



HAL
open science

Synthèse du programme RhônEco (1998 – 2023) et recommandations

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Emmanuel Castella, Maxence Forcellini, Camille Lebrun, Jérémie Riquier, Anaëlle Bouloy, Georges Carrel, Maxime Logez, Hélène Mayor, et al.

► To cite this version:

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Emmanuel Castella, Maxence Forcellini, Camille Lebrun, et al.. Synthèse du programme RhônEco (1998 – 2023) et recommandations. [Rapport de recherche] Université Lyon 1; CNRS; INRAE; Université de Genève. 2024, 45 p. hal-04680015

HAL Id: hal-04680015

<https://hal.science/hal-04680015v1>

Submitted on 28 Aug 2024

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.



Suivi scientifique
de la restauration
du Rhône

Synthèse du programme RhônEco (1998 – 2023) et recommandations

Synthèse du programme RhônEco (1998 – 2023) et recommandations

Version du 26 juillet 2024



Coordination scientifique : Jean-Michel Olivier (UMR CNRS 5023, LEHNA), Nicolas Lamouroux (INRAe, RiverLy), Emmanuel Castella (Département F.A.Forel des Sciences de l'Environnement et de l'Eau & Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève), Maxence Forcellini (INRAe, RiverLy), Camille Lebrun (UMR CNRS 5023, LEHNA), Jérémie Riquier (UMR CNRS 5600, EVS, Université de Saint-Etienne)

Contribution scientifique et technique : Anaëlle Bouloy (INRAe, RiverLy), Georges Carrel (INRAe, RECOVER), Maxime Logez (INRAe, RiverLy), Hélène Mayor (Département F.A.Forel & Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève), Pierre Marle (Département F.A.Forel & Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève), Ivan Paz-Vinas (UMR CNRS 5023, LEHNA), Hervé Piégay (UMR CNRS 5600, EVS), Raphael Santos (UMR CNRS 5023, LEHNA), Nicolas Tissot (UMR CNRS 5600, EVS), Abdelkader Azougui (INRAe, RiverLy), Hervé Capra (INRAe, RiverLy), Bertrand Launay (INRAe, RiverLy), Guillaume Le Goff (INRAe, RiverLy), Anael Marchand (INRAe, RiverLy), Jacques Mouthon (INRAe), Hervé Pella (INRAe, RiverLy), Robin Dadure (INRAe RECOVER), Basile Cousin (UMR CNRS 5023, LEHNA), Noéline Garcia (UMR CNRS 5023, LEHNA), Mathieu Tocaben (UMR CNRS 5023, LEHNA)

Avec le soutien efficace du Graie.

Pour citer ce rapport

Olivier J.-M., Lamouroux N., Castella E., Forcellini M., Lebrun C., Riquier J., *et al.* (2024). *Synthèse du programme RhônEco (1998 – 2023) et recommandations*. RhônEco. 45 p.

RhônEco est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Table des matières

1. Le contexte de la restauration hydraulique et écologique du Rhône.....	4
1.1 La restauration du Rhône dans le contexte international.....	4
1.2 RhônEco en bref	7
1.3 Le Rhône à un tournant : RhônEco dans un contexte de changements rapides	8
2. Les acquis de la restauration : des effets significatifs, à relativiser.....	10
2.1 Une diversité d’habitats recréée et des assemblages biologiques associés	10
2.2 Des espèces d’eau courante favorisées, des augmentations de bêta-biodiversité	13
2.3 Le contexte historique, que la restauration inverse peu	15
2.4 Exemples illustratifs.....	15
3. Des modèles prédictifs validés pour accompagner la restauration.....	17
3.1 Des modèles d’habitat hydraulique pour le chenal	17
3.2 Des modèles basés sur la connectivité pour la plaine alluviale	19
4. Les limites de la restauration, les facteurs explicatifs	22
4.1 La dynamique sédimentaire et la durabilité des habitats	22
4.2 La gestion hydro-sédimentaire des ouvrages à l’échelle du bassin (APAVer, chasses) ..	24
4.3 La restauration partielle de la complémentarité et la fonctionnalité des lônes.....	25
4.4 Les effets du réchauffement.....	26
4.5 La dynamique des espèces exogènes	28
4.6 La connectivité longitudinale.....	30
4.7 Bien d’autres explications à mieux identifier	30
4.8 Exemples illustratifs.....	31
5. Les enjeux futurs, opérationnels et scientifiques.....	34
5.1 Des objectifs instationnaires, à repenser	34
5.2 Enjeux opérationnels	34
5.3 Enjeux de connaissance	37
6. Vers RhônEco 2024-2028.....	39
7. Références bibliographiques	41
8. Annexes.....	44
Annexe 1 : les 32 lônes restaurées considérées.....	44
Annexe 2 : remerciements	45

1. Le contexte de la restauration hydraulique et écologique du Rhône

1.1 La restauration du Rhône dans le contexte international

En Europe, les activités humaines sont à l'origine de la dégradation de la morphologie, de l'hydrologie, de la qualité de l'eau et de la continuité de plus de 70% des cours d'eau. Chez les poissons, 37% des espèces sont considérées « en danger d'extinction ». Les causes sont multiples : construction de barrages, chenalisation, dérivation des cours d'eau, assèchement, modifications de l'occupation des sols (urbanisation, agriculture, industrialisation...), pollution des eaux...

Depuis les années 1980, la restauration écologique est devenue une problématique centrale dans le domaine de la gestion environnementale. Depuis 1992 par exemple, la [Convention sur la Diversité Biologique](#) appelle à « *la restauration des écosystèmes naturels et semi-naturels dégradés, y compris en milieu urbain, comme contribution pour inverser l'appauvrissement de la biodiversité, retrouver la connectivité, renforcer la résilience des écosystèmes, améliorer l'approvisionnement des services écosystémiques, atténuer les effets du changement climatique et s'adapter à celui-ci, lutter contre la désertification et la dégradation des terres, améliorer le bien-être humain tout en réduisant les risques environnementaux et les pénuries de ressources* ». L'Assemblée générale des Nations Unies a proclamé la période « 2021-2030 » comme « Décennie pour la restauration des écosystèmes ». Cet élan est conforté par le récent Règlement Européen sur la Restauration de la Nature.

De nombreux auteurs et des organisations internationales ont élaboré des guides à destination des acteurs afin de les aider à mieux prendre en compte et à caractériser les contextes socio-économiques et écologiques lors de la définition des objectifs de restauration écologique. Par exemple, la [Society for Ecological Restoration](#) (SER) a élaboré des « [Principes et normes internationaux pour la pratique de la restauration écologique](#) » qui prennent en considération tous les aspects liés à la mise en œuvre de la restauration. Dans la démarche proposée, l'objectif est un retour à un état le plus proche possible de l'état naturel dont l'évaluation est faite par rapport à celui d'un écosystème de référence. Cette condition s'avère restrictive ou irréaliste lorsque les projets de restauration écologique concernent des écosystèmes fortement contraints par les activités humaines ou les usages. Dans ce contexte, ce sont des actions de réhabilitation écologique qui sont mises en œuvre, ayant pour objectif le rétablissement d'un niveau de fonctionnalité écosystémique. Ces projets contribuent tous à améliorer l'intégrité écosystémique et la résilience socio-écologique.

Si la réhabilitation des hydrosystèmes s'est concentrée initialement sur la restauration des formes (style géomorphologique, ripisylves, méso et micro-habitats...) avec des effets parfois contrastés et des difficultés à lier changements biologiques post-restauration et procédures de restauration (Palmer *et al.*, 2010 ; Hering *et al.*, 2015), les retours d'expérience à l'échelle internationale ont conduit à une démarche visant prioritairement la restauration des processus physiques, biogéochimiques, et biologiques. Idéalement, ces pratiques doivent privilégier les approches à l'échelle des bassins versants et considérer différentes échelles spatiales en lien avec celles auxquelles opèrent les différents processus qui influencent la biodiversité (Beechie *et al.*, 2010 ; Friberg *et al.*, 2016 ; Palmer et Ruhí, 2019). Dans le cas du fleuve Rhône, compte-tenu de la taille du bassin versant, des usages et des aménagements présents tout le long du fleuve, une approche de la problématique de restauration écologique à l'échelle de l'ensemble du bassin est peu envisageable.

Dans une synthèse d'articles traitant de l'évaluation de l'efficacité des mesures de restauration sur les poissons des rivières, Rogosch *et al.* (2024) ont identifié la dégradation des habitats, la fragmentation et les modifications hydrologiques comme les principales causes de l'altération des

cours d'eau. Ils ont recensé les principaux objectifs de restauration écologique (**Figure 1**). La restauration des habitats aquatiques et celle de la connectivité longitudinale et latérale apparaissent comme les mesures de réhabilitation les plus courantes.

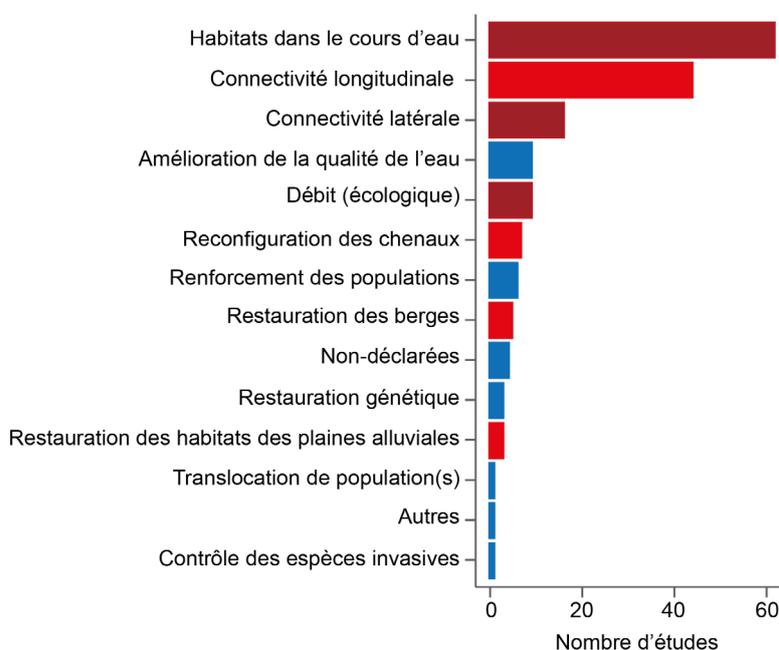
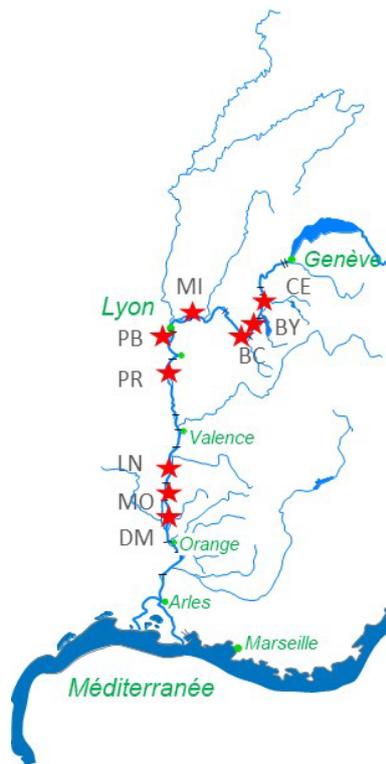


Figure 1 – Principales actions de restauration des cours d'eau recensées dans l'analyse bibliographique de Rogosch *et al.* (2024). Les actions mises en œuvre dans le cadre de la restauration écologique du Rhône sont indiquées en rouge, la couleur rouge foncé correspond aux actions principales, la couleur rouge clair correspond aux actions secondaires.

L'ambition du programme de restauration mis en œuvre sur le Rhône était de retrouver les caractéristiques et le fonctionnement d'un fleuve « vif et courant », en priorité sur neuf secteurs court-circuités par les aménagements hydroélectriques pour lesquels des améliorations importantes de la qualité écologique étaient envisageables. Les sites restaurés sont répartis sur ~ 250 km depuis la Chautagne jusqu'à Donzère-Mondragon (**Figure 2**). Les débits réservés ont été augmentés à l'aval de 8 barrages, par des facteurs allant jusqu'à 10. Par ailleurs, plusieurs dizaines de bras annexes (lônes) ont été recreusés et/ou reconnectés (32 considérés ici, voir **Annexe 1** ; **Figure 3**). Ainsi, les mesures mises en œuvre sur le Rhône s'inscrivent dans les efforts recensés au niveau international (**Figure 1**). Ces opérations d'envergure, mises en œuvre de façon répétée sur plusieurs secteurs, accompagnées d'un suivi interdisciplinaire anticipé avant restauration, font de la restauration du Rhône un exemple rare à l'échelle internationale.



Secteur (code)	Débit moyen annuel (m ³ .s ⁻¹)	Date de restauration	Débit réservé aval barrage (m ³ .s ⁻¹)	
			Avant	Après
Chautagne (CE)	410	juil-04	10-20	50-70
Belley (BY)	410	juil-05	25-60	60-90
Brégner-Cordon (BC)	435	juil-06	80-150	80-150
Canal de Miribel (MI)	598	-	30-60	30-60
Pierre-Bénite (PB)	1030	sept-00	10-20	100
Péage-De-Roussillon (PR)	1050	janv-14	10-20	50-125
Baix-Le-Logis-Neuf (LN)	1475	janv-14	10-20	74
Montélimar (MO)	1490	janv-14	15-60	75
Donzère-Mondragon (DM)	1490	janv-14	60	75

Figure 2. Les 9 secteurs principalement concernés par RhônEco. D'autres (Bugey, affluents) sont régulièrement pris en compte dans une approche comparative des effets de la restauration. Les dates de restauration et valeurs des débits minimum à l'aval des barrages sont indiquées.



Figure 3. Exemples de travaux sur les lônes, et création de milieux « neufs » (Luisette, En l'île dans le secteur de Belley)

1.2 RhônEco en bref

L'observatoire scientifique de la restauration du Rhône (RhônEco)¹ a succédé au suivi mis en place dans le cadre du programme décennal de restauration hydraulique et écologique du Rhône lancé en 1998. Il constitue, avec l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR)², l'un des programmes fédérateurs animés par l'Observatoire Hommes-Milieux Vallée du Rhône (OHM VR)³, site atelier de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR)⁴, dans le cadre du [Plan Rhône-Saône](#).

RhônEco est un programme de recherche dont l'objectif central est d'évaluer et prédire les effets des mesures de restauration écologique mises en œuvre sur le Rhône. Il s'appuie sur un suivi (monitoring) dédié à cette problématique. Les opérations de restauration concernées sont (1) l'augmentation des débits réservés, (2) la réhabilitation physique des îles, et plus récemment (3) le démantèlement des marges alluviales (reconnexions de casiers, élargissements du chenal) et (4) les recharges sédimentaires.

Jusqu'à ce jour, les suivis et les analyses proposées dans le programme RhônEco ont concerné principalement l'évolution hydro-morpho-sédimentaire des bras fluviaux et les réponses des communautés de poissons et de macroinvertébrés benthiques aux opérations de restauration des habitats dans les vieux-Rhône et les îles. Le suivi déployé permet une analyse à l'échelle des grands types de milieu (chenal principal et îles) et des communautés. Les protocoles permettent également de fournir des informations à l'échelle des populations.

Dans sa dimension d'observatoire, le programme permet de discriminer les effets relatifs des différentes mesures de restauration et les modifications induites par les changements climatiques (e.g. réchauffement de l'eau, avec des effets écologiques visibles sur plusieurs sites) ou par l'arrivée de nouvelles espèces exogènes. Pour cette raison, l'approche comparative multi-sites et multi-secteurs est fondamentale dans RhônEco. Elle seule permet d'identifier les effets de la restauration dans un contexte de changements globaux, rapides et multifactoriels.

Dans sa dimension prédictive, RhônEco permet d'évaluer la capacité des équipes scientifiques à prédire les effets biophysiques de la restauration. Les modèles permettent d'évaluer *a priori* les effets de nouvelles mesures de restauration et leur pérennité (e.g. durée de vie des îles restaurées). Ces modèles étant en partie transférables sur d'autres cours d'eau, leur test est d'intérêt général pour la gestion efficace des cours d'eau. En particulier, c'est sur le Rhône que sont testés les modèles généralement utilisés pour définir des débits écologiques à l'aval des barrages.

Les suivis réalisés dans le cadre de RhônEco couvrent jusqu'à 30 ans (**Figure 4**), et ont débuté avant les opérations de restauration de manière à établir des états initiaux intégrant la variabilité spatio-temporelle des systèmes étudiés. Ces caractéristiques pré-restauration sont indispensables à l'évaluation des effets de la restauration.

L'ensemble de ces caractéristiques font de RhônEco un programme unique, aux niveaux national et international, en termes d'acquisition de connaissances et de retours d'expériences quant aux effets des procédures de réhabilitation écologique mises en œuvre.

¹ <https://www.rhoneco.fr/>

² <https://observatoire-sediments-rhone.fr/>

³ <https://ohm-vallee-du-rhone.fr/>

⁴ <https://www.zabr.assograie.org/>

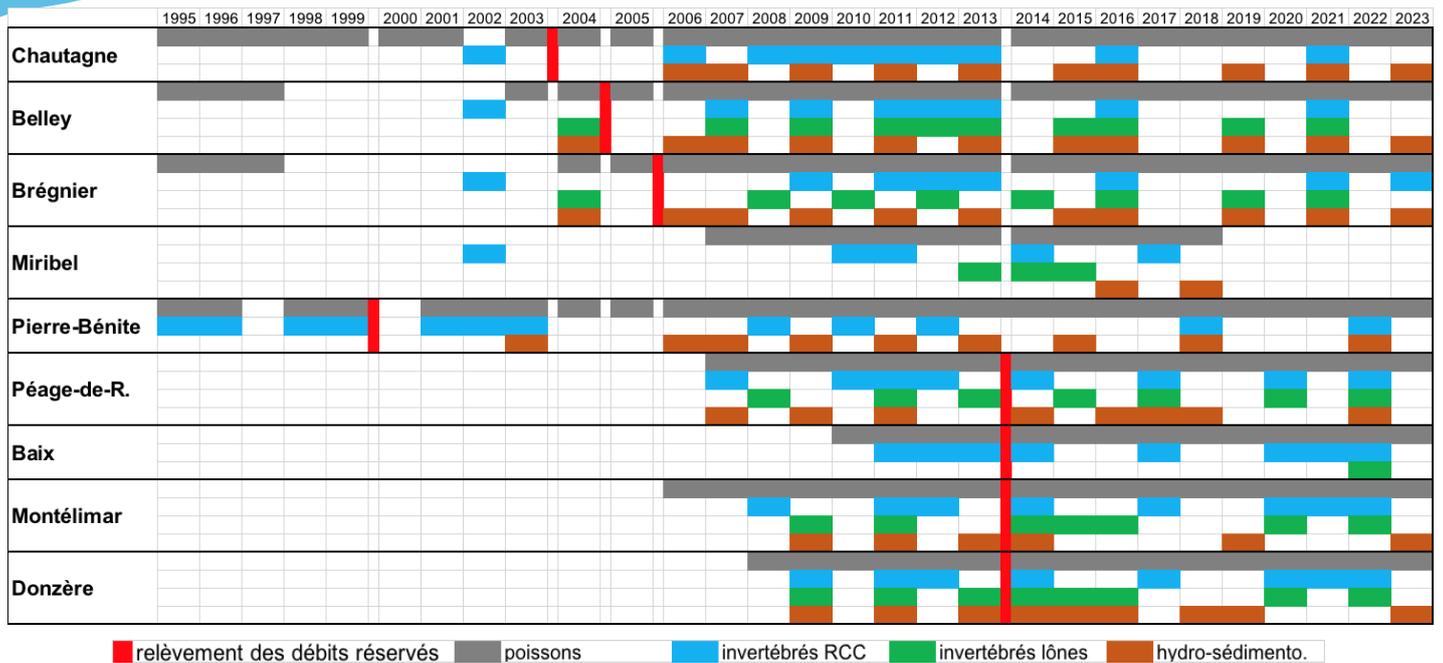


Figure 4. L’observation régulière de quatre compartiments biophysiques sur la période 1995 - 2023.

1.3 Le Rhône à un tournant : RhônEco dans un contexte de changements rapides

Bien des cours d’eau du bassin du Rhône vont subir une augmentation de la température de l’eau de plusieurs degrés dans les décennies à venir, associée (en général) à un renforcement des débits extrêmes dont une baisse des débits d’été. La température de l’air pourrait augmenter d’environ 2°C d’ici 2040-2070. Malgré une fonte glaciaire accélérée dans un premier temps, les étiages du Rhône lui-même seront susceptibles de baisser de 20% sur la même période, notamment au cours de la période post-estivale. Cette baisse sera encore plus marquée avec la disparition progressive des glaciers et générera un changement majeur des régimes hydrologiques et thermiques. Bien que les prévisions quantitatives soient entachées de fortes incertitudes⁵, il est certain que les débits et la température du fleuve, et en particulier leurs valeurs extrêmes, vont très rapidement changer. Ces changements rapides s’ajoutent à la découverte continue de polluants émergents. Ils représentent une menace pour les communautés aquatiques et plus largement pour le fonctionnement écologique du fleuve, vis-à-vis de laquelle l’adaptation s’annonce difficile.

En parallèle, les aménagements du Rhône et leur gestion vont évoluer rapidement (construction d’EPRs, construction ou rénovation de barrages, construction de passes à poissons, gestion de l’électricité de pointe...), modifiant également le régime hydro-thermique du fleuve, avec des conséquences facilitantes ou aggravantes pour l’écosystème aquatique. La restauration du fleuve elle-même évolue, avec de nouveaux leviers de restauration comme la recharge sédimentaire.

⁵ https://www.eaurmc.fr/jcms/pro_118205/fr/une-etude-sur-les-debits-du-rhone-pour-anticiper-leur-evolution

Face à ces changements rapides, l'évolution du Rhône est à un tournant important que le programme RhônEco ambitionne d'accompagner. La dimension « suivi » du programme reste importante, avec des recherches qui permettent d'évaluer et guider les opérations de restauration et d'estimer leur durabilité. Néanmoins, la dimension « observatoire » du programme se renforce, car les changements rapides que connaît le fleuve incitent à hiérarchiser les actions de gestion dans un contexte multi-stress, et à repenser les objectifs de gestion du fleuve (Figure 5).



Figure 5. A la fin de cette synthèse 2019-2023, nous présentons brièvement le programme 2024-2028, qui vise à renforcer la dimension d'observatoire multi-stress du fleuve pour répondre au défi de l'adaptation aux changements rapides attendus. Le programme comprend des descriptions thermiques et d'exposition aux toxiques plus complètes, avec une analyse de la biodiversité du fleuve impliquant plus de groupes biologiques et d'aspects fonctionnels.

Dans ce contexte, l'objectif du programme 2019-2023, que cette synthèse conclut, était en particulier : (1) d'apporter des retours consolidés, impliquant l'ensemble du fleuve, Haut-Rhône et Bas-Rhône, concernant les effets de la restauration et sa durabilité ; (2) de mettre à jour le test des modèles prédictifs des effets de la restauration ; (3) d'interpréter les succès et échecs de la restauration, afin de mieux identifier les facteurs explicatifs des réponses non-attendues ; (4) d'apporter des éléments de connaissance à plus long-terme sur la trajectoire du fleuve, par l'analyse de données anciennes sur les poissons.

2. Les acquis de la restauration : des effets significatifs, à relativiser

2.1 Une diversité d'habitats recrée et des assemblages biologiques associés

Les relevés hydromorphologiques réalisés depuis plus de 20 ans dans les bras latéraux du fleuve ont permis de mettre en évidence l'existence de 4 types principaux de conditions d'habitat dans les bras restaurés (Figure 6). Ces types sont définis par la nature du substrat composant le fond des bras, les fréquences de connexion au chenal à l'amont, et les contraintes de cisaillement s'exerçant en fond de bras lors des crues. Ainsi, les bras de type 1 (bras lotiques) sont des chenaux secondaires actifs, connectés avec le fleuve en permanence ou très fréquemment. Le fond de leur lit mineur est composé essentiellement de graviers et de galets et les forces exercées en fond de lit sont relativement fortes en crue. A l'opposé du gradient, les bras de type 4 (bras lentiques à courte durée de vie) sont des bras déconnectés du fleuve à leur extrémité amont et sont soumis à des retours d'eau intenses en provenance du fleuve à leur extrémité aval. Possédant des fonds totalement recouverts par les limons, avec des teneurs en argiles et en matière organique non négligeables, ces bras enregistrent des vitesses de sédimentation relativement fortes. Les contraintes de cisaillement en crue restent relativement faibles, ce qui explique que ces derniers se comportent comme de véritables bassins de décantation. Entre ces deux extrêmes, les bras de types 2 et 3 (bras lentiques à longue durée de vie) constituent deux situations intermédiaires relativement proches. Les bras de types 2 enregistrent des contraintes de cisaillement plus importantes en crue que les bras de type 3. Ils disposent ainsi de dépôts présentant une prédominance des sables sur les limons, alors que les limons prédominent sur les sables dans les bras de type 3, moins énergiques. A l'échelle des bras, ces types sont jusqu'à présent robustes dans le temps et rares sont les cas où les bras changent de type.

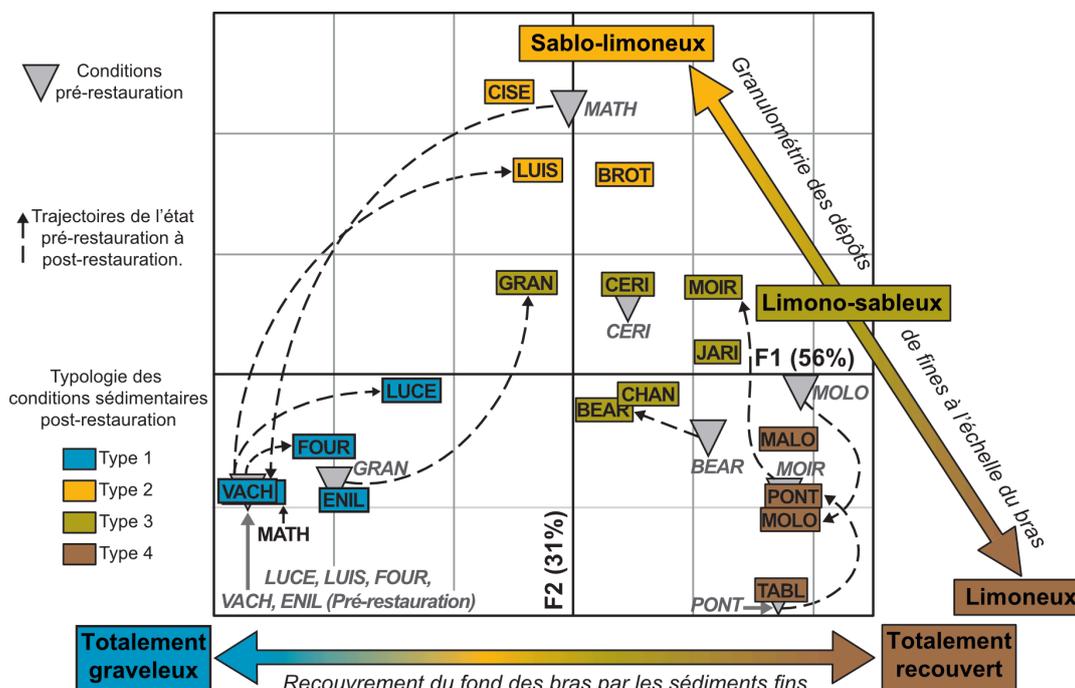


Figure 6. Analyse de la diversité des conditions granulométriques de surface moyennes mesurées dans les bras latéraux étudiés (voir Annexe 1 pour les codes). D'après Riquier et al. (2015).

Les types d'habitat (chenal et lônes) abritent différents assemblages biologiques (**Figure 7**). La distribution des taxons de macroinvertébrés est principalement organisée en lien direct avec les différents types d'habitat. Pour les poissons, plus mobiles, les différents stades du cycle de vie de chaque espèce (embryon, larve, juvénile, adulte) présentent des besoins spécifiques en termes d'habitats et de ressources trophiques. En fonction de ces exigences écologiques, la distribution spatiale des poissons s'organise au sein des différents types d'habitat. Elle dépend étroitement de l'adéquation entre les exigences écologiques de chaque stade de développement et les caractéristiques géomorphologiques et hydrauliques (telles que la vitesse de courant, la profondeur et le type de substrat), les conditions thermiques, les caractéristiques biologiques (comme la présence de végétation, d'abris et les ressources trophiques) et la teneur en oxygène dissous de ces habitats. Plus généralement, l'analyse détaillée des assemblages dans l'espace et le temps démontre que la diversité des habitats permet des fonctions de nurserie et de refuge, et peut favoriser la reproduction de certaines espèces.

Dans le cadre du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône, deux types d'annexes fluviales ont été réhabilitées, avec des fonctions complémentaires de celles du chenal : les bras secondaires courants (lotiques) et les lônes de type parapotamique (lenticues).

Les bras secondaires sont des bras peu profonds, où les vitesses d'écoulement sont plus faibles que celles du chenal, avec des fonds graveleux et une alternance de radiers et de mouilles. Ces chenaux offrent des habitats privilégiés pour certaines espèces d'eaux vives comme la loche franche et le spirin, ainsi que pour les juvéniles (i.e. les poissons non matures sexuellement) de grands leuciscidés comme le barbeau fluviatile, le chevaine, le hotu et la vandoise, et pour des salmonidés comme la truite fario. Les faibles proportions de juvéniles de l'année indiquent que ces milieux ne sont pas des habitats de croissance privilégiés pour les très jeunes poissons, mais plutôt des habitats efficaces pour la croissance des poissons de tailles intermédiaires et en particulier les hotus (**Figure 8**).

Les lônes lenticues sont connectées par leur extrémité aval hors période de crue, les contraintes hydrauliques sont faibles voir nulles, la température est plus élevée que dans les chenaux courants, les fonds sont généralement limono-sableux et le développement de la végétation aquatique peut être conséquent. Ces lônes abritent des effectifs élevés de juvéniles de l'année (près de 80% des captures annuelles) et une grande diversité d'espèces : des espèces du chenal comme le chevaine, des espèces qui utilisent ponctuellement ce type de milieu à un moment de leur cycle de vie comme l'ablette, les brèmes, le goujon, et des espèces pouvant y réaliser l'intégralité de leur cycle de vie comme la bouvière, le rotengle et la tanche (**Figure 7**). Ces lônes présentent des caractéristiques hydromorphologiques compatibles avec les exigences des jeunes stades de vie : de faibles contraintes hydrauliques, des sources trophiques primaires (phytoplancton) et secondaires (méiofaune, zooplancton, et autres niveaux trophiques) abondantes. La présence d'espèces végétales aquatiques offre des abris contre les prédateurs et des substrats de frai aux espèces phytophiles et phytolithophiles. Ces annexes sont des environnements privilégiés pour le développement des jeunes poissons et jouent le rôle crucial de nurseries.

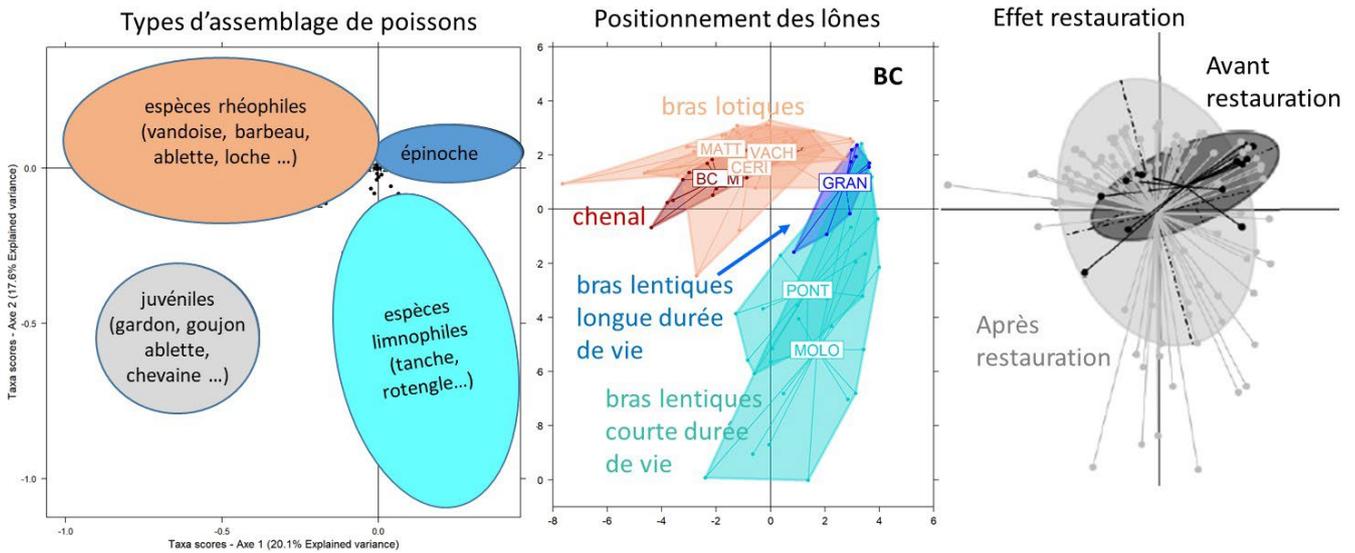


Figure 7. Expression graphique simplifiée d'une analyse multivariée (ACP) intra-secteurs sur les densités de poissons observées dans les différents types d'habitat (chenal et type de lônes). A gauche les assemblages de poissons révélés par l'analyse. Au centre le positionnement des lônes correspondant à différents types d'habitat, illustré par le secteur de Brégner-Cordon. Les polygones regroupent différentes dates d'échantillonnage. Les types d'habitat sont identifiés par la couleur des polygones. Les codes des lônes sont en **Annexe 1**. A droite, les positions des lônes pour les dates avant et après restauration, indiquant une augmentation de la diversité des assemblages à Brégner-Cordon. D'après Bouloy *et al.* (2024).

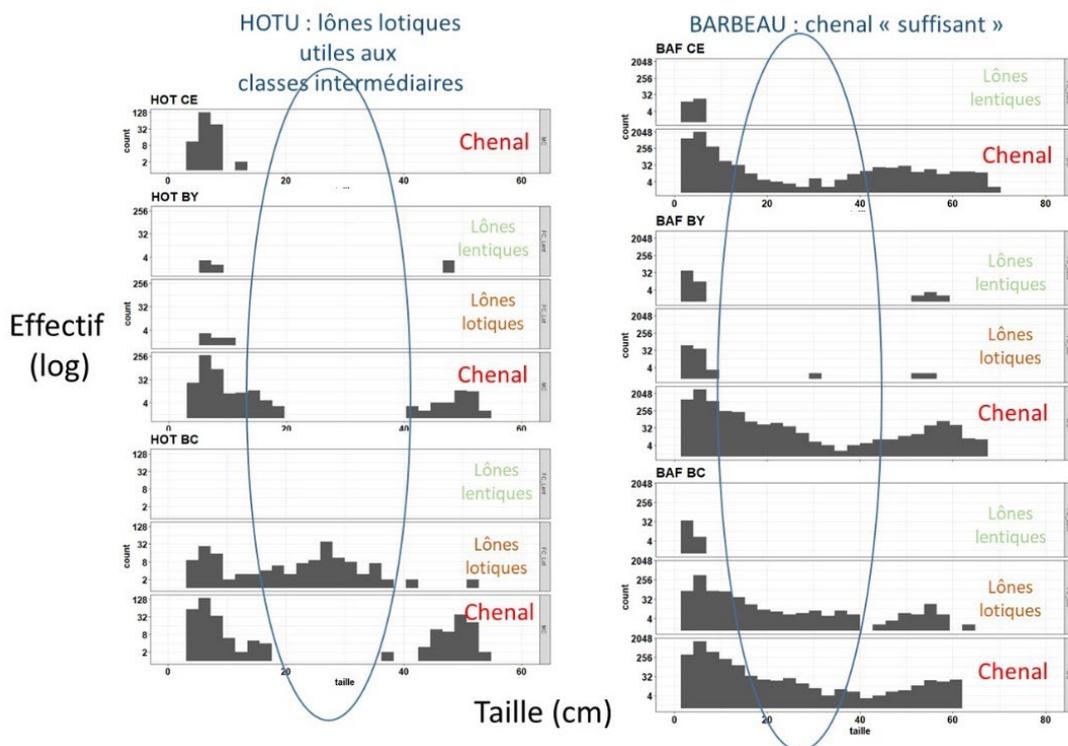


Figure 8. Histogrammes des tailles d'individus, pour le hotu et pour le barbeau, et pour les années post-restauration (ici jusqu'en 2019), des espèces dans les différents secteurs et types d'habitat (chenal, lônes lotiques, lônes lenticques), sur trois secteurs du Haut-Rhône (Chautagne, Belley, Brégner-Cordon). Les histogrammes sont présentés avec une échelle logarithmique sur les effectifs (axe vertical). Les hotus de taille intermédiaire se trouvent essentiellement dans les bras lotiques.

2.2 Des espèces d'eau courante favorisées, des augmentations de bêta-biodiversité

La période 2019-2023 confirme des changements importants de structure des communautés après restauration dans la plupart des secteurs, du Bas-Rhône comme du Haut-Rhône, dans les chenaux comme dans les îlons, mais qui ne sont pas toujours directement interprétés comme liés à la restauration hydraulique. Conformément aux attentes, on observe dans plusieurs secteurs une augmentation de l'abondance relative des espèces d'eau courante, une augmentation de la biodiversité de la plaine alluviale, avec un rôle important des bras secondaires recréés.

Des augmentations claires de l'abondance relative des espèces de poissons d'eau courante, inféodées aux habitats rapides et profonds, sont confirmées après restauration dans les chenaux où les hausses de débits réservés et les changements hydrauliques associés ont été les plus importants par rapport aux valeurs pré-restauration. C'est le cas dans les vieux-Rhône de Chautagne sur le Haut-Rhône, Pierre-Bénite (Figure 9) sur le Rhône moyen et Baix - Le Logis Neuf sur le Bas-Rhône. Les suivis de macroinvertébrés reflètent moins ces effets, avec des taxons rhéophiles favorisés en Chautagne, mais dans un premier temps seulement, et une réponse inverse à Baix - Le Logis Neuf. Il semble que les changements de communautés invertébrés reflètent des effets partagés entre secteurs, mais liés à d'autres facteurs environnementaux.

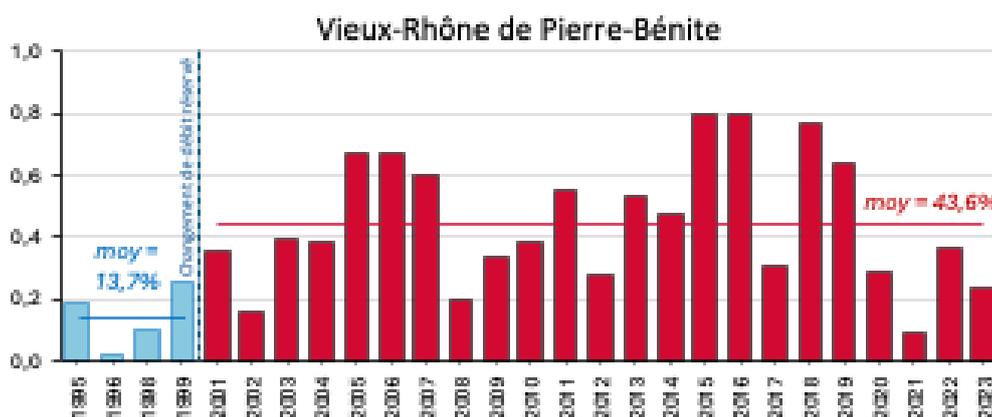


Figure 9. Évolution de la proportion de poissons appartenant à la guild des espèces d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, ombre commun, vandoise) dans le vieux-Rhône de Pierre-Bénite entre 1995 et 2023. L'augmentation de débit réservé a eu lieu en 2000.

Parmi les exemples les plus démonstratifs, l'augmentation du débit réservé dans le vieux-Rhône de Pierre-Bénite (Figure 9) a eu pour conséquence des augmentations de profondeur moyenne et de vitesse moyenne (passage de $\sim 0,08 \text{ m.s}^{-1}$ à $\sim 0,36 \text{ m.s}^{-1}$) défavorisant les espèces lénitophiles (gardon, perche-soleil...) et les espèces inféodées aux habitats peu profonds et plus ou moins courants comme la loche franche. Cette modification a triplé l'abondance relative des espèces d'eau courante, passant de 13,7 % à 43,6 %. Toutefois, cette valeur présente une forte variabilité interannuelle, car largement influencée par les effectifs élevés d'ablettes. Le barbeau fluviatile et le hotu contribuent modérément à cette métrique. La vandoise est régulièrement présente dans les échantillons mais les effectifs sont faibles.

La période 2019-2023 confirme également des augmentations satisfaisantes de la biodiversité « bêta » de la plaine alluviale, liées à la diversité spatiale des habitats recréés. C'est essentiellement sur les secteurs du Haut-Rhône abritant une forte diversité de înes restaurées que ces augmentations sont visibles. Pour les poissons, la **Figure 7** montre une augmentation de la bêta-diversité des assemblages de Brégnier-Cordon. Cette augmentation est également visible pour les macroinvertébrés, mais de façon plus forte à Belley qu'à Brégnier-Cordon (**Figure 10**). De tels effets ne sont pas encore décelables sur le Bas-Rhône.

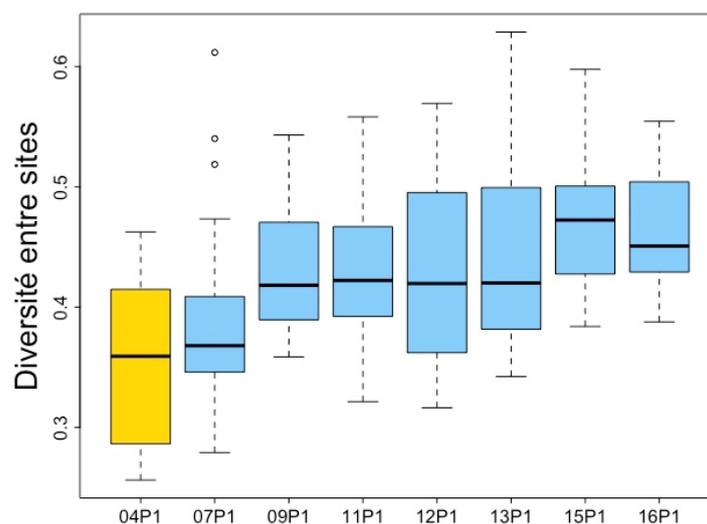


Figure 10. Dans le secteur de Belley, augmentation de la diversité des assemblages d'invertébrés aquatiques entre 17 sites, pour la période allant de 2004 (pré-restauration en jaune) à 2016 (post-restauration en bleu).

Parmi les différentes mesures de restauration de înes, notons que la recréation de bras lotiques par reconnexion complète entraîne des changements particulièrement significatifs, similaires entre secteurs, avec des peuplements de macroinvertébrés et de poissons rhéophiles s'établissant rapidement et durablement (**Figure 11**).

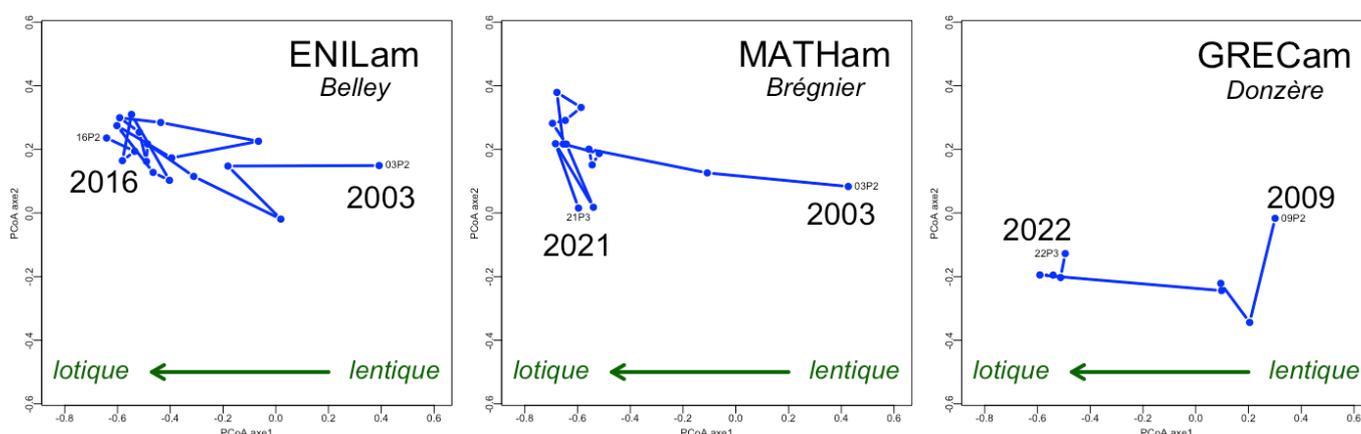


Figure 11. Trajectoire temporelle de înes sur la carte factorielle d'une analyse multivariée des assemblages d'invertébrés aquatiques, pour trois înes (En l'Île, Mathan sur le Haut-Rhône, et Grange Ecrasée sur le Bas-Rhône) restaurées par reconnexion complète au Rhône court-circuité. Dans les trois secteurs, les trajectoires convergent (de gauche à droite) vers un assemblage typique d'espèces de chenaux latéraux courants

2.3 Le contexte historique, que la restauration inverse peu

L'analyse de l'évolution spatio-temporelle historique, sur un siècle, de la structure du peuplement piscicole du Rhône fournit une image de la transformation des assemblages au fil du temps (**Figure 12**). Elle met en évidence les changements majeurs survenus à la suite de l'aménagement hydroélectrique du fleuve, entre les périodes 1910-1956 et 1974-1987, avec une forte régression de la truite et de l'ombre commun, des grands migrateurs à l'exception de l'anguille, la disparition de l'esturgeon et de l'apron sur l'axe fluvial, avec une distinction croissante entre Haut-Rhône et Bas-Rhône. La continuité du décalage de gauche à droite sur le premier axe des périodes récentes (1988-2023) est principalement liée à l'arrivée progressive, et continue, de nouvelles espèces exogènes qui colonisent rapidement le Rhône et ses affluents.

La réhabilitation écologique du fleuve (période 2000-2023) n'engendre pas de changements de structure des peuplements de poissons visibles sur cette représentation graphique de l'évolution des peuplements sur le long terme (**Figure 12**). Ce recul historique révèle clairement le caractère irréversible de l'impact marqué des aménagements et des usages du fleuve au cours du 20^{ème} siècle. L'analyse historique montre néanmoins que la restauration infléchit les courbes d'évolutions de certaines espèces sur certains secteurs, à l'image du barbeau favorisé sur le Haut-Rhône.

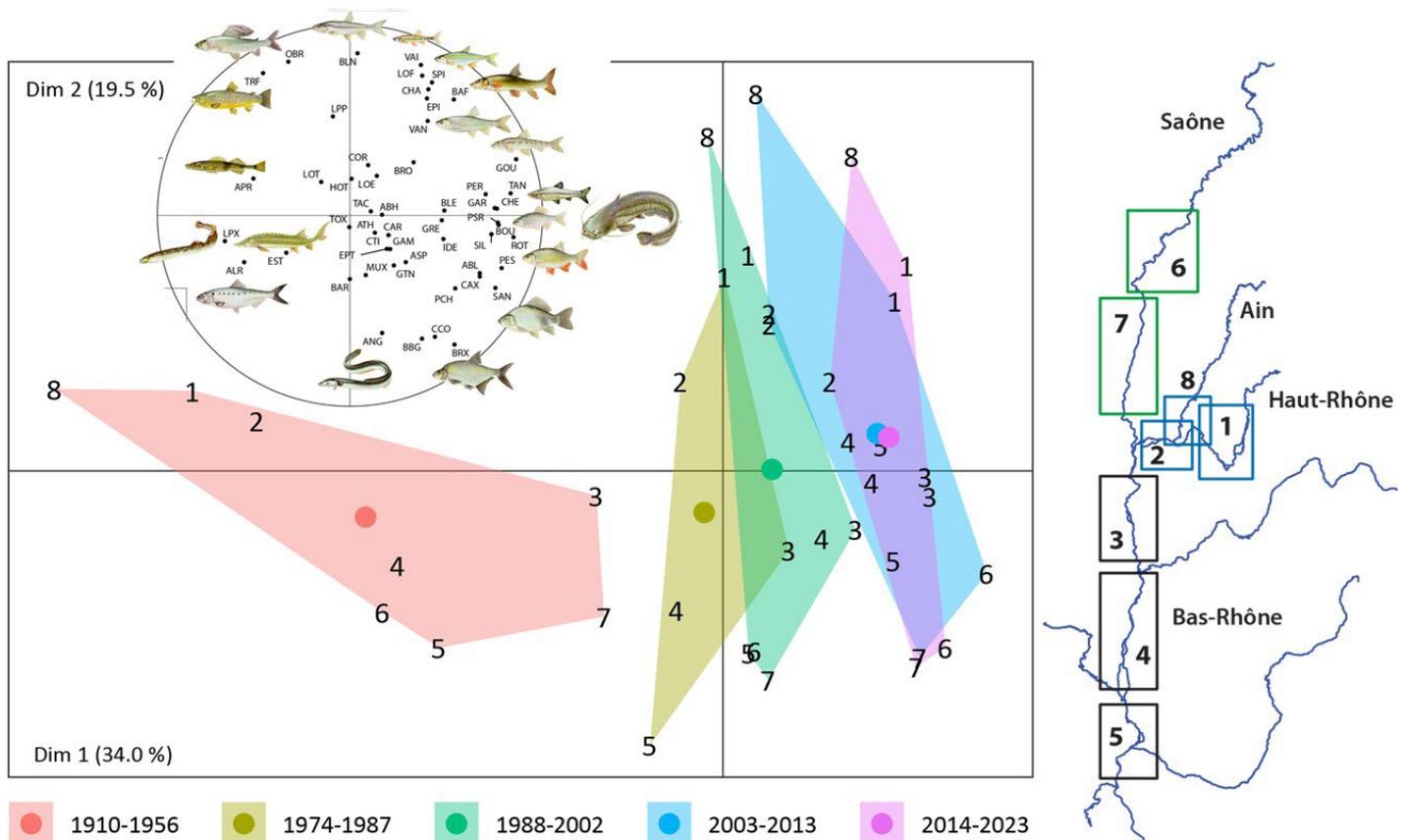


Figure 12. Carte factorielle de l'Analyse en Composantes Principales normée pondérée du tableau historique, construit à partir des données anciennes et publiées sur les cartes piscicoles départementales de L. Léger et de la compilation de données acquises essentiellement par pêche électrique après 1974. Les cinq périodes successives sont visualisées par des polygones colorés et les chiffres donnent la position des secteurs dans cette succession temporelle. Le cercle permet d'interpréter la contribution des espèces à l'évolution historique.

2.4 Exemples illustratifs

L'évolution des abondances relatives des poissons appartenant à la guildes des espèces d'eau courante sur une longue période est une image caractéristique des acquis de la restauration, qui rend compte des changements liés aux augmentations de débits réservés (**Figure 9** pour Pierre-Bénite). Sur le Haut-Rhône, dans le vieux-Rhône de Chautagne, les abondances relatives des ablettes et des barbeaux fluviatiles ont augmenté après le relèvement du débit réservé (**Figure 13**). Cette réponse est observée également dans le vieux-Rhône de Belley avec un effet toutefois plus marqué pour le barbeau fluviatile et secondaire pour la vandoise. L'augmentation de l'abondance relative des barbeaux est également marquée dans le vieux-Rhône de Brégnier-Cordon, où la modification du débit réservé n'a pas été de grande ampleur. Ces résultats suggèrent que d'autres facteurs, comme la restauration des îles ou l'évolution du régime thermique du Rhône, peuvent influencer la dynamique des populations de barbeaux.



Figure 13. Évolution (de 1985 à 2023) de l'abondance relative de trois espèces d'eau courante qui « répondent » positivement aux augmentations de débits réservés dans les vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon. Le trait vertical en pointillé marque la date de modification du débit réservé.

Les bras secondaires courants recréés, nous l'avons vu, abritent rapidement des communautés d'eaux courantes. Complémentaires du chenal pour le hotu, cette fonctionnalité observée sur le Haut-Rhône (**Figure 8**) où les bras lotiques abritent les hotus de taille intermédiaire, l'est également sur le Bas-Rhône à Péage-de-Roussillon (**Figure 14**).

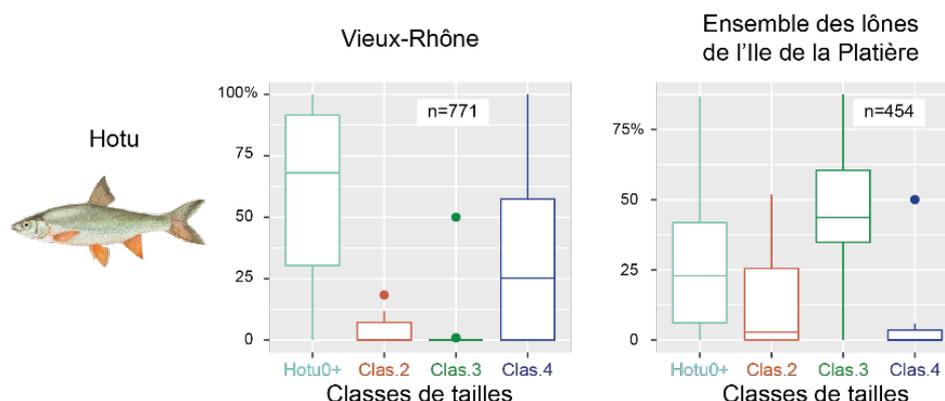


Figure 14. Distribution statistique des abondances relatives annuelles des classes de tailles des hotus dans le vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon et dans les îlots de l'Île de la Platière entre 2007 et 2022. La première classe de tailles correspond aux juvéniles de l'année, la classe 2 rassemble les individus dont la taille est immédiatement supérieure à la taille maximale des juvéniles de l'année et est inférieure à 15 cm, la classe 3 prend en compte les individus dont la taille est comprise entre 15 et 35 cm, la classe 4 regroupe les individus de tailles supérieures à 35 cm.

3. Des modèles prédictifs validés pour accompagner la restauration

Du fait de l'envergure, de la répétition et de l'anticipation des actions mises en œuvre, RhônEco a été une occasion unique de tester la capacité des scientifiques à prédire les effets de la restauration. L'ambition des modèles était d'être générique, c'est-à-dire de s'appliquer le plus largement possible, au-delà du Rhône.

3.1 Des modèles d'habitat hydraulique pour le chenal

Au sein du chenal, les modèles prédictifs sont des modèles d'habitat hydraulique, largement utilisés en France (et ailleurs) pour définir des débits écologiques à l'aval des barrages. Ils se basent sur l'effet des microhabitats hydrauliques (vitesses, hauteurs, forces ponctuelles) sur les variations d'abondance des espèces aquatiques. Ce sont ces paramètres qui ont été modifiés par les augmentations de débits réservés. Ces modèles couplent un modèle hydraulique (qui décrit les vitesses, hauteurs et forces ponctuelles au débit minimal) avec des modèles de réponse biologique à ces variables. Bien des modèles ont été développés avec des données d'autres cours d'eau que le Rhône, et leur transférabilité entre cours d'eau a été démontrée.

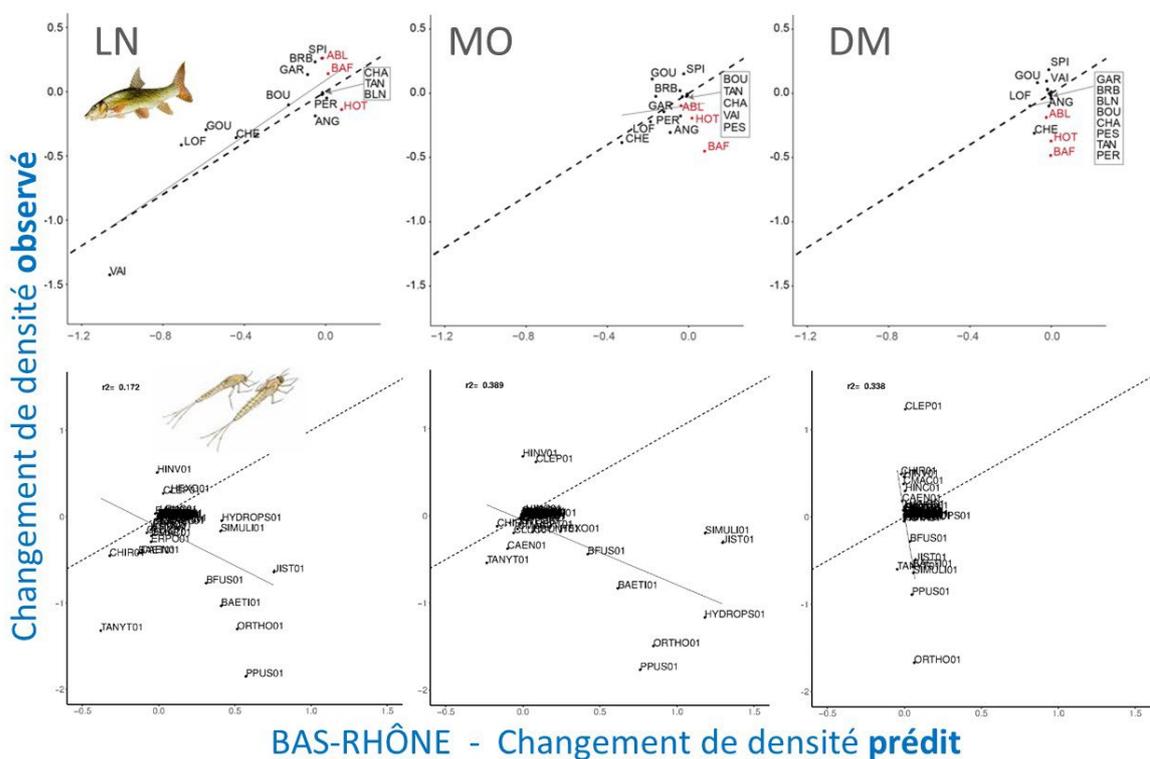
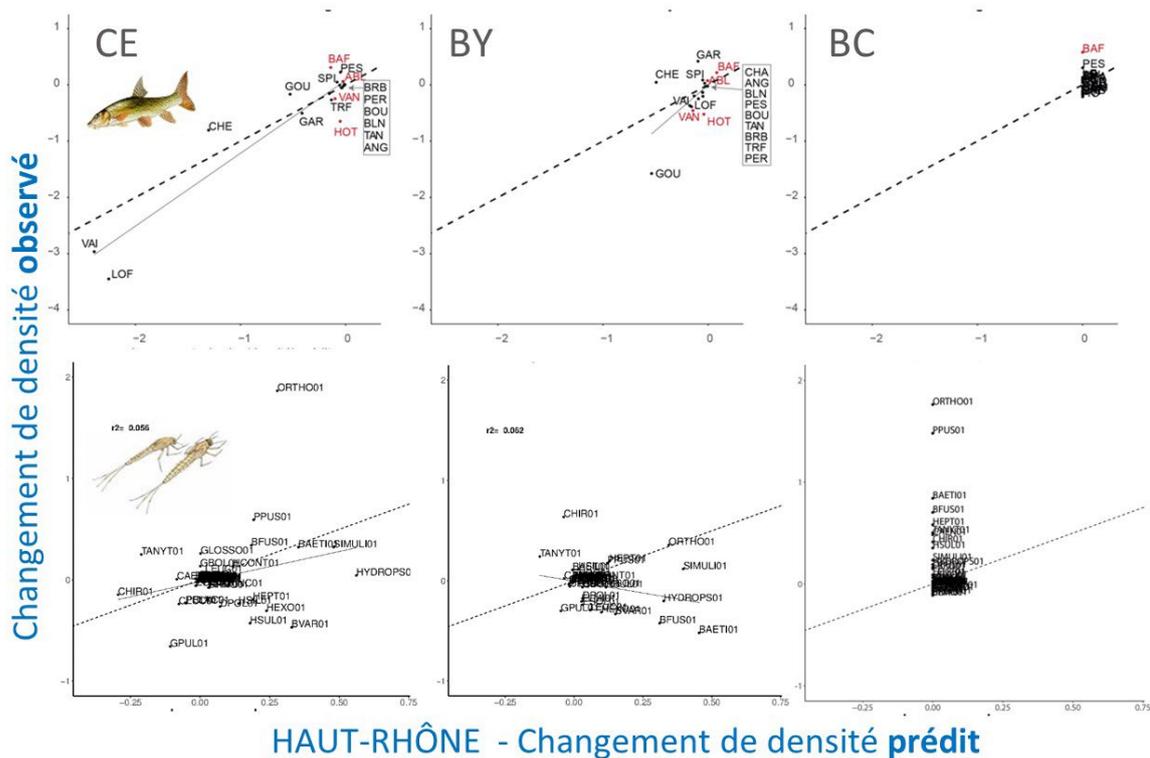


Figure 15. Tests de prédictions de changement de densités de taxons (poissons et invertébrés) sur 3 secteurs du Haut-Rhône et 3 secteurs du Bas-Rhône. Les observations correspondent aux échantillonnages des suivis. Les prédictions proviennent de modèles d’habitat hydrauliques. Les droites de régression (traits pleins) et la droite $y=x$ (pointillés) sont ajoutées. Les modèles utilisés (<https://ecoflows.inrae.fr/software/>) sont une mise à jour des modèles Stathab (pour les poissons) et FSTress (pour les invertébrés), avec les modèles de préférences de Lamouroux *et al.* (1999) et Forcellini *et al.* (2022).

La mise à jour (**Figure 15**) des tests des modèles d'habitat hydraulique pour les poissons et les invertébrés, qui avaient été testés en 2015 sur le Haut-Rhône et Pierre-Bénite (Lamouroux et Olivier, 2015 ; Mérigoux *et al.*, 2015), valide en partie les prédictions des effets de la restauration. Néanmoins, les tests sont bien plus concluants pour les poissons que pour les invertébrés, confirmant l'effet limitant d'autres facteurs pour ces derniers.

Pour les poissons, les réponses observées sont conformes aux prédictions et leur amplitude dépend de l'amplitude des changements hydrauliques. Toutefois, le barbeau répond plus positivement que prévu sur le Haut-Rhône et c'est l'inverse sur le Bas-Rhône. Le hotu et secondairement la vandoise répondent moins positivement que prévu.

Pour les macroinvertébrés, les réponses ne sont pas conformes aux attentes à l'exception des secteurs de Chautagne et Pierre-Bénite. Dans ces deux secteurs à forts changements hydrauliques, les validations sont moins fortes que celles obtenues en 2015, et l'analyse détaillée des réponses des taxons rhéophiles montre que l'augmentation initiale après restauration ne s'est pas toujours prolongée. Sur le Bas-Rhône, on note une baisse générale des densités, en particulier de taxons racleurs/broueteurs (*Baetis*, *Orthocladiinae*) et filtreurs (*Hydropsychidae*, *Simuliidae*) qui suggère l'hypothèse d'un impact significatif des dépôts de fines observés dans ces secteurs, probablement en lien avec la gestion sédimentaire des aménagements hydroélectriques de l'Isère.

3.2 Des modèles basés sur la connectivité pour la plaine alluviale

Au sein de la plaine alluviale, les modèles prédictifs sont basés sur le degré de connectivité des chenaux (fréquences de connexion amont et aval) et sur l'intensité des retours d'eau et du passage des crues (contrainte de cisaillement en crue). Ce sont principalement (mais pas uniquement) ces variables qu'a modifiées la restauration. Elles influencent à la fois les types d'habitat des lônes, les vitesses de sédimentation fine et donc la durée de vie des bras restaurés, et la réponse biologique. Les types de bras et leur durabilité peuvent être prédits *a priori*, ce qui est utilisé pour guider les choix de restauration/ré-intervention afin de diversifier les bras restaurés à l'échelle d'un même secteur.

Le suivi hydro-morpho-sédimentaire des bras a permis de mettre en évidence une large gamme de trajectoires évolutives (**Figure 16**) en termes de vitesse de remplissage par les sédiments fins (fraction < 2mm). (i) Les bras les plus connectés au fleuve, qui possèdent des contraintes hydrauliques fortes et fréquentes et des retours d'eau depuis l'aval nuls à très faibles, sont susceptibles de s'auto-entretenir sur le long terme. (ii) D'autres bras présentent des durées de vie *a priori* relativement forte (> 100 ans), qui s'expliquent par des contraintes hydrauliques intermédiaires à fortes et une sensibilité aux retours d'eau depuis leur extrémité aval variable. (iii) Un autre ensemble de bras présente des durées de vie intermédiaires s'échelonnant environ de 3 à 8 décennies. Ils se caractérisent par des contraintes hydrauliques en fond de lit intermédiaires à faibles et une sensibilité aux reflux intermédiaire à forte. (iv) Enfin, un dernier ensemble de bras est composé de chenaux à durée de vie courte (2 à 3 décennies), s'expliquant par des contraintes hydrauliques très faibles associées à des retours d'eau intenses. La plupart des bras restaurés dans les années 2000 appartenant à ce groupe sont en voie de déconnexion avancée à leur extrémité aval.

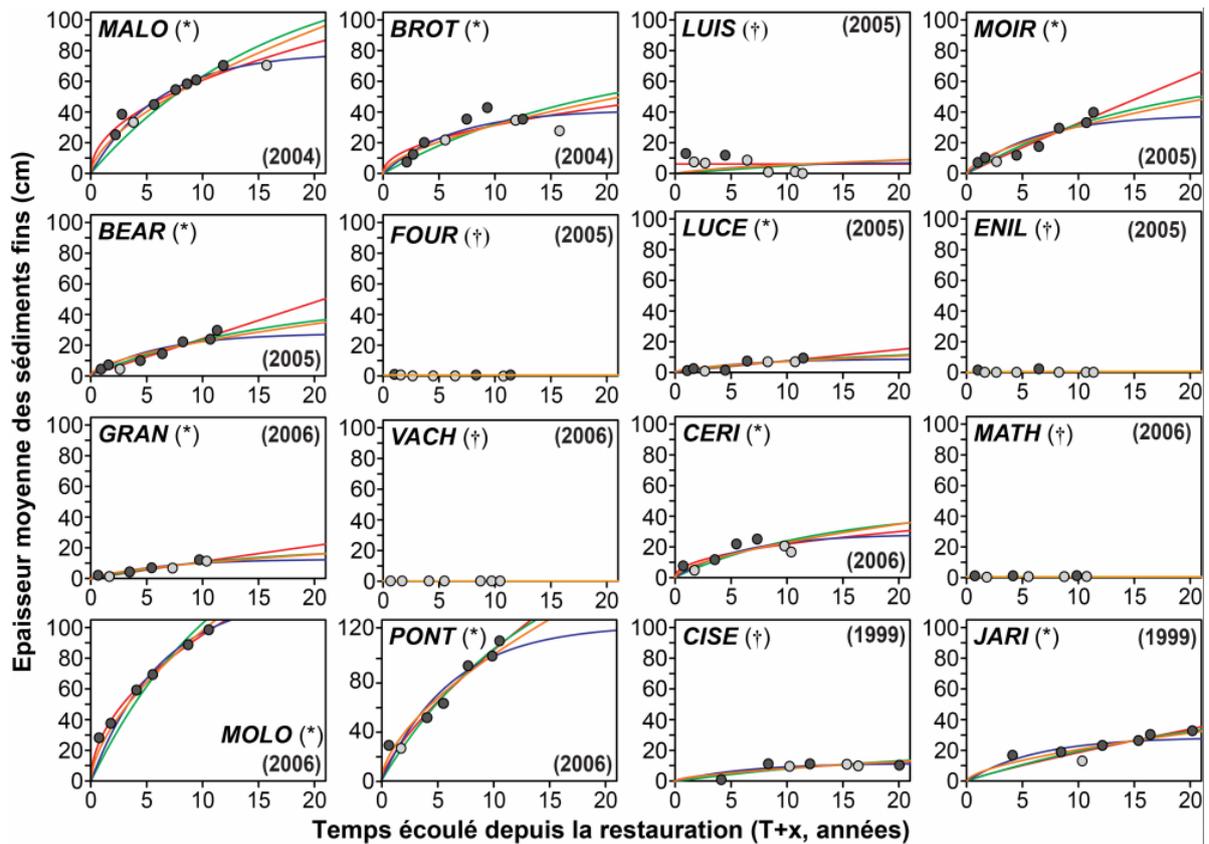


Figure 16. Les vitesses de sédimentation fine sont très variables suivant les types de bras. Elles ont pu être modélisées puis prédites à partir des fréquences de connexion, et de l'intensité de connexion. C'est sur cette base qu'a été estimée la durée de vie des milieux. Ces modèles développés sur le Haut-Rhône et Pierre-Bénite semblent à ce stade transférables sur le Bas-Rhône. Les codes des lônes sont en **Annexe 1**. D'après Riquier *et al.* (2017).

Les modèles de durée de vie des lônes peuvent être prolongés pour prédire les réponses biologiques. En couplant i) des modèles d'évolution de la sédimentation et des durées de connexion dans les bras et ii) des modèles de distributions des espèces de macroinvertébrés pour les fréquences de connexion, Marle *et al.* (2021) ont montré que l'impact des évolutions sédimentaires sur les communautés d'invertébrés pouvait être partiellement prédit (**Figure 17**).

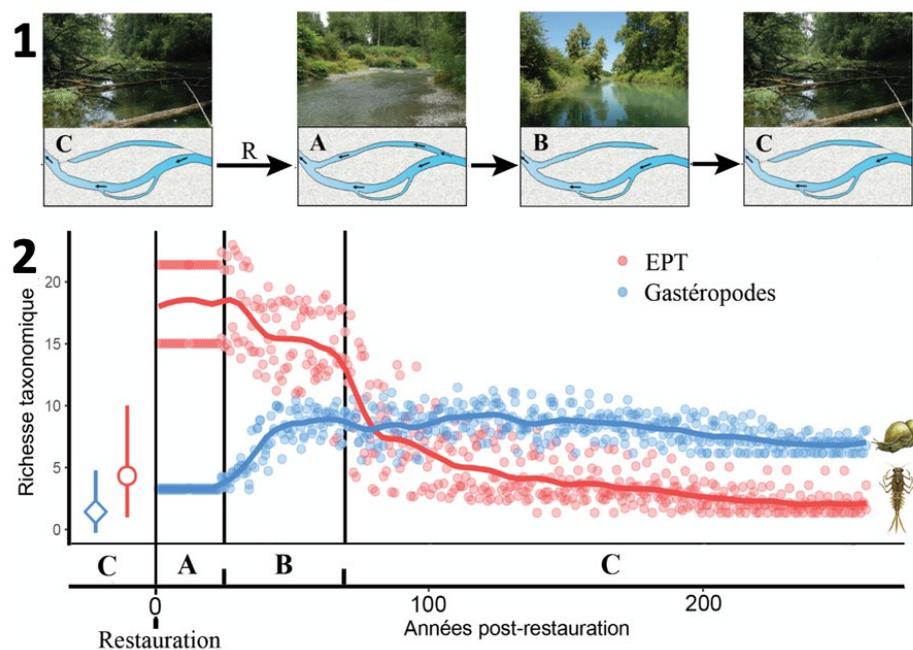


Figure 17. Modélisation des changements temporels de richesse des insectes (groupe des EPT, éphémères, trichoptères et plécoptères) et des gastéropodes dans un chenal latéral après une reconnexion complète avec le cours principal. 1 : A-chenal lotique connecté à l'amont et à l'aval, B-chenal semi-lotique connecté à l'aval, C-chenal lentique isolé en débit bas. 2 : les moyennes des richesses et les écarts min/max des richesses observées avant reconnexion ont été ajoutés pour comparaison. Chaque point représente une valeur de richesse prédite à partir des occurrences de taxons modélisées en fonction des durées de connexion amont et aval du chenal latéral (adapté de Marle *et al.*, 2021).

4. Les limites de la restauration, les facteurs explicatifs

Les réponses conformes aux attentes ne concernent souvent que quelques espèces ou taxons. Pour les poissons du Haut-Rhône, par exemple, les réponses du barbeau et partiellement de l'ablette ne contredisent pas les attentes. En revanche, celles du hotu et parfois de la vandoise peuvent être contraires aux attentes, en particulier dans les chenaux principaux où les occurrences régressent. Sur le Bas-Rhône au contraire, le barbeau n'est pas favorisé comme attendu, et le secteur de Péage-de-Roussillon montre une évolution très atypique pour l'ensemble des communautés vivantes.

Ces résultats suggèrent que divers facteurs environnementaux limitent les réponses observées, dont le programme 2019-2023 a débuté le diagnostic, de façon partielle cependant. Le diagnostic est appuyé par plusieurs angles de vue : (1) les écarts aux modèles prédictifs, (2) les différences entre groupes biologiques/espèces/traits de vie, (3) les différences entre secteurs, (4) l'analyse de la complémentarité lône-chenal, (5) les évolutions temporelles et leurs corrélations avec l'environnement (débits, température, chasses sédimentaires).

Cette partie décrit les facteurs limitants identifiés.

4.1 La dynamique sédimentaire et la durabilité des habitats

Les chenaux latéraux constituent des habitats qui, naturellement, tendent plus ou moins rapidement à se combler et à se déconnecter des branches de rang supérieur du réseau via des dépôts sédimentaires à leurs extrémités, à savoir l'établissement et l'engraissement des bouchons alluviaux (**cf. partie 3.2**). Le maintien de ces unités au sein d'un hydrosystème très anthropisé tel que le Rhône est ainsi dépendant de la réalisation de travaux de restauration réguliers pour compenser l'incapacité du fleuve à créer lui-même de nouveaux bras. Ce contexte dynamique est une des explications de plusieurs réponses biologiques elles-mêmes instationnaires ou complexes.

Les bras lotiques sont moins concernés par la sédimentation fine mais sont également dynamiques et la question de leur durée de vie se pose. L'immense majorité de ces bras vifs se comporte comme des puits sédimentaires : le stockage des alluvions grossières dans le lit des bras est largement prédominant sur l'export des matériaux. Cette accumulation de matériaux entraîne l'exhaussement progressif du lit des bras et leur rétractation par engraissement latéral, dans des proportions variables d'un bras à l'autre. Les vitesses de stockage de sédiments dans les bras vifs s'échelonnent d'environ 80 m³/an à plus de 3 960 m³/an pour les bras possédant les capacités de piégeage les plus élevées. Ces vitesses de remplissage sont essentiellement liées aux contraintes de cisaillement observées en crue dans les bras. Plus les contraintes hydrauliques dans les bras sont élevées, plus le volume de matériaux entrants et les volumes stockés seront importants.

La forte dynamique des bras permet d'interpréter des réponses biologiques elles-mêmes dynamiques. Par exemple, à Brégnier-Cordon, la reconnexion aval des lônes Molottes et Ponton, entraîne après 17 ans un « retour sur elle-même » de la trajectoire de changement des communautés d'invertébrés (**Figure 18**). Cette évolution est associée aux courbes « en cloches » de plusieurs métriques d'abondance et de diversité. Cette évolution assez rapide traduit l'installation de communautés associées aux mouvements d'eau créés par la reconnexion puis leur disparition progressive du fait de la formation du bouchon sédimentaire aval.

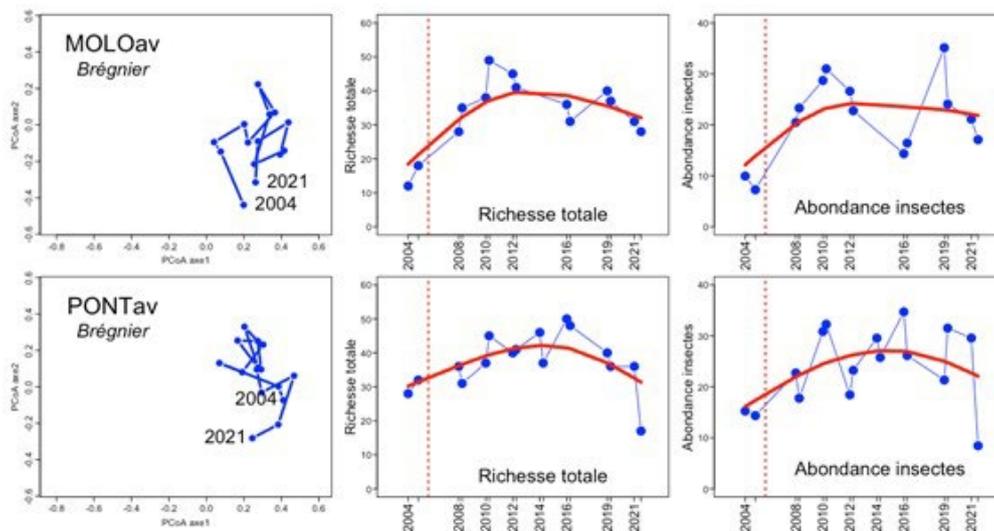


Figure 18. Dans le secteur de Brégner-Cordon, trajectoires de changement faunistique (à gauche) et évolution de la richesse totale et de l'abondance des insectes dans deux lînes restaurées par reconnexion aval (Molottes et Ponton).

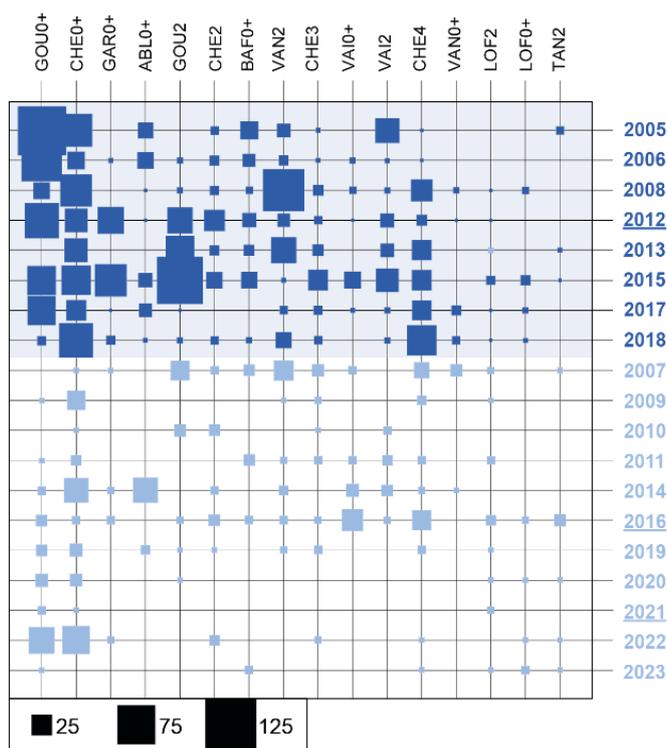


Figure 19. Représentation graphique des effectifs de poissons échantillonnés par classes de tailles (en colonnes) et par année (en lignes) dans l'Anse de Yenne depuis la restauration (période 2005-2023). La surface des rectangles est proportionnelle à la taille des effectifs échantillonnés. Les années soulignées à droite de la grille (2012, 2016 et 2021) correspondent aux évènements d'abaissement partiel de la retenue de Verbois (APAVER).

Un exemple piscicole parmi les bras lotiques est celui de l'Anse de Yenne (**Figure 19**). Les apports de matériaux grossiers lors des crues ont progressivement refermé l'extrémité amont de la lône et l'ont re-transformée en un milieu lentique. Cet effet, particulièrement sensible à partir de 2009-2010, se caractérise par une baisse notable des abondances et du nombre d'espèces, phénomène plus marqué à partir de 2019. La réouverture de bras courants avait recréé des habitats avec une granulométrie plus variée que dans le chenal principal, des profondeurs et des vitesses d'écoulement moindres. Ces habitats convenaient particulièrement aux espèces rhéophiles (ablettes, chevaine, barbeau fluviatile, vandoise, vairon, loche franche et truite).

4.2 La gestion hydro-sédimentaire des ouvrages à l'échelle du bassin (APAVer, chasses)

La gestion hydrosédimentaire du bassin versant semble avoir perturbé les communautés d'invertébrés des vieux Rhône en aval. C'est le cas de l'Abaissement Partiel de l'Aménagement de Verbois (APAVer) de 2012 qui a fait disparaître le gastéropode *Theodoxus fluviatilis*, racleur de diatomées sur substrats grossiers, des vieux-Rhône et des lônes reconnectées du Haut-Rhône (**Figure 20**). Les vidanges des barrages de la basse Isère en 2015 et 2021 ont également affecté la guilda des taxa racleurs/broueteurs. Cette hypothèse est appuyée par les écarts entre les observations de réponses des macro-invertébrés sur différents secteurs du Bas-Rhône et les prédictions par modèles d'habitat (**cf. partie 3.2**). De façon générale, l'augmentation des dépôts de sédiments fins peut altérer la production et l'accès à la nourriture (biofilm).

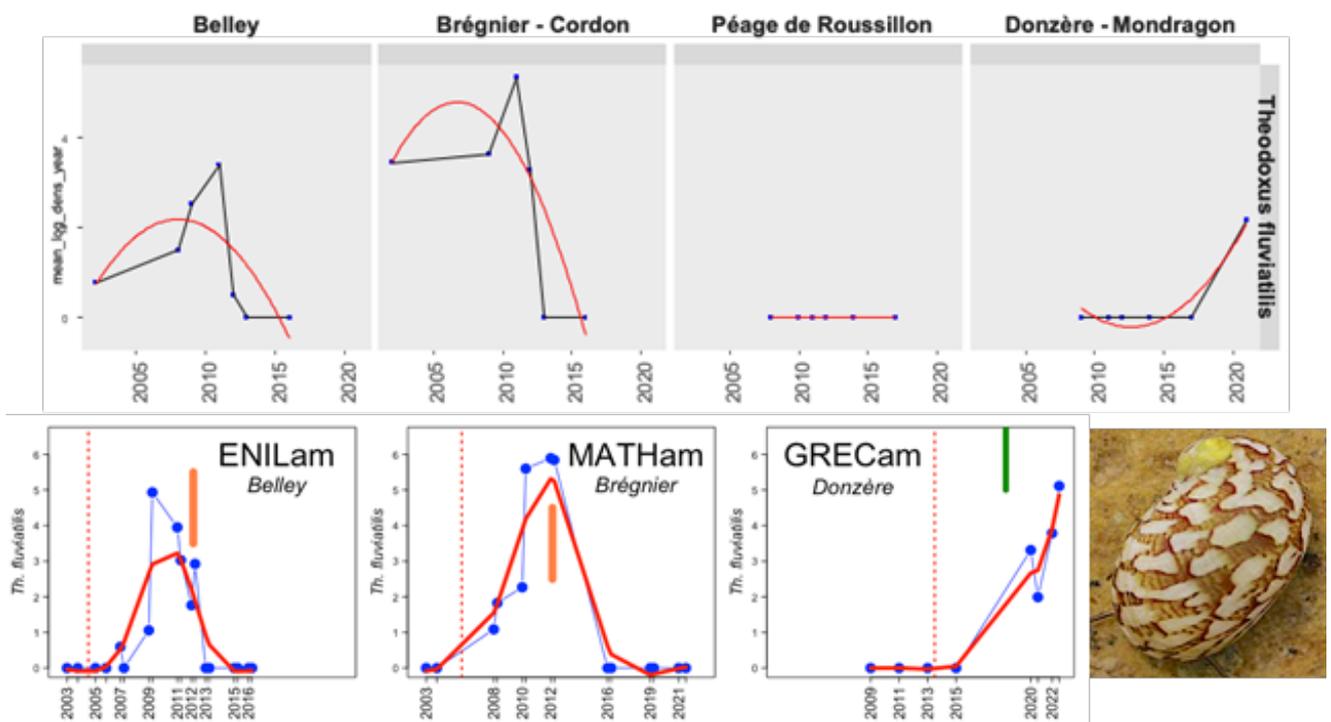


Figure 20. Variations d'abondance du gastéropode *Theodoxus fluviatilis*. En haut : dans quatre vieux-Rhône, en bas : dans trois lônes restaurées par reconnexion complète (En l'île, Mathan et Grange Ecrasée). La ligne tiretée rouge indique le relèvement des débits réservés, la barre orange l'APAVER de 2012 et la barre verte, la restauration de la lône de la Grange Ecrasée.

4.3 La restauration partielle de la complémentarité et la fonctionnalité des lônes

La réhabilitation des habitats caractéristiques des plaines alluviales a pour objectif de remettre à disposition des organismes aquatiques la plupart des habitats nécessaires pour l'accomplissement de leur cycle vital. L'augmentation des débits réservés et la réhabilitation physique de différents types de lônes doit contribuer au renforcement des effectifs et de la résilience des populations aquatiques.

Malgré l'envergure du programme de restauration du Rhône, le nombre de lônes restaurées par secteur reste souvent assez faible si l'on considère les fonctionnalités inhérentes aux différents types de lônes. Par exemple, les lônes de type parapotamonique, dont la fonction de nurserie pour les juvéniles de poissons a été démontrée lors du suivi post-réhabilitation, sont peu nombreuses à l'échelle des trois secteurs du Haut-Rhône (lône du Brotalet, lône des Molottes et lône du Ponton). De même le nombre de bras secondaires courants, réhabilités ou non, est plus important dans les vieux-Rhône de Belley et de Brégnier-Cordon qu'en Chautagne. Le suivi après réouverture de ce type de bras dans les vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon et de Donzère-Mondragon a montré l'efficacité de ces travaux de restauration, notamment pour les poissons de tailles intermédiaires : gardons, ablettes, chevaines, hotus, barbeaux fluviatiles. La quasi-absence de ces bras dans le vieux-Rhône de Chautagne a probablement contribué à l'effondrement des populations de hotus et de vandoises (**Figure 21**), expliquant également les écarts aux modèles prédictifs pour ces espèces (**Figure 15**).

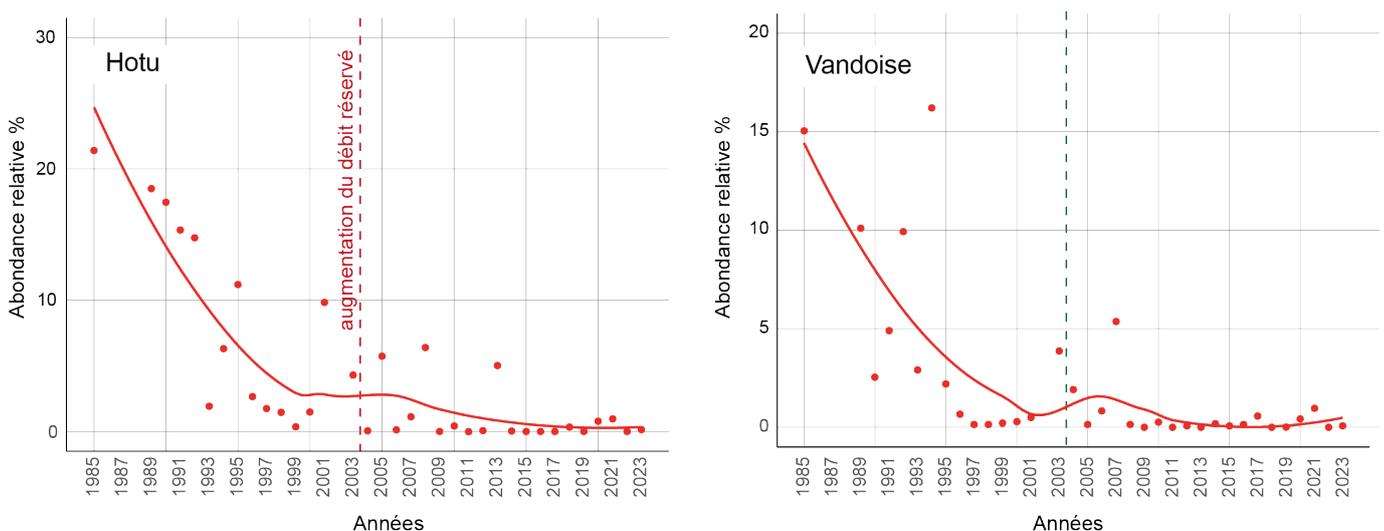


Figure 21. Évolution de l'abondance relative des hotus et des vandoises dans le vieux-Rhône de Chautagne entre 1985 et 2023. Le trait vertical marque la date de l'augmentation du débit réservé.

Cependant, la baisse de l'abondance relative des hotus est également constatée dans les vieux-Rhône de Brégnier-Cordon et de Belley (**Figure 22**), bien qu'elle soit moins marquée que dans le vieux-Rhône de Chautagne. Ce constat suggère que plusieurs causes soient à l'origine de ce déclin. Le hotu, comme la vandoise, est une espèce à reproduction précoce. La température de reproduction pour la vandoise est généralement comprise entre 7 et 12°C, celle du hotu est comprise entre 8 et 14°C. Ces deux espèces ne pondent qu'une fois dans l'année, en début de printemps. Les premiers stades de développement sont très vulnérables et leur sensibilité aux variations de débits dans les vieux-Rhône, notamment lors des surverses, peut conduire à des mortalités importantes et engendrer des problèmes de recrutement au sein des populations. De plus, le hotu est une espèce herbivore qui

exploite la couche de diatomées à la surface des galets. Une dégradation de cette ressource trophique n'est pas à exclure en raison des dépôts sédimentaires fins et des développements d'algues filamenteuses en lien avec l'eutrophisation des vieux-Rhône et la hausse des températures estivales. Ces problématiques n'ont cependant, jusqu'à ce jour, pas été étudiées en détail dans les vieux-Rhône (voir Ovidio et Nzau Matondo (2024) pour une revue sur l'espèce). Pour le barbeau au contraire, une espèce à ponte multiple qui répond positivement à la restauration sur les trois secteurs du Haut-Rhône quel que soit le changement de débit réservé, la complémentarité de la restauration des chenaux et des lônes semble effective. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'analyser de manière holistique les relations entre l'évolution des populations, l'évolution des différents types de bras et de leurs habitats ainsi que de leur connectivité avec les chenaux principaux (Manfrin *et al.*, 2020 ; Stoffels *et al.*, 2022).

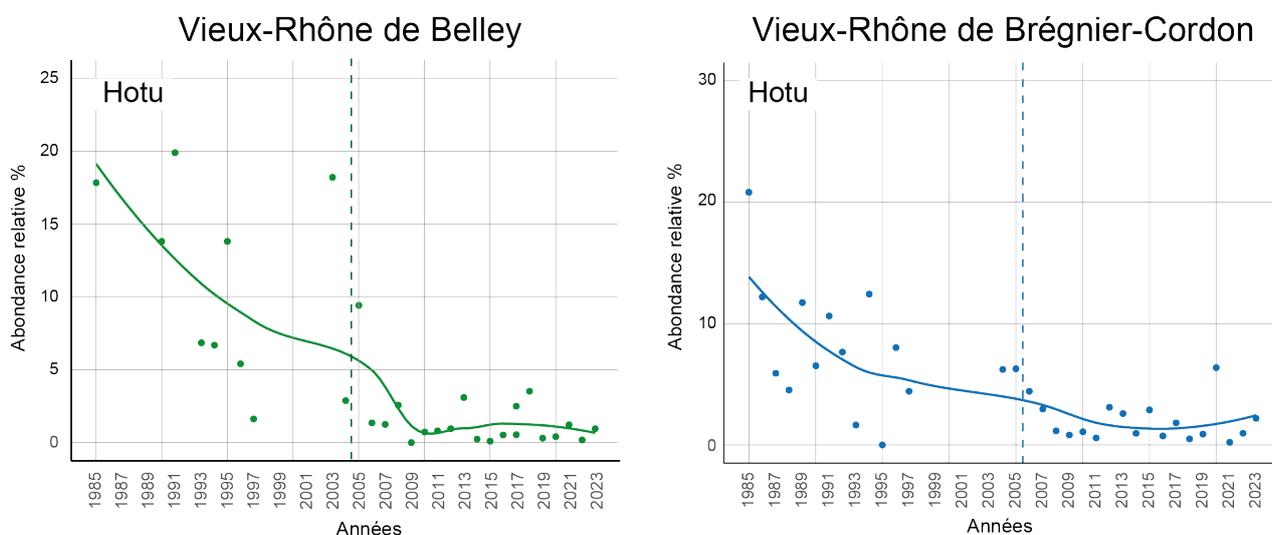


Figure 22. Évolution de l'abondance relative des hotus dans les vieux-Rhône de Belley et de Brégner-Cordon entre 1985 et 2023. Le trait vertical marque la date de l'augmentation du débit réservé.

4.4 Les effets du réchauffement

Les effets du réchauffement sont visibles sur le Rhône et ont déjà été reportés dans la synthèse de 2015. Par exemple, le suivi des températures de l'eau dans les vieux-Rhône, notamment sur le Haut-Rhône, témoigne d'un réchauffement progressif de la température du Rhône depuis 2007 et de manière plus régulière depuis 2015 (Figure 23).

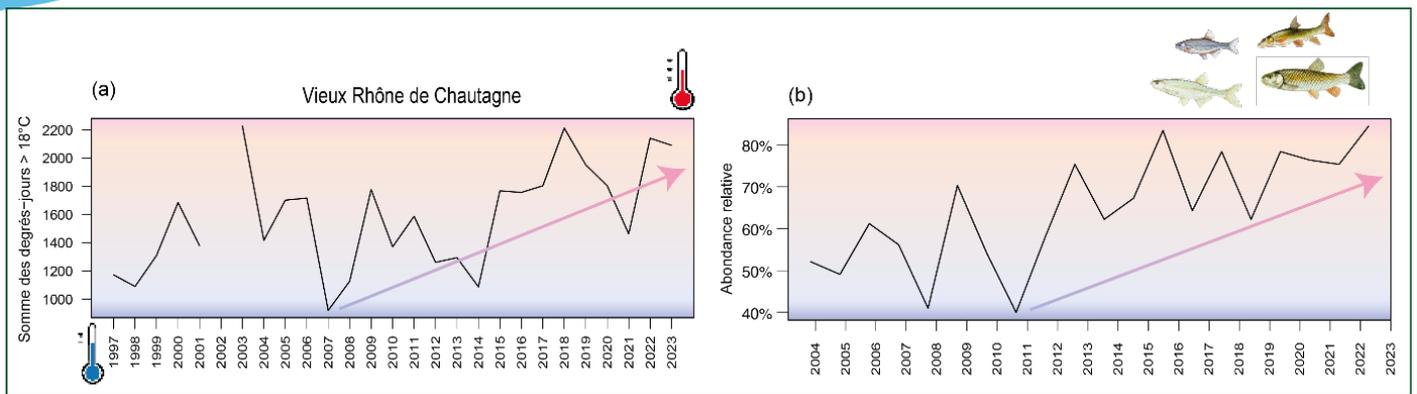


Figure 23. Chroniques des sommes de degrés-jours supérieures à 18°C de 1997 à 2023 pour le vieux Rhône de Chautagne. (b) Abondances relatives annuelles des espèces ayant une affinité forte (tanche, brème commune, brème bordelière, rotengle, poisson-chat et silure) à moyenne (ablette, spirilin, barbeau fluviatile, chevaine, gardon, bouvière et goujon asiatique) pour les températures élevées.

L'augmentation des températures estivales, avec des températures journalières maximales atteignant 25°C, pénalise probablement les deux salmonidés (truite et ombre commun) encore présents dans les vieux-Rhône du Haut-Rhône. Dans ces trois vieux-Rhône, la réponse biologique s'exprime par une augmentation de l'abondance relative des espèces les plus thermophiles de la communauté (ablette, spirilin, barbeau fluviatile, chevaine... ; **Figure 23**). En revanche il est probable que les espèces plus cryophiles comme la vandoise soient pénalisées par ces tendances, expliquant en partie leurs difficultés. Néanmoins, ces effets ne masquent pas la réponse globale des populations aux augmentations de débits réservés, dans la mesure où des espèces comme l'ablette et le barbeau fluviatile, apparemment favorisées par les conditions thermiques, le sont également par les changements liés aux augmentations de débits réservés.

L'évolution atypique du secteur de Péage-de-Roussillon est probablement expliquée par un fort effet du réchauffement climatique combiné au rejet thermique de la centrale nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Saint-Alban, située en rive gauche de la retenue de l'aménagement. Les prédictions des modèles d'habitat y sont clairement contredites. Une progression des poissons tolérants ou thermophiles comme l'ablette, la bouvière, le gardon ou le goujon asiatique est observée, de la même manière que celle des taxons invertébrés exogènes et/ou thermophiles (e.g. *Dreissena rostriformis*, *Chelicorophium robustum*).

Au vu de l'importance des changements thermiques attendus, l'hétérogénéité thermique de la zone alluviale sera une composante fondamentale à mieux prendre en compte pour comprendre et anticiper les changements de diversité biologique. En particulier, les lônes bien alimentées en eau souterraine peuvent constituer des refuges thermiques à préserver. La période 2019-2023 de RhônEco a déjà permis, là où les données sont disponibles (distribution des espèces et séries temporelles de température de l'eau) de construire des modèles de préférence thermique très significatifs pour les invertébrés afin d'anticiper les changements faunistiques et d'identifier les espèces à risques (**Figure 24**).

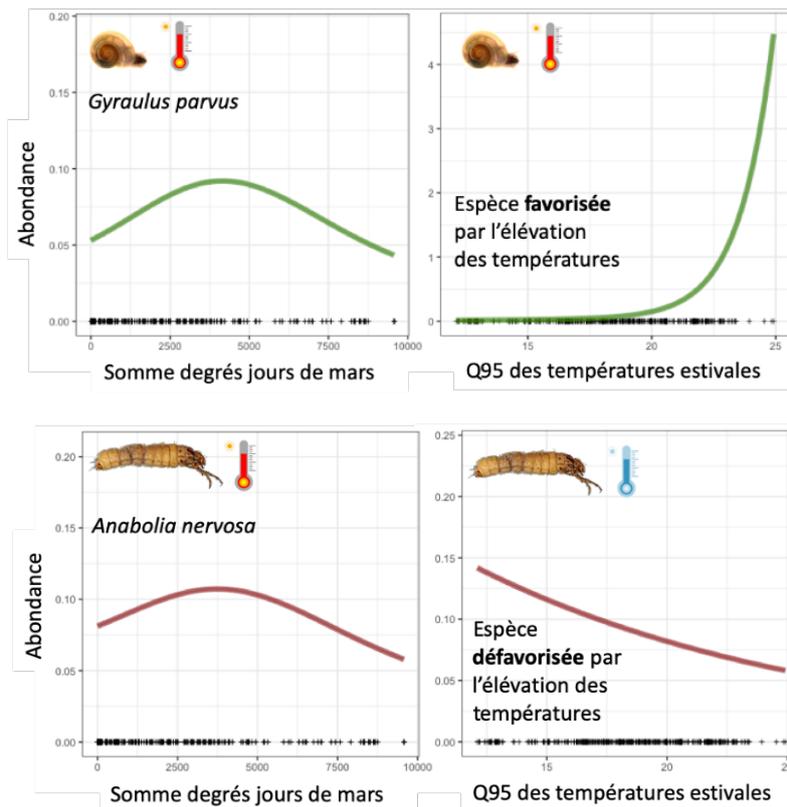


Figure 24. Préférences thermiques modélisées pour le gastéropode *Gyraulus parvus* et le trichoptère *Anabolia nervosa*. (Marle *et al.*, en préparation).

4.5 La dynamique des espèces exogènes

La forte dynamique des taxons exogènes complique l'interprétation des effets de la restauration. Bien que partageant un pool commun, le peuplement en taxons exogènes est différent entre les secteurs du Haut-Rhône, du Rhône-moyen et du Bas-Rhône, notamment par la diversité et la densité en crustacés et en polychètes. La tendance à la hausse de ces taxa est similaire entre plusieurs secteurs (**Figure 25** pour le chenal, **Figure 26** pour les lônes). Tous ces taxons exogènes ne présentent pas pour l'instant de caractère envahissant. Néanmoins, parmi les 32 taxons exogènes recensés dans le cadre du suivi RhônEco, un groupe de 6 taxons suit une dynamique de développement rapide (*J. istri*, *D. villosus*, *H. invalida*, *D. polymorpha*, *C. fluminea*, *P. antipodarum*) et peut potentiellement affecter les communautés indigènes par la compétition pour l'espace, la nourriture ou simplement par prédation. Les fortes densités observées pour le secteur de Péage-de-Roussillon sont probablement liées aux effets cumulés de 1) sa situation géographique, situé à l'aval de la confluence avec la Saône, corridor fluvial pour l'extension dans le territoire français des taxons exogènes d'origine ponto-caspienne qui colonisent le continent européen (Galil *et al.*, 2008) et 2) l'impact thermique du rejet de la centrale nucléaire de Saint-Alban, qui favorise les taxa exogènes, généralement thermophiles.



Figure 25. Evolution interannuelle de la densité en taxa exogènes par secteur, pour les macroinvertébrés du chenal.

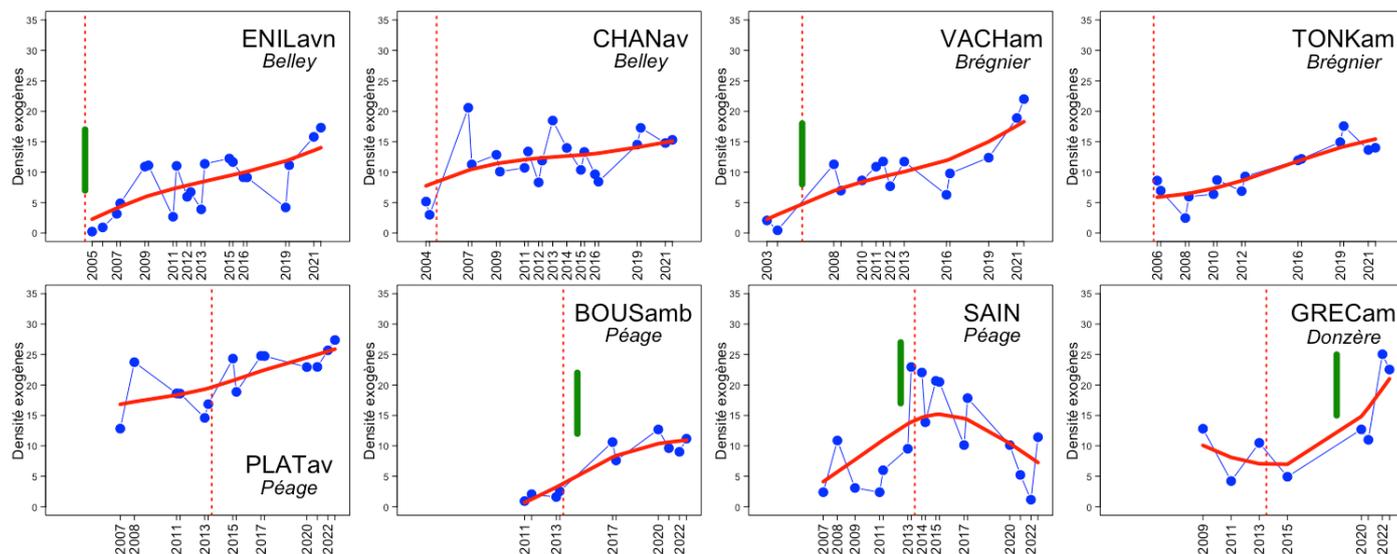


Figure 26. Evolution de la densité de l'ensemble des espèces exogènes dans six îlons restaurés par reconnexion complète (En l'île, Vachon, Grange Ecrasée), reconnexion aval (Boussarde amont, Saintes), augmentation de la fréquence de connexion amont (Platière), ou non restaurées (Chantemerle, Tonkin). Ligne tiretée rouge : élévation des débits réservés dans le secteur. Barre verte : reconnexion de la îlon. Les codes de îlons sont en **Annexe 1**.

Bien que le développement de ces taxons exogènes puisse parfois se produire simultanément avec les opérations de restauration, il ne doit pas nécessairement être associé à celles-ci. En effet, ce phénomène a été observé dans de nombreux grands fleuves européens (van der Velde *et al.*, 2002 ; Bij de Vaate *et al.*, 2022 ; Paunović *et al.*, 2015). Dans les lônes connectées au fleuve (**Figure 26**), le rythme de croissance des exogènes est comparable à ce qui est observé dans les chenaux principaux (**Figure 25**). Les tendances sont également similaires entre lônes restaurées et non restaurées (en particulier dans la lône de Chantemerle connectée au Rhône plein). Des tendances « en cloches » existent (Lône des Saintes) et sont probablement à relier aux phénomènes de comblement aval évoqués plus haut.

4.6 La connectivité longitudinale

Le rétablissement des voies de migration des poissons est l'un des trois objectifs du programme initial de restauration hydraulique et écologique du Rhône. Cinq passes à poissons ont été construites sur les barrages de dérivation (Avignon, Rochemaure, Le Pouzin, Jons et Villebois) et d'autres sont prévues. Néanmoins, la forte fragmentation longitudinale peut rester un frein à la persistance des populations, de poissons en particulier.

Les résultats du suivi de la faune piscicole dans les trois vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon depuis la mise en service des barrages suggèrent un possible effet de la fragmentation du Haut-Rhône. Le déclin progressif des populations de hotus et de vandoises suite à la mise en débit réservé du vieux-Rhône de Chautagne, le fait que leurs effectifs soient restés très faibles après l'augmentation du débit réservé en 2004, témoignent du manque de capacité de reproduction au sein de ces populations. Les grands cyprinidés (barbeau fluviatile par exemple) et les grands leuciscidés (hotu par exemple) sont connus pour effectuer des migrations de reproduction au sein des cours d'eau. Les comptages au niveau de la passe à poissons de Villebois (aménagement de Sault-Brénaz) montrent des remontées importantes de hotus adultes au printemps (période de reproduction). Rétablir la connectivité longitudinale entre les trois vieux-Rhône de Brégnier-Cordon, Belley et Chautagne par l'implantation de passes à poissons pourrait probablement remédier à ce problème.

4.7 Bien d'autres explications à mieux identifier

D'autres facteurs, identifiés ou non, peuvent contribuer à l'explication de la complexité des trajectoires écologiques observées sur le fleuve. Avant tout, rappelons les limites de puissance statistique du suivi malgré l'ampleur des efforts engagés, liées aux difficultés d'échantillonnage d'un grand fleuve. La surface mouillée d'un vieux Rhône échantillonnée dans RhônEco est de l'ordre de 1/1 000^{ème} de la surface totale, et la probabilité d'observer l'abondance d'une population doubler reste de l'ordre de 15% malgré l'ampleur du suivi (Vaudor *et al.*, 2015). Ainsi, les suivis sont nécessairement bruités et la puissance de détection des effets reste limitée. De même, les indicateurs de combinaisons de débit-température les plus pertinents, décrits aux moments clés pour les stades de vie des espèces, restent encore à mieux identifier.

Parmi les facteurs explicatifs possibles, par exemple des réponses limitées pour le barbeau à l'aval de Lyon, il y a la contamination des eaux de surface et des sédiments par les micropolluants. Elle représente une préoccupation majeure pour les agences de l'eau : parmi les 635 produits détectés

entre 2016 et 2018, 608 sont des produits de synthèse parmi lesquels 325 sont des pesticides⁶. Les concentrations d'autres micropolluants comme les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ou les contaminants d'intérêt émergent sont également en hausse sur le linéaire du Rhône avec une augmentation plus marquée en aval de Lyon.

Évaluer les effets toxiques de ces contaminants est une tâche difficile et fastidieuse, que la quantité de milieux différents dans l'hydrosystème rend encore plus conséquente. Ainsi des méthodologies de mesure de bioaccumulation chez des gammares encagés seront mises en œuvre. Les études mettant en évidence des effets de l'exposition aux contaminants sur la biologie des organismes *in situ* sont rares. Les résultats publiés par Devaux *et al.* (2015) ont montré les effets génotoxiques de l'exposition aux cocktails de contaminants présents dans le Rhône dans le secteur de Baix-Le Logis Neuf. Ces effets sont caractérisés par des dommages importants à l'ADN des spermatozoïdes, de faibles taux de survie des œufs et la présence de malformations léthales des larves après éclosion et après résorption du sac vitellin.

4.8 Exemples illustratifs

Les évolutions constatées dans les lînes pas ou peu restaurées témoignent d'une influence multifacteurs sur les réponses biologiques. Elles permettent de mettre en évidence des changements temporels affectant les communautés, et qui se superposent potentiellement aux évolutions décrites dans les lînes restaurées. Des lînes stagnantes très isolées, dans deux secteurs distincts (Vieille Lîne à Brégnier-Cordon et Bayard à Donzère) montrent ainsi des chutes d'abondance très comparables pour deux espèces lénitophiles considérées comme peu exigeantes et généralement abondantes (*Asellus aquaticus*, *Cloeon dipterum*). Dans le cas de la lîne Bayard, ces évolutions s'accompagnent de chute de la richesse totale et de l'abondance des insectes (Figure 27).

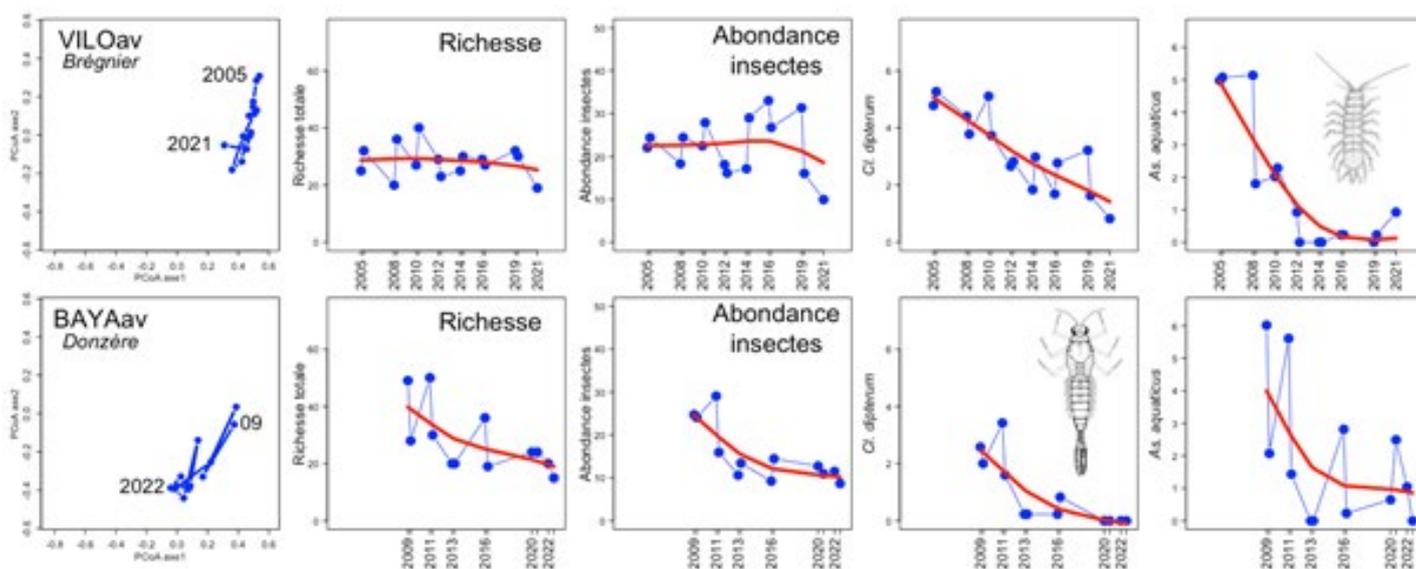


Figure 27. Trajectoires de changement faunistique (à gauche), évolution temporelle de deux métriques (richesse totale et abondance des insectes) et de l'abondance de deux espèces lénitophiles ubiquistes dans deux lînes isolées, stagnantes et non restaurées à Brégnier-Cordon sur le Haut-Rhône (Vieille Lîne) et Donzère sur le Bas-Rhône (Bayard).

⁶ source : https://www.eaurmc.fr/jcms/pro_71559/fr/l-etat-des-eaux-des-bassins-rhone-mediterranee-et-corse-2020

A Péage-de-Roussillon (lône de la Platière), dans un contexte de grande stabilité de la composition moyenne des peuplements de macroinvertébrés et de stabilité de la densité des espèces exogènes, les effectifs de deux espèces abondantes chutent (*Caenis luctuosa*, *Mystacides azurea*), de même que la richesse totale du peuplement et l'abondance des insectes (Figure 28). Ces deux espèces sont peu représentées dans le Rhône court-circuité et y chutent également en réponse au relèvement des débits réservés. Dans la lône, cette tendance commence avant le relèvement et l'absence de changements notables de l'hydraulicité ne parait pas pouvoir l'expliquer.

Ces changements mis en évidence dans des sites peu ou pas modifiés demeurent inexpliqués. Des interprétations sont certainement à rechercher dans l'évolution thermique des milieux et l'interaction de celle-ci avec l'effet de toxiques dans l'environnement. La chute d'effectifs d'espèces communes n'est pas sans évoquer des observations similaires menées dans les écosystèmes terrestres (van Klink *et al.*, 2024), bien que des tendances contrastées aient pu être observées dans les systèmes d'eau douce (van Klink *et al.*, 2020).

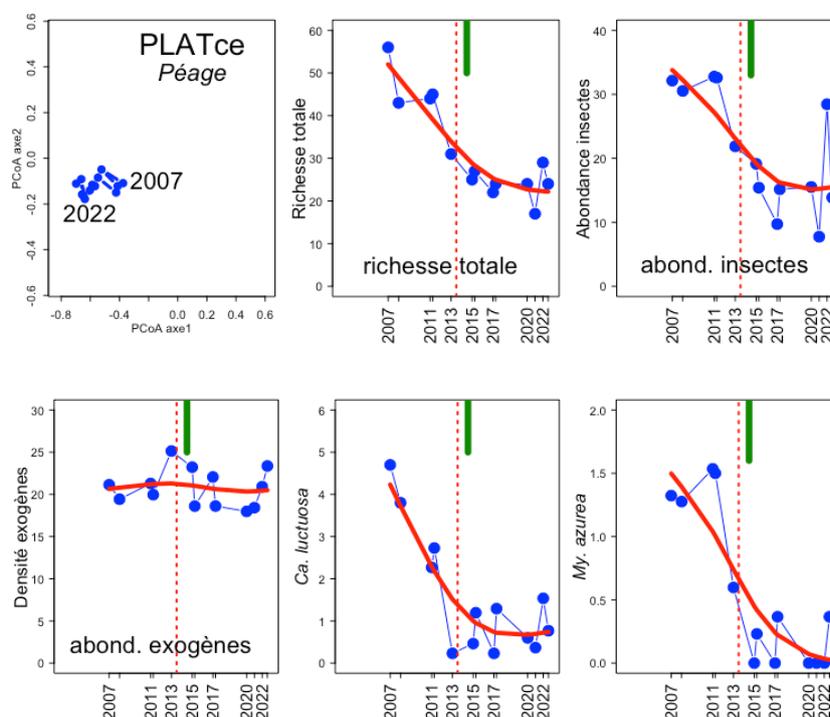


Figure 28. Trajectoires de changement faunistique (à gauche), évolution temporelle de trois métriques (richesse totale, abondance des insectes, densité des exogènes) et de l'abondance de deux espèces (*Caenis luctuosa*, *Mystacides azurea*) dans la lône de la Platière (Péage-de-Roussillon). Ligne tiretée rouge : élévation des débits réservés. Barre verte : abaissement du seuil de connexion amont de la lône.

Les analyses populationnelles, par espèce, comparatives entre secteurs, seront particulièrement utiles pour mieux comprendre les réponses biologiques multi-facteurs. Le prolongement des suivis les rendra de plus en plus puissantes statistiquement. Un exemple de ces réponses multi-facteurs et celui de *Baetis fuscatus*, un éphéméroptère eurytherme emblématique des grands fleuves. Les exigences de cette espèce en matière d'accès à la ressource trophique et d'habitats spécifiques pour sa reproduction en font un bon exemple pour illustrer la complexité des pressions exercées sur la faune benthique.

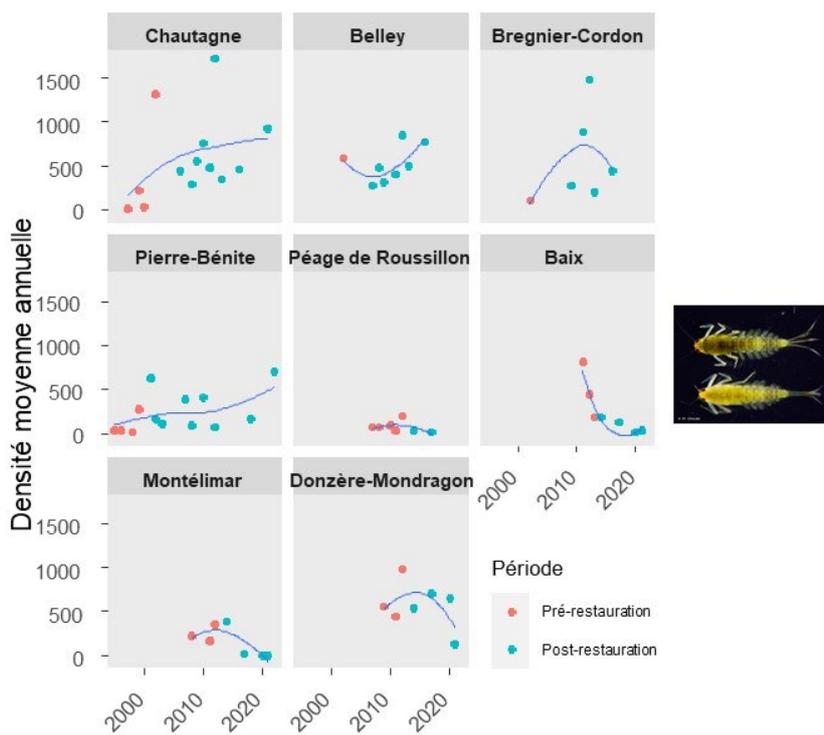


Figure 29. Evolution de la densité de l'espèce *Baetis fuscatus* dans les secteurs étudiés

Baetis fuscatus montre des résultats contrastés entre le Haut-Rhône et le Bas-Rhône (Figure 29). Sa densité a augmenté conformément aux attentes dans le Haut-Rhône et le Rhône-moyen. En revanche, plusieurs facteurs expliquent la dynamique inverse sur les secteurs étudiés du Bas-Rhône : (1) la gestion hydro-sédimentaire de l'Isère (cf. partie 4.2) ; (2) l'altération de la dynamique sédimentaire du chenal : dans certains vieux-Rhône, le réhaussement des débits réservés a entraîné une diminution de la disponibilité des habitats de pontes (substrats émergés) ; et (3) des possibles interactions biotiques : l'augmentation de la densité de taxa exogènes peut également contribuer à la régression de *Baetis fuscatus*. L'impact des espèces exogènes est peu connu, mais il est probable qu'elles augmentent la prédation, la compétition pour l'accès aux ressources et la diffusion de pathogènes.

5. Les enjeux futurs, opérationnels et scientifiques

5.1 Des objectifs instationnaires, à repenser

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône a été conçu à la fin des années 1990 en considérant que la prise en compte de la variabilité temporelle des conditions hydrologiques et thermiques du fleuve était relativement maîtrisée. Les objectifs du programme ont été orientés vers une réhabilitation physique du fleuve incluant des modifications de débits réservés, de travaux de reprofilage des îles et de rétablissement de connexions permanentes avec le chenal principal. Le travail d'analyse de l'évolution post-réhabilitation réalisé dans le cadre de RhônEco mais également de l'OSR a montré : 1) que bien que le fleuve et son fonctionnement physique soient très contraints par les aménagements, des processus d'érosion, de transport et de dépôts sédimentaires étaient observés à l'échelle locale et qu'une dynamique d'évolution des sites restaurés pouvait être caractérisée ; 2) que des dynamiques d'évolution de populations engendrées par la construction des aménagements (digues et barrages) persistaient après restauration ; et 3) qu'une prise en considération de l'impact des procédures de réhabilitation sur les processus physiques, biologiques et écologiques étaient nécessaire pour mieux comprendre la réponse de l'hydrosystème à la restauration. Les résultats obtenus au cours des deux dernières décennies ainsi que les nouvelles mesures de restauration envisagées (démantèlement des ouvrages Girardon, recharges sédimentaires) témoignent de la prise en compte de ces aspects dynamiques dans la manière de concevoir la gestion environnementale du fleuve. Les résultats obtenus dans le cadre de l'analyse de l'évolution morpho-sédimentaire et biologique des bras restaurés devraient initier une réflexion autour de la nécessité de pérenniser des fonctions écologiques au sein des plaines alluviales par des actions visant soit à infléchir les trajectoires post-restauration, soit à diversifier à nouveau les types d'habitats.

De plus, les modifications rapides des conditions hydrologiques et thermiques constatées au cours des dernières années devraient également stimuler des réflexions autour de la recherche de solutions de préservation des zones humides fluviales et des processus qui leur sont associés dans la perspective du dérèglement climatique. Les changements attendus, périodes chaudes durables, eutrophisation, évolutions rapides des bras, dont les conséquences sur le maintien de certaines populations « sensibles » pourraient s'avérer très néfastes, sont difficiles à anticiper. Dans ce contexte, les modèles développés dans RhônEco pourraient fournir des outils pour optimiser une gestion adaptative visant des objectifs repensés de façon collective entre acteurs. Enfin, l'ensemble des retours d'expérience conforte la nécessité de développer une vision d'ensemble du fonctionnement écologique du fleuve, associant la prise en compte d'une diversité et d'une complémentarité d'habitats suffisantes pour assurer le bon déroulement du cycle de vie des espèces ciblées par les objectifs de restauration, et le bon déroulement des processus à la base de la structuration des réseaux trophiques dans ces écosystèmes (Palmer et Ruhi, 2019).

5.2 Enjeux opérationnels

Continuer d'agir sur la diversité des îles, plus que sur l'augmentation des débits réservés

Les augmentations de débit réservés ont été particulièrement efficaces pour retrouver des peuplements d'eau courante dans les vieux-Rhône. Néanmoins, cette efficacité est essentiellement visible pour les poissons et dans les trois secteurs où les changements hydrauliques ont été majeurs

(Le Logis Neuf, Pierre-Bénite, Chautagne), avec un débit minimum initialement très bas que la restauration a multiplié par un facteur entre 5 et 10. Par ailleurs, les réponses non-attendues de certaines espèces de poissons sont en partie expliquées par une diversité insuffisante des habitats de la plaine alluviale. De surcroît, les réponses plus complexes des macroinvertébrés indiquent d'autres facteurs limitants (arrivée d'exogènes, sédiments) que les débits réservés. Enfin, les modèles d'habitat hydraulique suggèrent qu'il faudrait des augmentations de débit peu réalistes pour modifier à nouveau les conditions hydrauliques telles que dans les trois secteurs cités ci-dessus. L'ensemble de ces résultats suggère qu'une nouvelle augmentation des débits réservés ne serait pas le levier le plus efficace pour augmenter la diversité de la plaine alluviale.

Pérenniser la diversité des îles, en utilisant les modèles prédictifs

La complémentarité écologique des habitats du chenal et de la plaine alluviale a été démontrée, avec dans la plaine alluviale des habitats de nurserie, de croissance ou de reproduction complémentaires du chenal. Néanmoins, la diversité des habitats peut rester insuffisante pour certaines espèces, et notamment les habitats uniques offerts par les bras secondaires courants restent rares. Ainsi, il est primordial de garder un objectif de pérennité d'une plaine alluviale diversifiée, qui pourra offrir des refuges thermiques au-delà de la diversité physique des habitats. Les modèles de durée de vie des bras restaurés sont à mobiliser pour viser des interventions efficaces et anticiper les besoins de re-intervention.

Malgré une pression anthropique très forte, le Rhône reste dynamique. Il continue de s'ajuster localement (*e.g.* crues de l'hiver 2023-2024). Ce constat soulève la question de la mise en place de procédures de « gestion adaptative » visant à conserver sur le long terme la fonctionnalité écologique des îles réhabilitées. Il est nécessaire d'anticiper les actions de gestion à réaliser, et de discuter collectivement de la stratégie de maintien des bras à l'échelle de l'hydrosystème : quelles nouvelles restaurations sont à envisager ? Doit-on mettre en œuvre des mesures correctives sur les bras ayant changé de stades de succession ? Lesquelles ? L'ensemble de ces éléments plaident pour la mise en œuvre d'une planification à long terme des actions de gestion à réaliser sur les bras en prenant en compte la durabilité, la diversité des habitats et des fonctionnalités écologiques associées à l'échelle de chaque secteur.

Plus généralement, la perspective « fixiste » de la restauration des bras, où l'on agit essentiellement sur les formes/les habitats en ciblant des processus particuliers (*e.g.* connectivité latérale, verticale) montre ses limites. Il semble difficile de maintenir les bras à un stade donné de la succession, les événements morphogènes pouvant modifier de manière brutale leur trajectoire évolutive. Dans ce contexte, il faut approfondir les réflexions collectives autour des actions potentielles pouvant être menées localement pour redonner au fleuve la possibilité de créer lui-même des bras (*ex.* : favoriser l'érosion latérale et les recoupements naturels de bras, favoriser la formation de bancs). Ceci inclut les projets de démantèlement des digues du XIX^{ème} siècle, aujourd'hui parfois inutiles, qui pourront recréer une diversité de bras et d'habitats et restaurer une diversité granulométrique dans les vieux-Rhône, plus en adéquation avec les exigences des organismes rhéophiles.

Rechercher en particulier des équilibres granulométriques dans les bras secondaires lotiques

En ce qui concerne plus spécifiquement les bras secondaires courants, des avancées notables ont été réalisées dernièrement concernant la compréhension de leur trajectoire évolutive. Leurs modèles de fonctionnement restent en développement, mais permettent d'ores et déjà de prédire la propension des bras vifs à accumuler des matériaux grossiers sur la base des conditions hydrauliques observées en leur sein. Plus les contraintes hydrauliques dans les bras sont élevées, plus le volume de matériaux

entrants est important et de ce fait les volumes stockés. L'ampleur des volumes sédimentaires accumulés en une dizaine d'années dans les bras vifs (de 750 m³ à 60 000 m³ par bras) est également à mettre au regard de la stratégie de redynamisation sédimentaire de certains vieux-Rhône (démantèlement des marges et surtout injection sédimentaire) et de l'évolution des lignes d'eau dans le chenal. En particulier, les dernières opérations d'injection sédimentaire réalisées le long du corridor rhodanien impliquent des volumes réinjectés dans les vieux-Rhône s'échelonnant de 7 850 m³ à 30 000 m³ par opération. Ces résultats questionnent l'inter-compatibilité entre la reconnexion totale de chenaux secondaires au fleuve (habitats relativement rares à l'échelle du fleuve) et les opérations de redynamisation sédimentaire qui tendent à se multiplier et gagner en envergure.

Il est donc à présent primordial de considérer l'ensemble des processus hydrosédimentaires et leurs interactions (remplissage sédimentaire et déconnexion des bras restaurés, transport sédimentaire par charriage, dynamique verticale du lit, atterrissement des bras), en lien avec l'OSR, pour anticiper l'évolution biophysique des bras restaurés et planifier les opérations à venir, qu'elles concernent de nouveaux bras à restaurer ou des actions correctrices sur des bras déjà restaurés.

Favoriser l'hétérogénéité thermique pour la résilience aux changements rapides

La température de l'eau est bien identifiée à la fois comme un facteur limitant des réponses actuelles à la restauration, un paramètre majeur de la distribution spatiale des taxons (**Figure 24**), et un paramètre d'habitat qui va être modifié très rapidement. Dans ce contexte, la caractérisation de l'hétérogénéité thermique au sein de la plaine alluviale est une étape essentielle qui n'est que partiellement débutée. Cette hétérogénéité dépend en particulier de la géomorphologie des chenaux principaux (alternance seuils-mouilles, circulation d'eau souterraine à travers les bancs de galets), de l'intensité des liens entre la nappe d'accompagnement du fleuve et les îles, ainsi que de leur ombrage par la ripisylve. Un enjeu primordial des opérations futures sera de préserver et de restaurer des zones de refuges pendant les périodes au cours desquelles les températures s'élèvent fortement.

Décloisonner le système, en réduisant la fragmentation longitudinale

La construction des barrages hydroélectriques a fragmenté les populations strictement aquatiques. Si la dérive (déplacement des organismes avec le courant) permet de disperser les juvéniles de poissons d'amont en aval, depuis les sites de reproduction vers les sites de croissance, avec une possibilité encore non-clairement identifiée aujourd'hui de franchir les barrages, la remontée des géniteurs est fortement compromise si des dispositifs de franchissements n'existent pas. La robustesse des populations, notamment pour les poissons, dépend du nombre de géniteurs en capacité de se reproduire (taille efficace des populations) et en partie du pool génétique des populations. Une optimisation de la capacité de déplacement des géniteurs entre les sites (vieux-Rhône en particulier) lors des phases de reproduction permet d'assurer un succès de reproduction et de maintenir une diversité génétique dans les tronçons considérés. Le décloisonnement du système fluvial aménagé, et l'évitement de cloisonnement additionnel, constituent donc un moyen supplémentaire d'augmenter les bénéfices liés à la restauration écologique du fleuve.

Limiter les dépôts massifs liés aux chasses sédimentaires, sur l'Isère notamment

En termes de gestion de bassin, les chasses sédimentaires massives seront à mieux anticiper, éviter et réduire, au vu de leurs effets décelables et parfois très importants pour les communautés, sur le Haut-Rhône comme sur le Bas-Rhône où les réponses des invertébrés sont affectées de façon comparable sur plusieurs secteurs.

5.3 Enjeux de connaissance

Description de la thermie (habitats thermiques)

L'évolution future des températures est une source de préoccupation majeure pour la santé des hydrosystèmes (Bellard *et al.*, 2012 ; Ouellet *et al.*, 2020). L'acquisition de données thermiques fiables et précises est une étape indispensable pour : 1) caractériser l'hétérogénéité thermique au sein des plaines alluviales ; 2) analyser et déterminer les impacts potentiels des changements de régimes thermiques ; et 3) identifier les leviers permettant de les limiter (Fullerton *et al.*, 2018). Jusqu'en 2023, la température de l'eau a été enregistrée dans quatre vieux-Rhône : Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Péage-de-Roussillon ainsi que dans un nombre limité de lônes du Haut-Rhône. L'ambition poursuivie dans le cadre RhônEco est d'être en mesure de disposer d'une caractérisation à une échelle plus fine de l'hétérogénéité thermique dans les plaines alluviales. Dans ce cadre, une instrumentation dédiée des sites avec des enregistreurs de température en continu sera réalisée dans la future programmation. Des collaborations renforcées avec CNR et EDF sont envisagées pour optimiser les mesures, et bénéficier des modèles de température du Rhône total sur lesquelles les équipes de RhônEco ne travailleront pas directement.

Caractérisation de la contamination et mesure des effets à l'exposition

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône s'est focalisé sur la réhabilitation de la diversité des habitats dans les plaines alluviales du Rhône. L'analyse de la réponse des organismes à ces actions de réhabilitation s'est concentrée sur la prise en compte des relations habitats-espèces ou connectivité hydrologique – habitats – espèces. Dans un hydrosystème, la présence et l'abondance d'une espèce donnée est conditionnée par le fait que cette espèce ait la capacité de réaliser son cycle de vie afin d'assurer le recrutement au sein des populations. La diversité, la complémentarité et l'accessibilité des différents types d'habitats dans le système fluvial contribue en grande partie à la réussite du maintien ou de la croissance des populations ciblées par la réhabilitation mise en œuvre. Cependant, le succès de reproduction, ou même la survie des individus peuvent être compromis par la présence de contaminants. Les suivis de la qualité de l'eau réalisés par l'Agence de l'Eau RMC montrent que le Rhône véhicule de nombreuses molécules toxiques (*e.g.* pesticides, HAP, métaux lourds, PCBs, PFAS, polluants émergents). La caractérisation de la contamination et la prise en compte des effets toxiques de ces molécules sur les populations ne peuvent être exclues des études sur l'évaluation des effets de la restauration écologique du Rhône.

Analyse de l'évolution de la biodiversité

Les facteurs qui régissent l'abondance et la distribution des espèces sont nombreux et, au-delà des valeurs critiques de certains d'entre eux, le maintien des populations dans un secteur donné dépend aussi de critères conjoncturels, de la bonne synchronie entre des facteurs structurants pour l'accomplissement d'une ou de plusieurs phases clefs du cycle de développement des espèces. Ainsi les réponses des populations ou des communautés aquatiques les plus marquées et les mieux recensées dans le cadre de RhônEco sont celles consécutives à des changements importants de facteurs structurants comme les variables hydrauliques liées au débit ou le rétablissement de la connectivité hydrologique entre les chenaux principaux et les lônes. Néanmoins, la variabilité inter-saisonnière de débits, l'évolution de la température, l'évolution temporelle de la disponibilité et de l'accessibilité des habitats et le poids de l'héritage de l'aménagement du fleuve (endiguement, construction des barrages, urbanisation, industrialisation, agriculture...) peuvent avoir des effets diffus, s'inscrivant sur le long terme et à l'origine de changements profonds au sein des

communautés. L'analyse des effets des opérations de restauration écologique sur le Rhône ne doit pas occulter ce contexte et doit aussi être une opportunité d'alerter sur les changements de trajectoire de l'évolution écologique du fleuve.

Analyses à l'échelle populationnelle

D'abord conduites à l'échelle des communautés, les évaluations des effets de l'augmentation des débits réservés et de la réhabilitation des lônes ont mis en évidence des différences entre les réponses à l'échelle de populations. Ce constat nécessite de prendre en compte les caractéristiques biologiques (traits) et les exigences écologiques des espèces concernées afin de mieux comprendre les différences entre les réponses attendues et celles observées (Roberts, Anderson et Angermeier, 2016).

Analyser plus en détail les dynamiques spatio-temporelles de populations représentatives est un défi, mais sera nécessaire dans une optique de conservation, et pour comprendre les mécanismes biophysiques (*e.g.* barrière à la dispersion, reproduction, réponses physiologiques, interactions biotiques) « clefs », qui en combinaison guident les réponses biologiques.

Caractérisation des processus dans les différents types de lônes

Exceptés les bras secondaires, les lônes sont des zones humides fluviales avec des fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques. Dans le cadre de RhônEco, ce sont essentiellement les fonctions écologiques, étudiées sous l'angle des relations habitats-espèces qui ont été prises en compte. Ces milieux, majoritairement lenticques, sont le siège d'une production importante de matière organique, à la base de certains réseaux trophiques importants (milieux de croissance des jeunes poissons par exemple) mais jouent également un rôle fondamental dans le déroulement du cycle du carbone et des nutriments (en particulier azote et phosphore). Comme dans le cas de la structuration des communautés de macroinvertébrés, il est probable que ces processus se structurent en lien avec la connectivité hydrologique des lônes. Si ces fonctions sont de plus en plus étudiées dans les plaines alluviales du Danube, elles n'ont fait l'objet que de rares investigations sur le Rhône (Rostan *et al.*, 1988). Pourtant, ces processus écosystémiques sont de première importance pour caractériser le fonctionnement écologique du fleuve. De plus, les pronostics liés aux impacts du dérèglement climatique prévoient une augmentation de la sévérité des étiages post-estivaux qui pourraient induire une déconnexion accélérée de certains bras, avec des impacts potentiels sur les processus écosystémiques et donc sur les fonctions écologiques associées à ces annexes fluviales.

Anticiper les besoins futurs en lien avec le dérèglement climatique et l'évolution des usages

Les modèles prédictifs de RhônEco ont déjà contribué à guider les actions de restauration. Toutefois, le contexte de changements climatiques rapides dans lequel la restauration s'inscrit actuellement a été peu considéré jusqu'à présent.

Il sera important de s'emparer des scénarios de changements climatiques établis pour le fleuve (scénarios multi-modèles de débit et de température), en collaboration avec les partenaires gestionnaires, et d'intégrer ces paramètres dans les modèles statistiques prédictifs (*cf. partie 3*) pour disposer de scénarios prospectifs d'évolution biophysique potentielle des milieux restaurés. L'approche permettra d'intégrer des scénarios prospectifs de l'évolution des paramètres physiques d'habitat (*e.g.* conditions hydrauliques, fréquence de connexion, température de l'eau, vitesse d'alluvionnement des bras) et de disposer de projections biologiques (*e.g.* en termes de proportions d'espèces d'eau courantes, mises à jour des modèles de distribution d'espèces, modèles relatifs à la

structure des communautés et à la biodiversité, ou encore des modèles liés au métabolisme et au cycle du carbone qui peuvent devenir très limitants à l'avenir).

La question des scénarios climatiques du Rhône n'est pas une question facile, car les débits et les températures dépendent des conditions climatiques, de la fonte glaciaire, de la gestion des ouvrages suisses et français (hydroélectriques ou nucléaires), de la gestion du lac Léman, et sont affectés par la gestion sub-journalière de l'électricité de pointe dont les effets sont encore mal connus.

6. Vers RhôneEco 2024-2028

En écho aux enjeux décrits dans cette synthèse, la programmation RhôneEco 2024-2028 propose une inflexion scientifique importante du programme, afin d'aller plus loin dans la compréhension et la prédiction des effets (succès ou échecs) de la restauration, tout en poursuivant les suivis en place des communautés de poissons et de macroinvertébrés. Il s'agit de mieux comprendre pourquoi les réponses ne sont pas toujours celles prédites, de les replacer dans un contexte environnemental changeant, mais aussi de s'adapter aux nouvelles formes de restauration, dans le but d'étudier la trajectoire du fonctionnement écologique du fleuve et d'identifier les mesures de restauration qui assurent ce fonctionnement.

Les nouveautés scientifiques ont conduit à une proposition de programmation organisée en 5 axes de recherche interdépendants (**Figure 30**). Les inflexions principales sont :

- une volonté de description « multi-facteurs » des habitats, incluant une description fine de l'identité thermique des sites/secteurs étudiés, des expositions aux toxiques, de la connectivité latérale et longitudinale des habitats. Ces co-facteurs conditionnent les réponses observées (ou non) suite aux actions de restauration. Ils sont d'autant plus importants à prendre en compte qu'ils sont déjà soumis à des changements rapides.
- une volonté d'analyser plus en détail les réponses des populations, dans une optique de conservation, mais surtout pour comprendre les mécanismes biophysiques (*e.g.* barrière à la dispersion, reproduction, réponses physiologiques) « clefs » et les facteurs environnementaux qui guident l'observation ou non des réponses biologiques attendues. Cette étape permettra une identification plus fine des facteurs et de potentiels effets seuils sur lesquels agir en priorité pour maintenir les populations.
- une volonté d'élargir les suivis pour avoir une vision intégrée de la biodiversité, en incluant dans RhôneEco d'autres groupes biologiques (*e.g.* végétation riparienne, communautés microbiennes), parfois au moyen d'une phase « test » de faisabilité (macrophytes aquatiques, groupes d'invertébrés revisités). Ces différents groupes participent à la biodiversité globale, interagissent dans le cadre des réseaux trophiques et in fine, participent aux processus écosystémiques (*e.g.* cycle des biogéochimiques). Ils donnent une vision complémentaire des effets de la restauration.
- une volonté de relier les observations biologiques aux processus écologiques fondamentaux de l'écosystème (*e.g.* productivité, cycle du carbone), dont le maintien et/ou l'optimisation du fonctionnement fait aujourd'hui partie des enjeux de nombreux programmes de restauration.
- une volonté de développer des modèles prédictifs de réponses écologiques à la restauration qui intègrent les scénarios climatiques et ainsi d'imaginer le Rhône futur et être force de propositions pour anticiper les travaux de restauration/modalités de gestion à venir.

Un observatoire pour guider des actions de restauration bénéfiques pour le fleuve Rhône dans un contexte de changement global

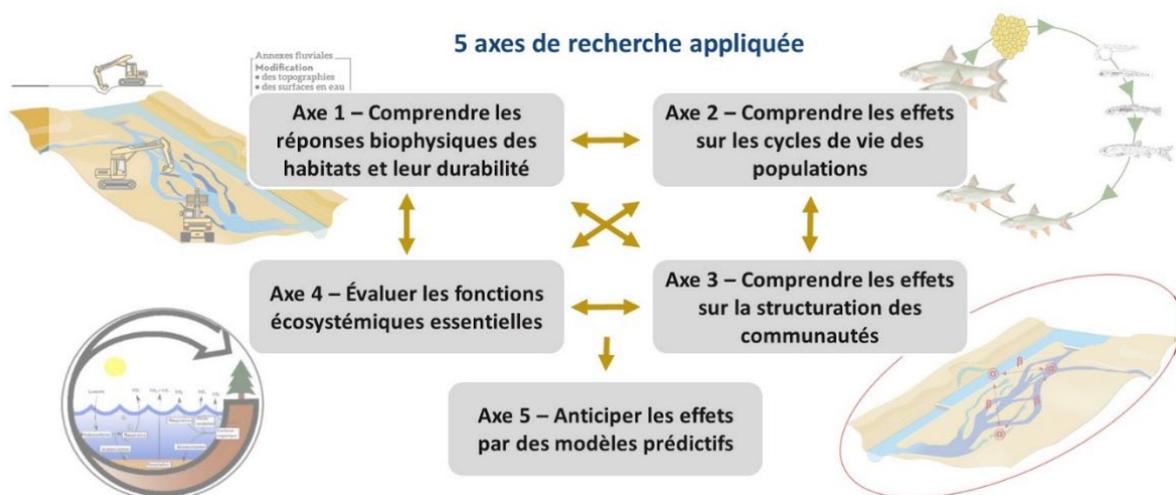


Figure 30. Schéma d’organisation globale du programme RhônEco 2024-2028, porté par une équipe scientifique renouvelée.

7. Références bibliographiques

- Beechie T.J., Sear D.A., Olden J.D., Pess G.R., Buffington J.M., Moir H., Roni P., Pollock M.M. (2010). Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *BioScience* 60 (3): 209-222.
- Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller, W., Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity: Biodiversity and climate change. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.
- Bij de Vaate A., Jazdzewski K., Ketelaars H., Gollasch S., Van der Velde G. (2002). Geographical patterns in range extension of Ponto-Caspian macroinvertebrate species in Europe. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 59. 1159-1174. 10.1139/f02-098
- Bouloy A., Olivier J.-M., Riquier J., Castella E., Marle P., Lamouroux N. (2024). Spatio-temporal dynamics of habitat use by fish in a restored alluvial floodplain over two decades. *Science of The Total Environment*, 906, 167540. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167540 <https://hal.science/RHONECO/hal-04231799v1>
- Devaux A., Bony S., Plenet S., Sagnes P., Segura S., Suaire R., Novak M., Gilles A., Olivier J.M. (2015). Field evidence about reproduction impairment in the fish nase (*Chondrostoma nasus*) through sperm DNA damage. *Aquatic toxicology* 169: 113-122.
- Forcellini M., Plichard L., Dolédec S., Mérigoux S., Olivier J.-M., Cauvy-Fraunié S. and Lamouroux N. (2022). Microhabitat selection by macroinvertebrates: generality among rivers and functional interpretation. *Journal of Ecohydraulics*, 7 28-41. doi.org/10.1080/24705357.2020.1858724
- Friberg N., Angelopoulos N.V., Buijse A.D., Cowx I.G., Kail J., Moe T.F., Moir H., O'Hare M.T., Verdonschot P.F.M., C. Wolter C. (2016). Effective River Restoration in the 21st Century: From Trial and Error to Novel Evidence-Based Approaches. Pp 535-600. In: *Advances in Ecological Research*, Volume 55. Elsevier Ltd. dx.doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.08.010
- Fullerton A.H., Torgersen C.E., Lawler J.J., Steel E.A., Ebersole J.L., Lee S.Y. (2018). Longitudinal thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change. *Aquatic Sciences*, 80, 3 (2018). doi.org/10.1007/s00027-017-0557-9
- Galil B.S., Nehring S., Panov V. (2008). Waterways as invasion highways—Impact of climate change and globalization. In: *Biological invasions*, Chapter 5. Springer Berlin Heidelberg, 193, 59-74.
- Hering D., Aroviita J., Baattrup-Pedersen A., Brabec K., Buijse T., Ecke F., Friberg N., Gielczewski M., Januschke K., Köhler J., Kupilas B., Lorenz A.W., Muhar S., Paillex A., Poppe M., Schmidt T., Schmutz S., Vermaat J., Verdonschot P.F.M., Verdonschot R.C.M., Wolter C. (2015). Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: a field study of 20 European restoration. *Journal of Applied Ecology* 52: 1518-1527. doi:10.1111/1365-2664.12531
- Lamouroux N., Capra H., Pouilly M., Souchon Y. (1999). Fish habitat preferences at the local scale in large streams of southern France. *Freshwater Biology*, 42, 673-687.
- Lamouroux N., Gore J.A., Lepori F., Statzner B. (2015). The ecological restoration of large rivers needs science-based, predictive tools meeting public expectations: an overview of the Rhône project. *Freshwater Biology*, 60, 1069-1084. <https://hal.science/RHONECO/hal-02152578v1>
- Lamouroux N., Olivier J.-M. (2015). Testing predictions of changes in fish abundance and community structure after flow restoration in four reaches of a large river (French Rhône). *Freshwater Biology*, 60, 1118-1130. <https://hal.science/RHONECO/hal-01328462v1>

- Manfrin A., Bunzel-Drüke M., Lorenz A.W., Maire A., Scharf M., Zimball O., Stoll S. (2020). The effect of lateral connectedness on the taxonomic and functional structure of fish communities in a lowland river floodplain. *Science of the Total Environment*, 719 (2020) 137169.
- Marle P., Riquier J., Timoner P., Mayor H., Slaveykova V.I., Castella E. (2021). The interplay of flow processes shapes aquatic invertebrate successions in floodplain channels - A modelling approach applied to restoration scenarios. *Science of the Total Environment* 750 (1): 142081. <https://hal.science/RHONECO/hal-02931379v1>
- Mérigoux S., Forcellini M., Dessaix J., Fruget J.-F., Lamouroux N., Statzner B. (2015). Testing predictions of changes in benthic invertebrate abundance and community structure after flow restoration in a large river (French Rhône). *Freshwater Biology*, 60, 1104-1117 <https://hal.science/RHONECO/hal-02152585v1>
- Ouellet V., St-Hilaire A., Dugdale S.J., Hannah D.M., Stefan Krause S., Proulx-Ouellet S. (2020). River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of the Total Environment* 736, 139679. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679
- Ovidio, M.; Nzau Matondo, B. (2024). Ecology and Sustainable Conservation of the Nase *Chondrostoma nasus*: A Literature Review. *Sustainability* 16, 6007. doi.org/10.3390/su16146007
- Palmer M.A., Menninger H.L., Bernhardt E. (2010). River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? *Freshwater Biology* (2010), 55 (Suppl. 1): 205–222. doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02372.x
- Palmer M.A., Ruhi A. (2019). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science* 365, 1264. dx.doi.org/10.1126/science.aaw2087
- Paunović M., Csányi B., Stanković I., Graf W., Leitner P., Bammer V., Huber T., József Szekeres J., Borza P. (2015). Invasive species. Chapter 10, pp 140-148 *In Joint Danube Survey 3. A Comprehensive Analysis of Danube Water Quality*. I. Liška, F. Wagner, M. Sengl, K. Deutsch, J. Slobodník (Editors). Published by: ICPDR – International Commission for the Protection of the Danube River.
- Riquier J., Piégay H., Sulc Michalkova M. (2015). Hydromorphological conditions in eighteen restored floodplain channels of a large river: linking patterns to processes. *Freshwater Biology*, 60: 1085-1103. <https://hal.science/RHONECO/hal-01223357v1>
- Riquier J., Piégay H., Lamouroux N., Vaudor L. (2017). Are restored side channels sustainable aquatic habitat features? Predicting the potential persistence of side channels as aquatic habitats based on their fine sedimentation dynamics. *Geomorphology*, Vol. 295, 507-528. <https://hal.science/RHONECO/hal-01575564v1>
- Roberts J.H., Anderson G.B., Angermeier (2016). A Long-Term Study of Ecological Impacts of River Channelization on the Population of an Endangered Fish: Lessons Learned for Assessment and Restoration. *Water* 2016, 8, 240; doi:10.3390/w8060240
- Rogosch J.S., Boehm H.I., Tingley III R.W., Wright K.D., Webb E.B., Paukert C.P. (2024). Evaluating effectiveness of restoration to address current stressors to riverine fish. *Freshwater Biology* Vol. 69 Issue 5: 607-622. DOI: 10.1111/fwb.14232
- Rostan J.C., Amoros C., Juget J. (1987). The organic content of the surficial sediment: a method for the study of ecosystems development in abandoned river channels. *Hydrobiologia* 148: 45-62.
- Stoffels R.J., Humphries P., Bond N.R., Price A.E. (2022). Fragmentation of lateral connectivity and fish population dynamics in large rivers. *Fish and Fisheries* 23: 680–696. DOI: 10.1111/faf.12641

- van der Velde G., Nagelkerken I., Rajagopal S., Bij de Vaate A. (2002). Invasions by Alien Species in Inland Freshwater Bodies in Western Europe: The Rhine Delta. In: *Invasive aquatic species of Europe – distributions, impacts and management* (pp.360-372), Kluwer Academic PublishersEditors: Leppäkoski E, Gollasch S, Olenin S. DOI:10.1007/978-94-015-9956-6_37
- van Klink R., Bowler D.E., Gongalsky K.B., Swengel A.B., Gentile A., Chase J.M. (2020). Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science* 368: 417–420.
- van Klink R., Bowler D.E., Gongalsky K.B., Shen M., Swengel A.B., Chase J.M. (2024). Disproportionate declines of formerly abundant species underlie insect loss. *Nature*. 628: 359-364.
- Vaudor L., Lamouroux N., Olivier J.-M., Forcellini M. (2015). How sampling influences the statistical power to detect changes in abundance: an application to river restoration. *Freshwater Biology*, 60, 1192-1207. <https://hal.science/RHONECO/hal-01328509v1>

8. Annexes

Annexe 1 : les 32 lônes restaurées considérées

Secteur	Lône (CODE)	Type de restauration				Type de connexion	
		Recreu- sement	Ouvert. amont	Ouvert. aval	Travaux particuliers	Avant	Après
Chautagne	Malourdie (MALO)	X		X		Aucune	Aval
	Brotalet (BROT)	X				Aval	Aval
Belley	Luisettes (LUIS)	X				Aval	Aval
	Moiroud (MOIR)	X				Aval	Aval
	Béard (BEAR)	X		X		Aucune	Aval
	Fournier (FOUR)	X				Aval	Aval
	Yenne_en l'Île (ENIL)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Lucey (LUCE)				Abaissement du passage à gué	Amont- aval	Amont- aval
Brégnier- Cordon	Chantemerle (CHAN)	X				Amont- aval	Amont- aval
	Granges (GRAN)	X		X		Aucune	Aval
	Vachon (VACH)	X	X			Aval	Amont- aval
	Cerisiers (CERI)	X			Dragage localisé	Amont- aval	Amont- aval
	Molottes (MOLO)	X		X		Aucune	Aval
	Mattant (MATH)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Ponton (PONT)	X		X		Aucune	Aval
Pierre- Bénite	Table Ronde (TABL)	X		X		Aucune	Aval
	Ciselande (CISE)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Jaricot (JARI)	X		X		Aucune	Aval
Péage-de- Roussillon	Platière (PLAT)				Abaissement de la digue rive gauche du vieux-Rhône, démantèlement du casier amont	Aval	Aval
	Noyé Nord (NONO)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Noyé Sud (NOSU)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Ilon (ILON)	X			Creusement de marres en amont de la lône	Aval	Aval
	Boussarde (BOUS)	X	X		Démantèlement de casiers Girardon	Aval	Amont- aval
	Sainte (SAIN)	X		X		Aucune	Aval
Baix-Le Logis Neuf	Géronton (GERO)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
Montélimar	Roussette (ROUS)	X				Aval	Aval
Donzère- Mondragon	Grange écrasée (GREC)	X	X	X	Reconfiguration de la connexion aval	Aval	Amont- aval
	Lône Malaubert & Surelle (MALA)				Démantèlement casiers Girardon amont, abaissement du niveau de connexion	Aval	Aval
	Dames (DAME)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Dion (DION)				Démantèlement casiers Girardon coté vieux-Rhône	Amont- aval	Amont- aval
	Banc Rouge (BARO)	X	X	X		Aucune	Amont- aval
	Désirade (DESI)	A venir	A venir	A venir		Aucune	

Annexe 2 : remerciements

A tous les contributeurs, permanents et occasionnels, scientifiques et partenaires opérationnels ...

Dans les lônes



Dans les chenaux



A ceux qui partent en retraite méritée ... ici aux sources (suisses) du Rhône ...

Georges Carrel (avec Louis Roux)



Emmanuel Castella (avec Georges Carrel)



Jean-Michel Olivier (avec Nicolas Lamouroux)

Aux partenaires et au groupe de scientifiques renouvelé qui permettront d'aller plus loin ...

RHÔN ECO

Suivi scientifique
de la restauration
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

