



**HAL**  
open science

## **RHONECO : Suivi scientifique du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône. Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve. Synthèse (2014)**

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Olga Béguin, Anne-Laure Besacier-Monbertrand, Emmanuel Castella, Sylvain Dolédec, Maxence Forcellini, Dorothea Hug Peter, Hélène Mayor-Siméant, David Mccrae, et al.

### ► To cite this version:

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Olga Béguin, Anne-Laure Besacier-Monbertrand, Emmanuel Castella, et al.. RHONECO : Suivi scientifique du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône. Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve. Synthèse (2014). [Rapport de recherche] Irstea; LEHNA - UMR CNRS 5023; EVS - UMR 5600; UR MALY, Irstea; Université de Genève, Faculté des Sciences, Institut des Sciences de l'Environnement. 2014, pp.31. hal-02606651v1

**HAL Id: hal-02606651**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02606651v1>**

Submitted on 16 May 2020 (v1), last revised 24 Apr 2024 (v2)

**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 du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône

Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve

Synthèse  
(2014)



# Sommaire

<b>1 Introduction – Originalité internationale de la restauration du Rhône</b>	6
<b>2 La restauration hydraulique et écologique du Rhône</b>	6
<b>3 Suivi scientifique des sites restaurés et évaluation des effets de la restauration</b>	10
<b>4 Synthèse des résultats et pérennité des actions</b>	10
4.1 Effets des modifications de débits réservés dans les chenaux principaux	11
4.2 Restauration des lônes et diversité de la plaine alluviale	14
<i>Quatre types de patrons sédimentaires dans les lônes restaurées, stables dans le temps</i>	14
<i>Vers une gestion quantitative des sédiments et des habitats dans les lônes</i>	15
<i>La restauration des lônes a favorisé une plus grande diversité des peuplements de macroinvertébrés benthiques à l'échelle de la plaine alluviale</i>	18
<i>Restauration et diversité des types de lônes</i>	22
4.3 Les traits biologiques pour apporter une interprétation plus fonctionnelle de la restauration des grands cours d'eau.	22
<b>5 Leçons générales pour les restaurations futures</b>	24
5.1 Validation de l'approche prédictive	24
5.2 Optimisation des suivis de restauration	25
5.3 Définition des attendus de restauration et lien avec l'approche prédictive, identification de "pistes" d'actions pour aider à l'atteinte des objectifs	26
<b>6 Conclusion et poursuite du programme</b>	28

Ont contribué à la rédaction de ce rapport :

Jean-Michel Olivier, Sylvain Dolédec, Sylvie Méricoux, UMR CNRS 5023 Lyon

Nicolas Lamouroux, Maxence Forcellini, Irstea Lyon

Hervé Piégay, Jérémie Riquier, Lise Vaudor, UMR CNRS 5600 Lyon

Emmanuel Castella, Olga Béguin, Anne-Laure Besacier-Monbertrand, Dorothea Hug Peter, Hélène Mayor, David McCrae, Amael Paillex., Institut F.A. Forel & Institut des Sciences de l'Environnement, Section des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Genève.

Coordination générale : J.M. Olivier & N. Lamouroux

## Résumé

### *Contexte*

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône est un programme destiné à améliorer la qualité écologique du Rhône en augmentant les débits minimums dans les vieux-Rhône et en réhabilitant les annexes fluviales. Initialement 8 secteurs prioritaires avaient été identifiés en raison de leur fort potentiel écologique, mais depuis la mise en application de la loi sur l'eau (LEMA, 2006) au 1<sup>er</sup> janvier 2014 les débits minimums ont été relevés partout où ils étaient inférieurs au 1/20<sup>ème</sup> du module inter-annuel. Dans certains cas, les débits minimums ont été multipliés par un facteur 10 (ex : à Pierre-Bénite) induisant une multiplication des vitesses de courant moyennes par un facteur 5. Les 9 secteurs où les potentialités écologiques ont été identifiées comme importantes représentent environ 110 km de cours d'eau (vieux-Rhône de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Miribel, Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon, Baix-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère-Mondragon). Ces augmentations de débit minimum se traduisent dans les vieux-Rhône par des modifications de paramètres physiques importants pour les organismes aquatiques : largeurs mouillées, profondeurs, vitesses d'écoulement, contraintes au fond... Parallèlement, certaines annexes fluviales (lônes) ont été réhabilitées dans le but de promouvoir une plus grande diversité d'habitats au sein de la plaine alluviale du Rhône et de favoriser les espèces caractéristiques de ces milieux. Vingt et une lônes ont été réhabilitées dans les secteurs de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon, 3 à Pierre-Bénite, 1 à Montélimar et un chantier de réhabilitation de 6 lônes a été ouvert à Péage-de-Roussillon depuis 2011. Les objectifs du projet de réhabilitation des lônes de Donzère-Mondragon sont en cours de définition. Parmi les 27 lônes dont la restauration est achevée fin 2013, 12 ne possédaient aucune connexion avec le chenal courant, 12 étaient connectées par l'aval et 4 étaient connectées à l'amont et à l'aval. La restauration a modifié les connexions pour 14 d'entre elles. Après restauration, 1 seule lône (Béard) reste déconnectée du chenal principal, 15 sont connectées par l'aval et 11 par l'amont et par l'aval. Les travaux de génie civil (recreusement, dragage) ont réhabilité, au moins en partie, l'alimentation en eau souterraine de 12 des 27 lônes restaurées. La réhabilitation des lônes a multiplié la longueur des lônes en eau par 1.5 et la surface mouillée par 1.2.

### *Évaluation des effets de la restauration*

#### *Réponses aux augmentations de débits réservés.*

L'approche retenue pour détecter et évaluer les effets des augmentations de débits réservés dans les vieux-Rhône repose sur une description des changements des caractéristiques physiques de l'habitat (utilisation de modèles d'habitats, approche prédictive) et l'analyse des modifications des communautés de poissons et de macroinvertébrés benthiques induites par ces changements. Les effets attendus concernent essentiellement l'augmentation post-restauration des espèces caractéristiques des chenaux courants des grands fleuves (espèces présentant une forte affinité pour les habitats courants et profonds et/ou possédant de bonnes capacités de résistance au courant). Un suivi est actuellement en cours sur 9 secteurs cités ci-

dessus. Les résultats montrent que les modifications de structure de communautés sont d'autant plus marquées et visibles que les modifications des débits sont importantes (cas des secteurs de Pierre-Bénite et de Chautagne) et que les suivis sont mis en œuvre sur une période suffisamment longue avant et après restauration. Par exemple, la proportion des individus appartenant aux espèces de poissons dites « d'eau courantes » (présentant une affinité marquée pour les grands cours d'eau : ombre commun, ablette, barbeau fluviatile, hotu, vandoise) dans les échantillons a été multipliée par 2.2 en Chautagne après restauration (2004-2013) et par 2.7 à Pierre-Bénite (2001-2013). Des résultats équivalents ont été observés au sein de communautés d'invertébrés benthiques.

#### *Réponses aux mesures de réhabilitation des annexes fluviales.*

L'analyse de l'évolution post-restauration de la structure des peuplements de macroinvertébrés benthiques a montré que la restauration a favorisé à la fois des communautés d'eaux plus "courantes", mais surtout une plus grande diversité des communautés à l'échelle de la plaine alluviale. Cet effet de diversification globale à l'échelle des secteurs de Belley et Brégnier-Cordon est la résultante de changements hydrologiques et sédimentologiques enclenchés dans les lônes par les divers modes de restauration

Par ailleurs, la mise en évidence d'une typologie de bras restaurés (4 types de bras) représente un des résultats importants de ce programme. Les résultats témoignent de l'existence d'une dynamique fluviale au sein de tronçons de cours d'eau fortement contraints par l'aménagement hydroélectrique et révèlent pour certains bras l'existence de processus d'auto-entretien. La typologie est fondée sur l'analyse conjointe des patrons granulométriques des sédiments composant le fond des bras, des fréquences de connexion amont et de l'intensité des forces tractrices lors des crues engendrant une circulation d'eau dans les bras. Ces caractéristiques, décrivant la connectivité hydrologique des différentes lônes, permettent d'expliquer une grande partie des patterns de distributions des macroinvertébrés benthiques et des changements observés suite à la restauration : composition taxonomique des peuplements, richesse taxonomique de certains groupes et variations d'abondances de plus d'un quart des taxons rencontrés. Ces résultats offrent des perspectives nouvelles en termes de définition des objectifs écologiques des opérations de restauration à venir. En effet, il devient envisageable de proposer des scénarios d'évolution de la structure des communautés de macroinvertébrés, et donc des caractéristiques écologiques des lônes à restaurer en fonction des fréquences de connexion hydrologique amont envisagées et de la modélisation des contraintes hydrauliques au sein des bras lors des épisodes de débordement.

D'autres composantes ont également été suivies, les communautés de macrophytes et les assemblages de poissons dans les lônes restaurées. Pour ces compartiments, une approche prédictive n'a pas pu être mise en œuvre, soit à cause de la stratégie d'échantillonnage choisie (trop peu de lônes suivies et pas de temps très lâche pour les macrophytes), soit par manque de données avant restauration et/ou de connaissances permettant de prédire les modifications de structures des assemblages (cas des poissons).

## ***Conclusion***

La nécessité d'évaluer l'efficacité des procédures de restauration physique des habitats aquatiques rhodaniens a motivé des travaux de recherche destinés à quantifier les liens entre les caractéristiques physiques des habitats fluviaux et leur dynamique et les espèces présentes. Une approche prédictive permettant de confronter des attentes relatives aux effets des travaux de restauration engagés et des données issues des suivis post-restauration a été privilégiée. Elle permet de mettre en évidence les changements induits par la restauration au sein des communautés d'organismes aquatiques mais également de fournir une aide à la décision précieuse pour la définition des objectifs lors de la planification de travaux de restauration à venir. Le suivi sur le terrain a permis d'effectuer une analyse approfondie de la pertinence des échantillonnages réalisés en regard de la capacité des données acquises à mettre en évidence les changements attendus suite à la restauration du Rhône. Ces enseignements sont d'une importance capitale pour définir les suivis futurs et mieux caractériser les attentes associées. Les méthodes développées et les résultats obtenus dans le cadre du programme de recherche associé à la restauration écologique du Rhône sont transposables à d'autres systèmes fluviaux et constituent une avancée internationale importante.

Le chantier mis en œuvre à travers le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône et son intégration dans le Plan Rhône constituent une expérimentation « grandeur nature » unique. Le programme de recherche associé, destiné à rechercher les effets de la restauration sur le fonctionnement écologique du fleuve, permet d'améliorer considérablement le niveau des connaissances scientifiques mais aussi d'analyser les interactions entre les besoins engendrés par l'anthropisation importante de la vallée et la nécessité de préserver la biodiversité des plaines alluviales et les services écosystémiques procurés par le corridor fluvial. Dans le cadre du Plan Rhône et du respect de la Directive Cadre européenne sur l'Eau, l'objectif est d'optimiser la gestion du Rhône et de ses milieux annexes dans une optique de développement durable.

# 1 Introduction – Originalité internationale de la restauration du Rhône

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône français, objet de ce rapport, a été lancé officiellement en 1998 suite à une combinaison d'initiatives locales, régionales et nationales. Intégré en 2007 dans le cadre du "Plan Rhône", le programme combine l'augmentation des débits réservés dans les vieux-Rhône (tronçons court-circuités par les aménagements hydroélectriques) et la restauration de la connectivité latérale au sein des chenaux annexes de la plaine alluviale (les lônes). Il concerne aussi l'amélioration des voies migratoires piscicoles (alose, anguille, lamproies), problématique non traitée ici.

La restauration du Rhône s'inscrit dans une dynamique de restauration physique des grands cours d'eau à l'échelle internationale, suite aux altérations écologiques dues aux modifications des régimes hydrologiques et à l'atterrissement des plaines alluviales (Tockner et Stanford, 2002 ; Carlisle *et al.*, 2011). Alors que les budgets dévolus à la restauration des cours d'eau sont importants et en constante augmentation, il reste extrêmement difficile de tirer des leçons générales des expériences de restauration. Par exemple, une synthèse récente des 113 principales expériences de restauration de débits dans 20 pays différents montre que ces expériences sont peu comparables entre elles (Olden *et al.*, 2014), la plupart correspondent à des mesures de restauration ponctuelles et évaluent la réponse d'un unique groupe biologique, et moins de 20% rapportent des données hydrauliques ou thermiques.

La restauration du Rhône possède des caractéristiques uniques à l'échelle internationale. En effet, le programme a concerné plusieurs tronçons du fleuve et de multiples bras alluviaux, les mesures de restauration physique ont parfois été de grande ampleur, de nombreuses données biologiques (poissons, invertébrés) pré-restauration ont été mobilisées, les caractéristiques physiques des sites sont bien connues et le suivi scientifique des effets de la restauration a pu être coordonné entre sites et pérennisé.

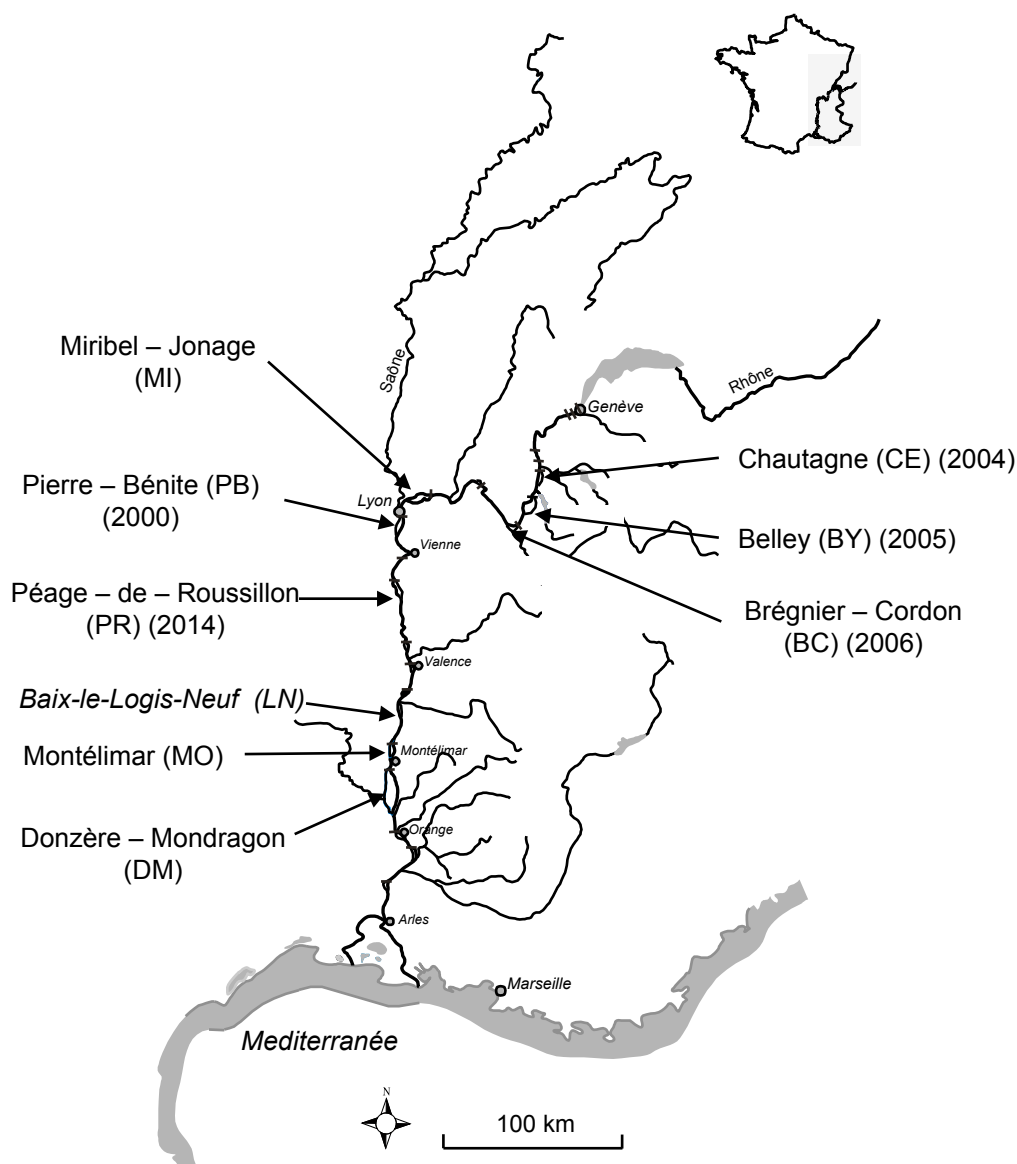
Cette situation originale permet l'évaluation des effets écologiques de la restauration mais également de tester la capacité prédictive de modèles éco-hydrologiques (faisabilité d'approches coûts – bénéfiques). Les modèles testés et validés sur le Rhône sont génériques car ils peuvent s'appliquer à d'autres cours d'eau. Ainsi, l'expérience de la restauration du Rhône contribue à fournir des outils quantitatifs pour prédire les effets écologiques d'autres opérations de restauration. Un numéro spécial de la revue *Freshwater Biology* (Lamouroux *et al.*, 2015) met à disposition les résultats des tests prédictifs ainsi qu'un certain nombre de leçons, notamment en termes d'optimisation des protocoles de suivis ou de décodage des processus sociaux accompagnant la restauration (Barthélémy & Armani, 2015). Le cas du Rhône devrait également illustrer les démarches européennes concernant la gestion écologique des régimes hydrologiques ("e-flow" guidance, en cours d'écriture).

## 2 La restauration hydraulique et écologique du Rhône.

L'aménagement hydroélectrique du Rhône a provoqué des changements physiques et fonctionnels importants, affectant l'ensemble des compartiments du système fluvial en modifiant drastiquement la dynamique fluviale. Le programme de restauration du Rhône n'a pas pour vocation de rendre au fleuve sa dynamique naturelle, ni de restaurer un état antérieur



aux aménagements hydroélectriques. Son ambition est de redonner au fleuve un aspect plus courant et d'améliorer la diversité des habitats physiques dans la plaine alluviale aménagée, à l'échelle des lônes et des vieux-Rhône. Huit secteurs prioritaires ont été initialement sélectionnés en raison des fortes potentialités écologiques (Fig. 1), d'autres secteurs sont maintenant concernés du fait de l'augmentation générale des débits réservés au 1<sup>er</sup> Janvier 2014 (Loi sur L'eau de 2006). Ce rapport concerne les huit sites initiaux et celui de Baix-le-Logis-Neuf en raison des enjeux écologiques importants suite à l'augmentation du débit réservé.



*Fig. 1 – Le Rhône, identification des secteurs prioritaires (le secteur de Baix-le-Logis-Neuf figure sur la carte en raison des enjeux importants de la restauration dans ce secteur), les années de restauration sont indiquées. Les débits réservés ont été augmentés le 1<sup>er</sup> janvier 2014 à Péage-de-Roussillon, Baix-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère dans le cadre de la mise en application de la Loi sur l'Eau et les Milieux aquatiques.*



*Illustrations – Vieux-Rhône de Chautagne avant (a) et après (b) augmentation du débit réservé ( $20$  et  $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respectivement); travaux de creusement de la Lône Vachon (c) et dragage dans la Lône Moiroud (d), Lône Mathan (e, f) et Lône des Molottes (g, h) avant (e, g) gauche et après restauration (f, h).*

La restauration a débuté sur le vieux-Rhône de Pierre-Bénite (long. 9,8 km), où 3 lônes ont été restaurées en 1999 et le débit réservé à l'aval du barrage a été augmenté de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (en hiver) à  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en 2000. Les secteurs de Chautagne (en 2004), Belley (en 2005) et Brégner-Cordon (en 2006) ont ensuite été restaurés avec des changements de débits moins marqués (Tableau 1). A Brégner-Cordon, le changement de débit minimum n'a concerné que l'amont de la confluence du Guiers (passage de  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à  $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Les débits réservés dans les autres sites ont été modifiés au 1<sup>er</sup> janvier 2014. À Péage-de-Roussillon, pour répondre à des objectifs écologiques particuliers (privilégier les espèces de grèves le long des bancs de galets, favoriser la forêt alluviale, ...), des modulations saisonnières importantes ont été définies (Tableau 1).

D'un point de vue hydraulique, les augmentations de débits réservés se traduisent par des augmentations de hauteurs et profondeurs moyennes importantes. Par exemple, les valeurs de

largeurs et de profondeurs moyennes à Pierre-Bénite sont passées de 101/1,3 m ( $Q\ 10\ m^3.s^{-1}$ ) à 127/2,2 m ( $Q\ 100\ m^3.s^{-1}$ ), en Chautagne elles sont passées de 49/0,5 m ( $Q\ 10\ m^3.s^{-1}$ ) à 69/0,9 m ( $Q\ 50\ m^3.s^{-1}$ ). À Pierre-Bénite, la vitesse d'écoulement moyenne est passée de  $\sim 0,08$  à  $\sim 0,36\ m.s^{-1}$ , en Chautagne, elle est passée de  $\sim 0,39$  à  $\sim 0,84\ m.s^{-1}$ .

Tableau 1. Valeurs de débits réservés avant et après restauration dans les vieux-Rhône des 8 sites prioritaires du programme de restauration du Rhône.

Secteur	Débit moyen annuel m3/s	Date de restauration	Débit réservé $m^3/s$	
			Avant	Après
Chautagne	410	07/2004	10-20	50-70
Belley	410	07/2005	25-60	60-90
Brégnier-Cordon	435	07/2006	80-150	80-150
Canal de Miribel	598	-	30-60	30-60
Pierre-Bénite	1030	09/2000	10-20	100
Péage-de-Roussillon	1050	01/2014	10-20	50-125
Baix-le-Logis-Neuf	1475	01/2014	10-20	74,5
Montélimar	1490	01/2014	15-60	75,4
Donzère-Mondragon	1490	01/2014	60	75,4

Tableau 2. Lônes restaurées entre 1999 et 2013 et modalités de restauration mises en œuvre. Sur certaines lônes, des améliorations mineures ont été apportées : (1) abaissement du gué, (2) dragage local, (3) amélioration de la connexion en aval. \* le degré de connexion en aval de la Lône de la Sainte dépend du débit du Rhône.

Secteur	Lône	Année de restauration	Type de restauration					Type de connectivité	
			Dragage creusement	Reconnexion amont	Reconnexion aval	Améliorations mineures	Augmentation débit réservé	avant	après
Chautagne	Malourdie	2004	x	-	x	-	x	aucune	aval
Chautagne	Brotalet	2004	x	-	-	-	x	aval	aval
Belley	Anse de Chanaz	2005	x	-	-	-	x	amont-aval	amont-aval
Belley	Luisettes	2005	x	-	-	-	x	aval	aval
Belley	Moiroud	2005	x	-	-	-	x	aval	aval
Belley	Fournier	2005	x	-	-	-	x	aval	aval
Belley	Béard	2005	x	-	(x)	-	x	aucune	(aval)
Belley	Orgeval	2005	x	-	x	-	x	aucune	aval
Belley	Lucey	2005	-	-	-	(1)	x	amont-aval	amont-aval
Belley	Anse de Yenne	2005	x	x	-	-	x	aucune	amont-aval
Belley	Virignin	2005	x	-	-	-	x	aval	aval
Belley	Chantemerle	1989/1993/2003	x	-	-	-	-	(amont)-aval	(amont)-aval
Brégnier-Cordon	Granges	2006	x	-	-	-	x	aval	aval
Brégnier-Cordon	Vachon	2006	x	x	-	-	x	aval	amont-aval
Brégnier-Cordon	Cerisiers	2006	(x)	-	-	(2)	-	(amont)-aval	(amont)-aval
Brégnier-Cordon	Mathan	2006	x	x	x	-	-	amont-aval	amont-aval
Brégnier-Cordon	Molottes	2006	x	-	x	-	-	aucune	aval
Brégnier-Cordon	Ponton	2006	x	-	x	-	-	aucune	aval
Brégnier-Cordon	Islon	2006	x	x	-	-	-	aval	amont-aval
Brégnier-Cordon	Sables	2006	x	-	-	(3)	-	aval	aval
Brégnier-Cordon	Marquisat & Colonnes	2006	x	x	-	-	-	aval	amont-aval
Pierre-Bénite	Ciselande	1999-2000	x	x	x	-	x	aucune	amont-aval
Pierre-Bénite	Jaricot	1999-2000	x	-	x	-	x	aucune	aval
Pierre-Bénite	Table-Ronde	1999-2000	x	-	x	-	x	aucune	aval
Péage de Roussillon	Lône du Noyer Sud	2013	x	x	x	-	-	aucune	amont-aval
Péage de Roussillon	Lône de la Sainte	2013	x	-	x	-	-	aval*	aval*
Montélimar	Lône de la Roussette	2013	x	-	-	-	-	aval	aval

Entre 1999 et 2013, 21 lônes ont été réhabilitées sur les 3 secteurs du Haut-Rhône, ainsi que 3 à Pierre-Bénite, 2 à Péage-de-Roussillon et 1 à Montélimar (Tableau 2). Les modalités de réhabilitation des lônes (annexe 1) dépendent à la fois de l'objectif global de diversité, des objectifs déclinés à l'échelle locale et de l'état de ces milieux avant restauration, certains étant quasiment atterris. La majorité des lônes ont été creusées (dragages), certains bras ont été partiellement reconnectés au chenal (généralement par l'aval), d'autres complètement (voir tableau en annexe 1 pour les caractéristiques des lônes restaurées). L'augmentation du débit réservé peut avoir une influence directe sur ce degré de connexion. Au total, la connexion avec le chenal principal a été modifiée sur 14 des 27 lônes restaurées. Les procédures de

restauration physique ont eu pour objectif essentiel de restaurer des formes en eau plutôt que des processus (restauration de la dynamique sédimentaire par exemple) même si les opérations de restauration modifient et influencent les processus.

### **3 Suivi scientifique des sites restaurés et évaluation des effets de la restauration**

L'effet des augmentations de débit réservé dans les vieux-Rhône est mesuré par l'analyse des modifications des structures des communautés de poissons et de macroinvertébrés benthiques. L'approche retenue pour détecter et évaluer les effets des augmentations de débits réservés dans les vieux-Rhône repose sur une description des changements des caractéristiques physiques de l'habitat. Les changements en fonction des valeurs de débit sont prédits avec des modèles hydrauliques statistiques simples qui décrivent les fréquences de distribution de variables ayant une influence forte sur la distribution des organismes aquatiques : les contraintes au fond (shear stress) pour les macroinvertébrés benthiques, et la vitesse de courant et la profondeur pour les poissons. Des modèles de préférence des invertébrés et des poissons vis-à-vis de ces variables sont couplés à ces modèles hydrauliques pour estimer les modifications de densités des organismes liées aux changements de valeurs de débit réservés. Cette démarche permet d'identifier des espèces (ou des taxons) dont les densités peuvent varier, en augmentant ou en diminuant, de manière significative en réponse aux augmentations de débits réservés.

Le suivi des caractéristiques morfo-sédimentaires des lônes permet de comprendre l'organisation spatiale des différents types d'habitats au sein des bras restaurés, mais aussi de décrire la dynamique et de mesurer les taux de comblement des annexes fluviales restaurées afin d'estimer leur durée de vie potentielle. Le suivi du compartiment biologique porte ici sur les macrophytes aquatiques, les macroinvertébrés et les poissons. La méthodologie employée pour les suivis est décrite dans l'annexe 2 ainsi que le détail des campagnes d'échantillonnage réalisées aux sites choisis (annexe 3).

Dans tous les cas, la significativité des changements mesurés est d'autant plus importante que la qualité de la description de la variabilité temporelle des variables biologiques utilisées est bien prise en compte, aussi bien avant restauration qu'après. Les stratégies d'échantillonnage ont donc été optimisées en prenant en compte cette exigence et le coût du suivi. Ainsi, l'analyse de l'effet des augmentations du débit réservé dans les vieux-Rhône a pu bénéficier sur certains secteurs de l'existence de données acquises durant plus de 20 ans avant la restauration (jusqu'à 133 campagnes d'échantillonnage des poissons avant restauration à Péage-de-Roussillon et jusqu'à 8 campagnes d'échantillonnage des macroinvertébrés à Pierre-Bénite et à Péage-de-Roussillon). L'ensemble des données est maintenant bancarisé et public (<http://restaurationrhone.univ-lyon1.fr>).

### **4 Synthèse des résultats et pérennité des actions**

Les effets des augmentations de débits réservés dans les vieux-Rhône et de la réhabilitation physique des lônes sont présentés séparément bien que ces deux aspects soient très complémentaires, le degré de connexion hydrologique (connectivité latérale) étant un

facteur clef de l'évolution morpho-sédimentaire des bras restaurés, de la structuration et de l'évolution des biocénoses dans les lônes et dans le chenal.

#### 4.1 Effets des modifications de débits réservés dans les chenaux principaux

Les peuplements aquatiques des vieux-Rhône sont influencés au-delà de la restauration physique par les changements d'hydrologie, de température et la construction plus ou moins récente des barrages. Malgré l'influence de ces contraintes multiples, l'analyse globale des données biologiques de l'ensemble des sites courants du fleuve, restaurés ou non montre que la restauration des débits réservés dans les vieux-Rhône a induit des modifications très significatives en termes d'abondances relatives et absolues des espèces de poissons ou de macroinvertébrés (Fig. 2 et Fig. 3). Ces changements sont plus ou moins importants selon les sites et dépendent notamment de l'ampleur des changements de débits.

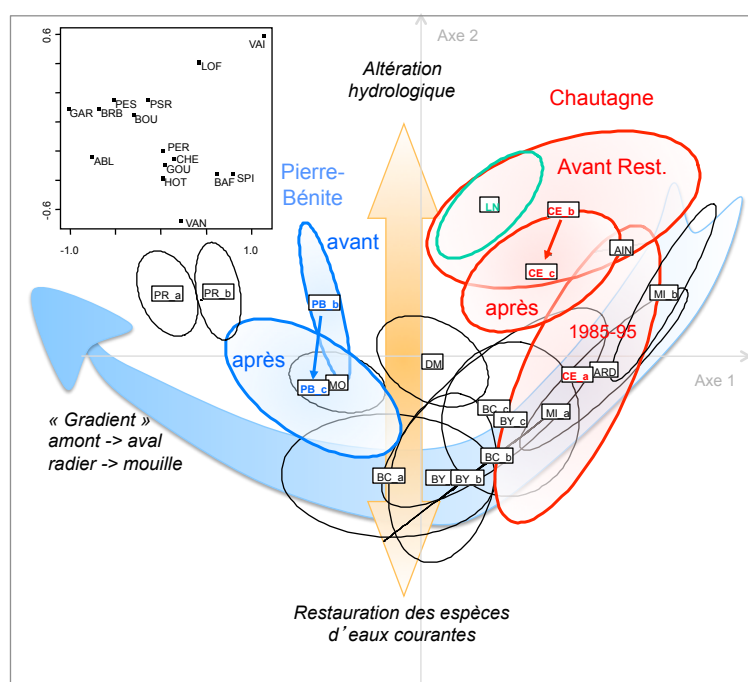


Fig. 2 – Analyse multivariée des peuplements de poissons (38 espèces) sur l'ensemble des vieux-Rhône suivis, restaurés ou non (image synthétique de la structure spatio-temporelle des peuplements sur le plan factoriel des 2 premiers axes d'une ACP sur les log-proportions des espèces par site  $\times$  période). Pour chaque vieux-Rhône (ex : CE pour Chautagne), les notations CE\_a, CE\_b et CE\_c sont des périodes, a : anciennes, b : les 8 ans avant restauration et c : après restauration (cf. annexe 4 pour la définition exacte de tous les sites et toutes les périodes). L'insert montre les coordonnées factorielles des espèces (cf. codes en annexe 4).

Les peuplements de poissons (Fig. 2) se structurent en premier lieu selon un gradient Haut-Rhône – Bas-Rhône (axe 1 de l'analyse, flèche bleue) prenant en compte le caractère plus ou moins lotique et les conditions thermiques des secteurs. Ainsi, le peuplement du vieux-Rhône de Donzère se rapproche de celui des vieux-Rhône de l'amont de Lyon, sans doute à cause d'une forte proportion de radiers dans ce tronçon court-circuité (Fig. 2). Les proportions des espèces typiques des radiers (barbeau, spirin, loche franche et viron) influencent cet axe. L'effet de la restauration est mis en évidence sur le second axe de l'analyse (vertical, flèche jaune). La restauration a favorisé des espèces d'eaux courantes (groupe d'espèces typiques des grands fleuves, préférant à la fois les habitats courants et profonds : vandoise, hotu, barbeau, toxostome, ablette, ombre commun) au moins en

Chautagne et à Pierre-Bénite. En Chautagne, la restauration a inversé une forte altération observée après la construction des barrages (période 1980-1995).

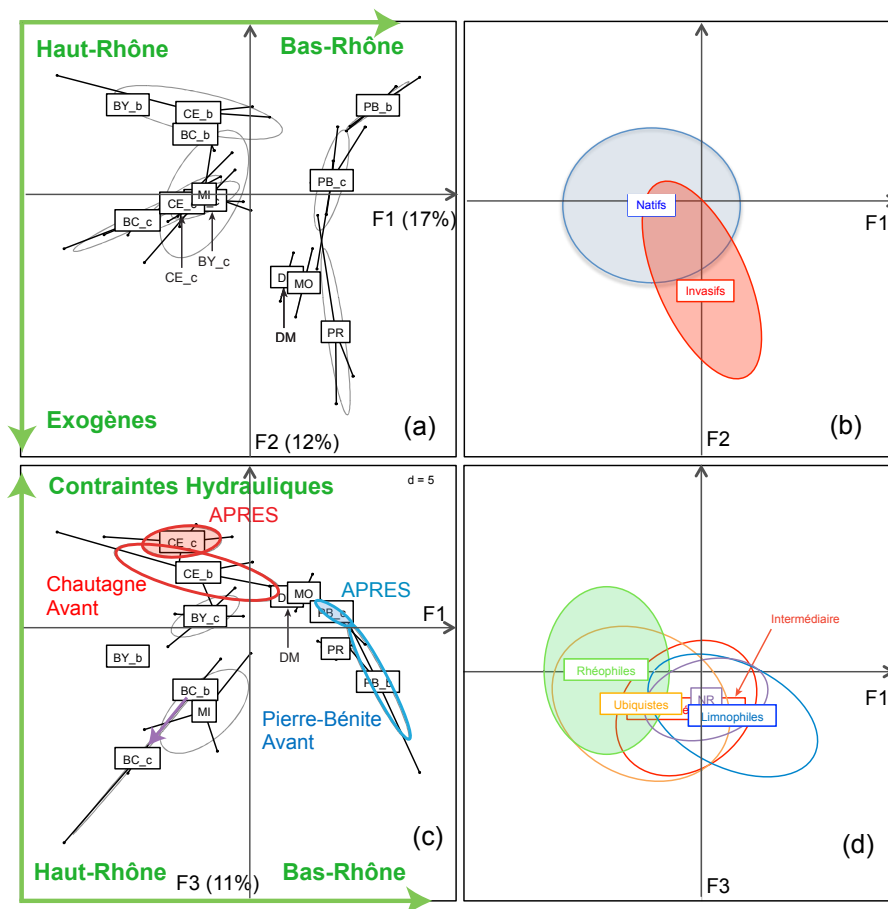


Fig. 3 – Analyse multivariée des peuplements d'invertébrés (100 taxons les plus abondants, cf. annexe 5) sur l'ensemble des vieux-Rhône suivis, restaurés ou non (ACP normée sur les log-densité des taxons, par site  $\times$  période, image synthétique de la structure spatio-temporelle des peuplements sur le plan F1xF2 en haut, et sur le plan F1xF3 en bas). Les graphes de droite montrent les coordonnées des taxons, regroupés au sein d'ellipses suivant leur origine géographique (Natifs, Invasifs) ou leur degré de rhéophilie (Rhéophiles, Limnophiles, Ubiquistes, Intermédiaires et Non Renseignés, voir détails dans l'annexe 2). Les codes des sites  $\times$  périodes sont les mêmes que pour la Figure 2. La liste des taxons et la carte factorielle des taxons sont disponibles dans l'annexe 5.

L'analyse des peuplements de macroinvertébrés benthiques (Fig. 3) met également en évidence une séparation nette entre les peuplements du Haut-Rhône et ceux du Bas-Rhône (sur l'axe 1 de l'analyse, Fig. 3a), les secteurs du Haut-Rhône étant caractérisés par des communautés de macroinvertébrés généralement plus rhéophiles (Fig. 3d).

Les changements avant/après restauration combinent une augmentation des espèces exogènes (discriminées sur l'axe 2, Fig. 3b) et de certaines espèces rhéophiles (axe 3) sur les secteurs de Chautagne, Belley et Pierre-Bénite. Les arrivées récentes d'espèces exogènes (*Dikerogammarus villosus*, *Hypania invalida*,...) ont coïncidé avec les opérations de restauration sans que ces deux phénomènes soient directement liés. En revanche, l'augmentation du caractère rhéophile peut être attribué à la restauration. Ainsi, comme pour

les poissons, l'effet de la restauration est visible à l'échelle du fleuve malgré l'influence d'autres facteurs structurants (Fig. 3c).

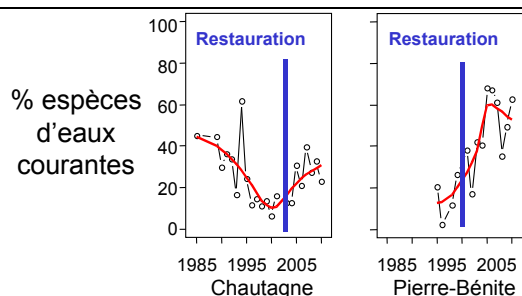


Fig. 4 – Evolution de la proportion des poissons "d'eau courante" dans les vieux-Rhône au cours du temps.

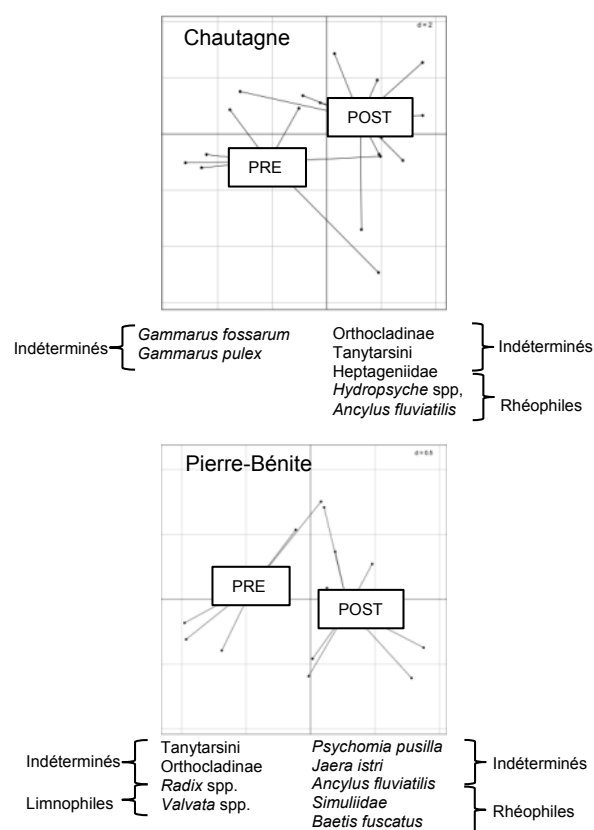


Fig. 5 – Une analyse séparée (ACP sur les log-densités) des communautés d'invertébrés à Chautagne et Pierre-Bénite discrimine fortement les situations avant et après restauration, sous l'effet combiné de taxons rhéophiles et exogènes.

### Pierre-Bénite et Chautagne : deux vieux-Rhône où les changements physiques sont les plus importants.

Les changements qui sous-tendent les analyses globales ci-dessous sont des modifications importantes d'abondance relative des espèces. Pour les poissons, la proportion d'espèces d'eaux courantes est passée de 15% à 44% à Pierre-Bénite et de 10% à 23% à Chautagne (Fig. 4). A Chautagne, une tendance d'augmentation des espèces de petits cours d'eau (ex : loche franche, vairon) observée depuis la construction des barrages est inversée.

Pour les invertébrés, des augmentations des proportions des taxons rhéophiles sont visibles dans les deux sites (Fig.5). Certains taxons (Chautagne : *Ancylus fluviatilis* et Heptageniidae spp, Pierre-Bénite : *Ancylus fluviatilis* et Simuliidae), ont vu leurs abondances multipliées par des facteurs de 5 à 11. Des taxons limnophiles (Chautagne : Polycentropodidae, Pierre-Bénite : *Helobdella stagnalis*) ont des abondances divisées par 6 et 34. Les changements impliquent également des groupes mal déterminés (ex : chironomes) et des taxons dont le codage des préférences hydrauliques (rhéophiles / limnophiles) demanderait à être confirmé pour améliorer l'interprétation.

## 4.2 Restauration des lônes et diversité de la plaine alluviale

### *Quatre types de patrons sédimentaires dans les lônes restaurées, stables dans le temps*

L'analyse post-restauration des données de granulométrie des sédiments échantillonnés dans les lônes a permis d'identifier quatre principaux types de patrons granulométriques mettant en exergue différentes modalités de sédimentation (dépôts par décantation et dépôts « en vrac »). L'hydrologie (la fréquence de connexion amont) et l'intensité des forces hydrauliques développées au sein des bras lors des crues (forces maximales enregistrées sur le fond des bras) conditionnent les processus d'érosion-dépôt et les classes granulométriques dominantes des dépôts de fines à l'échelle de chaque bras (Fig. 6). Les chenaux de type 1 sont des bras à lit graveleux pouvant présenter des plaques sporadiques de sables voire parfois de limons. Les bras de types 2 et 3 constituent des cas intermédiaires présentant des taux de recouvrement de leur fond par les fines similaires. Les bras de type 2 enregistrent des dépôts plutôt sablo-limoneux, alors que ceux des bras de type 3 s'inscrivent dans une gamme plutôt limono-sableuse. Les bras de type 4 sont, quant à eux, totalement recouverts par des dépôts limoneux.

Après restauration, l'essentiel de la variabilité temporelle de ces patrons sédimentaires est imputable à des changements de gradients granulométriques longitudinaux, sans pour autant qu'il y ait changement de type. Ceci indique que la distribution granulométrique longitudinale des dépôts est modifiée épisodiquement lors des crues (retours d'eau et débordement amont) sans toutefois remettre en cause les types sédimentaires définis précédemment. Ces types sont par conséquent robustes dans le temps et une diversité locale de ces différents types est un bon indicateur de la diversité des conditions fonctionnelles des lônes restaurées.

Sur les 18 bras étudiés, des données pré-restauration sont disponibles pour 12 d'entre-eux (Fig. 6). D'une manière générale, les travaux ont avant tout rajeuni les formes sans pour autant modifier le fonctionnement hydrosédimentaire des bras. Ainsi, pour la plupart des bras, les conditions granulométriques post-travaux sont très proches de celles observées avant restauration. Seuls trois bras présentent un changement significatif de type sédimentaire suite aux travaux de restauration (Luisettes, Granges et Mathan). Le recreusement et la reconnection de la Lône Mathan (chenal perché quasiment atterri avant restauration) a mis à nu les sédiments grossiers (galets) et l'écoulement permanent qui y transite à présent permet de fortement limiter les dépôts de fines. Le curage de la Lône des Luisettes et de la Lône des Granges (bras perchés et essentiellement graveleux avant travaux) a modifié leurs conditions hydrodynamiques internes, favorisant localement leur capacité de piégeage des alluvions fines. On observe également un changement de type de patron granulométrique sur la Lône Moiroud qui reste peu significatif car essentiellement imputable à la présence de dépôts sableux très localisés qui n'avaient pas été observés avant restauration.



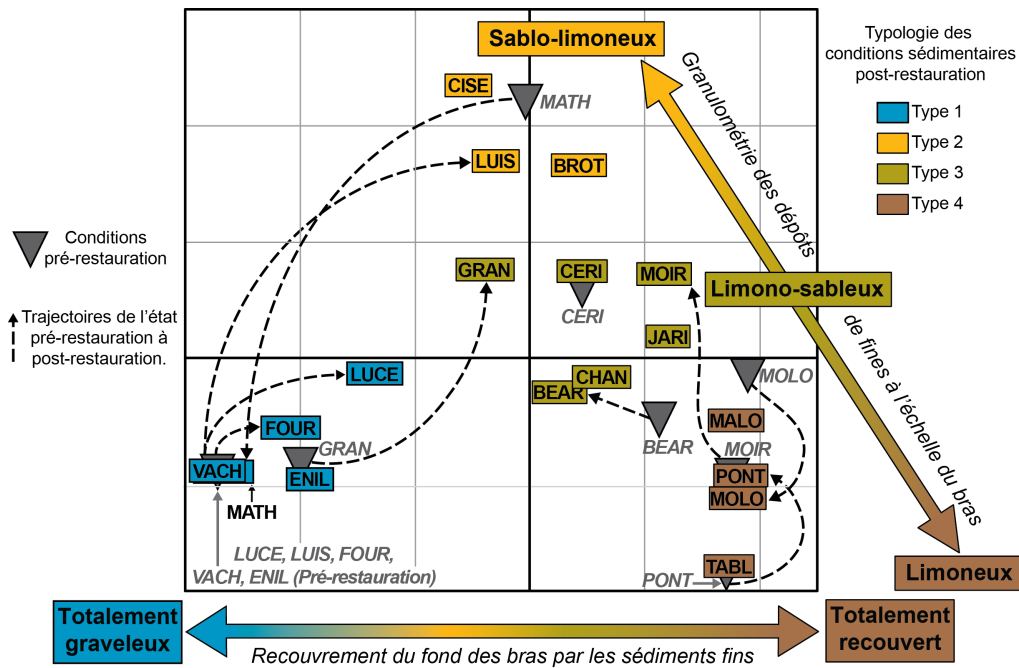


Fig. 6 – Typologie des conditions sédimentaires moyennes mesurées après travaux dans les bras restaurés du Haut-Rhône et de Pierre-Bénite intégrés au suivi sédimentaire (Analyse en Composantes Principales inter-lônes). Les sites sont principalement ordonnés selon les caractéristiques granulométriques des dépôts sédimentaires et du taux de recouvrement de leur fond par les sédiments fins. Les flèches en pointillés indiquent les trajectoires post-restauration des lônes (Riquier et al., 2015). Codes des stations : MALO, Lône de la Malourdie, BROT, Lône du Brotalet (secteur de Chautagne) ; LUIS, Lône des Luisettes, MOIR, Lône Moiroud, BEAR, Lône Béard, FOUR, Lône Fournier, LUCE, Lône de Lucey, ENIL, Lône d'en l'Île (secteur de Belley) ; GRAN, Lône des Granges, VACH, Lône Vachon, CERI, Lône des cerisiers, MATH, Lône Mathan, MOLO, Lône des Molottes, PONT, Lône du Ponton (secteur de Brégner-Cordon) ; CISE, Lône de Ciselande, JARI, Lône de Jaricot, TABL, Lône de la Table Ronde (secteur de Pierre-Bénite).

### Vers une gestion quantitative des sédiments et des habitats dans les lônes

Deux variables quantitatives jouant un rôle primordial dans l'évolution post-restauration des caractéristiques géomorphologiques des lônes ont donc été identifiées grâce au suivi réalisé : la fréquence des évènements débordants à l'amont et l'intensité des débordements (contraintes de cisaillement maximales exercée sur le lit), les deux n'étant d'ailleurs pas forcément liés (Fig. 7). Les différentes combinaisons des valeurs prises par ces variables déterminent les conditions sédimentaires observées au sein des lônes. Le fait de pouvoir relier les conditions granulométriques à ces variables explicatives quantifiables constitue un acquis important. En effet, il devient alors possible, lors de la définition des objectifs de restauration, de déterminer relativement précisément les caractéristiques des types de bras (conditions granulométriques) en fonction de leurs modalités de fonctionnement hydrologique après restauration. Différents scénarios peuvent alors être envisagés en ciblant des géométries pré-existantes se rapprochant de tel ou tel type afin de sélectionner les bras à restaurer selon leur potentiel hydro-sédimentaire, ou encore en choisissant d'agir sur la géométrie des bras pour modifier ces variables en accord avec les objectifs de restauration, notamment en jouant sur les modalités de connexion amont avec le chenal vif.

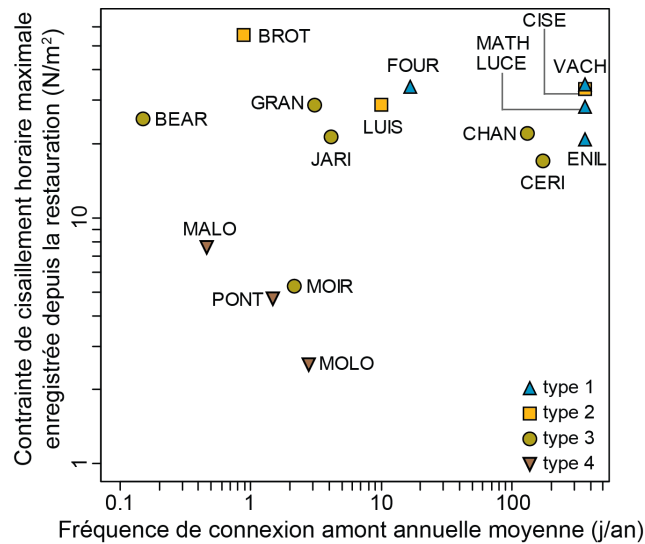


Fig. 7 – Caractérisation du régime de connectivité des bras restaurés en crue. Les couleurs se réfèrent aux types de conditions sédimentaires post-restauration décrits précédemment. Riquier *et al.* (2015)

Ces descripteurs quantitatifs des caractéristiques de l'écoulement en crue n'ayant été disponibles que très récemment, les biologistes (Castella *et al.*, sous presse) ont jusqu'ici estimé le degré de connectivité hydrologique des stations suivies à partir de variables environnementales mesurées *in situ* et permettant le calcul d'un indice de connectivité indirect. Cet indice est utilisé par les biologistes pour modéliser la composition et la richesse des peuplements des annexes fluviales (Fig. 8). Il est également prévisible à partir des deux variables quantitatives sus-citées (Fig. 9). Il devient donc envisageable de mettre en relation les caractéristiques des peuplements de macroinvertébrés dans les lônes restaurées avec des variables physiques quantifiant leur connectivité hydrologique. Les retours d'expérience issus des suivis des peuplements d'invertébrés après restauration peuvent constituer une importante base de connaissances mobilisable dans le cadre de la définition des objectifs écologiques pour de futures lônes à restaurer.

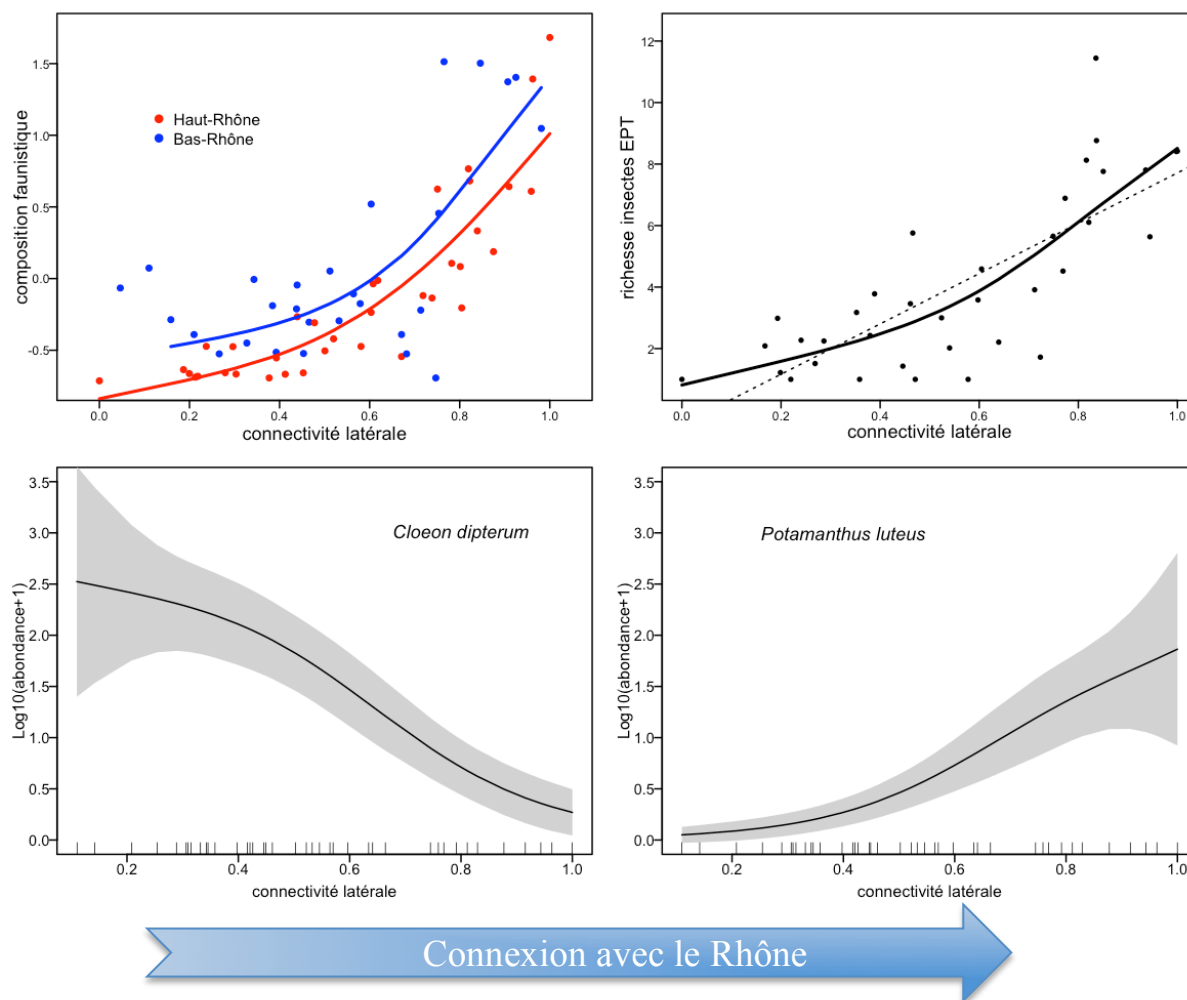


Figure 8 - L'indice de connectivité latérale (axe horizontal des 4 graphiques) est une combinaison mathématique de 4 variables intégrant l'influence du fleuve sur les lônes : la teneur en matière organique du sédiment, la diversité de la granulométrie, la quantité de végétation aquatique et la conductivité électrique de l'eau. Il varie de 0 (site déconnecté très peu ou pas influencé par le fleuve) à 1 (site connecté de façon permanente).

Il a pu être montré que cet indice :

- est corrélé au changement de composition des peuplements d'invertébrés dans les lônes : en haut à gauche, 36 sites du Haut-Rhône et 28 sites du Bas-Rhône. L'axe vertical permet de mesurer la ressemblance de la composition taxonomique des sites (points).

- est corrélé à la richesse taxonomique de certains groupes d'invertébrés : en haut à droite la richesse en insectes Ephémères, Plécoptères et Trichoptères augmente lorsque la connectivité au fleuve augmente (18 sites de Belley et Brégnier avant restauration). La richesse de ce groupe est un indicateur de qualité biologique des milieux lotiques.

- permet de modéliser les variations d'abondance d'un peu plus du quart des taxons rencontrés. En bas : exemples de modèles de variation d'abondance d'espèces défavorisée (*Cloeon dipterum*) et favorisée (*Potamanthus luteus*) par la connexion au Rhône. Les courbes de réponse (et leur intervalle de confiance) ont été construites à partir de 40 sites de Belley et Brégnier avant restauration.

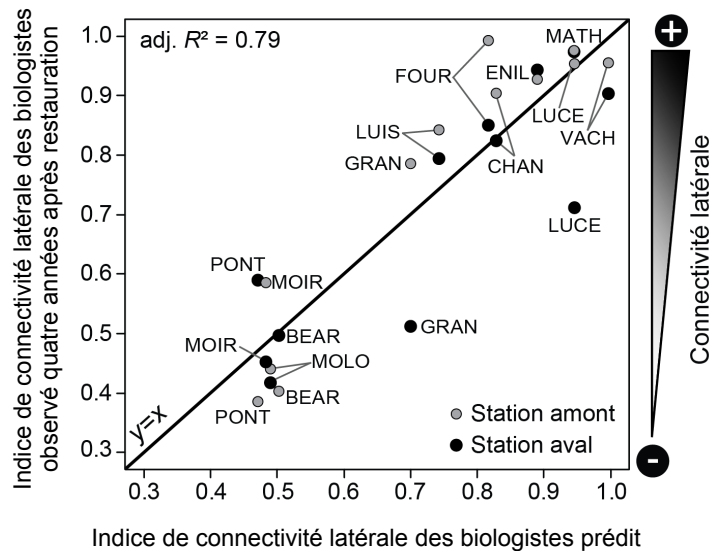


Fig. 9 – L'indice de connectivité latérale des bras restaurés tel qu'estimé sur le terrain par les biologistes peut être prédit par une régression linéaire multiple intégrant la fréquence de débordement amont et une estimation moyenne des contraintes de cisaillement maximum exercées sur le fond des bras depuis leur restauration Riquier et al. (2015)

***La restauration des lônes a favorisé une plus grande diversité des peuplements de macroinvertébrés benthiques à l'échelle de la plaine alluviale***

L'analyse de l'évolution post-restauration de la structure des peuplements de macroinvertébrés benthiques a montré que les lônes ont été colonisées par des communautés de macroinvertébrés présentant des affinités pour ces différents types sédimentaires. La restauration a favorisé à la fois des communautés d'eaux plus "courantes", mais surtout une plus grande diversité des communautés à l'échelle de la plaine alluviale (Fig. 10 et Fig. 11). Les peuplements des sites restaurés s'ordonnent selon un gradient de connectivité hydrologique avec le chenal principal, allant des milieux fortement déconnectés, très lentiques, aux bras secondaires courants.

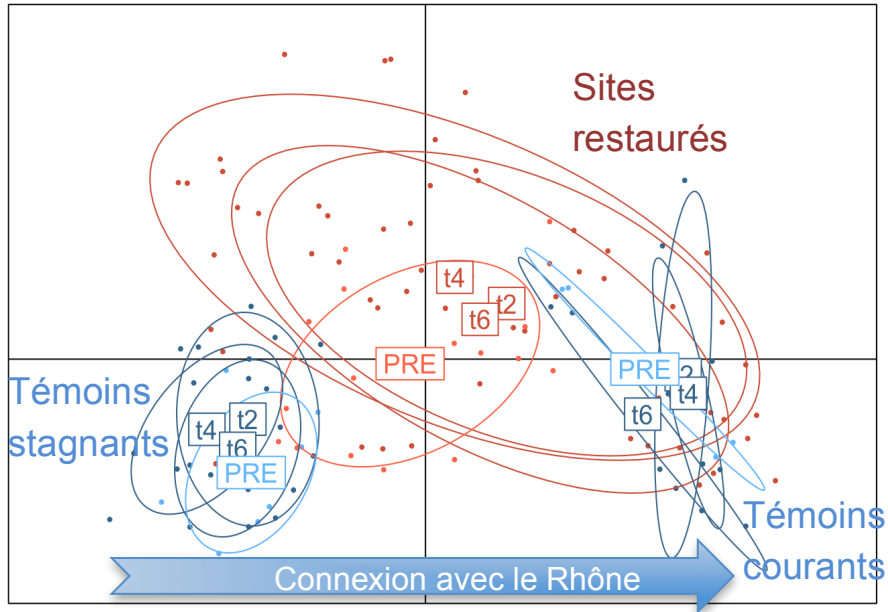


Fig. 10 – Position des communautés de macroinvertébrés des lônes des secteurs de Belley et Brégner-Cordon le long d'un gradient de connexion hydraulique avec le fleuve (analyse biologique multivariée). En bleu les sites témoins déconnectés (à gauche) ou connectés (à droite). En brun les lônes restaurées avant (PRE) et après restauration (avec t2, t4 et t6 correspondant à 2, 4 et 6 ans après restauration). La restauration a modifié la position moyenne des peuplements vers des peuplements d'eau plus courante, et augmenté la diversité des situations à l'échelle de la plaine alluviale (ellipses brunes plus grandes lorsque l'on passe de "PRE" aux dates post-restauration). Castella et al (2015).

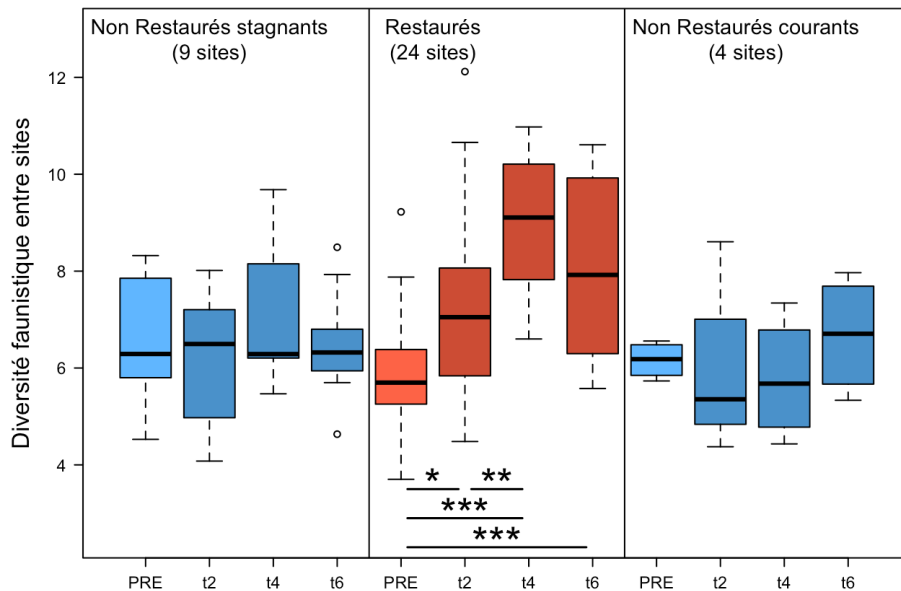


Fig. 11 – Changements temporels de la diversité des communautés benthiques entre lônes dans les secteurs de Belley et Brégner-Cordon réunis, avant (PRE) et après restauration (avec t2, t4 et t6 correspondant à 2, 4 et 6 ans après restauration). La diversité des communautés reste stable dans les sites témoins non restaurés, elle augmente de façon significative dans les sites restaurés. Significativité : \* : p 0.05 ; \*\* : p 0.01 ; \*\*\* : p 0.001.

Cet effet de diversification globale à l'échelle des secteurs de Belley et Brégnier-Cordon est la résultante de trajectoires successives enclenchées dans les lônes par les divers modes de restauration (Fig. 12). Les variations d'abondances des taxons associées à ces changements peuvent être très fortes (Fig. 13). L'examen de ces trajectoires fait apparaître les points majeurs suivants :

- tous les sites restaurés montrent des changements faunistiques ; ceux-ci sont largement supérieurs à la fluctuation interannuelle dans les milieux stagnants non restaurés et, dans une mesure moindre, aux changements des milieux courants non restaurés ;
- les trajectoires temporelles à partir de l'état pré-restauration ont lieu de façon très globale dans la même direction (de la droite vers la gauche sur la Fig. 12). Cette direction est la résultante de deux tendances plus ou moins marquées selon les types de restauration et de connexion au fleuve : 1) l'augmentation post-restauration de taxons rhéophiles (par ex. *Theodoxus fluviatilis*, Fig. 13, *Silo* sp., *Ancylus fluviatilis*, l'exogène *Hypania invalida*), et 2) l'augmentation parallèle de taxons plus lénitophiles et/ou phytophiles dans les sites à connectivité plus faible (par ex. *Pisidium* sp., Fig. 13, *Asellus aquaticus*, *Caenis horaria*, l'exogène *Haitia acuta*). Cette double tendance explique la diversification à l'échelle de la plaine alluviale des communautés des sites restaurés. La restauration ne fait pas que favoriser les taxons les plus rhéophiles, elle soutient aussi l'expansion de taxons plus lénitophiles qui bénéficient sans doute de l'initiation de nouvelles séquences de colonisation végétale et de l'augmentation des flux d'eau souterraine. Dans les sites complètement reconnectés au fleuve, une première phase (à T+2) voit la diminution de taxons lénitophiles comme *Cloeon dipterum* (Fig. 13) ou *Bithynia tentaculata* ;
- pour tous les types de sites, les changements de T+4 à T+6 sont d'une amplitude inférieure aux périodes précédentes et montrent souvent un "retour en arrière" par rapport à la trajectoire globale précédemment décrite. Cette tendance mérite d'être suivie afin de déterminer si les communautés ont atteint un nouvel état d'équilibre où les changements interannuels seraient plus faibles ou s'il s'agit d'un retour progressif en direction de l'état pré-restauration.

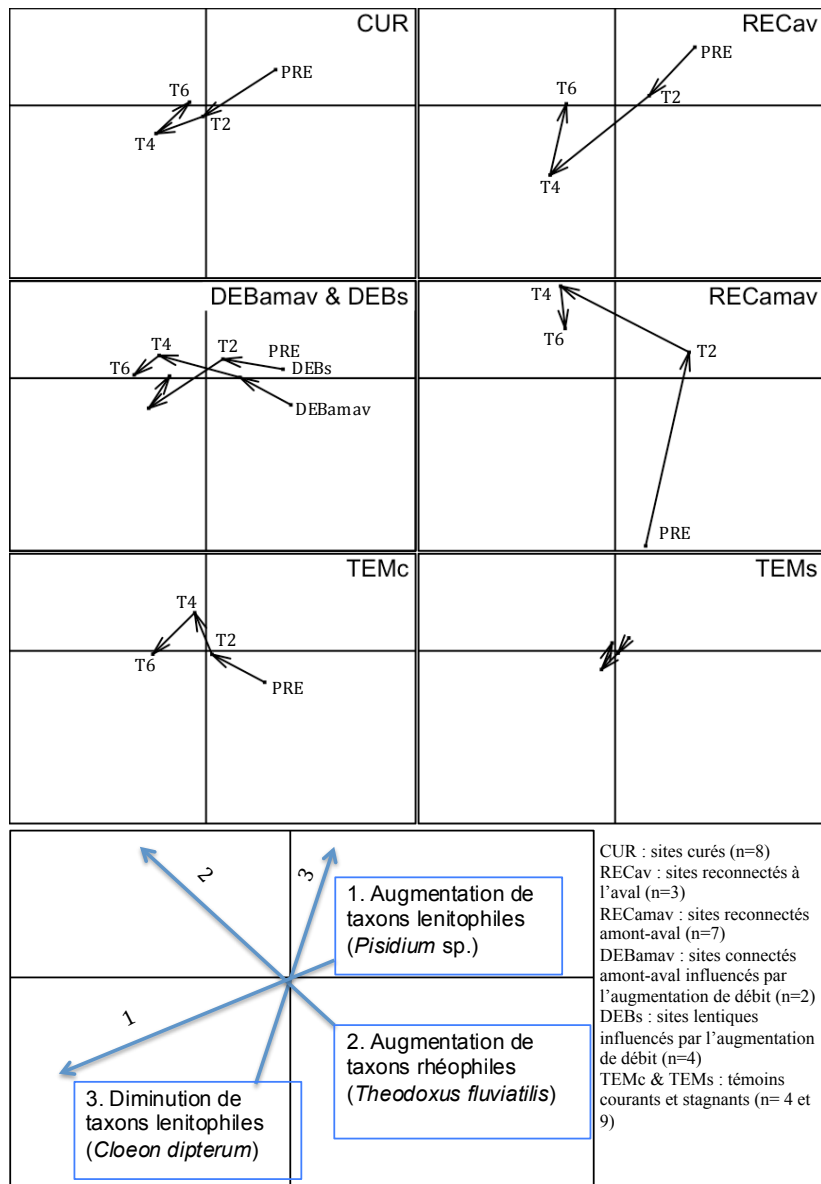


Fig. 12 – Trajectoires temporelles moyennes des communautés d'invertébrés dans les sites regroupés par type de restauration et de connexion au fleuve, avant (PRE) et après restauration (avec T2, T4 et T6 correspondant à 2, 4 et 6 ans après restauration). Les flèches bleues (en bas à gauche) résument les trois principaux types de changements faunistiques.

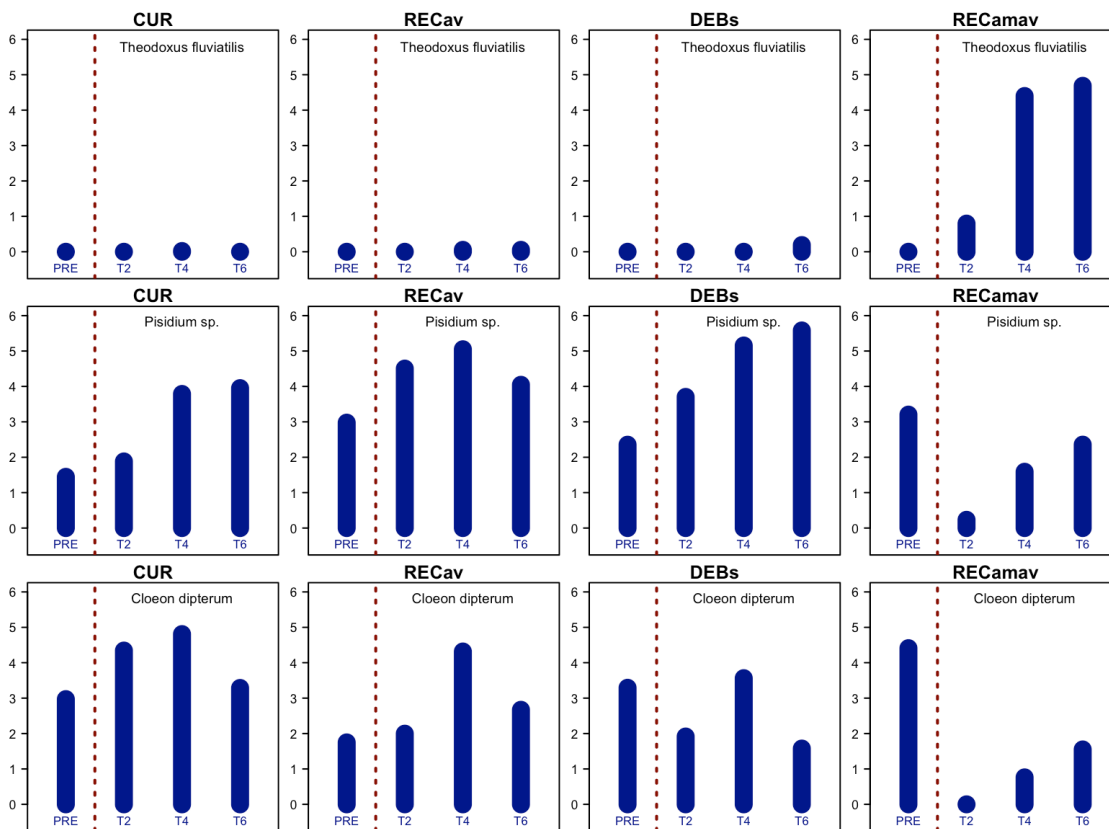


Fig. 13 – Changements temporels du  $\log_e$  de la densité moyenne (abondance par  $0.25 \text{ m}^2$ ) de trois taxons emblématiques (*Theodoxus fluviatilis*, *Pisidium sp.*, *Cloeon dipterum*) dans les sites restaurés avant (PRE) et après restauration (avec T2, T4 et T6 correspondant à 2, 4 et 6 ans après restauration). Les sites sont regroupés par type de restauration et de connexion au fleuve (voir Figure 11).

### Restauration et diversité des types de lônes

Il est à présent possible d'établir un descriptif de l'évolution éco-hydromorphologique des bras restaurés au regard des actions de restauration entreprises. Les lônes des Luisettes, de Béard, d'En l'Île sur le vieux-Rhône de Belley, puis les lônes des Granges et des Molottes à Brégnier-Cordon constituent de bons exemples de la diversité des modes de restauration et des changements observés (sédimentologie, peuplements de macroinvertébrés benthiques et de poissons). Ces résultats détaillés, présentés dans l'annexe 6, illustrent les liens entre différents contextes de fonctionnement hydro-sédimentaires des lônes restaurées et leurs caractéristiques biologiques, attestant de la diversité des types de lônes après restauration.

### 4.3 Les traits biologiques pour apporter une interprétation plus fonctionnelle de la restauration des grands cours d'eau.

Les espèces, au-delà de leur identité, présentent des morphologies et des caractéristiques biologiques variées en lien avec l'habitat et jouent chacune un rôle dans le fonctionnement de l'écosystème (ex : dynamique des communautés, filtration de la matière organique, rétention des sédiments). On peut donc regrouper les espèces en fonction de leur morphologie, cycle de vie, physiologie et régime trophique, caractéristiques connues sous le nom de traits biologiques. L'avantage de l'utilisation des traits est qu'elle permet une interprétation mécanistique des relations entre habitat et communautés. On peut supposer que la



morphologie, les modes de locomotion et de respiration ainsi que les régimes trophiques vont être impactés par des modifications d'habitat engendrées par des changements des conditions hydrauliques. Cette approche, qui est complémentaire de l'examen des réponses des communautés aquatiques à la restauration, a été appliquée aux communautés de macroinvertébrés des chenaux principaux (vieux-Rhône) et secondaires, et aux peuplements de poissons des vieux-Rhône dans le cadre du programme de restauration du Rhône.

Par exemple, les augmentations des débits réservés dans les chenaux principaux des vieux-Rhône montrent des modifications variables de la réponse biologique des communautés de macroinvertébrés proportionnelles au degré de modification des débits. L'augmentation de la proportion d'individus de petite taille s'accompagne d'une diminution de la proportion d'individus protégeant leurs œufs, peut-être du fait de conditions plus oxygénées. Les plus fortes vitesses de courant favorisent les individus présentant des dispositifs d'accrochage ("clingers"), mieux adaptés à une augmentation des contraintes hydrauliques de fond. Une augmentation de la proportion de filtreurs passifs se nourissant de la matière organique dans la colonne d'eau parallèlement à une diminution des déchetteurs et une augmentation des racleurs-herbivores indique une transition vers des communautés plus caractéristiques des grandes rivières (Fig. 14). Cette approche permet d'émettre des hypothèses de changements de structures des assemblages faunistiques reposant sur des variations de proportions de traits dans les différents biefs du Rhône en s'affranchissant des différences de composition taxonomique. Elle permet par exemple de comparer les changements observés après restauration sur le Haut-Rhône à ceux observés sur le Bas-Rhône, c'est-à-dire dans des contextes hydrologiques, thermiques et biologiques différents.

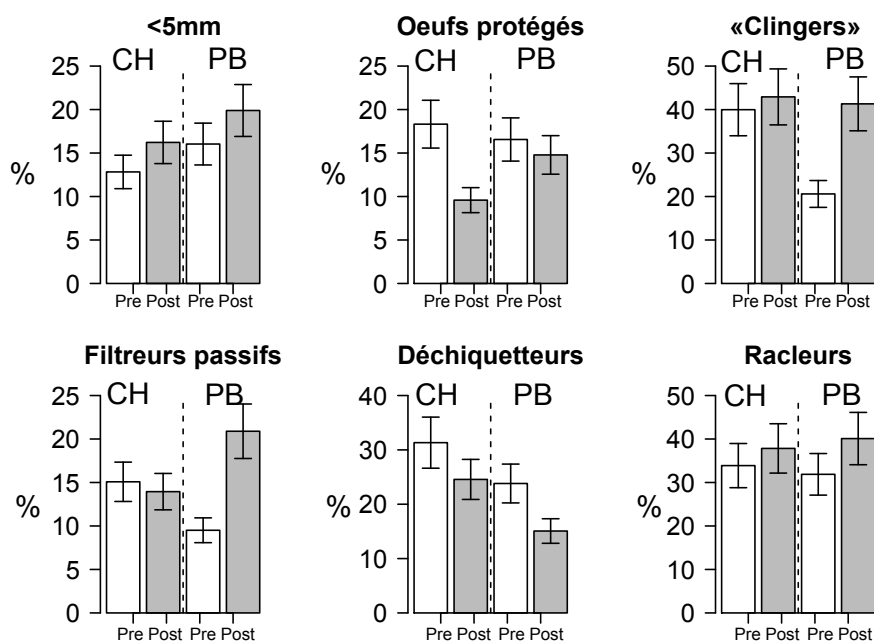


Fig. 14 – Réponse (en % d'individus) de six caractéristiques biologiques de macroinvertébrés benthiques avant (Pre) et après (Post) les augmentations de débit réservé dans les vieux-Rhône de Chautagne (CH) et de Pierre-Bénite (PB).

## 5 Leçons générales pour les restaurations futures

### 5.1 Validation de l'approche prédictive

L'originalité principale du suivi scientifique a été de tester des prédictions des changements de densité des taxons (ex : espèces ou groupes d'espèces) de la façon la plus indépendante possible, à partir de modèles construits sur d'autres sites et avant restauration. Par exemple, les modèles utilisés pour prédire l'effet des changements de débits réservés dans le chenal sont semblables à ceux régulièrement utilisés dans d'autres cours d'eau pour les études d'impacts de renouvellement de concessions (ex : estimhab). Ainsi, le test de prédictions sur le Rhône constitue un retour d'expérience plus général de l'utilité des modèles d'habitat physique. Pour de nombreuses espèces de poissons des vieux-Rhône comme pour les invertébrés du chenal et des lônes, des validations des prédictions ont été obtenues (Fig. 15). Les prédictions sont particulièrement précises dans les sites où le changement de débit minimum est fort. En revanche, les conclusions sont plus floues dans les sites où les changements de débit minimum sont inférieurs à un facteur 2.

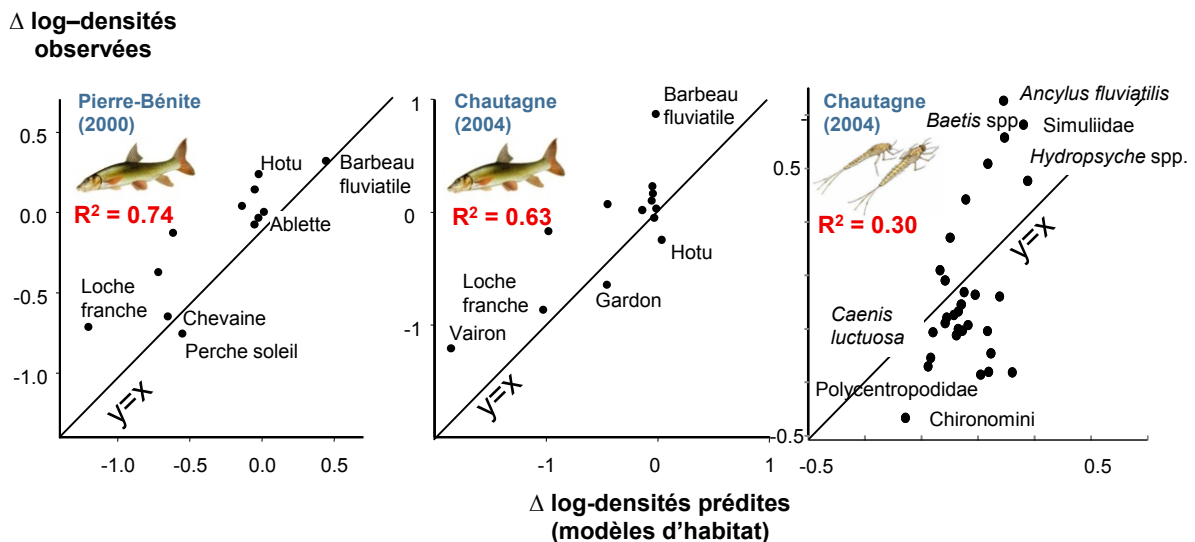


Fig. 15 – Exemples de validation de modèles d'habitat prédisant les changements de densité de poissons (Lamouroux et Olivier, 2015) et de macroinvertébrés (Mérigoux et al., 2015) dans le chenal principal. Ces tests ont été réalisés sur 4 secteurs restaurés du Rhône et pour un sous-ensemble d'espèces dont les préférences hydrauliques sont connues.

La prédiction des changements de densité après restauration est globalement plus précise dans le chenal principal du fleuve que dans les lônes. Néanmoins, des validations correctes de prédictions ont été obtenues dans les lônes complètement reconnectés au chenal principal. Il est vraisemblable que dans les milieux à courant permanent, les contraintes hydrauliques représentent le facteur dominant déterminant la distribution des espèces et rendant donc la modélisation plus "simple". La figure 16 montre la complexité de la relation densités prédites / densités observées pour les lônes reconnectées. Si l'on peut être relativement confiant concernant la possibilité de prédire correctement les changements pouvant intervenir dans les systèmes où les contraintes hydrauliques sont les plus marquées, la recherche d'autres variables explicatives déterminantes doit être poursuivie pour les systèmes à plus faible

connectivité. Les variables liées à la connectivité verticale (régime thermique et oxygénation), ainsi que la structure de la végétation aquatique semblent être actuellement les meilleurs candidats pour atteindre cet objectif.

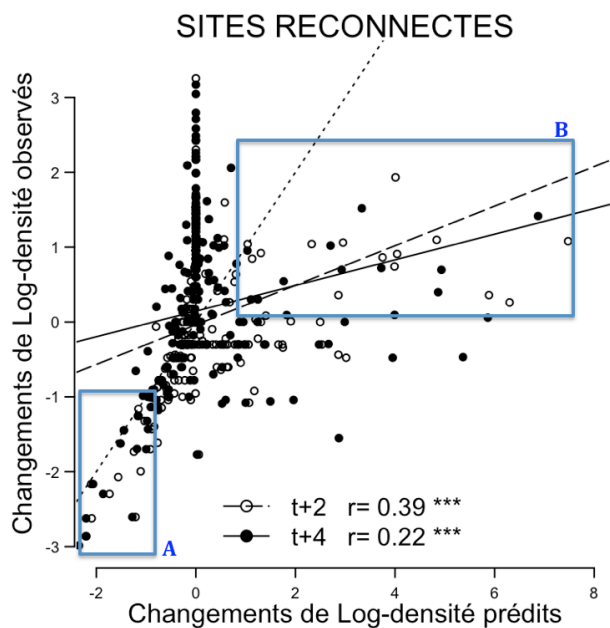


Fig. 16 – Relation entre changements de densité prédits et observés (à T+2 et T+4) pour 54 taxons modélisés dans 8 sites reconnectés (En l'Île, Vachon, Mathan, Ponton aval et Molottes aval). La ligne en pointillés fins est la relation  $y=x$ . A : sites dans lesquels la diminution de taxons lénitophiles (*Cloeon dipterum*, *Bithynia tentaculata*, *Haitia acuta*, *Coenagrion puella / pulchellum*) est bien prédite ; B : sites dans lesquels l'augmentation de la densité de taxons rhéophiles (*Psychomyia pusilla*, *Potamanthus luteus*, *Gammarus pulex* & *fossarum*, les exogènes *Potamopyrgus antipodarum* et *Corbicula fluminea*) observée est encore inférieure aux prédictions.

## 5.2 Optimisation des suivis de restauration

Comme le suivi des effets de la restauration du Rhône a concerné de nombreuses combinaisons (sites  $\times$  espèces  $\times$  effort d'échantillonnage), il a constitué une occasion unique de quantifier la capacité d'un protocole de suivi donné à détecter des changements d'abondance des espèces (Vaudor *et al.*, 2015). Les résultats de ces analyses biostatistiques montrent l'importance, au delà du nombre de points d'échantillonnage, du nombre de campagnes pré- et post-restauration pour augmenter la puissance statistique de détection des effets. Par exemple, pour un effort d'échantillonnage comparable à celui du Rhône, la probabilité de détecter des changements de densité importants (facteur 5) d'une espèce donnée est  $\sim 55\%$  avec 4 campagnes et  $\sim 76\%$  avec 16 campagnes (Fig. 17). Ces estimations dépendent de nombreux facteurs dont la variable biologique d'intérêt (ex : une espèce plus ou moins grégaire, une métrique de communauté). Néanmoins, la conclusion générale est claire : tirer des leçons des opérations de restauration impose de définir des efforts de suivis à plusieurs niveaux, dont des efforts poussés sur certaines opérations de restauration "pilotes" (avec plus de 5 campagnes d'échantillonnage avant et après restauration).

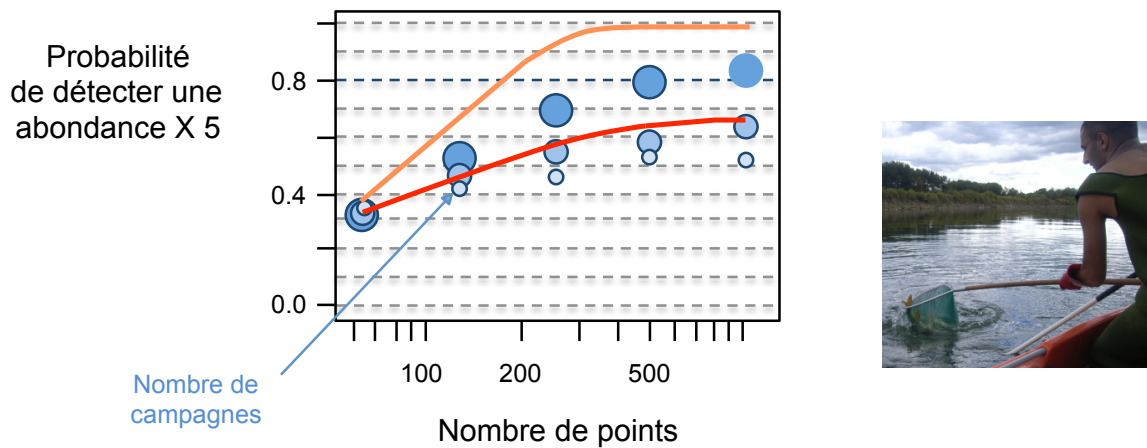


Fig. 17 – Les résultats de Vaudor et al. (2015) permettent de quantifier a priori la probabilité de détecter un changement donné d'abondance (ici  $\times 5$ ) en fonction de l'abondance initiale de l'espèce, de son degré de grégarisme, du nombre de points de pêche et du nombre de campagnes. Dans l'exemple ci-dessus d'une espèce "moyenne", les différents cercles correspondent à l'effet du nombre de campagnes (4, 8 ou 16).

### 5.3 Définition des attendus de restauration et lien avec l'approche prédictive, identification de "pistes" d'actions pour aider à l'atteinte des objectifs

Les retours d'expériences sont maintenant suffisamment avancés pour guider les nouvelles actions et le choix des lînes sur lesquelles intervenir. Cela peut concerner la définition des nouveaux débits réservés ou encore la sélection de lînes à restaurer, à partir d'un diagnostic *a priori* de la diversité et de la durabilité des types fonctionnels. Les objectifs de la réhabilitation écologique des lînes et de leur reconnexion avec le chenal principal peuvent être divers : augmentation de la diversité d'habitats et de la biodiversité associée, biologie de la conservation ou prise en compte d'usages. Sur le plan scientifique, la phase de définition des attentes en termes de changements écologiques après restauration est une étape importante. Elle doit permettre i) d'orienter les choix techniques méthodologiques en termes de restauration (ampleur des modifications de débit, travaux d'ingénierie dans le cas de la réhabilitation des chenaux et des annexes fluviales, ...) et ii) de formuler clairement des hypothèses relatives aux effets attendus des procédures de restauration sur les milieux (modification de la structure et du fonctionnement physique et éventuellement chimique) et sur les modifications consécutives au sein des biocénoses. Elle permet également de définir les besoins en termes de suivis et *in fine* d'optimiser l'analyse des effets des mesures de restauration. Ces objectifs peuvent être précisés à l'échelle du site restauré ou de l'ensemble d'un secteur.

De façon générale, des améliorations écologiques notables liées à des augmentations de débits réservés sont attendues sur les secteurs où ce débit était encore très bas avant le 1<sup>er</sup> janvier 2014 (ex : Baix-le-Logis-Neuf, Péage-de-Roussillon) et où se sont maintenues des populations d'espèces de grands fleuves. Les modèles suggèrent un effet non-linéaire de l'augmentation des débits : là où les débits ont été augmentés, obtenir des changements de structures de peuplements d'une amplitude comparable à ceux déjà observés demanderait des augmentations de débits beaucoup plus importantes et peu réalistes pour les gestionnaires. Sur l'ensemble des secteurs, une gestion optimisée des vitesses de montée et de descente des

débites lors des manœuvres de barrage de dérivation serait à explorer, notamment afin de limiter les impacts négatifs sur les jeunes stades de développement de poissons (ex : piégeage lors des phases d'abaissement), ainsi que les répercussions des éclusées du Haut-Rhône sur les vieux-Rhône à certaines périodes.

Les facteurs physiques contrôlant la diversité fonctionnelle des lônes ont été relativement bien identifiés au cours des précédents suivis. Grâce aux résultats obtenus, il est maintenant possible, pour les annexes fluviales suivies, d'établir un lien entre des paramètres physiques jouant un rôle clef dans l'évolution morpho-sédimentaire des bras restaurés et la composition et la richesse taxonomique des peuplements d'invertébrés aquatiques qui s'y établissent. Il existe donc maintenant un cadre typologique permettant de positionner (avant restauration) les lônes à restaurer afin de s'assurer que les scénarios de restauration envisagés permettent de maximiser cette diversité fonctionnelle sur le tronçon d'intervention. Ainsi, les modèles liant contrôles hydrauliques et sédimentation permettent de positionner telle ou telle lône à restaurer à un niveau approprié dans la typologie, notamment en fonction de la cote de connexion amont qui contrôle les fréquences de débordement. En conséquence, il devient donc possible de mieux définir les objectifs de restauration des annexes fluviales, c'est-à-dire leur position au sein de la typologie actuellement disponible, en déterminant les caractéristiques de connexion amont des lônes à restaurer. À l'heure actuelle, ce travail ne peut pas encore être réalisé « en routine » et nécessite une collaboration avec les équipes de recherche. Cette démarche paraît d'autant plus opportune sur le Rhône médian car la connexion amont des bras est bien souvent régie par une digue basse et non par un bouchon sédimentaire très atterri et boisé. Ces évolutions fonctionnelles n'ont pas encore été entreprises et mériteraient d'être conduites et suivies sur de prochains sites, y compris sur le Haut-Rhône, pour validation.

La restauration des formes est très souvent pérenne car le lit du Rhône est souvent figé du fait du pavage et de l'absence de transport solide. Lorsque les formes fluviales sont mobiles (seuil au droit de l'entrée amont de Ciselande sur Pierre Bénite, seuil naturel au droit de l'extrémité aval de la Malourdie en Chautagne), la connectivité peut être affectée, conduisant à des atterrissements par modification de la ligne d'eau. De fait, les réflexions actuelles concernant les potentialités de redynamisation du lit (recharge sédimentaire, reprise de l'érosion résultant de l'enlèvement des digues basses des casiers Girardon et des tenons) s'intègrent dans une analyse plus globale de la restauration de l'ensemble des annexes fluviales. De telles actions de remobilisation de sédiments peuvent conduire à renforcer la connectivité en relevant localement le niveau d'eau dans le bras actif ou au contraire la réduire, notamment en favorisant la formation d'un bouchon graveleux à l'entrée amont de certains bras reconnectés. Il est ainsi important que le « design » de futurs bras secondaires prenne en compte un transport solide potentiel et se soucie de minimiser les risques de formation de bouchon amont. Un travail de recherche sur l'analyse de la dynamique locale des processus d'érosion-sédimentation est donc à envisager.

## 6 Conclusion et poursuite du programme

L'effet de la restauration est clairement identifié malgré une structuration spatio-temporelle forte des peuplements aquatiques révélant l'existence de tendances de long terme liées à d'autres facteurs, comme l'aménagement progressif du Rhône ou l'évolution climatique récente, et aux dynamiques d'espèces invasives potentiellement favorisées par la restauration. Le travail réalisé a permis de poursuivre le test et le développement de modèles prédictifs des effets de la restauration (construction d'éléments manquants comme les préférences des invertébrés dans le chenal et dans les lônes). Le suivi post-restauration a permis de démontrer l'efficacité de cette approche. Les outils développés et les résultats acquis permettent d'envisager la définition des objectifs des restaurations futures de façon plus pertinente. Par exemple, les avancées notables en termes d'identification et de quantification des variables qui régissent les modalités de connexion hydrologique des bras restaurés et le lien avec les caractéristiques biologiques de ces lônes permettent d'envisager la définition des objectifs écologiques associés à la restauration des anciens bras du fleuve de manière beaucoup plus efficace (diagnostic *a priori* de la diversité et de la durabilité des types fonctionnels) que lors de la première phase de restauration (Pierre-Bénite et Haut-Rhône).

La qualité des résultats obtenus démontre que les efforts importants en termes d'acquisition de données pré et post-restauration, aussi bien d'un point de vue quantitatif (suivis multi-groupes, effort d'échantillonnage, durée) que qualitatif (standardisation de l'échantillonnage, précision au niveau de l'identification des taxons de macroinvertébrés) sont essentiels. Les exemples présentés montrent que différents groupes biologiques ont une capacité variable à refléter les effets de la restauration. En particulier, les poissons ont été utiles pour apprécier des modifications de long terme, tandis que les suivis des peuplements de macroinvertébrés ont été importants pour refléter l'augmentation de la diversité biologique de la plaine alluviale. L'approche prédictive développée pour les poissons et les macroinvertébrés n'a pas pu être mise en œuvre pour les communautés de macrophytes aquatiques en raison d'un effort d'échantillonnage trop faible, tant en ce qui concerne le nombre de lônes suivies que la fréquence d'échantillonnage. Les données collectées sont exploitées pour renseigner le diagnostic écologique mis au point par Amoros, Bornette & Henry (2000) et consultable sur le site web dédié au suivi de la restauration.

La question de l'évaluation de l'importance des interactions entre les espèces exogènes et les espèces natives, composante biologique dont on attend une réaction en lien avec les opérations de restauration, reste ouverte. L'effet "espèces invasives" est notable sur le chenal mais commun à l'ensemble des sites, restaurés ou non. Il est visible mais reste d'amplitude réduite dans les lônes, ou l'augmentation des abondances d'espèces invasives ne diminue pas celles des espèces natives (Paillex *et al.*, 2015). Des travaux couplant des approches de terrain et des études expérimentales seraient sans doute bénéfiques pour mieux comprendre ces interactions et les quantifier.

A mi-chemin des opérations de restauration, le retour d'expérience permet de préciser les objectifs de la poursuite du suivi scientifique (dimensionnée actuellement pour 2014-2018):

\* *Évaluation de la pérennité des habitats* : la poursuite de l'étude du fonctionnement hydrosédimentaire des lônes est fondamentale pour guider la gestion quantitative de ces

milieux, guider le choix des sites à restaurer en maximisant la diversité des types fonctionnels possibles, et évaluer *a priori* la durée de vie de ces milieux. Elle passe par la poursuite de la modélisation statistique des fréquences de connexions et des caractéristiques hydrauliques des lônes restaurées, à des échelles plus fines que celle de la modélisation 1D du fleuve (collaboration RhonEco – OSR). L'intégration d'objectifs de restauration portant plus sur des aspects dynamiques du fonctionnement hydro-sédimentaire des lônes sera souhaitable.

\* *Analyse et prévisibilité des réponses écologiques, poursuite des tests* : les sites ayant permis de mettre en évidence des effets significatifs de la restauration sont essentiellement ceux où les débits réservés ont été fortement augmentés (Pierre-Bénite – Chautagne), et ceux contenant une forte diversité de lônes (Belley – Brégnier-Cordon). La poursuite du suivi devrait renforcer ce retour d'expérience original sur différents sites du Rhône moyen et du Bas-Rhône où le débit a été fortement modifié récemment (ex : Péage-de-Roussillon, Baix-le-Logis-Neuf) et d'autres où il est prévu de restaurer une diversité de lônes (ex : Donzère-Mondragon, Miribel).

\* *Dynamiques des réponses / temps de réponse* : quelques éléments sur les dynamiques interannuelles des peuplements de poissons (Daufresne *et al.*, 2015) ont été mis en évidence et notamment le rôle des crues et de la température (ex : la densité annuelle globale est favorisée par des températures printanières élevées). Mais cette question nécessite de séparer les tendances d'évolution des sites, l'effet de la restauration et l'effet des variations environnementales annuelles (chasses, crues, températures). La poursuite du suivi permettra d'approfondir cette problématique, même si cela reste délicat puisque seule environ 0.1% de la surface de chaque vieux-Rhône est échantillonnée chaque année. L'idée est d'identifier des similitudes de formes dans les trajectoires post-restauration des différents sites (structures des peuplements) et de les relier aux variables environnementales annuelles (prévu en 2015-16).

\* *Complémentarité lônes-chenal-affluents* : une étude plus précise du fonctionnement écologique des lônes et des dynamiques sur certains sites (Brégnier-Cordon, Péage-de-Roussillon, Donzère) permettra de mieux comprendre la complémentarité lônes – chenal. Afin de mieux cerner l'échelle spatiale du fonctionnement des populations et les conséquences possibles sur les effets de la restauration, une étude des flux génétiques entre tronçons du fleuve (vieux-Rhône, retenues, canaux, lônes) et affluents sur 2 aménagements (Donzère-Mondragon et Baix-le-Logis-Neuf) a débuté en 2014 pour 5 espèces de poissons.

Enfin, l'ensemble de ces travaux alliant objectifs écologiques (amélioration de la diversité des types d'annexes fluviales à l'échelle d'un secteur, tant du point de vue hydro-morpho-sédimentaire que de la biodiversité qu'elles abritent) et processus physiques (hydrologie – hydraulique – transport sédimentaire) suggère l'existence de liens forts entre les programmes Rhôneco et l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône).

## Références citées dans le texte

- Amoros C., Bornette G. & Henry C.P. (2000) Environmental auditing. A vegetation-based method for ecological diagnosis of riverine wetlands. *Environmental Management*, 25: 211-227.
- Barthélémy C. & Armani G. (2015) A comparison of social processes at three sites of the French Rhône River subjected to ecological restoration. *Freshwater Biology*, 60 (6): 1208-1220.
- Castella E., Beguin O., Besacier-Monbertrand A.-L., Hug Peter D., Lamouroux N., Mayor Siméant H. *et al.* (2015) Testing predictions of changes in aquatic invertebrate communities after the restoration of floodplain connectivity in a large river (French Rhône). *Freshwater Biology*, 60 (6): 1131-1146.
- Carlisle D.M., Wolock D.M & Meador M.R. (2011) Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 264–270.
- Daufresne M., Veslot J., Capra H., Carrel G., Poirel A., Olivier J.-M. *et al.* (2015) Fish community dynamics (1985-2010) in multiple reaches of a large river (French Rhône) subjected to various degrees of flow restoration and other environmental changes. *Freshwater Biology*, 60 (6): 1176-1191.
- 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 (6): 1118-1130.
- 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 introduction to the Rhône project. *Freshwater Biology*, 60 (6): 1069-1084.
- 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 (6): 1104-1117.
- Olden J.D., Konrad C.P., Melis T.S., Kennard M.J., Freeman M.C., Mims M.C. *et al.* (2014) Are large-scale flow experiments informing the science and management of freshwater ecosystems? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 176–185.
- Paillex A., Castella E., zu Ermgassen P.S.E. & Aldridge D.C. (2015) Testing predictions of changes in alien and native macroinvertebrate communities and their interaction after the restoration of a large river floodplain (French Rhône). *Freshwater Biology*, 60 (6): 1162-1165.
- Riquier J., Piégay H. & Šulc Michalkova M. (2015) Hydromorphological conditions in 18 restored floodplain channels of a large river: linking patterns to processes. *Freshwater Biology*, 60 (6): 1085-1103.
- Tockner K. & Stanford J.A. (2002) Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29, 308-330.
- Vaudor L., Lamouroux N., Olivier J.-M. & Forcellini M. (2015) How sampling and population characteristics influence the statistical power to detect changes in abundance: an application to large river restoration. *Freshwater Biology*, 60 (6): 1192-1207.