environnement local et des relations spatiales entre les habitats pour expliquer la probabilité de présence des espèces étudiées.

### 2.2.3 Mouvements, trajectoires individuelles et accessibilité des habitats

#### 2.2.3.1 Utilisation des habitats dans les domaines vitaux

J'ai mené plusieurs études utilisant des données de trajectoires temporelles individuelles qui ont mis en évidence les secteurs occupés de façon fréquente (aires principales d'activités) et l'influence de facteurs environnementaux sur les mouvements des espèces. Dans des milieux très fluctuants, comme le secteur eau douce des estuaires soumis à marée, les espèces étudiées

développent des stratégies adaptatives particulières (Le Pichon *et al.* 2014 ; Acolas *et al.* 2017b; Le Pichon *et al.* 2017a ). Ces stratégies sont observées en corrélant les trajectoires avec les facteurs environnementaux et en confrontant les enveloppes d'utilisation de l'habitat (Kernels Browniens 50% du temps) avec la cartographie dynamique des habitats estuariens (Figure 2-12). Dans l'estuaire d'eau douce tidal de la Seine, l'ampleur des mouvements des trois espèces étudiées est plus élevée avec la marée montante (flot) (Le Pichon *et al.* 2017a). Ce mécanisme de transport tidal sélectif a été observé en Gironde sur les juvéniles de flet (*Platichthys flesus*), de mullet porc (*Chelon ramada*) et d'anguilles (*Anguilla anguilla*) à l'occasion de la thèse de Thomas Trancart (Trancart 2011). Une majorité d'individus présentent un « homing spatial » court et moyen-terme, défini par un retour à des habitats précédemment occupés (Lucas & Baras 2001). Ce comportement est observé à la fois entre l'habitat de repos et d'alimentation et entre habitats intertidaux et subtidaux, mais aussi à large échelle avec plusieurs aires principales d'activités quotidiennes. Ce comportement est relié à un mécanisme de mémoire spatiale court terme impliquant une identification visuelle ou olfactive de repères et de topographie des fonds dans les milieux fluctuants. En particulier, le mullet, aidé d'une bonne vision en couleur, mémorise la direction et la distance (Benhamou *et al.* 1990), lui permettant de revenir rapidement et de loin sur un site d'alimentation intertidal précédemment occupé (Le Pichon *et al.* 2015a). Ces processus de mémorisation des changements de conditions environnementales ont été aussi observés par télémétrie dans un milieu très fluctuant comme le Rhône, montrant une sélection de l'habitat de « moindre contraintes » (Capra *et al.* 2017).

A l'occasion de la thèse de Thomas Trancart, nous avons observé que les habitats d'eau douce tidaux en Gironde sont utilisés par les juvéniles de 2-3 ans de flet pour leur croissance estivale avec une préférence pour les milieux ombragés et peu profonds (Le Pichon *et al.* 2014). Les habitats d'eau douce et oligohalins sont aussi utilisés par un quart des juvéniles d'esturgeon européen (*Acipenser sturio*) de 10 mois nés en captivité (fraction résidente), avec une préférence pour les secteurs où la profondeur varie de 5 à 8 m entre la basse mer-et la haute mer (Figure 2-12) avec des substrats fins (Acolas *et al.* 2017b). Les possibilités actuelles de couplage des données d'habitat dynamiques et de trajectoires individuelles sont essentielles pour comprendre la réponse des espèces aux conditions de plus en plus fluctuantes des milieux aquatiques soumis aux altérations humaines et notamment leur capacité de mémorisation des conditions d'habitat quotidien.

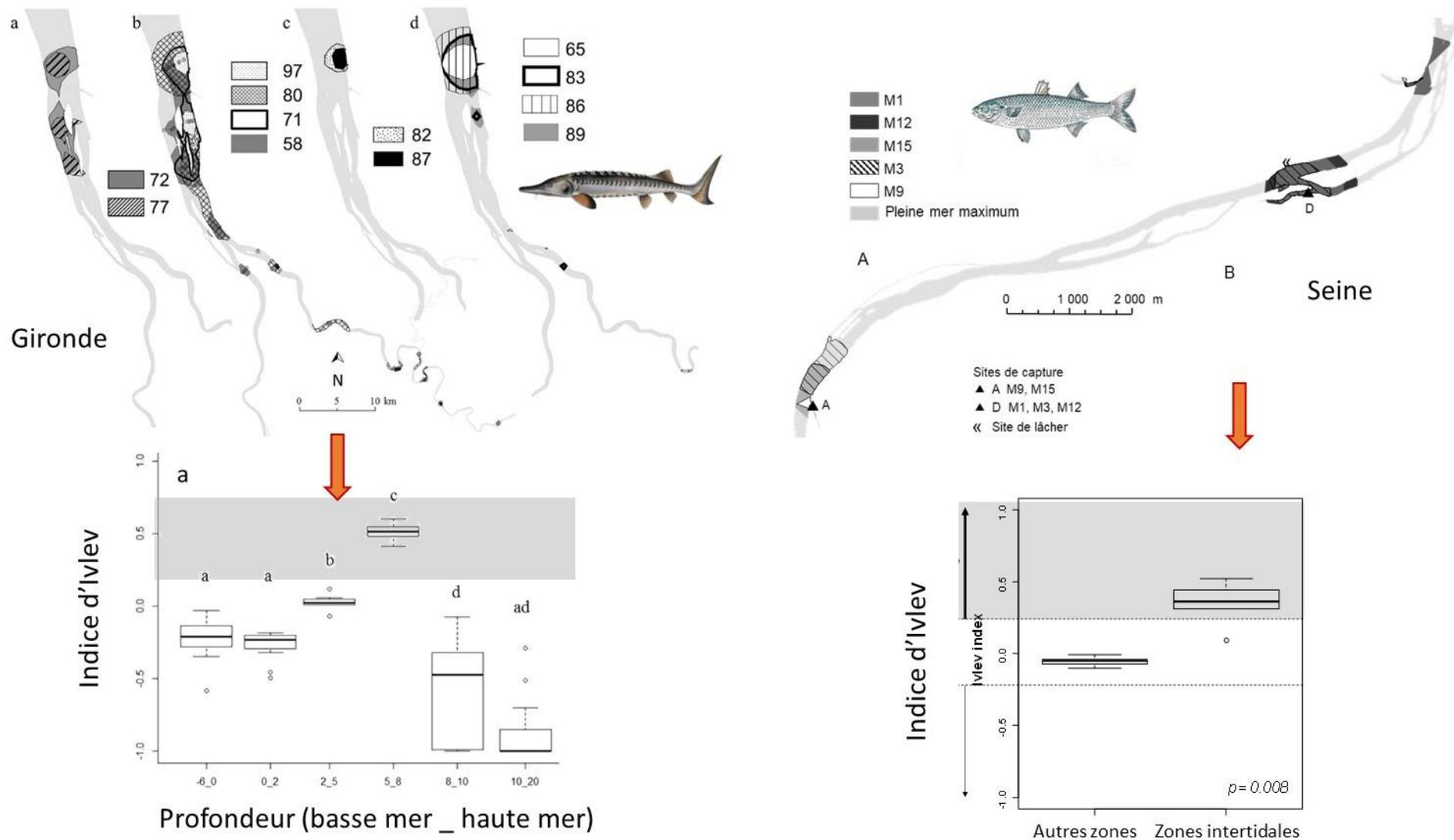


Figure 2-12 – Enveloppes de domaines vitaux 50% du temps pour l'esturgeon en Gironde et le mullet porc en Seine. Exemple de sélectivité d'habitat (Indice d'Ivlev positif) obtenues pour l'ensemble des individus étudiés par télémétrie acoustique (un numéro : un individu)

### 2.2.3.2 *Accessibilité des habitats en migration*

L'analyse des trajectoires via la télémétrie génère des données de capacités de mouvements et de comportement face aux ouvrages permettant d'appréhender des facteurs essentiels de la continuité écologique. Les capacités de mouvements ont été quantifiées par télémétrie radio, sur la truite commune résidente dans deux petits cours d'eau d'Île-de-France (Le Pichon *et al.* 2019), par télémétrie acoustique sur le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*) et la brème commune (*Abramis brama*) dans la Seine (projet CONSACRE). Elles donnent des indications sur les comportements et l'ampleur des mouvements pendant la migration de reproduction de ces espèces résidentes. Sur la truite commune, l'ampleur des mouvements a servi à calibrer différents scénarios de restauration de la continuité écologique et à évaluer l'accessibilité aux frayères potentielles pour des individus très ou moyennement mobiles (Roy & Le Pichon 2017). La fraction mobile de juvéniles d'esturgeon européen (trois quart des individus) ont migré rapidement dans les eaux mésohalines de l'estuaire de la Gironde avec des comportements variés : soit une trajectoire rectiligne soit une trajectoire avec des aller-retour fréquents (Acolas *et al.* 2012).

De même le comportement face aux ouvrages de type seuil, embâcles ou barrages de navigation lors de migrations de reproduction apporte des données individuelles essentielles pour modéliser la connectivité fonctionnelle. Un suivi de la montaison des grandes aloses à partir du premier barrage venant de la mer (Poses) jusqu'à Paris (184 km) a été réalisé par télémétrie acoustique. Les données de détection permettent de calculer des vitesses individuelles de déplacement mais aussi des temps de blocage à l'aval de chaque ouvrage (Figure 2-13). Cela améliore la calibration des résistances des modèles de moindre coût en intégrant la variabilité individuelle. Ces différences de comportement au sein d'un groupe d'individus ou d'une même population, si elles sont systématiques et structurées, sont désormais considérées comme des "personnalités" qui jouent un rôle dans les processus écologiques et évolutifs, en particulier dans la création de patrons spatiaux de distribution des individus (Wolf & Weissing 2012).

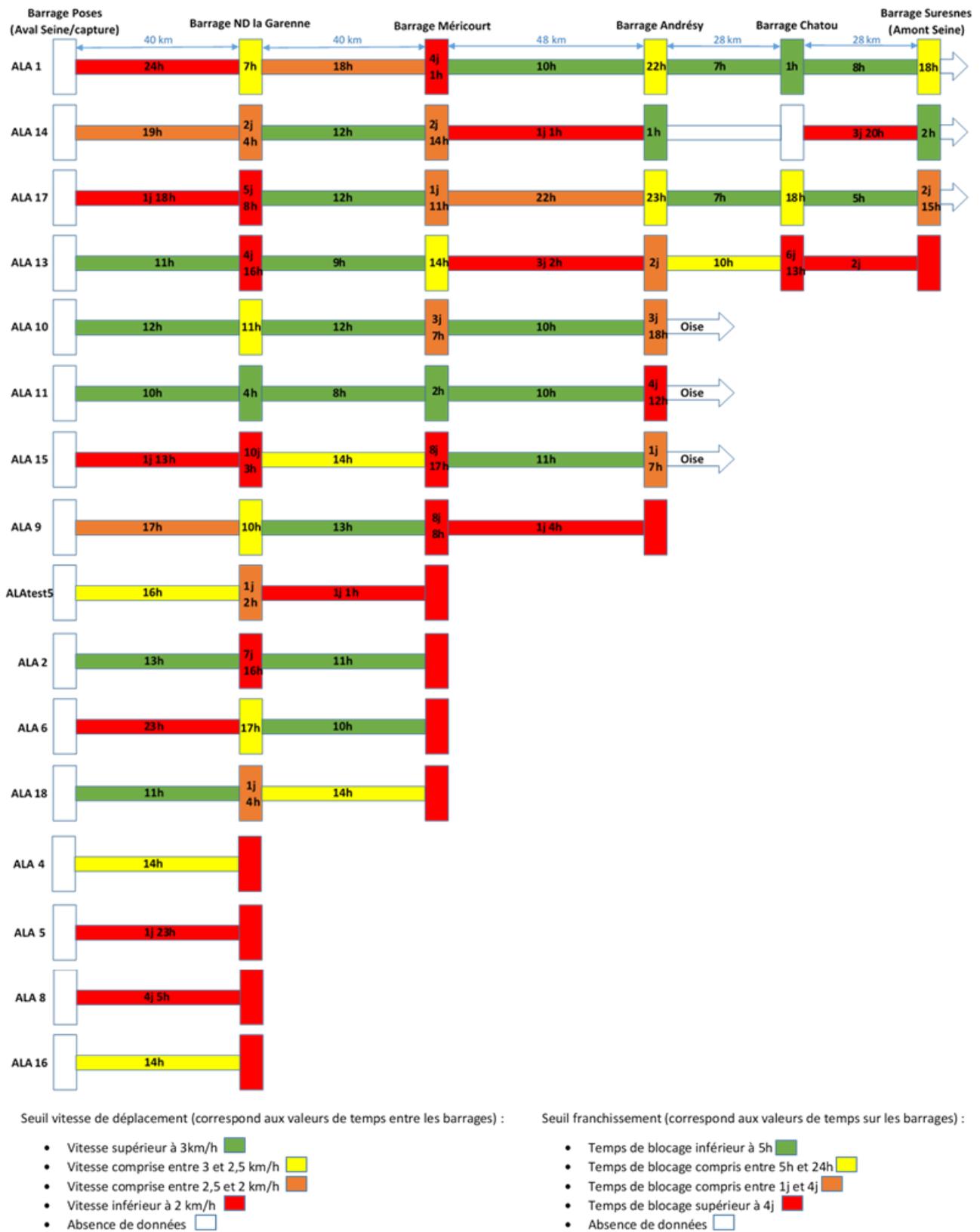


Figure 2-13 – Trajectoire et comportement à l’aval des barrages de navigation lors de la migration de reproduction de la grande alose sur la Seine (2021). Les individus sont classés en fonction du nombre d’ouvrages franchis. Le gradient de couleurs (vert au rouge) indiquent des temps de blocage croissants et des vitesses de déplacement qui diminuent (Michelot 2021).

### 2.3 Conclusion du chapitre

Les approches à large portée conduisent à détecter des patrons à des échelles auxquelles ils n'ont pas été préalablement détectés ou quantifiés ; c'est un aspect de l'écologie des paysages orienté vers l'exploration des patrons et des processus sans a priori sur les échelles pertinentes. Pour les milieux aquatiques que j'ai étudiés, des estuaires aux petits cours d'eau, ces approches large portée donnent l'opportunité de détecter des patrons peu prévisibles de distribution des habitats et des espèces, en lien avec des contextes altérés par les activités humaines. J'ai examiné certains patrons de distribution des espèces et cherché à élucider les processus les expliquant, notamment via l'analyse d'effets emboîtés de variables locales d'habitat et du contexte spatial. Les métriques de proximité sont pertinentes pour rendre compte de la supplémentation/complémentation des habitats, deux processus écologiques cruciaux pour la dynamique des populations. White et Rahel (2008) ont ainsi montré l'importance de la complémentation frayère/refuge sur la co-existence de plusieurs classes d'âges de truites (*Oncorhynchus clarkii*). L'approche d'échantillonnage basée sur des cartographies préalables d'habitats vitaux potentiels (Focal Patch Study) a été pertinente pour mieux détecter des espèces peu abondantes et faire le lien avec la fonctionnalité des milieux échantillonnés, ce qui est difficile avec un échantillonnage classique. L'utilisation de la télémétrie apporte une quantification de la variabilité des comportements individuels à travers l'analyse des trajectoires spatio-temporelles. L'étude de ces trajectoires individuelles est efficace pour comprendre les dynamiques d'utilisation des habitats du cycle de vie, des mouvements associés et faire le lien avec l'hétérogénéité des milieux. L'ensemble des travaux que j'ai menés alimente la perspective « behaviorscape » (White *et al.* 2014) ou « fishscape » (Bergeron, comm. pers.) et contribue à améliorer la compréhension des réponses des poissons aux impacts du changement global (Torgersen *et al.* 2021).

### 3 Établir un contexte spatial et temporel pour les actions de préservation et de restauration des milieux aquatiques et de leur diversité piscicole

Les scientifiques et les gestionnaires savent, depuis des décennies, que pour répondre aux directives politiques visant à conserver la biodiversité, à réduire la dégradation des habitats et à accroître le maintien naturel des espèces en améliorant la connectivité des habitats, il est crucial d'établir un diagnostic holistique du fonctionnement des hydrosystèmes (Frissell *et al.* 1986; Doppelt *et al.* 1993; Hand *et al.* 2018). La connaissance du contexte spatio-temporel multi-échelle (Baudry 2002) garantit une mise en œuvre et un suivi efficace des projets de préservation et de restauration des milieux (*sensu* (Bell *et al.* 1997)). Pour les milieux aquatiques, le succès de la restauration est dépendant du contexte spatial du site dans son bassin versant, du contexte temporel mais aussi du contexte sociétal (Wohl *et al.* 2005). Pour quantifier ces divers contextes, la cartographie continue des milieux, l'échantillonnage intensif des peuplements et la modélisation de scénarios d'évolution des paysages aquatiques, sont des outils efficaces pour guider les actions de restauration.

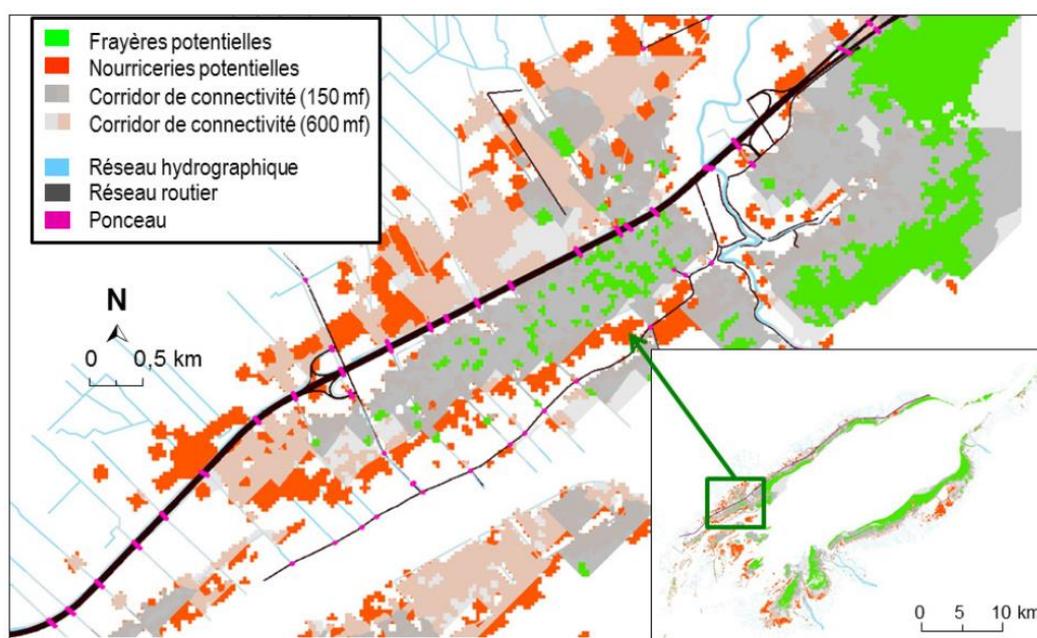
Les budgets étant souvent limités, la hiérarchisation spatiale des actions de préservation et de restauration est essentielle pour optimiser la réussite des attendus écologiques et sociétaux des projets (Roni *et al.* 2018). La perception et l'évaluation du succès de la restauration par les gestionnaires et les écologues peuvent diverger de celles des décideurs politiques et de la société (Jähnig *et al.* 2011). Il est alors important de bien comprendre quels bénéfices sont attendus par ces derniers et pourquoi, afin de garantir le soutien global à ce type d'actions. Comprendre la perception des cours d'eau par les acteurs locaux, la relation Ville-Rivière notamment, dégage des pistes d'actions communes autour de la restauration écologique (Carré 2011). Les méthodes et outils présentés précédemment ont été testés pour leurs capacités à fournir des éléments de hiérarchisation des actions de préservation des cours d'eau et à accompagner les problématiques de restauration de la continuité écologique.

#### 3.1 Cibler les milieux prioritaires à préserver

##### 3.1.1 Préserver les milieux à forte potentialité d'accueil

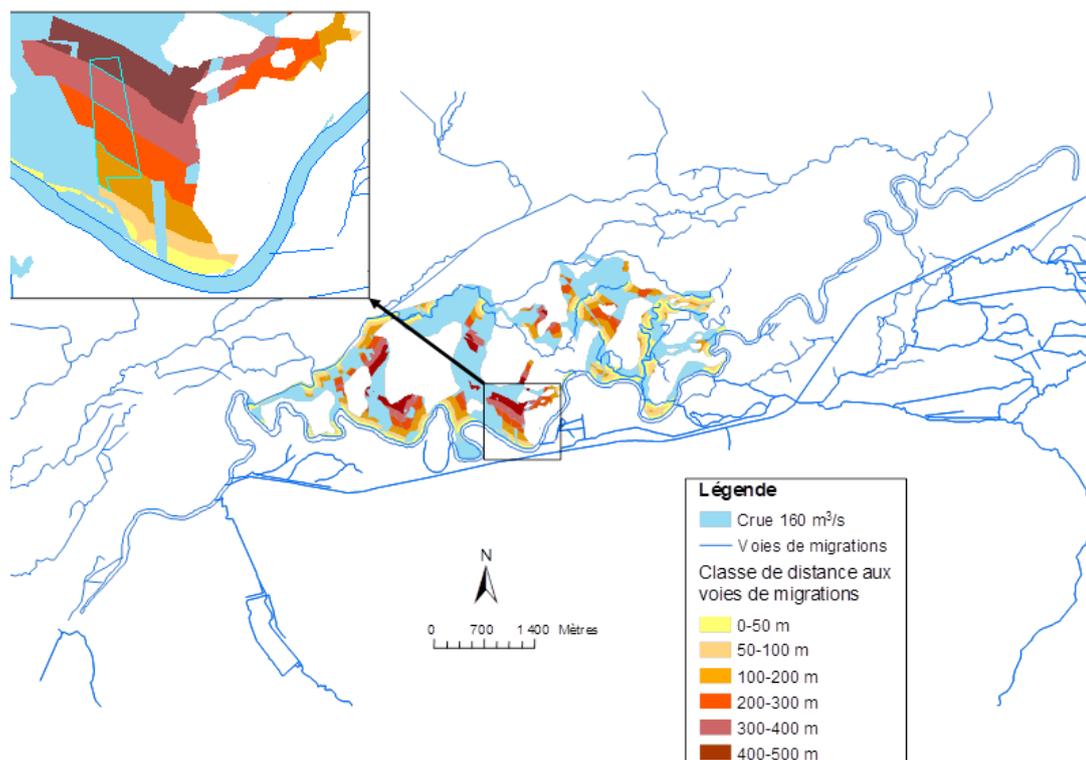
Les travaux que j'ai menés pour cartographier les habitats vitaux, à l'aide de la modélisation de leur disponibilité et accessibilité, mettent en évidence les milieux qui présentent les plus fortes potentialités d'accueil. Dans le cadre du co-encadrement de la thèse d'Aline Foubert (Université de Chicoutimi, Canada, 2012-2017), de la mission longue que j'ai réalisée au ministère de la faune

du Québec (2015) et d'un stage de Master 2 (Maëlle Legros, 2017), les milieux de la plaine alluviale à préserver en priorité pour le grand brochet dans le Lac St Pierre (Canada) ont été cartographiés. Les localisations qui sont fréquemment favorables pour la fraye ou la nourricerie sur 50 années sont modélisées rétrospectivement (Figure 2-1), ainsi que les secteurs où les frayères et les nourriceries se superposent et les corridors de connectivité entre les frayères et les nourriceries (Le Pichon *et al.* 2018; Foubert *et al.* 2019; Foubert *et al.* 2020). Ces corridors sont actuellement impactés par le réseau routier, les pratiques agricoles intensives et la régulation du débit (Figure 3-1). La préservation du réseau de fossés, l'entretien ou l'ajout de ponceaux (buses) sont des pistes concrètes pour améliorer la connectivité et le succès de la reproduction du brochet (Brodeur & Auclair 2016).



*Figure 3-1 – Exemple de corridors de connectivité en 1983 modélisés pour deux distances fonctionnelles (mf) (détail sur la méthode dans (Le Pichon et al. 2018)).*

Pour cette espèce, j'ai proposé une méthode cartographique pour évaluer la proximité des frayères à une voie d'eau permanente, garantissant le retour des juvéniles vers la Seine dans la plaine alluviale de la Bassée (Le Pichon *et al.* 2011). Ce classement des frayères potentielles en fonction de la distance à une voie de migration pour les juvéniles identifie les prairies à fort potentiel de recrutement à préserver en priorité (Figure 3-2).



*Figure 3-2 – Surfaces de frayères potentielles au débit 160 m<sup>3</sup>/s en fonction de leur distance aux voies de migration en eau dans le bief naturel de la Bassée (Seine).*

L'utilisation de la modélisation chronologique identifie les habitats vitaux qui sont ou non connectés avec un ou plusieurs habitats successifs du cycle de vie et pour lesquels des actions de préservation doivent être envisagées. Ainsi, la préservation des habitats favorables aux tacons du saumon atlantique sur la rivière Matapédia (Canada) qui sont connectés aux habitats d'alevins, connectés à des frayères, connectées à des fosses (Figure 2-11, *T-A-F-Fo*) améliore la capacité d'accueil des cours d'eau du Québec pour cette espèce. De même, la superposition des habitats de nurserie des juvéniles de bar connectés successivement pendant la marée pour différents coefficients de marée (Figure 3-3), constitue des secteurs précis à préserver en priorité (Le Pichon & Alp 2018a). Ces éléments sont importants pour la planification des actions de gestion et de restauration à l'échelle de l'estuaire de la Seine. Ils sont intégrés à l'action « Restauration des gradients latéraux d'habitats entre le lit majeur et le lit mineur et amélioration de la continuité latérale », proposé par le GIP Seine Aval (Muntoni 2020).

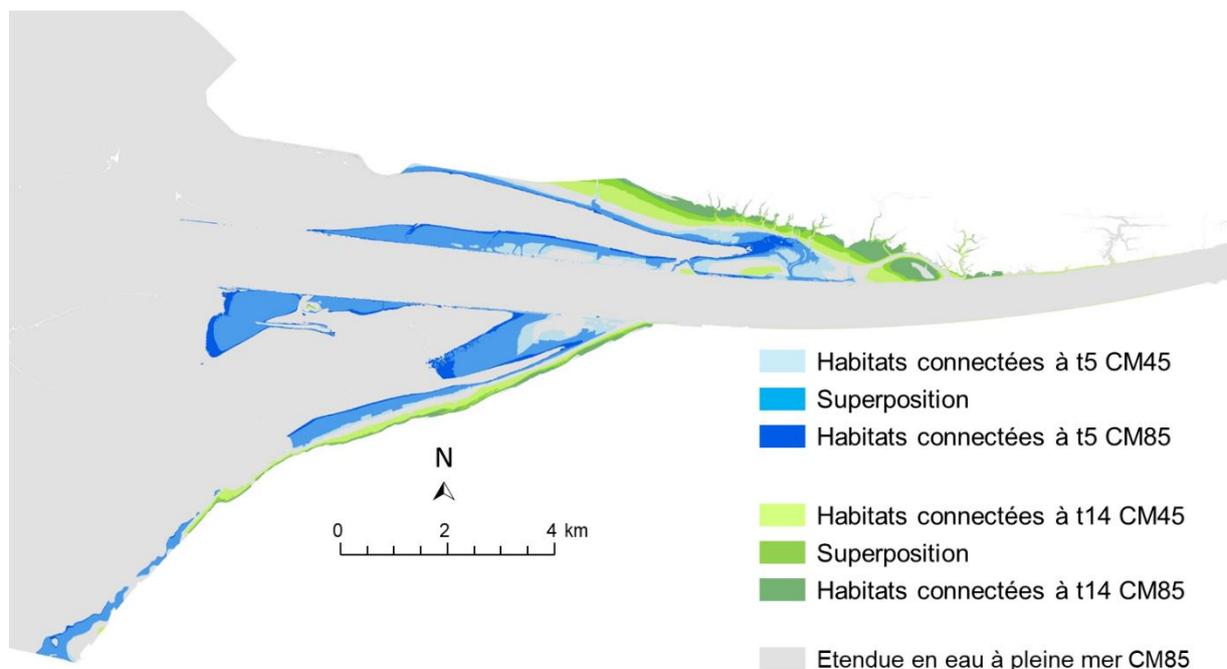


Figure 3-3 – Nourriceries des juvéniles de bar connectés au début du flot (t5 connecté à t1) et en fin de flot (t14 connecté depuis t1, voir Figure 1-3) pour deux coefficients de marée (CM) 45 et 85 dans l'estuaire de la Seine. « Superposition » délimite les secteurs où les nourriceries sont connectées aux deux coefficients.

### 3.1.2 Préserver les centres principaux d'activités

Les études de télémétrie fournissent des données expérimentales de mouvements, d'utilisation temporelle d'habitats et de domaines vitaux qui identifient et délimitent les milieux à fort potentiel d'accueil à préserver. Dans le chapitre précédent, la délimitation des secteurs où se réalisent les activités quotidiennes d'individus met en évidence l'importance de préserver les zones intertidales, les refuges subtidaux, certaines profondeurs et substrats favorables aux espèces estuariennes (Figure 2-12). De même, l'utilisation par la truite commune des secteurs aux habitats hétérogènes, incluant principalement une proximité conjointe aux mouilles et aux radiers, a été observée avec des données de télémétrie radio sur une année (Le Pichon *et al.* 2019) mais aussi avec des données de pêches électriques réalisées sur la période de fin d'été (Belliard *et al.* 2011). Malgré des temporalités différentes, ces deux méthodes indiquent le rôle clé de la complémentation des radiers et des mouilles (distances inférieures à 10 m) sur la présence de truite commune dans leurs aires d'activités quotidiennes (Figure 2-10). L'échantillonnage des habitats d'alimentation sur de larges étendues de la Seine indiquent aussi des aires principales d'activités pour des individus de barbeau fluviatile, peu abondant dans ce secteur (Figure 2-8).

## 3.2 Hiérarchiser les actions de restauration

### 3.2.1 Mise en perspective historique et sociétale

Les hydrosystèmes fluviaux sont désormais considérés comme des systèmes socio-écologiques (SES) hautement complexes et dynamiques, intégrant les héritages d'une longue histoire d'utilisation humaine. Dans ces systèmes, la compréhension des processus sociaux est cruciale pour améliorer l'efficacité des mesures de gestion (Bouleau 2014; Dunham *et al.* 2018 ; Hand *et al.* 2018 ). Dans le contexte du changement global, les connaissances tirées des expériences passées et la connaissance des héritages historiques donnent des lignes directrices pour formuler des mesures de préservation et de restauration (Winiwarter *et al.* 2013; Eschbach *et al.* 2018 ) mais aussi des actions de gestion adaptative (Haidvogel *et al.* 2019). Dans la vallée de la Seine, la connaissance des facteurs d'évolution des paysages fluviaux dans une séquence long terme de régimes de perturbations guide le choix d'une référence de restauration (Poudevigne *et al.* 2002).

Pour accompagner le programme de restauration des cours d'eau à enjeux pour la truite commune sur le territoire du PNR Vallée de Chevreuse, l'étude de leurs trajectoires géo-historiques a été menée à l'occasion d'un stage de Master co-encadré (Marion Jugie, 2012). Ces trajectoires sont importantes pour interpréter certains processus et altérations hydromorphologiques sur le temps long, notamment l'incision du lit en lien avec un bassin versant très imperméabilisé. Ces éléments guident les types de restauration qui sont mises en œuvre par le PNR Vallée de Chevreuse et les bureaux d'études. L'étude historique de la continuité écologique Seine depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle et des interactions rivière–société a été menée à l'occasion du co-encadrement d'un stage de Master (Emeric Courson, 2019), avec une historienne de l'environnement (Laurence Lestel, Sorbonne Université). L'utilisation complémentaire des analyses d'archives et de la modélisation a mis en lumière l'interaction cumulée complexe des obstacles physiques (barrage de navigation) et chimiques (oxygenation) sur la disparition et la recolonisation de cet axe fluvial par les poissons migrateurs (Figure 3-4) (Le Pichon *et al.* 2020). Ces deux facteurs de stress ont été documentés dans d'autres grands systèmes fluviaux dans une perspective à long terme, mais ils ont souvent été considérés séparément (Soetaert *et al.* 2006; Fernandes *et al.* 2020). L'utilisation d'une approche de modélisation de la connectivité fonctionnelle historique s'est avéré pertinente, comme pour les travaux menés au Portugal (Segurado *et al.* 2015). Ces travaux multi-disciplinaires ont aussi montré que (i) le consensus social, porté par les intérêts industriels pendant de longues périodes (Garcier 2007), et (ii) la perception négative des rivières, liée à la pollution, ont empêché la mise en œuvre de stratégies efficaces de gestion de la libre circulation des poissons.

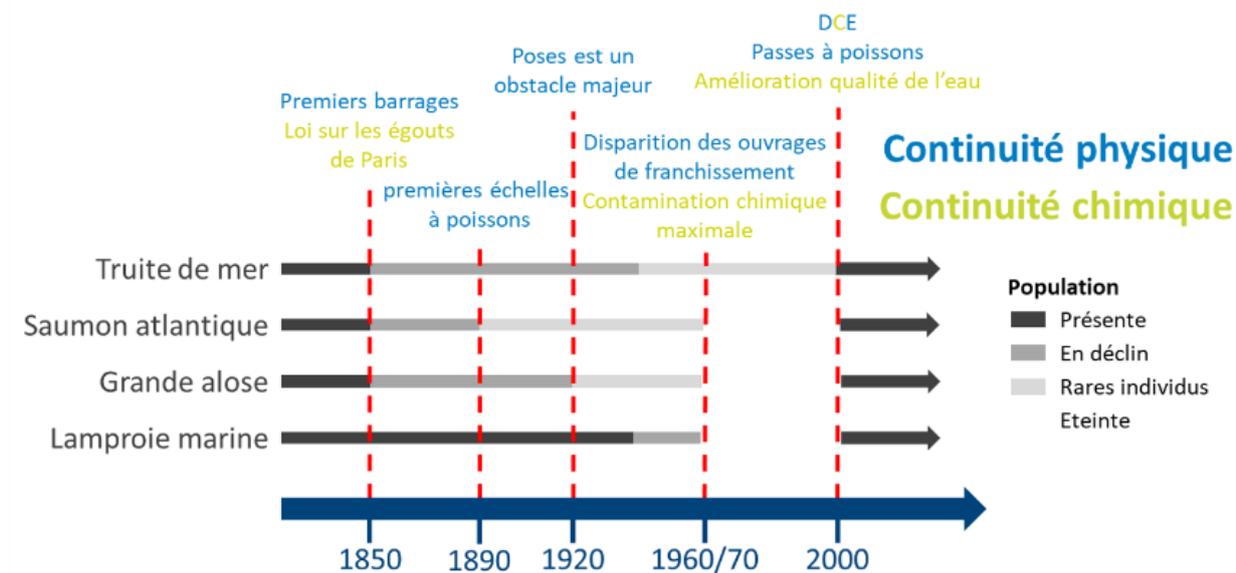


Figure 3-4 – Evolution de la présence de quelques espèces de poissons migrateurs et grandes périodes de modification des continuités physiques et chimiques (« Tout s’explique », 2020, GIP Seine Aval).

Pour accompagner les acteurs locaux et le grand public dans l’appropriation des questions de restauration de la continuité écologique, divers outils de communication sont essentiels. L’utilisation de la modélisation d’accompagnement a été un outil de dialogue avec les gestionnaires et les autres usagers pour communiquer autour de la continuité écologique à l’occasion de la révision du [SAGE](#) des deux Morins. Dans ce contexte, les cartes de connectivité se sont avérées préférables aux graphiques car les usagers peuvent les interpréter plus facilement. Ces cartes facilitent (i) la visualisation de l’effet d’un aménagement local (par un propriétaire de moulin par exemple) sur la continuité écologique globale, (ii) la hiérarchisation des actions souhaitées par les gestionnaires ou (iii) le dialogue dans certains conflits d’usage (pêcheurs/kayakistes) (Carre *et al.* 2014; Le Pichon & Tales 2014). Cette question d’une vision partagée de la rivière est au cœur d’un axe de travail interdisciplinaire du projet [CONSACRE](#). Il met en lumière l’importance d’échanges entre les gestionnaires et les riverains, par l’intermédiaire des gardes rivières ou par la sensibilisation effectuée par des techniciens. Ces derniers portent des objectifs de restauration qui puissent s’articuler avec les projets locaux de territoire. L’implication de tous types d’usagers dans la construction initiale d’un projet de restauration aide à dépasser des conflits potentiels (Germaine *et al.* 2021).

### 3.2.2 Mise en perspective future : des scénarios prospectifs

Pour aider les décideurs de la planification spatiale des barrages (Doyle *et al.* 2008), divers outils et méthodes ont été proposés pour hiérarchiser les choix de gestion centrés sur les organismes aquatiques (Kemp & O'Hanley 2010; McKay *et al.* 2017 ; Hermoso *et al.* 2018). Le calcul des distances fonctionnelles avec Anaqualand fait partie des outils qui évaluent l'impact cumulé des obstacles physiques et chimiques sur les poissons, et incorpore la composante comportementale de la connectivité.

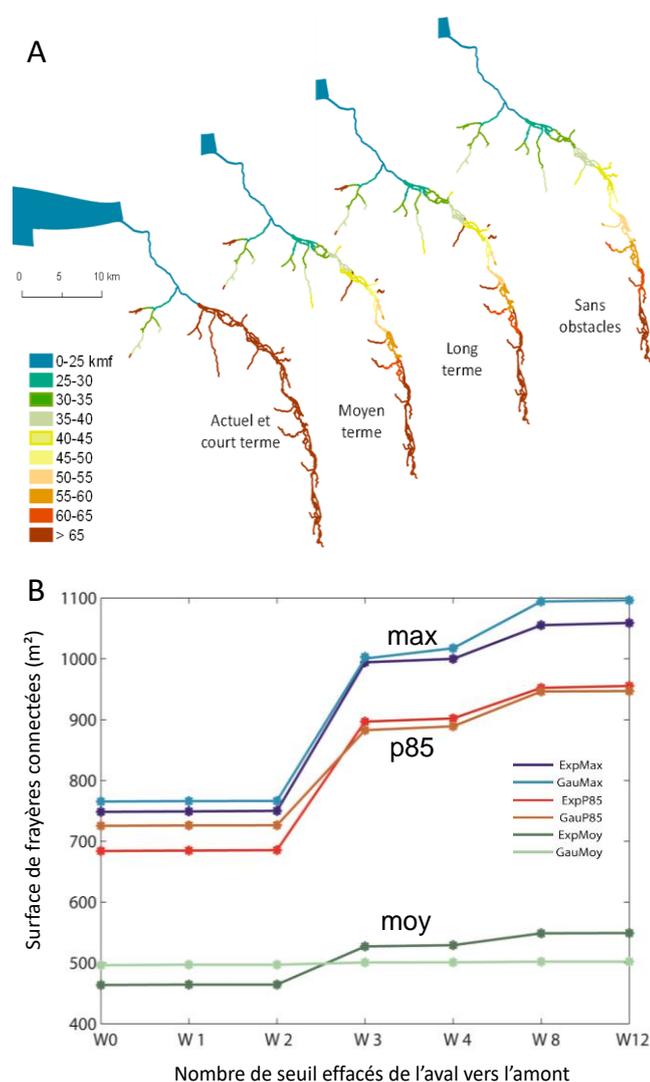


Figure 3-5 – Des scénarios d'accessibilité aux frayères. A gauche : pour la truite de mer dans la Risle (affluent de la Seine), les classes de distances fonctionnelles (kmf) indiquent le gradient de cette accessibilité à partir de l'embouchure. 21 obstacles effacés pour le scénario « court terme », 34 de plus pour « moyen terme » et 11 de plus pour « long terme » (Le Pichon & Alp 2018b). A droite, pour la truite résidente dans la Mérentaise, trois classes de mobilité issues de données télémétriques (moyenne, percentile85 et maximum) et deux type de courbes d'accessibilité (exponentielle décroissante ou gaussienne, (Roy & Le Pichon 2014)).

Ce logiciel considère la mobilité des poissons à des stades de vie spécifiques et contextualise l'aménagement des ouvrages par rapport à la localisation des habitats vitaux. L'accessibilité aux habitats vitaux est exprimée avec des cartes de distances fonctionnelles (Risle, Cailly (Le Pichon & Alp 2018a)) ou des aires cumulées accessibles (Roy & Le Pichon 2017) (Figure 3-5). Ces cartes et métriques sont un outil d'aide à la décision pour comparer différents scénarios d'aménagement successifs des ouvrages. Les exemples que j'ai pu traiter ont montré leurs potentialités à répondre aux demandes de divers acteurs de la gestion des milieux aquatiques : le PNR Vallée de Chevreuse (Mérantaise, truite commune), la Fédération de pêche de l'Eure (Risle, truite de mer), Rouen Métropole (Cailly, truite de mer), le syndicat de rivière de la Mauldre (truite commune), la commission locale de l'eau des deux Morins (barbeau fluviatile).

### 3.3 Conclusion du chapitre

Les données à forte intensité spatiale et le recours à la modélisation de scénarios historiques ou prospectifs s'avèrent une solution potentielle pour cibler (i) les habitats vitaux et milieux à forte potentialité d'accueil à protéger et à conserver, (ii) les lieux de forte abondance d'espèces peu abondantes et (iii) les possibilités d'amélioration de la connectivité structurelle et fonctionnelle.

Bien que cruciale, la connaissance du contexte écologique des opérations de restauration ne suffit plus à garantir leur succès. Pour les projets de restauration de la continuité écologique, qui cristallisent régulièrement des conflits d'acteurs, il faut poursuivre le développement d'outils et d'approches multi-disciplinaires (écologie, hydromorphologie, histoire, géographie et science politique) (Drouineau *et al.* 2018). Recourir aux approches historiques et prospectives, pour les hydrosystèmes impactés par l'homme sur le temps long, est crucial afin de proposer des stratégies de gestion adaptative et durable (Hein *et al.* 2019). Les outils que j'ai tenté de développer visent ainsi à mieux évaluer les influences humaines sur la complexité des paysages fluviaux : entre « simplification écologique » (Peipoch *et al.* 2015) et « surprises écologiques » (Lindenmayer *et al.* 2010) et à fournir un contexte spatio-temporel pertinent pour les actions de restauration.

## 4 Perspectives : De l'approche « paysage aquatique » à une écologie spatiale des cours d'eau ou «Riverscape Ecology»

4.1 Poursuivre la modélisation de la continuité écologique en intégrant des échelles adaptées aux enjeux actuels et futurs de préservation de la biodiversité.

4.1.1 Combiner des modèles estuariens, axe fluviaux et affluents pour accompagner la dynamique de recolonisation des bassins versants par les migrateurs amphihalins.

Les variables hydrodynamiques et biogéochimique influencent la dynamique de recolonisation des espèces migratrices dans les bassins versants. Trois projets en cours ou futur pourront alimenter ce thème, combinant la modélisation hydro-biogéochimique disponible dans les estuaires macrotidaux de la Seine et de la Gironde via le Modèle MARS3D (Diaz *et al.* 2020) et sur l'axe Seine (200 km) via le modèle hydro-biogéochimique Prose-PA (Wang *et al.* 2019). Ces modèles fournissent des vitesses de courants, profondeurs, des flux de matière en suspension ou des concentrations en oxygène et des températures, spatialisés en fonction des débits et coefficient de marée à haute résolution temporelle (10 à 30 mn).

Le volet scénarios de continuité écologique sur l'axe Seine et ses affluents du projet CONSACRE, mené avec Marie-Line Merg, combine les modèles estuaire Seine, axe Seine et affluents pour évaluer l'accessibilité potentielle aux frayères de plusieurs espèces de poissons grands migrateurs (lamproie marine, truite de mer et saumon Atlantique, grande alose). L'objectif est d'identifier les zones critiques pour la migration et comparer des scénarios de gestion et de restauration pour identifier des actions opérationnelles. Cette approche de modélisation sera utilisée pour tester des scénarios d'évolution de la continuité écologique, avec le changement climatique (scénario CMIP5) et avec la construction de nouvelles micro-centrales sur les barrages de navigation de l'axe Seine. Ces scénarios intégreront les projections de température de l'eau et d'oxygène qui seront modélisées à l'aide de Prose-PA (Mines Paris Tech, (Wang *et al.* 2019)).

Les enjeux du travail de thèse de Marie Lamour, que je co-encadre avec Marie-Laure Acolas (INRAE), consistent à évaluer dans l'estuaire de la Gironde, comment les esturgeons européen ré-introduits (de 2007 à 2015) utilisent les habitats estuariens soumis à des fluctuations importantes. Des variables environnementales dynamiques comme la vitesse de courant de la couche de fond et les substrats des couches sédimentaires issus du modèle MARS3D seront mobilisées. Les connaissances acquises sur les caractéristiques des habitats essentiels à la croissance de l'espèce permettront d'envisager pour le futur des estimations de la capacité d'accueil du milieu et

d'envisager les possibilités de recolonisation d'autres estuaires français, comme celui de la Seine, et européens, comme l'Elbe en Allemagne, pour lesquels des données d'habitats sont disponibles.

Ces modèles hydrodynamiques seront aussi mobilisés pour étudier les variables environnementales qui influencent la migration trans-estuarienne des grandes aloses sur trois bassins versants de la façade Atlantique. Ils serviront à hiérarchiser l'importance des facteurs hydro-climatiques et des conditions d'aménagement des axes fluviaux dans les évolutions observées de géniteurs en migration de reproduction. Pour approfondir ces questions, un sujet de thèse a été proposé à l'équipe commune Hynes INRAE/EDF (Co-encadrement avec Eric de Oliviera 2022-).

#### *4.1.2 Elaborer des modèles de connectivité à l'échelle du bassin versant pour proposer des métriques qui enrichissent les modèles de biodiversité.*

Les modèles écologiques classiques de distribution d'espèces dans les bassins versants prennent rarement en compte de façon explicite la connectivité des habitats aquatiques dans lesquels les organismes se déplacent par les processus de migration. C'est pourquoi développer une approche qui permette d'intégrer de façon explicite à la fois les facteurs hydroclimatiques et la connectivité dans les modèles de prédiction de biodiversité globale est un réel défi. Ce défi sera abordé à l'occasion d'une thèse qui débute dans notre équipe avec Aliénor Jeliaskov (CR). Elle vise à produire des prospectives futures de biodiversité piscicole sur la base de scénarios de changements hydroclimatiques, d'aménagements (par exemple, évolution de la navigation fluviale) et d'usages du sol en prenant en compte de façon explicite et pertinente les connectivités au sein du bassin versant. Un travail préliminaire a été initié avec un sujet de Master co-encadré (Davion 2021). Les premières analyses montrent que les modèles de distribution d'espèces sont améliorés par le choix de métriques de connectivité fonctionnelle par rapport aux distances hydrographiques et que la contribution des variables de connectivités par rapport aux variables environnementales varie d'une espèce à l'autre.

#### *4.1.3 Modéliser l'accessibilité chronologique des habitats*

Les deux exemples de modélisation chronologique traités ont été riches d'enseignements (bar commun et saumon Atlantique). J'aimerais appliquer ce type de modélisation de l'accessibilité chronologique à la grande alose, dont la disponibilité spatiale des habitats d'eau douce influence le succès du recrutement. L'arrivée sur des frayères favorables après migration doit être synchronisée avec la maturation sexuelle des individus (Paumier *et al.* 2020). Divers habitats complémentaires doivent être accessibles chronologiquement : une zone de repos/repli de pré-

reproduction utilisée la nuit sous les ouvrages (Steinbach *et al.* 1986; Acolas *et al.* 2004), une zone de ponte, une zone de dépôt des œufs (Baglinière 2000), habitats des larves et/ou de concentration des alosons avant dévalaison. Dans les bassins versants perturbés, les fenêtres spatiotemporelle d'accessibilité à des habitats essentiels de qualité par un nombre suffisant de géniteurs se réduisent, perturbant le succès reproducteur de la population.

#### 4.2 Renforcer la perspective « behaviorscape/fishscape »

Je souhaite poursuivre le développement des connaissances sur les processus à l'origine des dynamiques spatio-temporelles de la diversité piscicole dans les milieux complexes altérés par les activités humaines et dans un contexte évolutif de changement global. La modélisation hydrodynamique et biogéochimique combinée avec la biotélémétrie est efficace pour caractériser la dynamique temporelle d'utilisation des habitats dans des conditions environnementales fluctuantes. Ces conditions fluctuantes, en dehors d'une enveloppe de variabilité naturelle ou historique, résultent d'activités anthropiques auxquelles les espèces n'ont pas encore pu s'adapter. Les connectivités hydraulique et biogéochimique fluctuent ainsi dans le temps et modifie les conditions de déplacements des espèces dans leur milieu. Les individus ont-ils une mémoire de ces fluctuations anthropiques et développent-ils une stratégie de sélection d'habitat de moindre contrainte ?

La prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des connectivités entre habitats fonctionnels du cycle de vie s'appuiera sur une modélisation intégrée hydro-biogéochimiques 2D ou 3D générant des variables qui affinent la caractérisation des habitats perçus par les poissons. La température, l'oxygène dissous et l'ammonium, influencés par les pratiques aux abords des cours d'eau et les usages du bassin versant, seront intégrées dans la modélisation pour estimer leurs interactions ou leurs impacts cumulés avec les variables physiques.

Les progrès de la télémétrie associée au biologging fournissent des données issues de capteurs de température, profondeur, accéléromètre ou de fréquence cardiaque. En particulier l'accélérométrie donne des informations sur les compromis énergétiques associés aux niveaux d'activité dans différents habitats (Metcalf *et al.* 2016). Cette approche serait à développer pour mieux calibrer la résistance du paysage aquatique pour les espèces et les stades de vie, un paramètre crucial pour le calcul de la connectivité fonctionnelle (Beier *et al.* 2008). D'autre part, la variabilité individuelle des comportements et des capacités de mouvement nécessite d'intégrer une analyse de sensibilité aux modélisations de connectivité fonctionnelle pour tenir compte des « caractères » existant dans une population (voir la Figure 2-13 et Figure 3-5). Cette question pourrait être

abordée à l'occasion d'un sujet de thèse en projet sur la grande alose, dont la montaison sur les axes fluviaux est perturbée par la présence d'obstacles physiques, thermiques, chimiques ou biologiques. Selon les années, les interactions entre le régime hydrologique, les types d'ouvrages présents (barrages hydro-électrique, de navigation, présence d'écluses, de passes à poissons...) et leurs modes de gestion vont influencer les comportements de migrations de reproduction et la franchissabilité des ouvrages par cette espèce (Groux *et al.* 2015).

#### 4.3 Participer à la formalisation d'une « Riverscape Ecology »

Je vais poursuivre la collaboration avec le groupe « Riverscape », avec pour horizon de pouvoir formaliser une « Riverscape Ecology », qui serait adaptée aux paysages fluviaux, aux organismes qui y sont liés, à leurs communautés et écosystèmes. Un groupe de travail est envisagé à l'occasion du congrès Ecohydraulics en 2024 à Québec sur ces questions. Il serait pertinent de s'inspirer du parcours chronologique de l'écologie des paysages marins côtiers ou « Seascape Ecology ». Les avancées, les manques et les défis dans l'application des concepts et des outils de l'écologie des paysages au milieu marin côtier ont été tout d'abord discutés (Boström *et al.* 2011). Les avantages de cette approche pour une planification de la restauration des zones côtières sont devenus rapidement évidents (Pittman *et al.* 2011), jusqu'à la publication du livre « Seascape Ecology » (Pittman 2017).

L'utilisation de l'approche paysage aquatique pour les milieux fluviaux et estuariens est encore en émergence mais elle montre des opportunités claires pour la préservation et la restauration des milieux aquatiques et de la biodiversité piscicole. Son application à une large gamme de milieux d'eau douce, des petits cours d'eau aux estuaires sur divers continents, et à une variété de questions théoriques et opérationnelles, milite pour la poursuite de son développement et sa formalisation en « Riverscape Ecology ». Bien que les exemples actuels soient principalement sur les peuplements de poissons, elle gagnerait à être étendue à d'autres taxons comme les invertébrés, pour lesquels quelques tests sur l'Asse (Vallée de la Durance) se sont révélés prometteurs. Dans le contexte actuel du changement global et des efforts pour préserver la biodiversité, cette formalisation doit passer par une intégration plus grande des interactions avec la société et par une gestion adaptative de ces écosystèmes dynamiques.

J'espère que les quelques éléments apportés dans ce manuscrit montrent combien cette approche « Riverscape » est une opportunité pour comprendre, préserver, rendre visible et transmettre à un large public, l'émerveillement du monde aquatique.



# Riverscapers



**BIOLOGICAL REVIEWS**  
 doi: 10.1093/bioadv/bbab090  
 doi: 10.1111/brev.12010

**Riverscape approaches in practice: perspectives and applications**

Christian E. Torgersen<sup>1\*</sup>, Céline Le Pichon<sup>2†</sup>, Aimee H. Fullerton<sup>3</sup>, Stephen J. Dugdale<sup>4</sup>, Jeffrey J. Duda<sup>5</sup>, Floriane Giovannini<sup>6</sup>, Évelyne Tales<sup>7</sup>, Jérôme Belliard<sup>8</sup>, Paulo Branco<sup>9</sup>, Norman E. Bergeron<sup>10</sup>, Mathieu L. Roy<sup>11</sup>, Diego Tonolla<sup>12</sup>, Nicolas Lamouroux<sup>13</sup>, Hervé Capra<sup>14</sup> and Colleen V. Baxter<sup>12</sup>

<sup>1</sup>U.S. Geological Survey, Forest and Rangeland Ecosystem Science Center, Cascade Field Station, University of Washington, School of Environmental and Forest Sciences, Box 352100, Seattle, WA, 98195, U.S.A.  
<sup>2</sup>INRAE, HPCAR, Université Paris-Saclay, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10070, Antony Cedex, 92761, France  
<sup>3</sup>NIWA, National Marine Fisheries Service, Northwest Fisheries Science Center, Fish Ecology Division, 2725 Montlake Blvd. E., Seattle, WA, 98112, U.S.A.  
<sup>4</sup>School of Geography, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, U.K.  
<sup>5</sup>U.S. Geological Survey, Western Fisheries Research Center, 6505 NE 65th St., Seattle, WA, 98115, U.S.A.  
<sup>6</sup>INRAE, Paj50 (Platforme for Open Science), 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10070, Antony Cedex, 92761, France  
<sup>7</sup>Centre de Recherche Florestale, Institut Supérieur de Agronomie, Université de Lubus, Lubus, 1349 017, Portugal  
<sup>8</sup>Faculté National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 8A9, Canada  
<sup>9</sup>Environment and Climate Change Canada, 1350 Ave. d'Estimoteville, Québec, QC, G1J 0C3, Canada  
<sup>10</sup>Institute of Natural Resource Science, Queen's University of Applied Sciences, Galashiels, Walsburgh, B629, Switzerland  
<sup>11</sup>INRAE, RIVERLY, 1 rue de la Doue, CS 20074, Flerzy-la-Croix Cedex, 09265, France  
<sup>12</sup>Shawnee Ecology Center, Department of Biological Sciences, Idaho State University, Pocatello, ID, 83209, U.S.A.



## 5 Capacité à diriger des recherches

### 5.1 Bilan des publications

Après quatre années passées sur la thématique « pépinière forestière », j'ai valorisé mes travaux par quatre publications et divers rapports, notamment pour les deux projets européens auxquels je participais. Arrivée en mobilité dans l'équipe d'hydro-écologie d'Antony, me reconvertir à cette nouvelle thématique a pris du temps. Sans à priori sur les méthodes et outils utilisées en écologie des cours d'eau, j'ai cherché les approches qui me semblaient adaptées et pertinentes pour répondre à des questions de préservation des habitats piscicoles. J'ai fait appel à des spécialistes de l'écologie des paysages d'un côté et à d'autres chercheurs en écologie aquatique qui avaient commencé à défricher ces questions au cours de leurs thèses, comme Christian Torgersen (issu lui aussi du milieu forestier !), Colden Baxter, Dan Dauwalter et son encadrant Bill Fisher (rapporteur de ma thèse). Se positionner à l'interface de l'écologie des cours d'eau et de l'écologie du paysage étant peu courant, je rencontrais des enthousiastes ou des incrédules, parfois des opposants. De même pour les revues où j'envoyais mes manuscrits, je recevais des refus sur la thématique de *Landscape Ecology*, *Landscape and Urban Planning* ou *Freshwater Biology*. Il a fallu quelques années et des projets appliqués pour tester cette approche et montrer qu'elle pouvait apporter une aide pertinente pour la conservation des espèces de poissons. Une chronologie des revues dans lesquelles mes articles ont été publiés (Figure 5-1) montre le préambule forestier, la reconversion thématique, puis une dynamique de publications qui reprend depuis ma thèse et s'améliore ces dernières années avec des revues au lectorat généraliste (*Landscape Ecology*, *Ecosystems*, *Limnology and Oceanography* et *Biological Review*).

Ayant pu m'initier à l'analyse bibliométrique avec ma collègue Floriane Giovannini (INRAE), j'ai trouvé utile de regarder comment et pourquoi des auteurs cite mes articles et quels sont leurs thématiques de recherche ? Le *Web Of Science* référence 20 articles auxquels j'ai participé à partir de 2006 ; ils ont été cités par 153 articles dont j'ai analysé les domaines disciplinaires et les réseaux de mots clés auteurs (Figure 5-2).

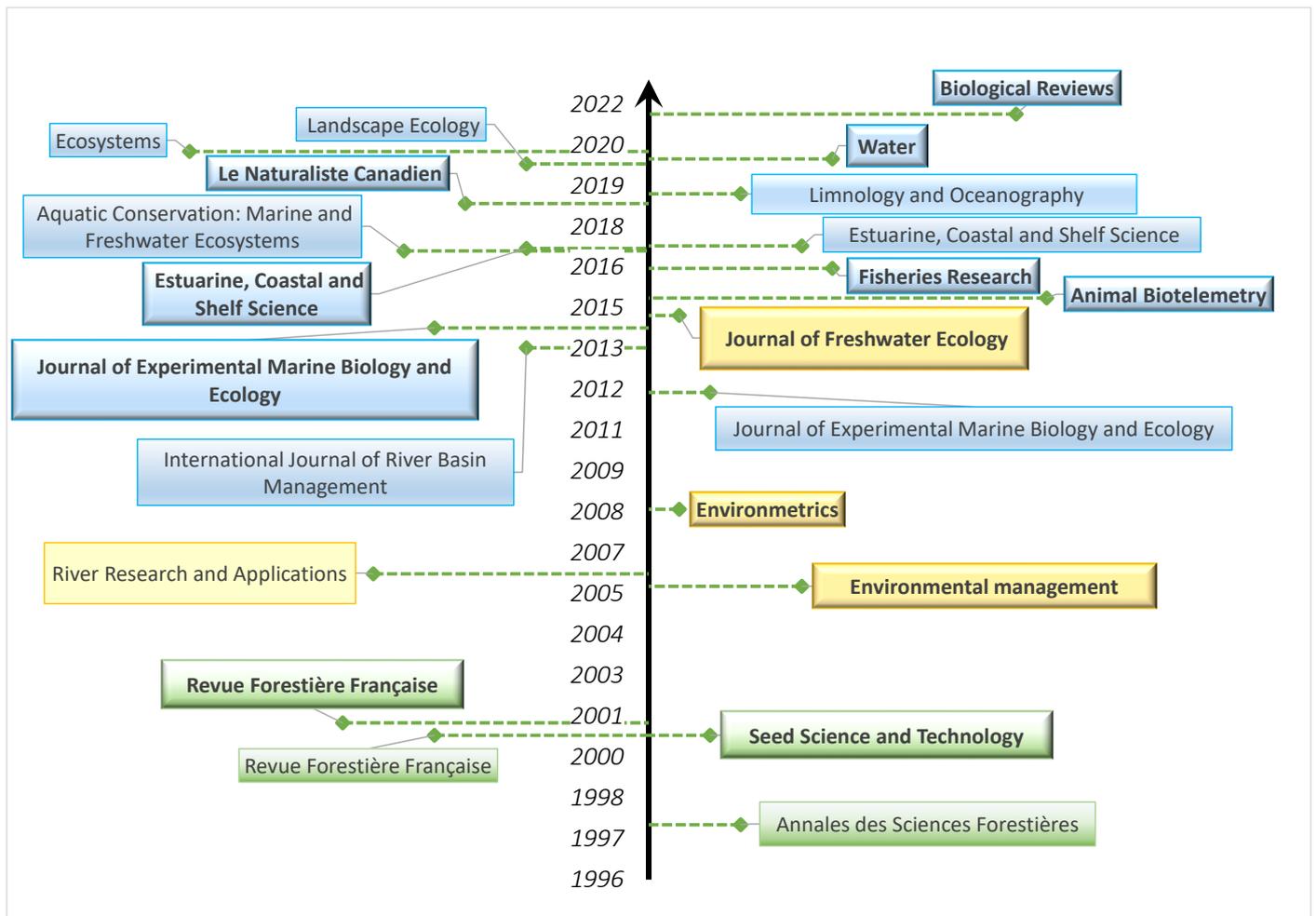


Figure 5-1 – Chronologie des revues à comité de lecture qui ont publié les 22 principaux articles auxquels j’ai participé, en gras les articles en premier auteur. En jaune les articles liés à ma thèse.

Quatre principales disciplines émergent de façon assez équilibrée : Marine/Freshwater Biology, Environmental Sciences, Ecology et Fisheries, indiquant un positionnement des revues entre biologie, écologie des poissons et sciences de l’environnement (Figure 5-2 ❶) . Le réseau de mots clés indique un taux d’occurrence élevé pour « connectivité », avec des liens forts vers « habitat », « poisson », « riverscape » et « conservation » (Figure 5-2 ❷). Ce positionnement de ma recherche actuelle, à travers le prisme des citations par les pairs, correspond assez bien à mes objectifs et s’avère n’être pas trop éloigné (avec des mots clés moins nombreux...) de celui des citations de l’article de (Fausch *et al.* 2002), qui est un de mes articles « de référence » initial (Figure 5-2 ❸).

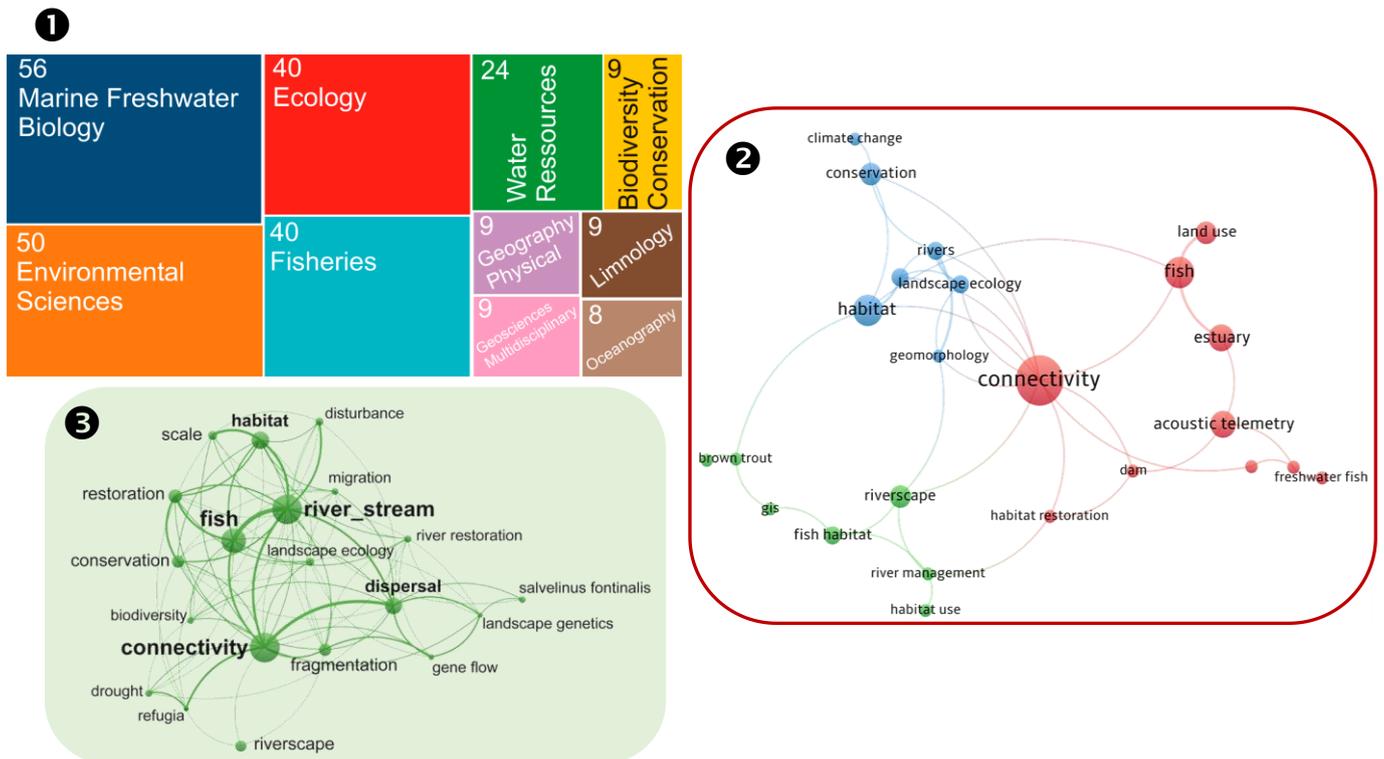


Figure 5-2 – Eléments d'analyse bibliométrique de ma production scientifique. ① Répartition des disciplines référencées pour les 153 citations de mes 20 articles publiés (chaque article peut mentionner plusieurs disciplines), ② Réseau de co-occurrence des mots clés auteurs des 153 citations. ③ Réseau des 20 mots clés auteurs les plus fréquents pour les 510 citations de l'article de Fausch et al. (2002).

## 5.2 Encadrement, animation et financement de la recherche

### Choisir et orienter

Dans la capacité à *diriger* des recherches, je retiens les éléments de définition : *choisir et progresser dans une certaine direction, orienter et montrer un chemin*. Il y a donc une question de choix que l'on fait en permanence : choix des hypothèses, des protocoles, des méthodes et outils et des analyses pour avancer dans la direction que l'on souhaite tout en étant capable de changer de direction si on est dans une impasse ! Cette capacité se construit dans le temps, elle englobe la capacité à conduire une recherche de bout en bout, de l'acquisition de données à la publication des résultats. Elle passe par une capacité à expliquer ses choix, à les partager avec les collègues et les étudiants à chaque étape mais aussi à écouter les avis et contraintes concrètes de leur mise en œuvre. Cela prend du temps, et lorsque l'on fait une reconversion, c'est encore plus long de se sentir capable mais surtout légitime à proposer une direction. J'ai particulièrement appris de mes premières expériences d'encadrement des agents de pépinières dans le Limousin où j'ai vite perçu que des résultats fiables reposent sur un protocole expérimental pertinent mais aussi bien compris

et adopté par ceux qui le réalisent. En écologie aquatique, ce travail d'acquisition de données en équipe est crucial car on est rarement seul sur l'eau, pour cartographier le lit des cours d'eau, prélever des invertébrés, faire une pêche électrique, insérer des émetteurs par chirurgie ou relever des données de détection des mouvements. Si on propose une orientation, elle relève d'un choix au sein de l'équipe dans une enveloppe de possibilités, avec les collègues permanents mais aussi les contractuels. Dès 2003, j'ai encadré surtout des Ingénieurs d'Etudes puis des post-doctorant, Ingénieur de Recherche et Assistant Ingénieur contractuels, qui apportent leur autonomie et leur expérience, autorisant une co-construction enrichie des projets (Figure 5-3).

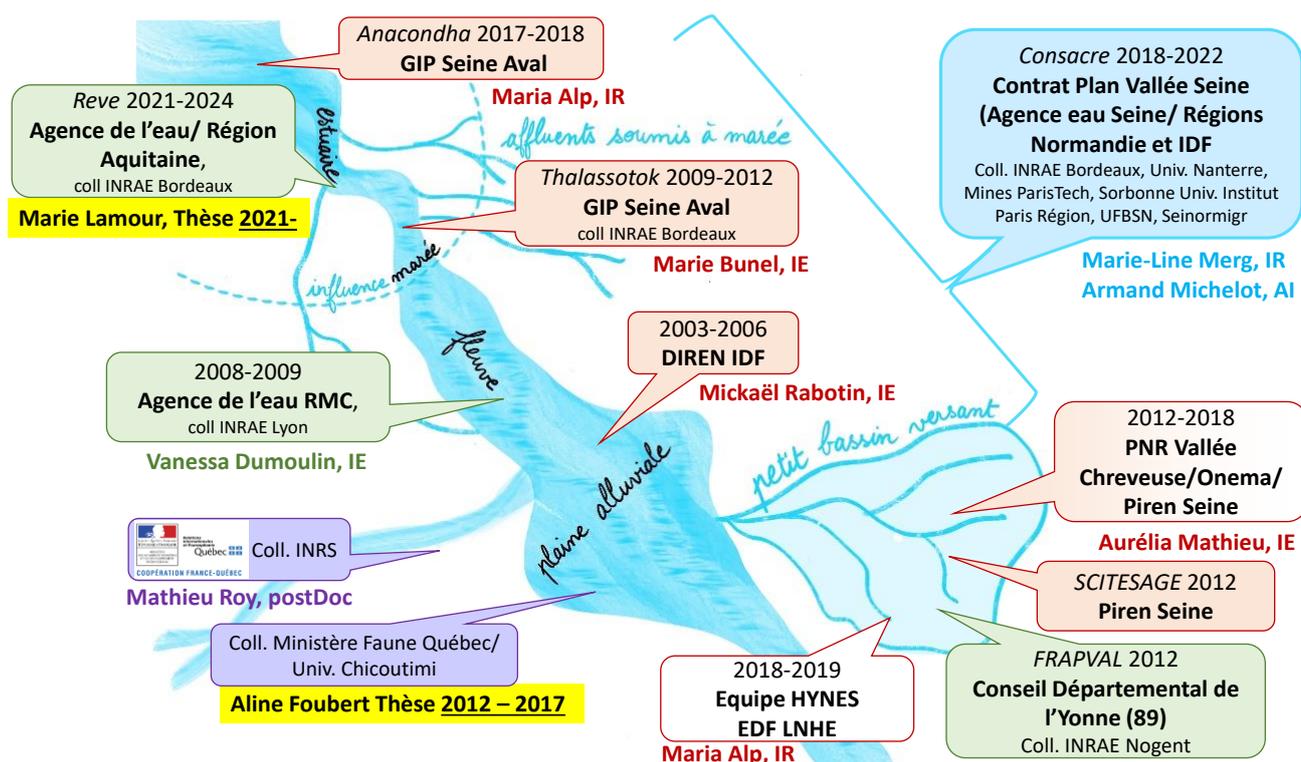


Figure 5-3 – Schéma synthétique des projets (acronyme en italique), financeurs (en gras), collaborations et principaux encadrements contractuels et thèses. AI : Assistant Ingénieur, IE : Ingénieur d'Etudes et IR : Ingénieur de Recherche. Voir [liste des acronymes](#).

Il y a un moment où l'on est prêt à encadrer des étudiants ; je l'ai vécu en deux temps, avec une période de co-encadrement. Car proposer « un cadre », orienter et montrer un chemin et au besoin sortir du cadre nécessite des bases solides. En formation par la recherche, j'ai encadré essentiellement des Masters recherche, et depuis 2012 deux thèses en co-encadrement : une avec l'université de Chicoutimi et le Ministère de la Faune du Québec (2012-2017) et une qui débute avec l'INRAE de Bordeaux (2021- ). Pour compléter cette première expérience, j'ai suivi en 2017

une formation « encadrer un doctorant », qui m’a donné des bases et des outils tout en gardant en tête que les doctorants n’ont pas tous besoin du même type d’encadrement.

*Collaborer et animer*

Diriger une recherche c’est aussi des partenariats et des collaborations qui vont enrichir les questions traitées. Les collaborations principales qui ont structuré mes travaux sont schématiquement présentées dans le diagramme ci-dessous (Figure 5-4). Hormis celles au sein de l’équipe d’hydro-écologie fluviale qui fait partie de l’unité HYCAR depuis 2019, j’ai collaboré avec plusieurs unités de recherche d’Irstea/INRAE (Hydro-écologie Bordeaux et Lyon) pendant toutes les années où nous étions évalués dans le même collectif de recherche par l’HCÉRES.

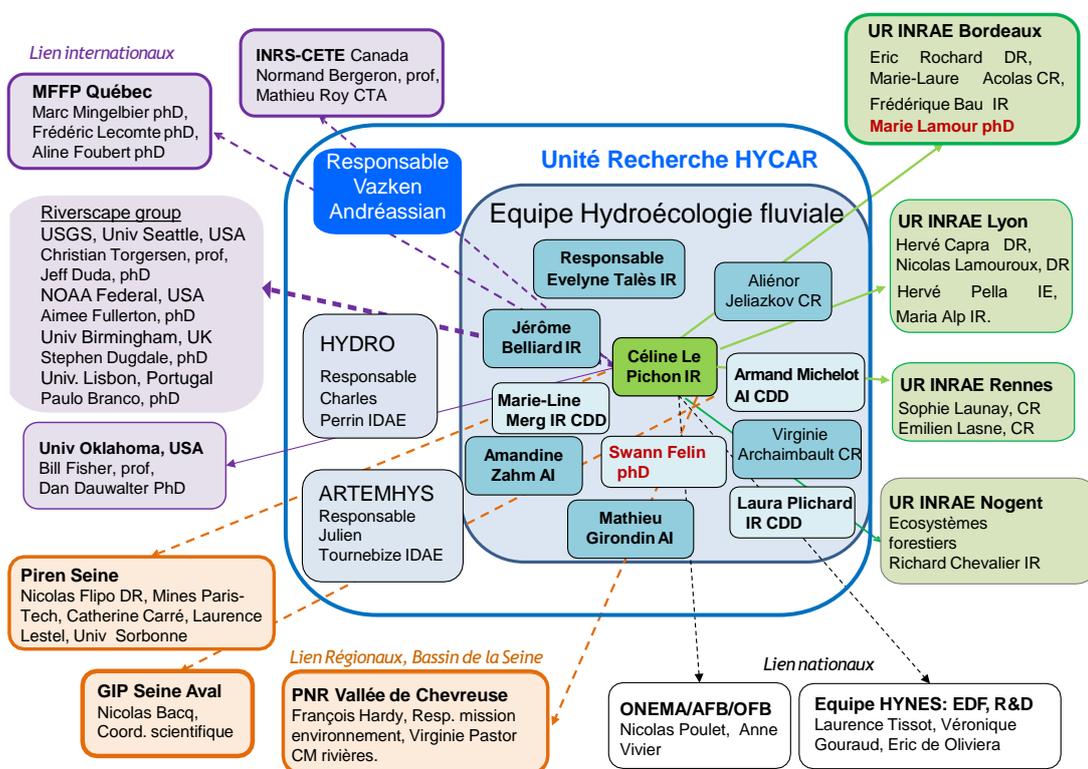


Figure 5-4 – Collaborations et partenariats nationaux et internationaux. Voir liste Acronymes

Dès mon arrivée en 2000, les partenariats principaux et historiques de l’équipe étaient le PIREN Seine, EDF pour le suivi de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, le CSP/Onema/AFB/OFB, l’Agence de l’eau Seine Normandie et la DIREN IDF qui a financé le premier projet que j’ai mené sur la Bassée (Seine). A l’occasion de mon travail de thèse (2003-2006), la collaboration se structure avec l’INRA SAD-Armorique de Rennes (Jacques Baudry, qui a été mon co-directeur de thèse) et l’Université de Rouen (Isabelle Poudevigne). Je collabore ensuite

avec l'Irstea Lyon sur le Rhône à l'occasion d'un projet financé par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (2008-2009) (Figure 5-3).

A partir de 2009, je participe à des travaux sur l'estuaire de la Seine et/ou de la Gironde en collaboration avec l'unité de recherche d'Irstea Bordeaux. Ils se réalisent dans le cadre des appels à proposition de recherche du GIP Seine Aval, phase 4 (Thalassotok 2009-2012) puis phase 5 (Anacondha 2017-2019). En 2018, avec la mise en place de la Zone atelier Seine, j'ai co-construit avec le GIP Seine Aval le projet CONSACRE financé par le CPiER Vallée de la Seine dont j'assure l'animation scientifique (2018-2022). Je poursuis la collaboration dans le projet REVE par un co-encadrement de thèse (2021- 2023) (Figure 5-3).

Depuis 2012, une convention de collaboration avec le Parc Naturel de la Vallée de Chevreuse a été mise en place pour aider à hiérarchiser la restauration de la continuité écologique des cours d'eau du territoire du PNR Chevreuse et suivre l'efficacité de la restauration des projets menés (2012-2021). Les projets de suivis réalisés étaient financés en partie par l'Onema/AFB/OFB et le PIREN Seine (2012-2018).

En parallèle, une collaboration internationale avec le Canada (Québec) a débuté en 2012, suite à des échanges réguliers dans le cadre de la 64<sup>ème</sup> CPCFQ qui finance des semaines d'échanges de chercheurs France/Québec. J'ai effectué plusieurs missions à Québec entre 2012 et 2016 (DFA et INRS-CETE). Dans ce cadre, j'ai co-encadré (30%) la thèse d'Aline Foubert (Université de Chicoutimi) de 2012 à 2017. Mathieu Roy (INRS-CETE) a été accueilli à Antony en 2014 pendant 6 mois, préalablement à une mission longue durée de 4 mois que j'ai effectué à Québec en 2015 (50% DFA et 50% INRS). Enfin, un stage de Master 2 a été co-encadré en 2016 avec Aline Foubert. Cette collaboration, très riche m'a permis de découvrir des problématiques de connectivité dans de grands milieux, de collaborer à cinq communications orales (AFS, AGU, Larval Fish Conference, EcoHydraulics) et à quatre articles publiés.

Depuis 2014, je collabore avec un réseau de chercheurs internationaux qui utilisent les mêmes concepts, issus de l'écologie du paysage, et développent des méthodes et outils liés à la notion de riverscape (Figure 5-4). Un séminaire de travail a eu lieu en 2016 à Antony que j'ai animé avec Christian Torgersen (USGS, Univ. Seattle) afin de faire une synthèse de la recherche internationale sur la mise en pratique de cette approche pour répondre à des questions de recherche et de gestion des milieux d'eau courante.

## Références

- Acolas, M.L., Anras, M.L.B., Veron, V., Jourdan, H., Sabatie, M.R. & Bagliniere, J.L. (2004) An assessment of the upstream migration and reproductive behaviour of allis shad (*Alosa alosa* L.) using acoustic tracking. *Ices Journal of Marine Science*, **61**, 1291-1304.
- Acolas, M.L., Carrera Garcia, E., Le Pichon, C. & Rochard, E. (2017a) Downstream migration of stocked young of year European sturgeon in the Gironde-Garonne-Dordogne aquatic system: knowledge acquired by acoustic telemetry. *ISS8 8th International Symposium on Sturgeons, 10/09/2017 - 16/09/2017*, pp. 1. Vienna, AUT.
- Acolas, M.L., Le Pichon, C. & Rochard, E. (2017b) Spring habitat use by stocked one year old European sturgeon *Acipenser sturio* in the freshwater-oligohaline area of the Gironde estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **196**, 58-69.
- Acolas, M.L., Rochard, E., Le Pichon, C. & Rouleau, E. (2012) Downstream migration patterns of one-year-old hatchery-reared European sturgeon (*Acipenser sturio*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **430–431**, 68-77.
- Adriaensen, F., Chardon, J.P., 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.
- Allan, J.D. (2004) Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **35**, 257-284.
- Alp, M. & Le Pichon, C. (2021) Getting from sea to nurseries: Considering tidal dynamics of juvenile habitat distribution and connectivity in a highly modified estuarine riverscape. *Ecosystems*, **24**, 583-601.
- Antrop, M. (2000) Background concepts for integrated landscape analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **77**, 17-28.
- Baglinière, J.L. (2000) The genus *Alosa*  
Le genre *Alosa* sp. *Les Aloses Alosa alosa et Alosa fallax spp. : Ecobiologie et variété des populations*. INRA Editions, Paris (France).
- Bateman, D.S., Gresswell, R.E. & Torgersen, C.E. (2005) Evaluating single-pass catch as a tool for identifying spatial pattern in fish distribution. *Journal of Freshwater Ecology*, **20**, 335-345.
- Baudry, J. (2002) Spatio-temporal scales in restoration ecology. *Revue d'Ecologie (France)*.
- Baudry, J., Boussard, H. & Schermann, N. (2005) Chloé 3.1 : Freeware of multi-scales analyses on ASCII raster files. *Rennes, INRA, SAD-Armorique*.
- Baxter, C.V. (2002) Fish movement and Assemblage Dynamics in a Pacific Northwest Riverscape. PhD dissertation, Oregon State University.
- Beier, P., Majka, D.R. & Spencer, W.D. (2008) Forks in the Road: Choices in Procedures for Designing Wildland Linkages. *Conservation Biology*, **22**, 836-851.

- Bell, S.S., Fonseca, M.S. & Motten, L.B. (1997) Linking restoration and landscape ecology. *Restoration Ecology*, **5**, 318-323.
- 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., Hette, N., Le Pichon, C., Tales, E. & Zahm, A. (2011) La répartition des peuplements de poissons dans le bassin de la Seine : modèles à large échelle et focus sur les petits bassins versants franciliens. pp. 52.
- Belliard, J., Gorges, G., Le Pichon, C. & Tales, 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, Paris.
- Benda, L., Miller, D. & Barquín, J. (2011) Creating a catchment scale perspective for river restoration. *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**, 2995–3015.
- Benda, L., Poff, N.L., Miller, D., Dunne, T., Reeves, G., Pess, G. & Pollock, M. (2004) The network dynamics hypothesis: How channel networks structure riverine habitats. *BioScience*, **54**, 413-427.
- Benhamou, S., Sauvé, J.-P. & Bovet, P. (1990) Spatial memory in large scale movements: efficiency and limitation of the egocentric coding process. *Journal of Theoretical Biology*, **145**, 1-12.
- Bergeron, N., Roy, M., Le Pichon, C., Gillis, C.-A., Bujold, J.-N. & Mingelbier, M. (2016) Functional habitat chronology analysis: integrating life stages habitat requirements and habitat connectivity for estimating river production potential. *11th International Symposium on Ecohydraulics 2016*. Melbourne, Australia.
- Blondel, J. (2020) Biodiversité: un nouveau récit à écrire. *Biodiversité*, 1-208.
- Bonte, D., Van Dyck, H., Bullock, J.M., Coulon, A., Delgado, M., Gibbs, M., Lehouck, V., Matthysen, E., Mustin, K., Saastamoinen, M., Schtickzelle, N., Stevens, V.M., Vandewoestijne, S., Baguette, M., Barton, K., Benton, T.G., Chaput-Bardy, A., Clobert, J., Dytham, C., Hovestadt, T., Meier, C.M., Palmer, S.C.F., Turlure, C. & Travis, J.M.J. (2012) Costs of dispersal. *Biological Reviews*, **87**, 290-312.
- Boström, C., Pittman, S.J., Simenstad, C. & Kneib, R.T. (2011) Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, **427**, 191-217.
- Bouleau, G. (2014) The co-production of science and waterscapes: The case of the Seine and the Rhône Rivers, France. *Geoforum*, **57**, 248-257.
- Bourg, D. (2018) *Une nouvelle Terre*. Desclée de Brouwer, Paris.
- Boussard, H. & Baudry, J. (2017) A software for landscape pattern analysis.
- Brennan, J.M., Bender, D.J., Contreras, T.A. & Fahrig, L. (2002) Focal patch landscape studies for wildlife management: Optimizing sampling effort across scales. *Integrating landscape*

*ecology into natural resource management*. (eds J. Liu & W.W. Taylor), pp. 68-91. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Bretschko, G. (1995) River/land ecotones: Scales and patterns. *Hydrobiologia*, **303**, 83-91.
- Brodeur, P. & Auclair, N. (2016) Restauration du marais Saint-Eugène, suivi environnemental – année 2. pp. 59. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec, Trois-Rivières,.
- Bull, J.W., Suttle, K.B., Singh, N.J. & Milner-Gulland, E. (2013) Conservation when nothing stands still: moving targets and biodiversity offsets. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **11**, 203-210.
- Burel, F. & Baudry, J. (1999) *Ecologie du paysage, concepts, méthodes, et applications*. TEC & DOC, Paris.
- Calenge, C. (2007) Exploring habitat selection by wildlife with adehabitat. *Journal of Statistical Software*, **22**, 1-19.
- Capra, H., Pella, H., Morin, J., Le Pichon, C., Perraud, C., Datry, T., Secretan, Y., Jouve, P. & Matte, P. (2011) Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés d'invertébrés et de poissons. pp. 112.
- Capra, H., Pella, H., Morin, J., Le Pichon, C., Perraud, C., Datry, T., Secretan, Y., Jouve, P., Matte, P. & Demougin, V. (2010) Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés d'invertébrés et de poissons. (ed. R.F.R.C.A.d.l.E. RM&C.), pp. 104.
- Capra, H., Plichard, L., Bergé, J., Pella, H., Ovidio, M., McNeil, E. & Lamouroux, N. (2017) Fish habitat selection in a large hydropeaking river: Strong individual and temporal variations revealed by telemetry. *Science of the Total Environment*, **578**, 109-120.
- Carbonneau, P., Fonstad, M.A., Marcus, W.A. & Dugdale, S.J. (2012) Making riverscapes real. *Geomorphology*, **137**, 74-86.
- Carbonneau, P. & Piégay, H. (2012) *Fluvial remote sensing for science and management*. John Wiley & Sons.
- Carbonneau, P.E., Bergeron, N. & Lane, S.N. (2005) Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research*, **41**.
- Carré, C. (2011) Les petites rivières urbaines d'Île-de-France. Découvrir leur fonctionnement pour comprendre les enjeux autour de leur gestion et de la reconquête de la qualité de l'eau. Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Carré, C., Becu, N., De Coninck, A., Hague, J.-P., Deroubaix, J., Pivano, C., Flipo, N., Le Pichon, C., Mouchel, J.-M. & Tallec, G. (2012) L'intégration des modèles développés par la communauté scientifique du PIREN Seine au service d'une gestion multifonctionnelle de la rivière à l'échelle du SAGE. *Piren-Seine, phase 6*, pp. 16.

- Carre, C., Haghe, J.-P., De Coninck, A., Becu, N., Deroubaix, J., Pivano, C., Flipo, N., Le Pichon, C. & Tallec, G. (2014) How to integrate scientific models in order to switch from flood control river management to multifunctional river management? *International Journal of River Basin Management*, 1-30.
- Dauwalter, D., Fisher, W. & Belt, K. (2006) Mapping stream habitats with a Global Positioning System: accuracy, precision, and comparison with traditional methods. *Environmental Management*, **37**, 271-280.
- Dauwalter, D.C., Fesenmyer, K.A., Bjork, R., Leasure, D.R. & Wenger, S.J. (2017) Satellite and airborne remote sensing applications for freshwater fisheries. *Fisheries*, **42**, 526-537.
- Davion, F. (2021) Rôle de la connectivité écologique dans la distribution d'espèces de poissons à l'échelle du bassin versant de la Seine. (ed. P.E.M.e.H.E. Stage Master 2 - Université Côte d'Opale. Mention Science de la Mer), pp. 51.
- Diaz, M., Grasso, F., Le Hir, P., Sottolichio, A., Caillaud, M. & Thouvenin, B. (2020) Modeling mud and sand transfers between a macrotidal estuary and the continental shelf: Influence of the sediment transport parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **125**, e2019JC015643.
- Dietrich, J.T. (2017) Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**, 355-364.
- Doppelt, R., Scurlock, M., Frissell, C. & Karr, J.R. (1993) *Entering the watershed: a new approach to save America's river ecosystems*. Island Press.
- Doyle, M.W., Stanley, E.H., Havlick, D.G., Kaiser, M.J., Steinbach, G., Graf, W.L., Galloway, G.E. & Riggsbee, J.A. (2008) Aging infrastructure and ecosystem restoration. *Science*, **319**, 286-287.
- Drouineau, H., Carter, C., Rambonilaza, M., Beaufaron, G., Bouleau, G., Gassiat, A., Lambert, P., Le Floch, S., Tétard, S. & De Oliveira, E. (2018) River continuity restoration and diadromous fishes: Much more than an ecological issue. *Environmental Management*, **61**, 671-686.
- du Laurens d'Oiselay, D. (1999) Coût de production d'un plant de chêne sessile multiplié par bouturage.
- Dugdale, S.J., Hannah, D.M. & Malcolm, I.A. (2017) River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Science Reviews*, **175**, 97-113.
- Dunham, J.B., Angermeier, P.L., Crausbay, S.D., Cravens, A.E., Gosnell, H., McEvoy, J., Moritz, M.A., Raheem, N. & Sanford, T. (2018) Rivers are social–ecological systems: Time to integrate human dimensions into riverscape ecology and management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, **0**, e1291.
- Dunning, J.B., Danielson, B.J. & Pulliam, H.R. (1992) Ecological processes that affect populations in complex landscapes. *Oikos*, **65**, 169-175.

- Ebbesson, L. & Braithwaite, V. (2012) Environmental effects on fish neural plasticity and cognition. *Journal of Fish Biology*, **81**, 2151-2174.
- Eros, T., Botta-Dukat, Z. & Grossman, G.D. (2003) Assemblage structure and habitat use of fishes in a Central European submontane stream: a patch-based approach. *Ecology of Freshwater Fish*, **12**, 141-150.
- Eros, T., Schmera, D. & Schick, R.S. (2011) Network thinking in riverscape conservation - A graph-based approach. *Biological Conservation*, **144**, 184-192.
- Erős, T., Schmera, D. & Schick, R.S. (2011) Network thinking in riverscape conservation - A graph-based approach. *Biological Conservation*, **144**, 184-192.
- Eschbach, D., Schmitt, L., Imfeld, G., May, J.-H., Payraudeau, S., Preusser, F., Trauerstein, M. & Skupinski, G. (2018) Long-term temporal trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on large rivers: an interdisciplinary study. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 2717-2737.
- Fahrig, L. (1992) Relative importance of spatial and temporal scales in a patchy environment. *Theoretical Population Biology*, **41**, 300-314.
- Falke, J.A. & Fausch, K.D. (2010) From metapopulations to metacommunities: linking theory with empirical observations of the spatial population dynamics of stream fishes. *Community ecology of stream fishes: concepts, approaches, and techniques*. American Fisheries Society, Symposium, pp. 207-233.
- Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V. & Li, H.W. (2002) Landscapes to riverscapes: Bridging the gap between research and conservation of stream fishes. *BioScience*, **52**, 483-498.
- Fernandes, M.R., Aguiar, F.C., Martins, M.J., Rivaes, R. & Ferreira, M.T. (2020) Long-term human-generated alterations of Tagus River: Effects of hydrological regulation and land-use changes in distinct river zones. *Catena*, **188**, 104466.
- Fisher, W.L. & Rahel, F.J. (2004) Geographic Information Systems Applications in Stream and River Fisheries. *Geographic Information Systems in Fisheries* (eds W.L. Fisher & F.J. Rahel), pp. 49-84. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Flynn, K.F. & Chapra, S.C. (2014) Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, **6**, 12815-12836.
- Foubert, A., Le Pichon, C., Mingelbier, M., Farrell, J.M., Morin, J. & Lecomte, F. (2019) Modeling the effective spawning and nursery habitats of northern pike within a large spatiotemporally variable river landscape (St. Lawrence River, Canada). *Limnology and Oceanography*, **64**, 803-819.
- Foubert, A., Lecomte, F., Brodeur, P., Le Pichon, C. & Mingelbier, M. (2020) How intensive agricultural practices and flow regulation are threatening fish spawning habitats and their connectivity in the St. Lawrence River floodplain, Canada. *Landscape Ecology*, **35**, 1229-1247.

- Frissell, C.A., Liss, W.J., Warren, C.E. & Hurley, M.D. (1986) A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, **10**, 199-214.
- Garcier, R. (2007) Rivers we can't bring ourselves to clean—historical insights into the pollution of the Moselle River (France), 1850–2000. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**, 1731-1745.
- Germaine, M.-A., Drapier, L., Lespez, L. & Styler-Barry, B. (2021) How to better Involve stakeholders in river restoration projects. *River Restoration*, pp. 147-168.
- Gresswell, R.E., Torgersen, C.E., Bateman, D.S., Guy, T.J., Hendricks, S.R. & Wofford, J.E.B. (2006) A spatially explicit approach for evaluating relationships among coastal cutthroat trout, habitat, and disturbance in small Oregon streams. *Influences of Landscapes on Stream Habitats and Biological Assemblages*. (eds R.M. Hughes, L. Wang & P.W. Seelbach), pp. 457–471. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, USA.
- Groux, F., Therrien, J., Chanseau, M., Courret, D. & Tétard, S. (2015) Actualisation des connaissances sur l'efficacité et la conception des dispositifs de montaison pour l'alose. *Projet LIFE09NAT/DE/000008-Conservation and restoration of the Allis shad in the Gironde and Rhine watersheds*, pp. 85.
- Guibert, M. & Le Pichon, C. (2001) Influence de la température sur la germination, la levée et sur les taux de semis à tiges multiples chez le chêne sessile. *Revue Forestière Française*, **LIII**, 44-54.
- Gustafson, E.J. & Parker, G.R. (1994) Using an index of habitat patch proximity for landscape design. *Landscape and Urban Planning*, **29**, 117-130.
- Haidvogel, G., Hoffmann, R. & Pont, D. (2015) Historical ecology of riverine fish in Europe. *Aquatic Sciences*, **77**, 315.
- Haidvogel, G., Winiwarter, V. & Brumat, S. (2019) Natural history of the Danube region. *Danube: Future Interdisciplinary School Proceedings 2017: Cultural and Social Implications of Global Change on the Danube River Basin*, 42.
- Hand, B.K., Flint, C.G., Frissell, C.A., Muhlfeld, C.C., Devlin, S.P., Kennedy, B.P., Crabtree, R.L., McKee, W.A., Luikart, G. & Stanford, J.A. (2018) A social–ecological perspective for riverscape management in the Columbia River Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **16**, S23-S33.
- Hein, T., Funk, A., Pletterbauer, F., Graf, W., Zsuffa, I., Haidvogel, G., Schinegger, R. & Weigelhofer, G. (2019) Management challenges related to long-term ecological impacts, complex stressor interactions, and different assessment approaches in the Danube River Basin. *River Research and Applications*, **35**, 500-509.
- Hermoso, V., Filipe, A.F., Segurado, P. & Beja, P. (2018) Freshwater conservation in a fragmented world: Dealing with barriers in a systematic planning framework. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **28**, 17-25.
- Horne, J.S., Garton, E.O., Krone, S.M. & Lewis, J.S. (2007) Analyzing animal movements using Brownian bridges. *Ecology*, **88**, 2354-2363.

- Hynes, H.B.N. (1975) The stream and its valley. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, **19**, 1–15.
- Hynes, H.B.N. (1989) Keynote address. *Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)* (ed. D.P. Dodge), pp. 5–10. Department of Fisheries and Oceans, Honey Harbour, Ontario, Canada.
- Jähnig, S., Lorenz, A., Hering, D., Antons, C., Sundermann, A., Jedicke, E. & Haase, P. (2011) River restoration success: a question of perception. *Ecological Applications*, **21**, 2007-2015.
- Kanno, Y., Letcher, B.H., Coombs, J.A., Nislow, K.H. & Whiteley, A.R. (2014) Linking movement and reproductive history of brook trout to assess habitat connectivity in a heterogeneous stream network. *Freshwater Biology*, **59**, 142-154.
- Kemp, P.S. & O'Hanley, J.R. (2010) Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, **17**, 297-322.
- Keymer, J.E., Marquet, P.A., Velasco-Hernández, J.X. & Levin, S.A. (2000) Extinction thresholds and metapopulation persistence in dynamic landscapes. *The American Naturalist*, **156**, 478-494.
- Kocik, J.F. & Ferreri, C.P. (1998) Juvenile production variation in salmonids: Population dynamics, habitat, and the role of spatial relationships. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**, 191-200.
- Kotliar, N.B. & Wiens, J.A. (1990) Multiple scales of patchiness and patch structure: a hierarchical framework for the study of heterogeneity. *Oikos*, **59**, 253-260.
- Kruse, C.G., Hubert, W.A. & Rahel, F.J. (1998) Single-pass electrofishing predicts trout abundance in mountain streams with sparse habitat. *North American Journal of Fisheries Management*, **18**, 940-946.
- Le Bouler, H., Le Pichon, C., Verger, M. & Callu, D. (1998) Etude des coûts de production pour des plants issus de multiplication végétative en vrac: cas du mélèze hybride. *Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux: seconde rencontre du groupe de la sainte catherine* (ed. ASTREDHOR), pp. 105-114. Antibes, France.
- Le Pichon, C. (1998) Le cernage en pépinière des résineux: rapport final (2e tranche). pp. 30. Cemagref, RGNO, Nogent sur Vernisson.
- Le Pichon, C. (2006) Une approche "paysage aquatique" pour une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes fluviaux et l'amélioration de la conservation des peuplements de poissons. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Le Pichon, C. & Alp, M. (2018a) ANACONDHA. Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire. pp. 101. Rapport GIP Seine Aval.
- Le Pichon, C. & Alp, M. (2018b) Projet ANACONDHA "Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire". Rapport de recherche du programme Seine Aval 5. pp. 101.

- Le Pichon, C. & Bourlon, V. (2000) Mise au point d'une technique d'amplification commerciale de lots de semis de chênes sous forme de plants bouturés: rapport final de convention ONF/Cemagref. pp. 62. Cemagref, RGNO, Nogent sur Vernisson.
- Le Pichon, C., Coustillas, J. & Rochard, E. (2015a) Using a multi-criteria approach to assess post-release recovery periods in behavioural studies: study of a fish telemetry project in the Seine Estuary. *Animal Biotelemetry*, **3**, 3-30.
- Le Pichon, C., Coustillas, J., Zahm, A., Bunel, M., Gazeau-Nadin, C. & Rochard, E. (2017a) Summer use of the tidal freshwaters of the River Seine by three estuarine fish: Coupling telemetry and GIS spatial analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **196**, 83-96.
- Le Pichon, C., Gorges, G., Baudry, J., Goreaud, F. & Boët, P. (2009) Spatial metrics and methods for riverscapes: quantifying variability in riverine fish habitat patterns. *Environmetrics*, **20**, 512-526.
- Le Pichon, C., Gorges, G., Boët, P., Baudry, J., Goreaud, F. & Faure, T. (2006a) A spatially explicit resource-based approach for managing stream fishes in riverscapes. *Environmental Management*, **37**, 322 - 335.
- Le Pichon, C., Gorges, G., Faure, T. & Boussard, H. (2006b) Anaqualand 2.0 : freeware of distances calculations with frictions on a corridor., pp. <https://www6.rennes.inra.fr/sad/Outils-Produits/Outils-informatiques/Anaqualand>. Cemagref, Antony.
- Le Pichon, C., Gorges, G. & Tales, E. (2011) Accessibilité des frayères à brochet dans une plaine alluviale de la Seine: La Bassée. *Zones Humides Infos*, 8-9.
- Le Pichon, C. & Guibert, M. (2001) Evaluating the germination capacity for commercial seedlots of *Quercus petraea*. *Seed Science and Technology*, **29**, 377-385.
- 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.
- Le Pichon, C., Mathieu, A., Tales, E., Zahm, A., Jugie, M., Slawson, D., Albert, M.-B., Roy, M., Hette, N. & Girondin, M. (2019) Suivi de l'efficacité de restauration de la continuité écologique: Cas des rivières du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. (ed. P.T.P. Agence française de la biodiversité AFB , restauration et réhabilitation des milieux aquatiques - Action n° 89), pp. 158.
- Le Pichon, C., Mingelbier, M., Legros, M., Foubert, A. & Brodeur, P. (2018) Effets du réseau routier sur la connectivité des frayères du grand brochet (*Esox lucius*) au lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent, Canada). *Le Naturaliste Canadien*, **142**, 78-91.
- Le Pichon, C. & Tales, E. (2014) Modélisation de la continuité écologique des rivières pour les poissons : un outil d'aide à la mise en place des trames bleues. *Revue SET*, **14**, 26-29.
- Le Pichon, C., Tales, É., Belliard, J. & Torgersen, C.E. (2017b) Spatially intensive sampling by electrofishing for assessing longitudinal discontinuities in fish distribution in a headwater stream. *Fisheries Research*, **185**, 90-101.

- Le Pichon, C., Tales, E., Gorges, G., Baudry, J. & Boët, P. (2015b) Using a continuous riverscape survey to examine the effects of the spatial structure of functional habitats on fish distribution. *Journal of Freshwater Ecology*, **31**, 1-19.
- Le Pichon, C., Trancart, T., Lambert, P., Daverat, F. & Rochard, E. (2014) Summer habitat use and movements of late juvenile European flounder (*Platichthys flesus*) in tidal freshwaters: Results from an acoustic telemetry study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **461**, 441-448.
- Le Pichon, C. & Verger, M. (2001) Itinéraires techniques pour la multiplication végétative en vrac du Mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry). *Revue Forestière Française*, **2**, 111-124.
- Leclerc, N. (2011) Conséquences de l'occupation des sols des petits bassins versants sur l'ichtyofaune. . Stage fin d'étude Ingénieur ENGEES
- Leuven, R.S.E.W. & Poudevigne, I. (2002) Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment. *Freshwater Biology*, **47**, 845-865.
- Leuven, R.S.E.W., Poudevigne, I. & Teeuw, R.M. (2002) Remote sensing and geographic information systems as emerging tools for riverine habitat and landscape evaluation : from concepts to models. *Application of Geographic Information Systems and Remote Sensing in River Studies* (eds R.S.E.W. Leuven, I. Poudevigne & R.M. Teew), pp. 63-74. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Lindenmayer, D.B., Likens, G.E., Krebs, C.J. & Hobbs, R.J. (2010) Improved probability of detection of ecological "surprises". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 21957-21962.
- Loicq, P., Moatar, F., Jullian, Y., Dugdale, S.J. & Hannah, D.M. (2018) Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. *Science of the Total Environment*, **624**, 480-490.
- Lucas, M.C. & Baras, E. (2001) *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science Ltd, Oxford.
- MacVicar, B., Piégay, H., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C. & Pecorari, E. (2009) Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**, 2031-2046.
- Malard, F., Tockner, K. & Ward, J.V. (2000) Physico-chemical heterogeneity in a glacial riverscape. *Landscape Ecology*, **15**, 679-695.
- McKay, S.K., Cooper, A.R., Diebel, M.W., Elkins, D., Oldford, G., Roghair, C. & Wiefelich, D. (2017) Informing Watershed Connectivity Barrier Prioritization Decisions: A Synthesis. *River Research and Applications*, **33**, 847-862.
- Merg, M.-L. & Le Pichon, C. (2021) Modélisation de la continuité écologique de l'axe Seine et ses affluents. pp. 52.
- Metcalf, J., Wright, S., Tudorache, C. & Wilson, R. (2016) Recent advances in telemetry for estimating the energy metabolism of wild fishes. *Journal of Fish Biology*, **88**, 284-297.

- Michelot, A. (2021) Bilan des mouvements des grandes aloses par télémétrie acoustique. pp. 23.
- Moilanen, A., Leathwick, J. & Elith, J. (2008) A method for spatial freshwater conservation prioritization. *Freshwater Biology*, **53**, 577-592.
- Muntoni, M. (2020) REPERE: Référentiel partagE sur les Priorités de restauration des fonctionnalités des milieux estuariens de la vallée de Seine-Aval. Rapport du GIP Seine Aval. pp. 94.
- Nelva, A., Persat, H. & Chessel, D. (1979) New method for investigating fish populations in large streams by multiple point abundance sampling. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **289**, 1295-&.
- Nguyen, H.H., Recknagel, F., Meyer, W., Frizenschaf, J., Ying, H. & Gibbs, M.S. (2019) Comparison of the alternative models SOURCE and SWAT for predicting catchment streamflow, sediment and nutrient loads under the effect of land use changes. *Science of the Total Environment*, **662**, 254-265.
- Olden, J.D. (2007) Critical threshold effects of benthoscape structure on stream herbivore movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **362**, 461–472.
- Pain, G., Baudry, J. & Burel, F. (2000) LandPop: un outil d'étude de la structure spatiale des populations animales fragmentées. *Géomatique*, 89-106.
- Palmer, M.A., Swan, C.M., Nelson, K., Silver, P. & Alvestad, R. (2000) Streambed landscapes: evidence that stream invertebrates respond to the type and spatial arrangement of patches. *Landscape Ecology*, **15**, 563-576.
- Palmer, S.C.J., Kutser, T. & Hunter, P.D. (2015) Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, **157**, 1-8.
- Paumier, A., Drouineau, H., Boutry, S., Sillero, N. & Lambert, P. (2020) Assessing the relative importance of temperature, discharge, and day length on the reproduction of an anadromous fish (*Alosa alosa*). *Freshwater Biology*, **65**, 253-263.
- Pavelsky, T.M. & Smith, L.C. (2009) Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada. *Water Resources Research*, **45**.
- Peipoch, M., Brauns, M., Hauer, F.R., Weitere, M. & Valett, H.M. (2015) Ecological Simplification: Human Influences on Riverscape Complexity. *BioScience*, **65**, 1057-1065.
- Pellicer, V. (1997) Etude de l'influence de facteurs environnementaux et physiologiques sur l'aptitude à l'enracinement de boutures de mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry). Doctorat Sciences de la terre option science des sols, Université d'Angers.
- Persat, H. & Copp, G.H. (1990) Electric fishing and point abundance sampling for the ichthyology of large rivers. *Developments in electric fishing. Proceedings of an International Symposium on Fishing with Electricity* (ed. I.G. Cowx), pp. 197–210. Fishing News Books Blackwell Scientific Publications, Oxford.

- Pickett, S.T. & White, P.S. (1985) *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, Orlando.
- Pittman, S.J. (2017) *Seascape Ecology*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Pittman, S.J., Kneib, R.T. & Simenstad, C.A. (2011) Practicing coastal seascape ecology. *Marine Ecology Progress Series*, **427**, 187-190.
- Poole, G.C. (2002) Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness within the river discontinuum. *Freshwater Biology*, **47**, 641-660.
- Poudevigne, I., Alard, D., Leuven, R.S.E.W. & Nienhuis, P.H. (2002) A systems approach to river restoration: a case study in the lower Seine valley, France. *River Research and Applications*, **18**, 239-247.
- Prévost, E. & Nihouarn, A. (1999) Relation entre indicateur d'abondance de type CPUE et estimation de densité par enlèvements successifs pour les juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) de l'année. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, 19-29.
- Pringle, C. (2003) The need for a more predictive understanding of hydrologic connectivity *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **13**, 467-471.
- Pringle, C.M., Naiman, R.J., Bretschko, G., Karr, J.R., Oswood, M.W., Webster, J.R., Welcomme, R.L. & Winterbourn, M.J. (1988) Patch dynamics in lotic systems : the stream as a mosaic. *Journal of North American Benthological Society*, **7**, 503-524.
- Radinger, J. & Wolter, C. (2014) Patterns and predictors of fish dispersal in rivers. *Fish and Fisheries*, **15**, 456-473.
- Reeves, G.H., Benda, L.E., Burnett, K.M., Bisson, P.A. & Sedell, J.R. (1995) A disturbance-based ecosystem approach to maintaining and restoring freshwater habitats of evolutionarily significant units of anadromous salmonids in the Pacific Northwest. *American Fisheries Society Symposium*, pp. 334-349.
- Reid, S. & Haxton, T. (2017) Backpack electrofishing effort and imperfect detection: Influence on riverine fish inventories and monitoring. *Journal of Applied Ichthyology*, **33**, 1083-1091.
- Rieman, B.E. & Dunham, J.B. (2000) Metapopulations and salmonids: a synthesis of life history patterns and empirical observations. *Ecology of Freshwater Fish*, **9**, 51-64.
- Riou-Nivert, P., Pâques, L., Le Pichon, C. & Bouvarel, L. (2001) *Le mélèze*. Forêt privée française.
- Roni, P., Anders, P.J., Beechie, T.J. & Kaplowe, D.J. (2018) Review of tools for identifying, planning, and implementing habitat restoration for Pacific Salmon and steelhead. *North American Journal of Fisheries Management*, **38**, 355-376.
- Rougier, T., Drouineau, H., Dumoulin, N., Faure, T., Deffuant, G., Rochard, E. & Lambert, P. (2014) The GR3D model, a tool to explore the Global Repositioning Dynamics of Diadromous fish Distribution. *Ecological Modelling*, **283**, 31-44.
- Roy, M.L. & Le Pichon, C. (2014) Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: a case study of brown trout spawning site use probabilities in Ile-de-France stream. *144e réunion*

annuelle de l'American Fisheries Society (AFS) De la recherche à la gestion des pêches : penser et agir localement et globalement, 17/08/2014 - 21/08/2014, pp. 15. Québec, CAN.

- 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.
- Schlosser, I.J. (1991a) Stream fish ecology : a landscape perspective. *BioScience*, **41**, 704-712.
- Schlosser, I.J. (1991b) Stream fish ecology: A landscape perspective. *BioScience*, **41**, 704–712.
- Schlosser, I.J. (1995) Critical landscape attributes that influence fish population dynamics in headwater streams. *Hydrobiologia*, **303**, 71-81.
- Schlosser, I.J. & Angermeier, P.L. (1995) Spatial variation in demographic processes of lotic fishes: conceptual models, empirical evidence, and implications for conservation. *American Fisheries Society Symposium*, pp. 392-401.
- Schmutz, S. & Jungwirth, M. (1999) Fish as indicators of large river connectivity: the Danube and its tributaries. *Archiv fuer Hydrobiologie*, 329-348.
- Schtickzelle, N. & Quinn, T.P. (2007) A metapopulation perspective for salmon and other anadromous fish. *Fish and Fisheries*, **8**, 297-314.
- Segurado, P., Branco, P., Avelar, A.P. & Ferreira, M.T. (2015) Historical changes in the functional connectivity of rivers based on spatial network analysis and the past occurrences of diadromous species in Portugal. *Aquatic Sciences*, **77**, 427-440.
- Sheaves, M. (2009) Consequences of ecological connectivity: the coastal ecosystem mosaic. *Marine Ecology Progress Series*, **391**, 107-115.
- Simpfendorfer, C.A., Heupel, M.R. & Hueter, R.E. (2002) Estimation of short-term centers of activity from an array of omnidirectional hydrophones and its use in studying animal movements. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **59**, 23-33.
- Soetaert, K., Middelburg, J.J., Heip, C., Meire, P., Van Damme, S. & Maris, T. (2006) Long-term change in dissolved inorganic nutrients in the heterotrophic Scheldt estuary (Belgium, The Netherlands). *Limnology and Oceanography*, **51**, 409-423.
- Steel, E.A., Beechie, T.J., Torgersen, C.E. & Fullerton, A.H. (2017) Envisioning, quantifying, and managing thermal regimes on river networks. *BioScience*, **67**, 506-522.
- Steel, E.A. & Lange, I.A. (2007) Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales: effects of multi-purpose dams in the Willamette River basin. *River Research and Applications*, **23**, 351-359.
- Steinbach, P., Gueneau, P., Autuoro, A. & Broussard, D. (1986) Radio-pistage de grandes aloses adultes en Loire. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 106-117.
- Tales, E., Belliard, J., Epissard, J., Gorges, G., Le Pichon, C. & Zahm, A. (2008) Connaissance des peuplements de poissons dans les petits bassins versants. pp. 15.

- Tales, E., Benoit, P., Gorges, G., Le Pichon, C., Poulin, M. & Rouillard, J. (2007) Poissons de Seine à Paris. pp. 55.
- Torgersen, C.E. (2002) A Geographical Framework for Assessing Longitudinal Patterns in stream Habitat and Fish Distribution. Doctor in Philosophy, Oregon State University.
- Torgersen, C.E., Baxter, C.V., Ebersole, J.L. & Gresswell, R.E. (2012) Incorporating Spatial Context into the Analysis of Salmonid–Habitat Relations. *Gravel-Bed Rivers*, pp. 216-224. John Wiley & Sons, Ltd.
- Torgersen, C.E. & Close, D.A. (2004) Influence of habitat heterogeneity on the distribution of larval Pacific lamprey (*Lampetra tridentata*) at two spatial scales. *Freshwater Biology*, **49**, 614-630.
- Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J. & Norton, D.J. (2001) Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, **76**, 386-398.
- Torgersen, C.E., Gresswell, R.E. & Bateman, D.S. (2004) Pattern detection in stream networks: quantifying spatial variability in fish distribution. *GIS-spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences (volume 2): Proceedings of the Second International Symposium on GIS-Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, 3-6 September 2002*. (eds T. Nishida, P.J. Kailola & C.E. Hollingworth), pp. 405–420. University of Sussex, Brighton, UK.
- Torgersen, C.E., Le Pichon, C., Fullerton, A.H., Dugdale, S.J., Duda, J.J., Giovannini, F., Tales, É., Belliard, J., Branco, P., Bergeron, N.E., Roy, M.L., Tonolla, D., Lamouroux, N., Capra, H. & Baxter, C.V. (2021) Riverscape approaches in practice: perspectives and applications. *Biological Reviews*, *n/a*.
- Townsend, C.R. (1989) The patch dynamics concept of stream community ecology. *Journal of North American Benthological Society*, **8**, 36-50.
- Trancart, T. (2011) Analyse comparative des tactiques déployées lors de la migration de colonisation des bassins versants par les poissons migrateurs amphihalins thalassotoques. Doctorat sciences et environnement, spécialité écologie aquatique ....
- Verger, M., Le Bouler, H. & Le Pichon, C. (2000) A software application to calculate the production costs of forest species reproduced by bulk vegetative propagation. *3rd International Symposium on Adventitious Root Formation*. Kluwer Academic Publisher, Veldhoven, The Netherlands.
- Verger, M. & Le Pichon, C. (2001) La multiplication végétative en vrac du Mélèze hybride. *Le Mélèze*. Institut pour le Développement Forestier.
- Verger, M., Le Pichon, C. & Cazet, M. (1998) Optimisation de l'élevage des pieds-mères de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) pour la multiplication végétative en vrac. *Annales des sciences forestières*, 785-799.
- Wang, S., Flipo, N. & Romary, T. (2019) Assimilating high-frequency data in a hydro-biogeochemical model of river systems, the ProSe-PA approach. *Geophysical Research Abstracts*.

- Ward, J.V. (1997) An Expansive Perspective of Riverine Landscapes: Pattern and Process Across Scales. *GAIIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, **6**, 52-60.
- Ward, J.V. (1998) Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biological Conservation*, **83**, 269-278.
- Ward, J.V. & Stanford, J.A. (1995) The serial discontinuity concept: Extending the model to floodplain rivers. *Regulated River: Research and Management*, **10**, 159-168.
- Welty, E.Z., Torgersen, C.E., Brenkman, S.J., Duda, J.J. & Armstrong, J.B. (2015) Multiscale analysis of river networks using the R package linbin. *North American Journal of Fisheries Management*, **35**, 802-809.
- Wheaton, J.M., Bouwes, N., McHugh, P., Saunders, C., Bangen, S., Bailey, P., Nahorniak, M., Wall, E. & Jordan, C. (2017) Upscaling site-scale ecohydraulic models to inform salmonid population-level life cycle modeling and restoration actions - Lessons from the Columbia River Basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, **43**, 21-44.
- White, S.M., Giannico, G. & Li, H. (2014) A 'behaviorscape' perspective on stream fish ecology and conservation: linking fish behavior to riverscapes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, **1**, 385-400.
- White, S.M. & Rahel, F.J. (2008) Complementation of Habitats for Bonneville Cutthroat Trout in Watersheds Influenced by Beavers, Livestock, and Drought. *Transactions of the American Fisheries Society*, **137**, 881-894.
- Wiens, J.A. (2002) Riverine landscapes: Taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, **47**, 501-515.
- Winiwarter, V., Schmid, M. & Dressel, G. (2013) Looking at half a millennium of co-existence: the Danube in Vienna as a socio-natural site. *Water History*, **5**, 101-119.
- Wohl, E., Angermeier, P.L., Bledsoe, B., Kondolf, G.M., MacDonnell, L., Merritt, D.M., Palmer, M.A., Poff, N.L. & Tarboton, D. (2005) River restoration. *Water Resources Research*, **41**.
- Wolf, M. & Weissing, F.J. (2012) Animal personalities: consequences for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, **27**, 452-461.
- Wu, J.G. & Loucks, O.L. (1995) From balance of nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Quarterly Review of Biology*, **70**, 439-466.
- Zeigler, S.L. & Fagan, W.F. (2014) Transient windows for connectivity in a changing world. *Movement Ecology*, **2**, 1.
- Zweimuller, I. (1995) Microhabitat use by two small benthic stream fish in a 2nd order stream. *Hydrobiologia*, **303**, 125-137.

## CV détaillé

**MADÉORE - LE PICHON Céline**

Ingénieure de recherche – Hydro-écologie

INRAE, Université Paris Saclay, Unité de recherche [HYCAR](#)

📍 Centre de Recherche Ile-de-France - Jouy-en-Josas – Antony

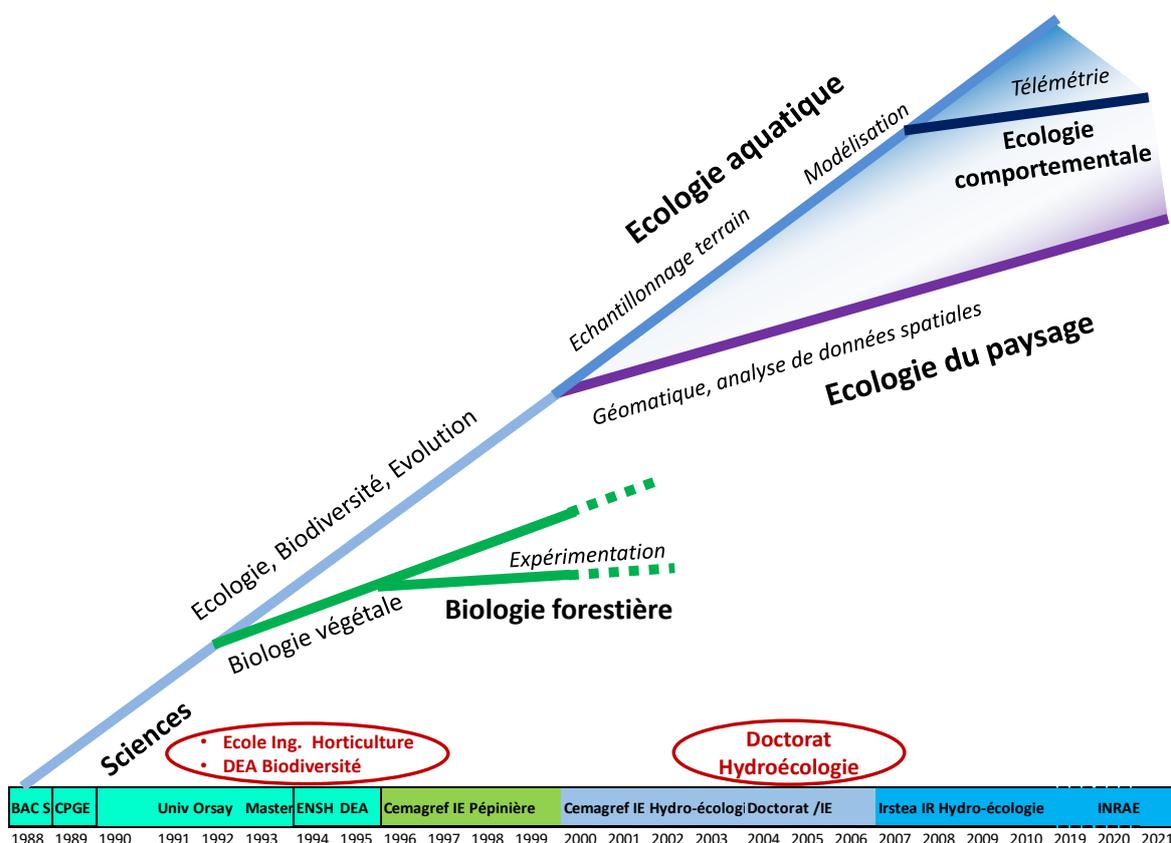
1 rue Pierre-Gilles De Gennes, 92761 Antony cedex

☎ +33 (0)1 40 96 61 77

✉ [celine.lepichon@inrae.fr](mailto:celine.lepichon@inrae.fr)

🏠 [Researchgate](#), [ORCID](#)

### Formation initiale et parcours professionnel



*Arbre cladistique des disciplines et des outils techniques mobilisés au cours de la formation initiale et du parcours professionnel placés sur une échelle temporelle. Les diplômes obtenus sont placés sur l'échelle temporelle.*

## Expérience d'encadrement et de formation

### Co-encadrement de thèse

Aline Foubert 2012 – 2017 – 30%. Co-encadrants : Frédéric Lecomte, Marc Mingelbier (Ministère de la Faune du Québec). Université du Québec à Chicoutimi. **Rôles de l'hétérogénéité et de la connectivité du paysage sur les poisons du fleuve Saint-Laurent (Canada): vers de nouvelles unités de gestion écologiques.** 3 articles publiés en commun dans *Limnology and Oceanography*, *Landscape ecology* et *Le Naturaliste Canadien*.

Marie Lamour : 2021–2023 – 50%. Co-encadrante : Marie-Laure Acolas (INRAE Bordeaux). **Utilisation des habitats estuariens par une espèce ré-introduite l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*) : identification des interactions intra et inter-spécifiques. Focus sur l'estuaire de la Gironde et potentiel de recolonisation à l'échelle européenne.**

### Comité de thèse

Julien Bergé, 2009-2011. Stratégies d'utilisation de l'habitat par les poissons dans des écosystèmes fluviaux hydrologiquement et thermiquement perturbés. Irstea, UR Dynam Lyon, encadrants : H. Capra, INRAE Lyon et M. Ovidio, Université Liège).

Annaelle Bouloy, 2021-2023. Complémentarité des habitats de la plaine alluviale pour les communautés aquatiques et influence des conditions abiotiques. Modèles et implications opérationnelles. INRAE, UR Riverly Lyon, encadrants : N. Lamouroux, INRAE Lyon et E. Castella, Université de Genève).

### Post-Doctorat / Ingénieur de recherche/ Ingénieur d'études

Mickaël Rabotin (IE) 2003 – 100%. **Cartographie fonctionnelle des habitats pour 7 groupes écologiques de poissons présents dans la plaine alluviale de la Bassée**, étude financée par la Direction Environnement IDF (DIREN).

Marie Bunel (IE) 2009 – 100%. **Cartographie des habitats de croissance estuariens pour trois espèces de poissons migrateurs thalassotoques : application méthodologique à l'estuaire amont de Rouen à Poses**, projet financé par le Groupement d'Intérêt Public Seine Aval (GIP SA).

Vanessa Dumoulin (IE) 2010 – 100%. **Impact journalier des changements de débit du Rhône sur la disponibilité et l'accessibilité des habitats vitaux de quatre espèces de poissons**, projet financé

par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (en collaboration avec le Cemagref Lyon, H. Capra, H. Pella).

Aurélia Mathieu (IE) 2012-2013 – 100%. **Etude des déplacements de truites par télémétrie radio sur deux cours d'eau du Parc Naturel Régional Vallée de Chevreuse avant aménagement de seuils**, projet financé par le PNR et l'Onema.

Mathieu Roy (post-Doc Québec) 2014 – 100%. **Analyse de la connectivité des frayères à truite sur la Mérintaise selon divers scénarios d'effacement d'ouvrages**, étude réalisée dans le cadre de la collaboration France-Québec 63<sup>ème</sup> CPCFQ.

Maria Alp (IR) 2016-2017 – 100%. **Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire de la Seine**, projet financé par le GIP Seine aval SA5. 2 présentations en conférence, un article publié dans *Ecosystems*.

2018-2019 – 100%. **Facteurs de mobilités de la truite commune en cours d'eau de montagne**, projet financé par l'équipe EDF/Irstea HYNES. Actuellement Ingénieur de Recherches à INRAE Lyon, UR Riverly.

Marie-Line Merg (IR) 2019-2022 – 100%. **Modélisations de la continuité écologique pour différentes espèces de poissons pour la Seine et ses affluents dans l'état actuel mais aussi pour des situations historiques ou prospectives liées au changement climatique**. Projet CONSACRE, Financement CPiER Vallée de la Seine, contrat de plan inter-régional. Un article publié dans un numéro spécial de *Water*.

#### Stage Master, Licence, Ingénieur

Damien du Laurens d'Oiselay 1999, Ingénieur Horticulture INH – 100%. Coût de production d'un plant de chêne sessile multiplié par bouturage.

Mathilde Kenarlikdjian 2003, Master – 100%. Fonctionnalités des habitats aquatiques selon les groupes écologiques de poissons : cas des habitats de reproduction.

Clélia Bilodeau 2005, Master – 100%. Structure spatiale du paysage sub-aquatique et viabilité des populations de poissons d'eau courante. *Actuellement Maître de conférences, Université Paris Diderot. Biogéographe.*

Fabienne Clément 2009, licence professionnelle – 100%. Evaluation de la structure spatiale des habitats et de la présence de discontinuités sur le bassin versant de l'Orgeval.

Nicolas Leclerc 2011, Stage fin d'étude Ingénieur ENGEES – 100%. Conséquences de l'occupation des sols des petits bassins versants sur l'ichtyofaune. *Actuellement DRIEA Seine Maritime*.

Marion Jugie 2012, Master – 50% (50% Frédéric Gob). Caractérisation hydromorphologique de la Mérantaise (Vallée de Chevreuse – Yvelines), un projet de restauration de la continuité écologique et sédimentaire de la rivière.

Alix Vaultier 2012, BTSA Gemeau – 50% (50% Aurélia Mathieu). Suivi télémétrique des populations de truite sur l'Aulne et la Mérantaise

Maëlle Legros 2017, Master – 60% (40% Aline Foubert). Évaluation des effets de l'autoroute 40 sur la connectivité des habitats du grand brochet dans la partie Nord du Lac Saint-Pierre, Québec, Canada. Article publié en co-auteur dans le *Naturaliste Canadien*.

Emeric Courson 2019, Ingénieur/Master – 50% (50% Laurence Lestel). Historique de la continuité écologique de l'axe Seine depuis le XIXe siècle. Article publié en co-auteur dans un numéro spécial de *Water*.

Flavie Davion, 2021, Master – 25% (50% Aliénor Jeliaskov, 25% Jérôme Belliard). Rôle de la connectivité écologique dans la distribution d'espèces de poissons à l'échelle du bassin versant de la Seine.

#### Participation à des enseignements de niveau Master

- Master Biologie de la conservation des poissons migrateurs de l'Université de Bordeaux «Méthodes et outils d'analyse spatiale des habitats aquatiques» (4h, 2013)
- Master SAGE Ecologie aquatique de l'Université Paris-Est Créteil, « Restauration de la continuité écologique principes et pratiques » (2h, 2015).

#### Formation continue

AgroParisTech « Les enjeux eau du Grenelle de l'environnement », 3h de cours « Trame verte et bleue : concepts, enjeux, élaboration et particularités de la composante bleue », 2011.

Séminaire Trame bleue en milieu urbain (5h) Groupe 3F, 2011.

#### Formations suivies

##### *Formations techniques terrain*

- Obtention du Permis bateau fluvial (2000)
- Formation « Pêche électrique » (Onema, Issoire, 5j en 2010)

- Formation « Conception des passes à poissons » (Onema, IMFT, 5j en 2010)
- Formation « habilitation électrique pour pratiquer la pêche électrique » (APAVE, 2j en 2016),
- Formation « Initiation à l'utilisation de la technologie RFID, Télémétrie passive » (Scimabio, 3j en 2021)

#### *Formations géomatique et statistique*

- 3 formations de 5 jours en SIG : « Pratique des SIG », « Statistiques spatiales », « Utiliser des images dans les SIG », Maison de la télédétection Montpellier, 2001-2002)
- Formation « Introduction à R » (3j en 2012),
- Formation « Pratique des SIG sous R » (3j en 2015),

#### *Formations encadrement, communication*

- Formation « Encadrer et accompagner un doctorant » (ASCEO, 2j en 2017).
- Formation « Média training » (2j en 2019).

#### Activités administratives et d'intérêt collectif

- Membre des groupes départementaux d'experts « Inventaires Frayères »: Essonne et Yvelines (2009-2011). Elaboration conjointe avec l'ONEMA et DRIEE-DDT des listes des tronçons de cours d'eau protégés au sens du L.432-3 du code de l'environnement.
- Membre du conseil Scientifique du PNR de la haute vallée de Chevreuse 2011-2019.
- Membre expert du Comité Régional Trame Verte et Bleue IdF 2011-2018.
- Expert dans le groupe de travail AFB Suivi Scientifique Minimal « biologique » (2014-2016). Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau en 2019 (<https://professionnels.afbiodiversite.fr/node/473>)
- Membre du Jury concours Ingénieur Etudes 2006 (hydro-écologie Irstea Aix-en-Provence).
- Membre des jurys de sélection professionnelle niveau Technicien en 2013 et 2016.
- Sauveteur secouriste du travail (2002-2005) et « Serre-File », Evacuation Incendie depuis 2014.



- Le Pichon C., Tales E. 2018. *Évaluer la fonctionnalité de la Trame bleue pour les poissons*. **Sciences Eaux et Territoires** 25, 68-71.
- Acolas M-L., Le Pichon C., Rochard E. 2017. *Spring habitat use by stocked one year old European sturgeon (*acipenser sturio*) in the freshwater-oligohaline area of the Gironde estuary*. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 196: 58-69.
- Le Pichon C., Coustillas J., Zahm A., Bunel M., Gazeau-Nadin C., Rochard E. 2017a. *Summer use of the tidal freshwaters of the River Seine by three estuarine fish: Coupling telemetry and GIS spatial analysis*. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 196: 83-96.
- Le Pichon C., Tales É., Belliard J., Torgersen C.E. 2017b. *Spatially intensive sampling by electrofishing for assessing longitudinal discontinuities in fish distribution in a headwater stream*. **Fisheries Research** 185: 90-101.
- 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.
- Le Pichon C., Tales É., Gorges G., Baudry J., Boët P. 2016. *Using a continuous riverscape survey to examine the effects of the spatial structure of functional habitats on fish distribution*. **Journal of Freshwater Ecology** 31: 1-19.
- Le Pichon C., Coustillas J., Rochard E. 2015. *Using a multi-criteria approach to assess post-release recovery periods in behavioural studies: study of a fish telemetry project in the Seine Estuary*. **Animal Biotelemetry** 3: 30.
- Carre C., Haghe J-P., De Coninck A., Becu N., Deroubaix J., Pivano C., Flipo N., Le Pichon C., Tallec G. 2014. *How to integrate scientific models in order to switch from flood control river management to multifunctional river management?* **International Journal of River Basin Management** 12: 231- 249.
- Le Pichon C., Tales É. 2014. *Modélisation de la continuité écologique des rivières pour les poissons : un outil d'aide à la mise en place des trames bleues*. **Sciences Eaux et Territoires** 14, 26-29.
- Le Pichon C., Trancart T., Lambert P., Daverat F., Rochard E. 2014. *Summer habitat use and movements of late juvenile European flounder (*Platichthys flesus*) in tidal freshwaters: Results from an acoustic telemetry study*. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 461: 441-448.

Acolas M-L., Rochard E., Le Pichon C., Rouleau E. 2012. *Downstream migration patterns of one-year-old hatchery-reared European sturgeon (*Acipenser sturio*)*. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 430–431: 68-77.

Le Pichon C., Tales É., Belliard J., Gorges G., Zahm A. Clement F. 2012. *La distribution spatiale des peuplements de poissons dans les petits bassins versants*. **Sciences Eaux et Territoires** spécial n°3, 24-33

Le Pichon C., Gorges G., Baudry J., Goreaud F., Boët P. 2009. *Spatial metrics and methods for riverscapes: quantifying variability in riverine fish habitat patterns*. **Environmetrics** 20: 512-526.

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-EAT** 50, 21-33.

Durance I., Le Pichon C., Ormerod S.J. 2006. *Recognizing the importance of scale in the ecology and management of riverine fish*. **River Research and Applications** 22: 1143-1152.

Le Pichon C., Gorges G., Boët P., Baudry J., Goreaud F., Faure T. 2006. *A spatially explicit resource-based approach for managing stream fishes in riverscapes*. **Environmental management** 37: 322 - 335.

Guibert M., Le Pichon C. 2001. *Influence de la température sur la germination, la levée et sur les taux de semis à tiges multiples chez le chêne sessile*. **Revue Forestière Française** LIII: 44-54.

Le Pichon C., Guibert M. 2001. *Evaluating the germination capacity of commercial seedlots of *Quercus petraea**. **Seed Science and Technology** 29: 377-385.

Le Pichon C., Verger M. 2001. *Itinéraires techniques pour la multiplication végétative en vrac du Mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry)*. **Revue Forestière Française** 2:111-124.

Verger M, Le Pichon C., Cazet M. 1998. *Optimisation de l'élevage des pieds-mères de douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) pour la multiplication végétative en vrac*. **Annales des Sciences Forestières** 55: 785-799.

#### *Ouvrages et chapitre d'ouvrages*

Carré, C., Meybeck, M., Garnier, J., Chong, N., Deroubaix, J.-F., Flipo, N., Goutte, A., Le Pichon C., Seguin, L. et Tournebize, J. 2020. *River Basin Visions: Tools and Approaches from Yesterday to Tomorrow*. In: **The Seine River Basin**. pp. 381-414. Springer, Cham.

Le Pichon C., Van Looy K. 2015. La continuité écologique des corridors fluviaux. In: **L'eau à découvert**, Euzen A, Jeandel C, Mosseri R (eds). CNRS éditions: 88-89.

Le Pichon C., Talès E., Clément F., Leclerc N., Gorges G., Zahm A. 2013. *Effet des discontinuités physiques sur la distribution spatiale des poissons en tête de bassin : cas de l'Orgeval*. In: **L'observation long terme en environnement: Exemple du bassin versant de l'Orgeval**. Editions QUAE: Versailles; 199-212.

Talès E., Belliard J., Le Pichon C.. 2013. *Les peuplements de poissons dans le bassin de l'Orgeval : un modèle de petit bassin versant francilien*. In: **L'observation long terme en environnement: Exemple du bassin versant de l'Orgeval**. Editions QUAE: Versailles; 189-197.

Belliard, J., Gorges, G., Le Pichon, C. et Tales, 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, Paris. 44p.

Nivert, P.R., Pâques, L.E, Le Pichon, C., Bouvarel, L. **Le Mélèze**. 2001. 144p.

Verger M., Le Pichon C. 2001. *La multiplication végétative en vrac du Mélèze hybride*. In: **Le Mélèze**. Institut pour le Développement Forestier.

### *Conférences*

Céline Le Pichon, Laurence Lestel, Emeric Courson, Evelyne Tales, Jérôme Belliard. 2019. *Historical changes in the ecological continuity of the Seine River for diadromous and freshwater fish: focus on physical and chemical discontinuities since the middle of the 18th century*. In 6th biennial symposium of the ISRS “Riverine landscapes as coupled socio-ecological systems”. Vienna, Austria.

Alp M., Le Pichon C., Bacq N., L'Ebrellec E., Moussard S.. 2017. *How changing connectivity affects nursery accessibility for fish juveniles: Tidal cycle in the Seine estuary*. In AWRA spring speciality conference “Connecting the dots: the emerging science of aquatic system connectivity”. Snowbird, Utah, Etats-Unis.

Bergeron N., Roy M., Le Pichon C., Gillis C-A., Bujold J-N., Mingelbier M. 2016. *Functional habitat chronology analysis: integrating life stages habitat requirements and habitat connectivity for estimating river production potential*. In 11th International Symposium on Ecohydraulics 2016. Melbourne, Australia.

- Lecomte F., Farrell J., Foubert A., Mingelbier M., Le Pichon C., Sirois P. 2015. *Early-life history productivity landscapes in a large heterogeneous river system (st Lawrence, Canada-US)*. In 39th Annual Larval Fish Conference. Vienne.
- Roy M., Le Pichon C., Bergeron N., Mingelbier M., Bujold J-N. 2015. *Improving salmon management with automated habitat characterization and functional habitat connectivity*. In American Geophysical Union (AGU), Joint Assembly. Montreal.
- Foubert A., Le Pichon C., Farrell J., Lecomte F., Mingelbier M. 2014. *Estimating connectivity between spawning and nursery habitats of northern pike*. In 144e réunion annuelle de l'American Fisheries Society (AFS), De la recherche à la gestion des pêches : penser et agir localement et globalement. Québec.
- Roy M., Le Pichon C. 2014. *Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: a case study of brown trout spawning site use probabilities in Ile-de-France stream*. In 144e réunion annuelle de l'American Fisheries Society (AFS), De la recherche à la gestion des pêches: penser et agir localement et globalement. Québec.
- Faure T., Le Pichon C., Boussard H., Baudry J. 2007. *Anaqualand 2.0 : Un logiciel d'analyse de la connectivité dans les cours d'eau*. In Colloque international de Géomatique et d'analyse spatiale. Clermont-Ferrand.
- Le Pichon C., Gorges G., Boët P., Baudry J., Goreaud F., Faure T. 2005. *A spatially explicit resource- based approach for managing stream fishes in riverscapes*. In GIS/Spatial analyses in fishery and aquatic sciences (Vol 3.) Proceedings of the Third International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, Nishida T, Kailola PJ, Caton AE (eds). Fishery-Aquatic GIS Research Group: Shangai Fisheries University, China; 285 - 310.
- Le Pichon C., Bourlon V. 2000. *Vegetative propagation of forest species by cuttings using confined atmosphere and sub-irrigation: Example of hybrid Larch and Sessile oak*. In 3rd International Symposium on Adventitious Root Formation. Kluwer Academic Publisher: Veldhoven, The Netherlands.
- Verger M., Le Bouler H., Le Pichon C. 2000. *A software application to calculate the production costs of forest species reproduced by bulk vegetative propagation*. In 3rd International Symposium on Adventitious Root Formation. Kluwer Academic Publisher: Veldhoven, The Netherlands.

Le Bouler H., Le Pichon C., Verger M., Callu D. 1998. *Etude des coûts de production pour des plants issus de multiplication végétative en vrac: cas du mélèze hybride*. In Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux: seconde rencontre du groupe de la sainte catherine, ASTREDHOR (ed). Antibes, France; 105-114.

Le Pichon C., Pellicer V., Bourlon V. 1998. *Bouturage à l'étouffée de ligneux forestiers avec irrigation par capillarité (sub-irrigation): exemple du mélèze hybride*. In Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux: seconde rencontre du groupe de la sainte Catherine, ASTREDHOR (ed). Antibes, France; 25-34.

Le Pichon C., Bourlon V. 1997. *Étude de quelques facteurs d'enracinement et de développement des boutures de chêne (Quercus petraea) en vue de multiplication végétative en vrac*. In Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux. Première rencontre du groupe de la Sainte Catherine, Verger M, Le Pichon C, Le Bouler H (eds). Cemagref Editions: Angers; 135-144.

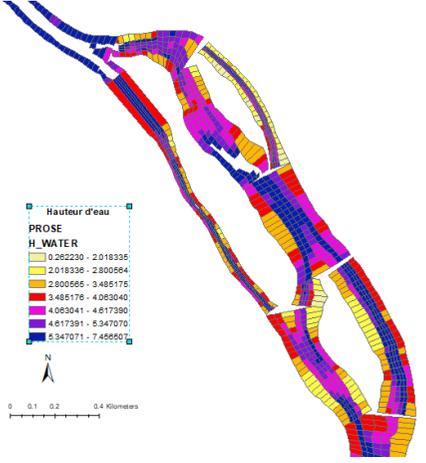
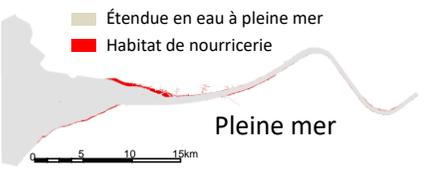
## Annexes

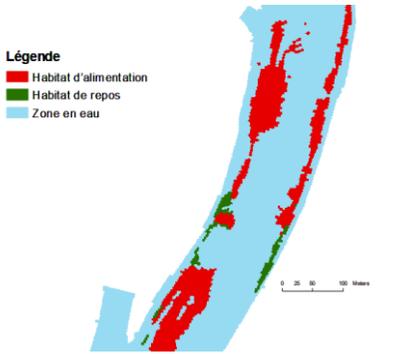
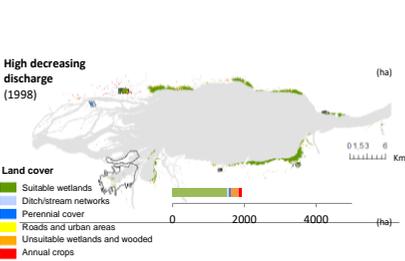
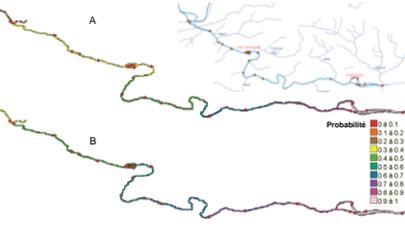
Annexe 1 – Exemples internationaux de l'approche paysage aquatique avec les variables mesurées et les méthodes de collecte de données. Les caractéristiques spatiales et temporelles associées des approches sont résumées ; le nombre de personnes impliquées et la durée de l'acquisition des données constituent des contraintes logistiques potentielles. Les objectifs d'application et de recherche sont fournis lorsqu'ils sont disponibles dans les articles sources.

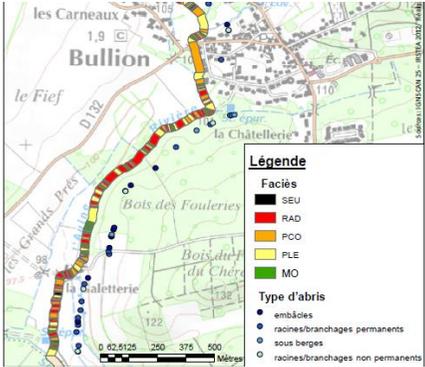
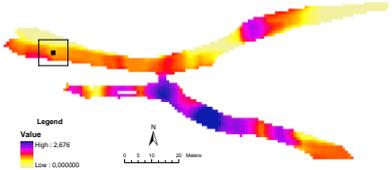
Location (name, country)	Type	Measured variables					Spatial characteristics		Temporal characteristics			Objectives	Reference	
		Fish	Aquatic habitat	Substrate	Temperature/chemistry	Riparian vegetation	Grain	Extent	Frequency	Duration	Crew			
Orco River, Italy	Spatially continuous remote sensing		X	X			1 m	45 km	Single survey				Research	Demarchi <i>et al.</i> (2016)
River Tromie, Scotland	Spatially continuous remote sensing		X	X			3 cm	16 km	Single survey		1 week	2	Applied (consultancy); research	Carbonneau <i>et al.</i> (2012)
Restigouch River watershed, Canada	Spatially continuous remote sensing				X		~20 cm	696 km	Annual (2 years)		2 weeks/year	2	Applied (detection of thermal refuges); research	Dugdale <i>et al.</i> (2015)
River Alva, River Fronhas and River Lima, Portugal	Spatially continuous remote sensing					X	0.5 m	~20 km	Present and historical		500 h	2	Research	Aguar <i>et al.</i> (2016)
3 sub-basins of the Tagus system, Portugal	Spatially continuous remote sensing					X		24, 18 and 78 km	Single survey		250 h	2	Research	Ferreira <i>et al.</i> (2005)
Southern Belgium (Wallonia)	Spatially continuous remote sensing		X			X	~1 m	12,000 km					Applied (monitoring, Water Framework Directive); research	Michez <i>et al.</i> (2017)
Treene River, Germany	Spatially intensive sampling	X	X	X			~1 km	~80 km	Single survey				Applied (monitoring); research	Radinger & Wolter (2015)
Elwha River, USA	Spatially intensive sampling	X	X	X			~10 m	70 km	Annual (2 years)		1–2 weeks	~12	Applied (monitoring); research	Brenkman <i>et al.</i> (2012)
Middle and North forks of John Day River, USA	Spatially intensive sampling	X	X		X		~5 m	120 km	Seasonal		3 weeks	~4	Applied (monitoring); research	Lawrence <i>et al.</i> (2014)
Middle Fork John Day River, USA	Spatially intensive sampling	X	X	X	X		1 m	50 km	Single survey		3 weeks	~4	Applied (monitoring); research	Torgersen & Close (2004)
Ain and Seynard River, France	Spatially intensive sampling	X	X	X			~50 m	17 km	Seasonal (2) and annual (2 years)		2 weeks	~3	Research	Plichard <i>et al.</i> (2016)
Seine River, France	Spatially intensive sampling	X	X	X			~5 m	18 km	Annual (2 years)		2 weeks	~6	Research, applied	Le Pichon <i>et al.</i> (2015)
Bear Creek, southwest Alaska, USA	Spatially intensive sampling	X			X			4 km				1	Research	Armstrong <i>et al.</i> (2013)
Hubbard Brook, USA	Spatially intensive sampling				Chemistry only		100 m	75 km	Seasonal (spring and autumn; one year)		3 months	12	Research; applied (monitoring)	McGuire <i>et al.</i> (2014)
Missouri River, USA	Spatially intensive sampling		X		X		0.5 m	338 km	Single survey		9 days	8	Research	Marotz & Lorang (2018)
Seine estuary, France	Spatially intensive telemetry and remote sensing	X	X	X			~100 m	50 km	Single survey		4 months	~2	Research	Le Pichon <i>et al.</i> (2017a)
Rivière Sainte-Marguerite Nord-Est, Canada	Spatially intensive telemetry and remote sensing	X			X		~20 cm	~60 km	Single (temperature), acoustic telemetry over 5 months		5 months	~6	Research	Frechette <i>et al.</i> (2018)
Rhône River, France	Spatially and temporally continuous telemetry	X	X	X	X		1 m	1.8 km x 140 m	3 s		3 months	~10	Research	Capra <i>et al.</i> (2017)
Rivière Ouelle, Canada	Spatially and temporally continuous telemetry and remote sensing	X			X		~20 cm	35 km (temperature), 2.4 km (telemetry)	6 surveys (temperature), passive integrated transponder (PIT) telemetry over 4 months		4 months	5	Research	Dugdale <i>et al.</i> (2013)
Quinebaug River, USA	Spatially continuous mapping		X				~1 m	~37 km	1–3 surveys				Applied (monitoring); research	Parasiewicz (2008)
Camp Creek (Umqua River basin), USA	Spatially continuous mapping	X	X				1 m	11 km	Annual (6 years)		1 week	14	Research; applied (monitoring)	Gresswell <i>et al.</i> (2006)
Poitou-Charente catchments, France	Spatially and temporally continuous habitats		X				~1 m	4000 km	every 2 weeks (10 years)		1 day		Applied (monitoring) citizen science	Datry <i>et al.</i> (2016)

Annexe 2 – Exemples de cartographie traités au cours de divers projets.

	<b>Portée : Etendue/ résolution</b>	<b>Années</b>	<b>Télé-détection</b>	<b>Relevés données terrain</b>	<b>Modélisation</b>	<b>Habitat</b>	<b>Image</b>
Plaine de la Bassée (Seine)	2 segments de 50 km / 1 m	2003-2006	Imagerie aérienne, 2 débits (moyen, sec)	Cartographie GPS : milieux latéraux contours, hauts fonds et substrat du chenal, abris	-	Habitats vitaux par groupes fonctionnels de poissons	
Ville de Paris	15 km / 25 m	2008		Cartographie GPS : berges, substrat, abris	Modèle hydrodynamique 2D Prose : vitesse, hauteur (3 débits)	Habitats vitaux par groupes fonctionnels de poissons	

<p><b>Fleuve</b> Seine (Ablon-Poses)</p>	<p>210 km / 1 m 20-30 m</p>	<p>2007  2020- 2021</p>	<p>Imagerie aérienne (Orthophoto IGN)</p>	<p>Cartographie GPS : berges, substrat, abris Photos berges (embarquées)</p>	<p>Modèle hydrodynamique 2D Prose : vitesse, hauteur d'eau, Oxygène, Température, physico-chimie</p>	<p>Cartes d'accessibilité aux frayères</p>	
<p><b>L'estuaire de la Seine</b></p>	<p>165 km/ 80*300m MARS3D, GPS 5m</p>	<p>2012  2017</p>		<p>Cartographie GPS des zones intertidales, substrat, abris, berges</p>	<p>Modèle hydrodynamique MARS 3D : vitesse et hauteur d'eau, marées</p>	<p>Habitats estival anguille, brème, mullet. Habitat de nourricerie du bar juvénile.</p>	

<p><b>Le Rhône</b></p>	<p>36 km / 2 m</p>			<p>Substrat de fond, bathymétrie au sonar multifaisceaux</p>	<p>Modèle hydrodynamique 2D Modeleur, vitesse et hauteur d'eau pour 5 débits</p>	<p>Habitat d'alimentation, de repos et de reproduction du barbeau, hotu, spirlin et chevesne</p>	
<p><b>Le lac Saint-Pierre (Saint- Laurent, Canada)</b></p>	<p>94 km / 20m</p>		<p>Imagerie aérienne, MNT, usage du sol, réseau routier et fossés, marais</p>		<p>Modèle hydrodynamique 2D vitesse et hauteur d'eau, température, végétation</p>		
<p><b>Le grand Morin</b></p>	<p>40 km</p>			<p>Obstacles à l'écoulement</p>	<p>Modèle hydrodynamique 1D Prose</p>	<p>Accessibilité aux frayères</p>	

<p><b>Baron Fork Creek (USA)</b></p>	<p>1,5 km / 1m</p>			<p>Faciès hydro morphologiques 2D</p>		<p>Habitats vitaux</p>	
<p><b>L'Aulne, l'Orgeval, la Mérantaise (IDF)</b></p>	<p>~ 3 km- 10 km/ 1m</p>			<p>Faciès hydro morphologiques, abris, substrat, obstacles à l'écoulement</p>			
<p><b>L'Asse</b></p>	<p>200 m</p>			<p>Vitesse, substrat 2D</p>		<p>Habitats invertébrés</p>	

<p><b>L'estuaire de la Gironde</b></p>	<p>2010-2018 (15 mn)</p>			<p><b>Données</b> campagnes chalut Température, salinité, profondeur, MES, turbidité</p>	<p><b>Modèle</b> hydrodynamique MARS 3D : vitesse, hauteur d'eau, MES, fraction granulométrique, Température</p>	<p><b>Habitats</b> esturgeons</p>	
--	--------------------------	--	--	--	--	---------------------------------------	---