



HAL
open science

Suivi scientifique du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône. Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve. Synthèse générale 2019

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Emmanuel Castella, Sylvain Dolédec, Maxence Forcellini, Camille Lebrun, Pierre Marle, Hélène Mayor, Hervé Piégay, Jérémie Riquier

► **To cite this version:**

Jean-Michel Olivier, Nicolas Lamouroux, Emmanuel Castella, Sylvain Dolédec, Maxence Forcellini, et al.. Suivi scientifique du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône. Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve. Synthèse générale 2019. [Rapport de recherche] Université de Lyon (COMUE); CNRS; INRAE; Université de Genève. 2019. hal-02875364

HAL Id: hal-02875364

<https://hal.science/hal-02875364>

Submitted on 24 Apr 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 du programme de restauration hydraulique et
écologique du Rhône

Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve

Synthèse générale

(2019)



Table des matières

1	Introduction	3
2	La restauration du Rhône	6
3	Organisation du suivi	7
4	Bilan du suivi des Vieux-Rhône et des lônes	11
4.1	Réponses aux augmentations de débit réservé	11
4.1.1	Réponse des communautés piscicoles aux augmentations de débit réservé.	12
4.1.1.1	Vieux Rhône du Haut-Rhône : Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon	15
4.1.1.2	Vieux-Rhône de Pierre-Bénite.....	24
4.1.1.3	Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Bais-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère	26
4.1.2	Réponse des communautés de macroinvertébrés benthiques aux augmentations de débit réservé. 33	
4.1.2.1	Signification des changements observés en termes de qualité d'habitat.....	38
4.1.2.1.1	Gain de « tolérance au courant »	38
4.1.2.1.2	Gain de qualité écologique.....	39
4.1.2.2	Signification des changements observés en termes de résilience et résistance des communautés42	
4.1.2.3	Signification des changements observés en termes de réponses fonctionnelles et trophiques	45
4.2	Evolution post-restauration des lônes	49
4.2.1	Une diversité de conditions d'habitats, de trajectoires évolutives et de durées de vie en lien avec le régime d'écoulement en crue des bras restaurés (Haut-Rhône, Pierre-Bénite) ...	49
4.2.2	Vers une prédiction <i>a priori</i> des conditions hydromorphologiques des bras restaurés et non restaurés généralisée à l'ensemble du corridor rhodanien	53
4.2.3	Réponse des communautés de macroinvertébrés à la réhabilitation écologique des lônes.	58
4.2.3.1	1. Résultats globaux sur l'ensemble des secteurs alluviaux étudiés (2003-2017).	58
4.2.3.1.1	Secteurs, lônes étudiées et calendrier.	58
4.2.3.2	Une image globale des communautés d'invertébrés de la zone alluviale du Rhône.	58

4.2.3.3	Un bilan concernant 11 îlons du Haut-Rhône, 10 ans après restauration.....	64
4.2.3.3.1	Îlons prises en compte et calendrier.	64
4.2.3.3.2	Bilan global des métriques faunistiques.	65
4.2.3.3.3	Restauration et trajectoire temporelle des communautés d'invertébrés.	65
4.2.3.4	Un bilan concernant 20 îlons du Bas-Rhône (2007 – 2017).	72
4.2.3.4.1	Îlons prises en compte et calendrier.	72
4.2.3.4.2	Éléments marquants de l'état initial et premiers changements post-restauration. 73	
4.2.4	Assemblages de poissons dans les îlons	76
4.2.4.1	Îlons du Haut-Rhône	76
4.2.4.2	Îlons du Bas-Rhône.....	81
4.2.5	Perspective : aide à la définition des objectifs et gestion. Modélisation prédictive des assemblages d'invertébrés d'un chenal latéral après une reconnexion hydrologique avec le fleuve 82	
4.2.5.1	Contexte et méthodes	82
4.2.5.2	Résultats et discussion.....	83
5	Discussion et perspectives	86
6	Annexes	97

1 Introduction

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône est un programme d'envergure et avec des objectifs ambitieux. Ce programme a été mis en œuvre dans un contexte où le fleuve est utilisé à des fins de production énergétique, comme une voie de navigation importante et où la vallée du Rhône est un axe de développement urbain, industriel et économique de première importance. Dans ce cadre, définir des objectifs de restauration écologique qui s'inscrivent dans une vision à long terme et qui visent à concilier les usages du fleuve et le maintien d'une diversité des habitats, et la biodiversité associée, au sein des plaines alluviales constitue un vrai challenge. D'abord porté par les collectivités locales du secteur de Pierre-Bénite, en aval immédiat de Lyon, puis par celles du Haut-Rhône avec comme *leitmotiv* le slogan « *retrouver un fleuve vif et courant* », intégré dans le « Programme Décennal de Restauration Hydraulique et Ecologique du Rhône », puis dans les objectifs du Plan Rhône, il est mis en œuvre sur le Rhône depuis 1999, date des premières réhabilitations de lônes à Pierre-Bénite et de l'augmentation du débit réservé dans ce Vieux-Rhône. Avant ces actions de restauration écologique, des travaux avaient été initiés dans différents secteurs du Rhône comme par exemple à Brégnier-Cordon, à Péage-de-Roussillon (Réserve Naturelle des Îles de la Platière) ou à Donzère-Mondragon. Le programme décennal de restauration comportait à l'origine trois volets : la réhabilitation des axes de migration pour les grands migrateurs (aloses, anguilles, lamproies), l'augmentation des débits réservés dans 8 tronçons prioritaires (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage, Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon, Montélimar, Donzère-Mondragon) et la réhabilitation écologique de certaines annexes fluviales (lônes), tronçons et lônes pour lesquels un fort potentiel écologique avait été identifié. La mise en œuvre de la Loi sur L'eau et les Milieux Aquatiques a conduit à l'augmentation du débit réservé sur une partie des autres aménagements hydroélectriques du Rhône le 1^{er} janvier 2014. Parmi ceux-ci, les enjeux écologiques potentiels liés à l'augmentation du débit minimum dans le vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf ont été identifiés comme importants (Figure 1).

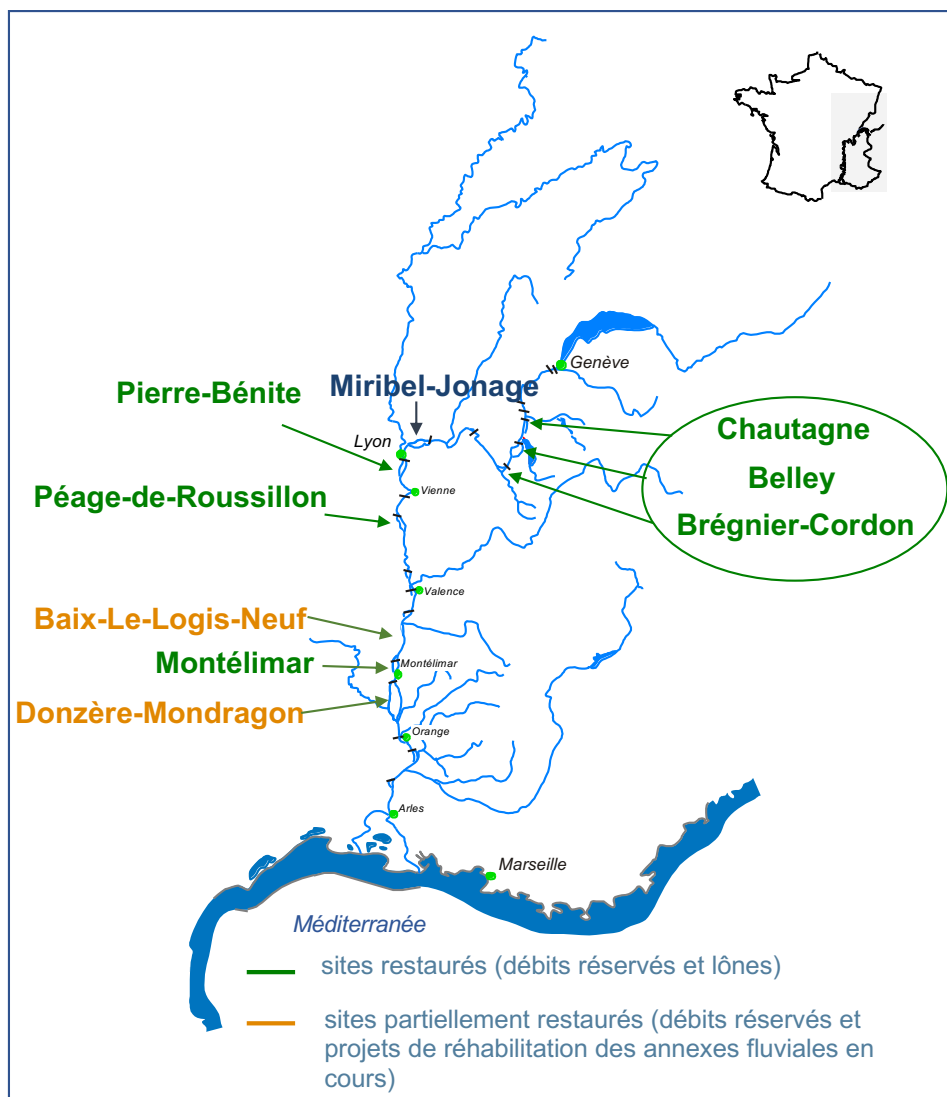


Figure 1 - Carte du Rhône montrant les 9 sites suivis dans le cadre du programme RhônEco. Les sites restaurés sont indiqués en vert, les sites partiellement restaurés (augmentation du débit réservé en janvier 2014) en orange.

Par la suite, l'analyse de l'altération du transport solide à l'échelle du fleuve a révélé l'importance de l'impact des endiguements « Girardon » édifiés le long du Rhône à partir de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. Ces aménagements, constitués d'un enchevêtrement de digues longitudinales, de seuils et d'épis qui ont favorisé l'incision du cours principal, tandis qu'en arrière des digues longitudinales des traverses et des tenons ont fortement contribué à piéger les sédiments en transit lors des crues dans les marges alluviales. Ensuite, la construction des ouvrages hydroélectriques a réduit considérablement la continuité amont-aval du transport des sédiments grossiers. Une réflexion s'est donc construite autour de la nécessité de démanteler une partie des endiguements du 19^{ème} siècle afin de promouvoir, localement, l'érosion latérale du lit et si possible, dans certaines limites, le transport et la

recharge sédimentaire passive dans les tronçons court-circuités par les barrages. Ces actions sont parfois complétées par des opérations locales de recharge sédimentaire active.

Toutes ces opérations ont pour ambition d'améliorer la qualité de l'habitat physique dans la plaine alluviale aménagée en diversifiant les conditions d'habitat par l'augmentation des débits réservés dans les sections court-circuitées et par la réhabilitation de certaines annexes fluviales en modifiant les surfaces en eau, les profondeurs et les modalités de connexion au chenal courant.

Dès les premières réflexions sur la restauration du Rhône, la nécessité de mettre en place un suivi scientifique dédié à l'évaluation de l'efficacité des opérations de restauration écologique a été mise en avant par les acteurs et les financeurs du programme. Depuis le début des années 1980, la communauté scientifique régionale, fédérant des chercheurs de différentes disciplines, s'est mobilisée autour des problématiques concernant l'écologie du Rhône au sens large et ce aussi bien dans un cadre de recherche fondamentale que de coopération avec les acteurs du fleuve (Services de l'Etat, Agence de l'Eau, CNR, EDF). C'est dans ce contexte que les scientifiques ont développé des travaux autour de la problématique de la restauration écologique du fleuve (programme RhônEco). L'ensemble du projet est conçu comme une étude pluridisciplinaire et constitue une thématique importante au sein de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et de son site « Vallée du Rhône » qui est également labellisé Observatoire Hommes-Milieux (OHM) (<https://ohm-vallee-du-rhone.in2p3.fr/>). Ce travail de recherche méthodologique a abouti à la proposition d'un certain nombre de métriques et d'indicateurs permettant de mesurer l'évolution des paramètres physiques et biologiques de l'écosystème en réponse aux modifications des caractéristiques physiques de l'habitat suite à la restauration du fleuve. Le programme RhônEco ne prend pas en charge le suivi de la réhabilitation des axes de migration pour les grands migrateurs.

En 2014, une synthèse des résultats acquis a été publiée, basée essentiellement sur les données collectées dans le cadre du suivi des 4 sites restaurés entre 2000 et 2006 (Pierre-Bénite, Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon). Ce travail d'analyse du retour d'expérience des résultats acquis sur le Rhône a donné lieu à la publication d'un numéro spécial de la revue *Freshwater Biology* en juin 2015 (« Towards a predictive restoration ecology : a case study of the French Rhône River ») et à l'édition par le GRAIE d'un document de synthèse à destination des acteurs du Rhône et des financeurs du programme (téléchargeable à http://www.graie.org/graie/graiedoc/doc_telech/brochure_RhonEco_restauracion_ecologique.pdf). Ces travaux s'appuient sur l'utilisation de modèles prédictifs développés dans le cadre de RhônEco et démontrent la capacité actuelle de prédire, au moins en partie, les changements physiques (évolution morpho-sédimentaires des bras restaurés) et biologiques (abondances des espèces, biodiversité) induits par les actions de restauration écologique.

Le programme RhônEco :

- fournit un observatoire de l'évolution des sites restaurés afin d'évaluer si les objectifs de la restauration sont atteints (mesurer des changements),
- permet l'amélioration de la définition des objectifs de restauration écologique en intégrant dans la démarche les résultats et conclusions obtenus sur les sites déjà restaurés et en mobilisant les outils développés dans le cadre de RhônEco.

Ce document présente de manière synthétique les derniers résultats du programme RhônEco et dresse un bilan des retours d'expériences sur les sites restaurés et sur les développements méthodologiques réalisés au sein du Programme RhônEco. Il présente en particulier le bilan scientifique du programme 2014-2018, après la seconde vague d'opérations de restauration essentiellement consacrées aux sites du Bas-Rhône. Dans la continuité des programmes antérieurs, la période 2019-2023 consolidera le bilan global, notamment sur le Bas-Rhône, permettra de tester la généralité spatiale des modèles prédictifs et d'optimiser la dimension "observatoire de long-terme" des suivis dans un contexte d'influences multiples (modification des débits, restauration des lônes et des marges alluviales, gestion sédimentaire, changement climatique).

2 La restauration du Rhône

La restauration écologique du Rhône a pour objectif de réhabiliter une diversité d'habitats physiques caractéristiques d'un grand fleuve et fait suite à la régulation des grands fleuves d'Europe comme le Rhône, le Rhin ou le Danube. Les leviers qui peuvent être mobilisés pour atteindre ces objectifs sont :

- l'augmentation du débit du cours d'eau en aval des barrages pour restaurer les paramètres hydrauliques des habitats (largeur, profondeur, vitesses d'écoulement, contrainte au fond) et la distribution des fréquences des types d'habitats définis par des combinaisons de valeurs de ces variables ;
- des travaux de génie civil destinés à recreuser, remodeler, draguer, reconnecter d'anciens bras ayant évolué vers une déconnexion totale du chenal principal et/ou un atterrissement depuis la mise en service des aménagements hydroélectriques.

Les axes de restauration concernent donc des modifications des caractéristiques physiques des habitats, dans le chenal courant (Vieux-Rhône) ou dans les annexes fluviales.

Dans les Vieux-Rhône concernés par le programme RhônEco, les débits réservés ont été modifiés entre 2000 et 2014 (Tableau 1). Ces tronçons représentent un linéaire cumulé de ~110 km sur les 522 km du cours français du Rhône. Les vitesses de courant moyennes peuvent être multipliées par 5 dans certains Vieux-Rhône suite à l'augmentation de débit réservé (ex : à Pierre-Bénite).

Tableau 1 - Valeurs de débits réservés dans les vieux-Rhône suivis.

Secteurs	Débit moyen annuel du Rhône total m ³ .s ⁻¹	Date de restauration	Débit réservé m ³ .s ⁻¹	
			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	1490	01/2014	60	75,4

La réhabilitation des îlons concerne une quarantaine de sites dont 32 font l'objet d'un suivi dans le cadre de RhônEco. Des îlons témoins non-restaurés sont également intégrés au suivi. Les modalités de réhabilitation varient en fonction du contexte géographique et historique du secteur :

- reconnexion amont et aval avec ou sans creusement,
- reconnexion aval, généralement avec creusement et/ou dragage,
- dragage et approfondissement d'une îlon existante,
- création de mares plus ou moins temporaires.

A Péage-de-Roussillon et à Donzère, en raison de l'intensité des endiguements « Girardon », la réhabilitation des îlons intègre parfois des opérations de démantèlement des digues et épis anciens afin de reconnecter les îlons au Vieux-Rhône, c'est le cas par exemple pour la îlon de la Boussarde à Péage-de-Roussillon, des îlons Grange écrasée, Dames, Banc rouge et Désirade à Donzère.

3 Organisation du suivi

Dès la construction du programme RhônEco, l'objectif était de développer des modèles prédictifs afin d'estimer au mieux les effets des procédures de restauration sur les composantes physiques du milieu et les incidences sur la structure des communautés aquatiques. Plusieurs exigences devaient être respectées pour atteindre cet objectif :

- être en mesure de modéliser les changements des variables physiques clefs (i.e. ayant un effet avéré sur l'évolution des facteurs physiques importants pour la caractérisation des habitats et l'évolution des biocénoses) en lien avec les procédures de restauration,
- définir des métriques pertinentes pour évaluer la réponse des organismes aux changements physiques consécutifs à la mise en place des procédures de restauration,

- organiser des suivis compatibles avec les exigences méthodologiques et les moyens techniques et financiers, standardiser les méthodes d'échantillonnage,
- disposer de données pré-restauration suffisamment pertinentes (i.e. sur plusieurs années avant restauration) et sur suffisamment de sites restaurés,
- disposer de données post-restauration sur le moyen-long terme afin de les comparer aux prédictions issues des modèles et d'évaluer le succès de la restauration écologique.

Le programme RhônEco bénéficie d'un financement long et utilise des données collectées parfois sur une durée de vingt ans avant la restauration des sites. Ce cas de figure est exceptionnel à l'échelle internationale dans une période où la restauration écologique des cours d'eau a pris une place de premier plan, notamment en lien avec les exigences réglementaires.

D'un point de vue technique, le suivi des Vieux-Rhône restaurés concerne essentiellement la collecte de données sur les peuplements de poissons et de macroinvertébrés benthiques (détail des protocoles et des métriques en annexe 1).

Les peuplements de poissons sont échantillonnés par pêche électrique, la méthode utilisée consiste en la collecte de nombreux petits échantillons répartis dans des stations de pêche situées dans les Vieux-Rhône (Nelva *et al.*, 1979). Les données sont collectées annuellement et l'effort de pêche est dimensionné en fonction de la longueur des Vieux-Rhône.

Les macroinvertébrés benthiques ainsi que les paramètres hydrauliques sont échantillonnés sur les mêmes stations selon un tirage aléatoire sur 20 transects. Les invertébrés sont récoltés avec un cylindre de Hess muni d'un filet de vide de maille de 200 μm jusqu'en 2013 puis 400 μm à partir de 2014. Les premiers centimètres de substrat et la faune associée sont collectés sur une surface de 0.05 m². Les échantillons sont ensuite triés et les organismes identifiés et dénombrés au laboratoire. La fréquence d'échantillonnage varie de 1 à 3 ans.

Dans la plupart des cas, la réhabilitation des annexes fluviales ouvre des milieux relativement « neufs » en raison de l'intensité des travaux de génie civil déployés pour atteindre les objectifs fixés. Ces milieux connectés ou non à leur extrémité amont en dehors des périodes de crues, sont ensuite soumis aux aléas du régime hydrologique et sont parcourus de manière plus ou moins intense par des flux d'eau et de sédiments. Il s'en suit une transformation progressive de leur profil en long, de la composition granulométrique des fonds, de leurs caractéristiques biologiques (nature et intensité des processus écologiques) et des biocénoses qui les habitent.

Le suivi hydromorphologique des bras repose essentiellement sur des mesures de terrain réalisées en moyenne toutes les deux années sur chaque site monitoré. Il s'appuie sur des mesures de hauteurs d'eau et d'épaisseurs des sédiments fins (fraction < 2 mm) et des

analyses granulométriques de sédiments prélevés lors des campagnes. Ces mesures permettent d'évaluer la trajectoire évolutive des bras en termes de fonctionnement hydro-sédimentaire et de caractériser des processus clés qui contrôlent leur évolution avant et après travaux (érosion, dépôt). En parallèle, une attention particulière est portée à la caractérisation de la connectivité de surface des bras avec le chenal principal (hydraulique, hydrologie), qui constitue un facteur de contrôle de premier ordre de l'évolution de ces milieux. La finalité du suivi est, d'une part, de créer un retour d'expérience quant à l'incidence des actions de restauration sur les conditions d'habitat dans les bras et l'évolution de ces dernières après intervention, puis (ii) d'évaluer la pérennité potentielle des unités restaurées en tant qu'habitats aquatiques qui dépend en grande partie de leur dynamique de comblement par les fines. La démarche d'ensemble doit permettre d'établir des modèles prédictifs de la réponse hydromorphologique des bras, qui constituent des outils opérationnels importants, notamment pour guider la conception technique des futurs bras à restaurer du fleuve.

Le suivi des communautés de macroinvertébrés benthiques dans les lônes est organisé autour de la définition de 1 à 3 stations d'échantillonnage par lône (amont, intermédiaire, aval). A l'intérieur de chaque station, un tronçon de 30 mètres (selon l'axe amont-aval de la lône) a été choisi pour l'échantillonnage de la macrofaune aquatique. A l'intérieur de chaque tronçon de 30 m, 4 points de prélèvement sont tirés au hasard. En chacun des 4 points une description de la structure de l'habitat (profondeur, courant, sédiment, végétation aquatique, ombrage) est effectuée selon un protocole standard à l'intérieur d'un quadrat de 50 x 50 cm. Dans ces mêmes points, la macrofaune aquatique est échantillonnée à l'intérieur du quadrat de la façon la plus exhaustive possible à l'épuisette (ouverture 15 x 12cm). Le vide de maille est 0.5 mm. La limite de profondeur est d'environ 190 cm (manche de l'épuisette). Les organismes aquatiques sont ensuite triés, identifiés et dénombrés au laboratoire. La fréquence d'échantillonnage est en général de un an sur deux.

Les poissons sont échantillonnés selon un protocole identique à celui mis en œuvre dans les Vieux-Rhône. La fréquence d'échantillonnage est annuelle.

Les macrophytes ont été échantillonnés jusqu'en 2013, le suivi n'a pas été reconduit ensuite.

Le Tableau 2 résume les sites et les thématiques suivis dans le cadre de RhônEco.

Tableau 2 - Récapitulatif des sites (Vieux-Rhône et îlons suivis entre 2003 et 2019) et des thématiques prises en compte dans le suivi actuel du programme de restauration du Rhône. Les sites marqués d'une * ne sont pas réhabilités, le suivi avait été anticipé avant que le programme de restauration de Donzère ne soit fixé.

Situation		Thématiques			
Secteurs	Types de milieu	Poissons	Invertébrés	Végétation	Sédimentation
Chautagne	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône de la Malourdie	X			X
	Lône du Brotalet	X			X
Belley	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône des Luisettes	X	X	X	X
	Lône Moiroud	X	X	X	X
	Lône Béard	X	X	X	X
	Lône Fournier	X	X	X	X
	Anse de Yenne	X	X		X
	Lône de Lucey		X		X
Brégner-Cordon	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône de Chantemerle	X	X	X	X
	Lône des Granges	X	X	X	X
	Lône Vachon	X	X		X
	Lône des Cerisiers	X			X
	Lône des Molottes	X	X	X	X
	Lône Mattant	X	X		X
	Lône du Ponton	X	X	X	X
Lône de la Plaine		X		X	
Canal de Miribel	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	lône Plançon		X		X
	lône Grella		X		X
	lône Vieux-Rhône		X		
	lône de Jonage		X		X
	cours eau Rizan		X		
	étang LIB1		X		
	étang LIB2		X		
Pierre-Bénite	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône de la Table Ronde	X		X	X
	Lône de Ciselande	X		X	X
	Lône de Jaricot	X		X	X
Péage de Roussillon	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône de la Platière	X	X	X	X
	Lône Noyé Nord	X	X	X	X
	Lône Noyé Sud	X			X
	Ilon	X	X	X	X
	Lône de la Boussarde	X	X	X	X
Lône de la Sainte	X	X	X	X	
Montélimar	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône de la Barcasse			X	
	Lône de la Roussette	X	X	X	X
Donzère-Mondragon	Chenal (vieux-Rhône)	X	X		
	Lône Grange écrasée	X	X	X	X
	Lône de Malatras *		X	X	X
	Lône du Carré *	X	X	X	X
	Lône de la République *		X	X	X
	Lône Malaubert & Surelle	X	X	X	X
	Lône du Bayard *	X	X	X	X
	Lône de Caderousse *	X	X	X	X
	Lône des Jones *	X	X	X	X
	Lascombe		X		X
	Dames	X	X		X
	Dion	X	X		X
	Banc Rouge	X	X		X
	Désirade	X	X		X

4 Bilan du suivi des Vieux-Rhône et des lônes

4.1 Réponses aux augmentations de débit réservé

Les procédures de restauration relatives aux modifications de débit minimum dans les Vieux-Rhône ont pour objectif de modifier la distribution spatiale et la proportion de « types » d'habitats caractérisés par des gammes de valeurs de variables physiques (vitesse d'écoulement, shear-stress, largeur, profondeur). Dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite, les vitesses au débit minimum ont été multipliées par 5 en moyenne (de 0.07 à 0.35 m.s⁻¹), dans celui de Chautagne par 2 (de 0.38 à 0.80 m.s⁻¹), moins ailleurs.

Les résultats de l'application de modèles d'habitat sur le Rhône comme ailleurs (Lamouroux *et al.*, 1999, Lamouroux & Capra, 2002) peuvent être synthétisés par quelques descripteurs hydrauliques clés des tronçons de cours d'eau. Les plus importants sont le nombre de Froude au débit médian FR50 et le nombre de Reynolds au débit minimum REM, qui sont des combinaisons du débit Q, de la largeur L et de la hauteur d'eau H du tronçon de cours d'eau considéré. Ces indices sont utiles pour refléter/comparer l'impact de la restauration sur plusieurs sites.

FR50 est un indice hydraulique lié à la morphologie du cours d'eau (proportions de radiers/mouilles). Plus sa valeur est élevée, plus **il reflète l'idée d'un fleuve vif**, de façon comparable sur des sites variés. C'est une variable potentiellement sensible à une modification de seuil transversal. Une augmentation de FR50 augmente la valeur d'habitat relative (par rapport aux autres espèces) des espèces typiques des radiers (barbeau fluviatile, loche franche, chabot, blageon, spirilin).

REM est lié au niveau de débit par unité de largeur. Plus sa valeur est élevée, plus **il reflète l'idée d'un fleuve courant**, de façon comparable sur des sites variés. Il est particulièrement sensible aux changements de débit minimum. Une augmentation de REM augmente la valeur d'habitat relative des espèces typiques d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, toxostome, vandoise, ombre commun). Noter que certaines espèces rhéophiles comme le barbeau sont favorisées à la fois par de fortes valeurs de FR50 et REM.

En pratique, $FR50 = Q50 / (g^{0.5} * H50^{1.5} * L50)$ et $REM = QM / (v * LM)$ où Q50, H50, L50 sont le débit, la hauteur et la largeur mouillée médians ; g est l'accélération gravitationnelle ; QM et LM sont le débit minimum et la largeur correspondante ; v est la viscosité dynamique de l'eau.

Le changement de débit minimum des Vieux Rhône modifie essentiellement la valeur de REM, l'indice de débit. En revanche, l'indice lié à la morphologie est assez peu modifié par le changement de débit.

4.1.1 Réponse des communautés piscicoles aux augmentations de débit réservé.

La proportion d'espèces d'eau courante (i.e. les espèces fortement inféodées aux habitats courants et profonds) est une métrique qui renseigne sur les modifications de structure au sein des peuplements de poissons consécutives à l'augmentation des débits réservés dans le Rhône. Une attention particulière est donc portée aux espèces qui composent cette guildes : ablette, barbeau fluviatile, hotu, toxostome, vandoise, ombre commun.

L'aménagement hydroélectrique, associé à l'urbanisation et l'industrialisation de la Vallée du Rhône, a conduit à une banalisation du corridor fluvial en aval de Lyon et a favorisé le développement des populations des espèces les plus tolérantes aux modifications des conditions d'écoulement, à la chenalisation et à l'endiguement, à la fragmentation des habitats, ou encore au réchauffement des masses d'eau, aux détriments des espèces les plus exigeantes (ombre commun et truite fario, vandoise...). Ainsi, en aval de Lyon, les Vieux-Rhône demeurent quasiment les seuls tronçons où les habitats clefs pour le déroulement du cycle de vie des espèces inféodées aux milieux courants sont encore préservés malgré les conséquences marquées des endiguements de la fin du 19^{ème} siècle (Girardon), la présence des barrages hydroélectriques (altération profonde des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments grossiers, incision et pavage des Vieux-Rhône) et la très forte réduction de débit dans ces tronçons. Dans ces secteurs, l'ablette, le barbeau fluviatile et le hotu sont les principaux représentants de la guildes des espèces d'eau courante.

Une analyse (analyse en composantes principale) réalisée sur un jeu de données renfermant les effectifs des 38 espèces de poissons échantillonnées (Tableau 3) et couvrant les neuf secteurs suivis dans le cadre du programme RhônEco illustre la nette séparation des peuplements en amont et en aval de Lyon (Figure 2).

Tableau 3 - Liste des espèces de poissons échantillonnées dans le cadre du suivi (vieux-Rhône et îlons) et codes associés. L'appartenance des espèces aux guildes de reproduction « phytophile » (P) et « litho-phytophile » (L-P) est indiquée.

Famille	Nom commun	Nom latin	Code	Guilde repro.
Petromyzontidae				
	Lamproie de Planer	<i>Lampetra planeri</i> (Bloch, 1784)	LPP	
Blenniids				
	Blennie fluviatile	<i>Salaria fluviatilis</i> (Asso, 1801)	BLE	
Salmonidés				
	Ombre commun	<i>Thymallus thymallus</i> (Linné, 1758)	OBR	
	Truite fario	<i>Salmo Trutta fario</i> (Linné, 1758)	TRF	
Esocidés				
	Brochet	<i>Esox lucius</i> (Linné, 1758)	BRO	P
Lotidés				
	Iote	<i>Lota lota</i> (Linné, 1758)	LOT	
Leuciscidae				
	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i> (L., 1758)	GAR	L-P
	Blageon	<i>Leuciscus souffia</i> (Risso, 1827)	BLN	
	Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i> (L., 1758)	VAN	
	Ide mélanote	<i>Leuciscus idus</i> (L. 1766)	IDE	L-P
	Chevaine	<i>Squalius cephalus</i> (L., 1758)	CHE	
	Rotengle	<i>Scardinius erythrophthalmus</i> (L., 1758)	ROT	P
	Vairon	<i>Phoxinus phoxinus</i> (L., 1766)	VAI	
	Ablette	<i>Alburnus alburnus</i> (L., 1758)	ABL	L-P
	Spiriin	<i>Alburnoides bipunctatus</i> (Bloch, 1782)	SPI	
	Brème bordelière	<i>Blicca bjoerkna</i> (L., 1758)	BRB	P
	Brème commune	<i>Abramis brama</i> (L., 1758)	BRE	L-P
	Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i> (L., 1758)	HOT	
	Toxostome	<i>Parachondrostoma toxostoma</i> (Vallot, 1837)	TOX	
Tincidae				
	Tanche	<i>Tinca tinca</i> (L., 1758)	TAN	P
Acheilognathidae				
	Bouvière	<i>Rhodeus sericeus</i> (Bloch, 1785)	BOU	
Gobionidae				
	Goujon	<i>Gobio gobio</i> (L., 1758)	GOU	
	Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i> (Chlegel, 1842)	PSR	
Cyprinidés				
	Barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i> (L., 1758)	BAF	
	Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i> (L., 1758)	CCO	P
	Carassin argenté	<i>Carassius gibelio</i> (Bloch, 1782)	CGO	L-P
Balitoridés				
	Loche franche	<i>Barbatula barbatula</i> (L., 1758)	LOF	
	Loche d'étang	<i>Misgurnus fossilis</i> (L., 1758)	LOE	P
Siluridés				
	Silure glane	<i>Silurus glanis</i> (Linné, 1758)	SIL	L-P
Ictaluridés				
	Poisson-chat	<i>Ameiurus melas</i> (Rafinesque, 1820)	PCH	
Anguillidés				
	Anguille	<i>Anguilla anguilla</i> (L., 1758)	ANG	
Gastérostéidés				
	Epinoche	<i>Gasterosteus aculeatus</i> (L., 1766)	EPI	
Centrarchidés				
	Perche-soleil	<i>Lepomis gibbosus</i> (L., 1758)	PES	
	Achigan à grande bouche	<i>Micropterus salmoides</i> (Lacépède, 1802)	BBG	
Percidés				
	Perche fluviatile	<i>Perca fluviatilis</i> (L., 1758)	PER	P
	Grémille	<i>Gymnocephalus cernua</i> (L., 1758)	GRE	L-P
	Sandre	<i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus, 1758)	SAN	P
Cottidés				
	Chabot	<i>Cottus gobio</i> (Linné, 1758)	CHA	

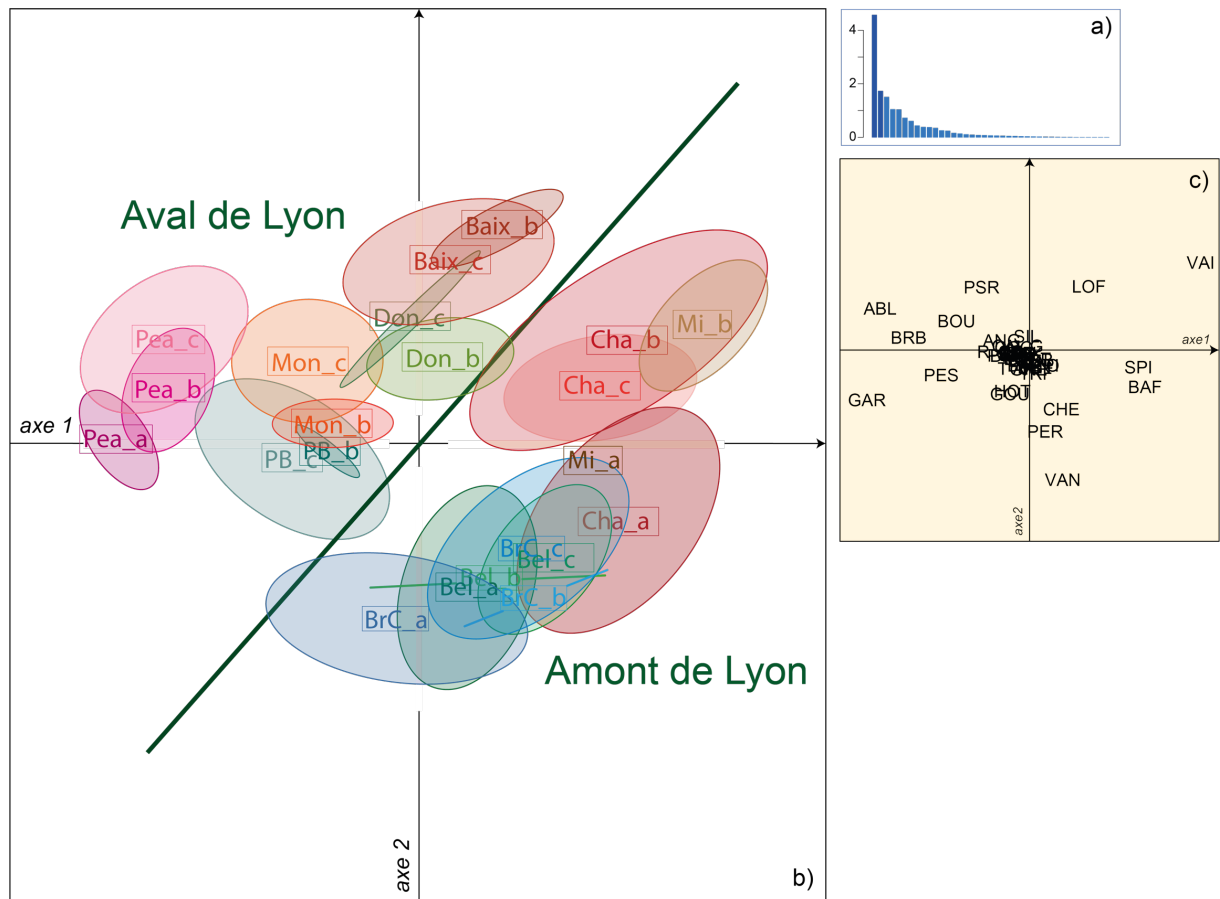


Figure 2 – Analyse de la structure spatio-temporelle des données collectées par pêches électriques dans les Vieux-Rhône des neuf secteurs concernés par le programme RhônEco, résultats d'une ACP réalisées sur les données d'abondance relative (%) par espèce transformée (\log_{10} abond.relative + 1). Compte-tenu des périodes d'échantillonnage relativement longues avant restauration dans certains Vieux-Rhône, deux périodes peuvent être distinguées avant restauration (a et b), les données post-restauration sont identifiées par « c ». Pour chaque secteur, les périodes prises en compte sont : Cha (Chautagne)_a (1985-1995), Cha_b (1996-2003), Cha_c (à partir de 2004), Bel (Belley)_a (1985-1997), Bel_b (2003-2004), Bel_c (à partir de 2005), BrC (Brégnier-Cordon)_a (1985-1997), BrC_b (2003-2005), BrC_c (à partir de 2006), Mi (Canal de Miribel)_a (1995), Mi_b (2007-2018), PB-b (1995-1999), PB_c (2001-2019), Pea_a(1985-2002), Pea_b(2003-2013), Pea_c (à partir de 2014), Baix (Baix-Le-Logis-Neuf)_b(2010-2013), Baix_c (à partir de 2014), Mon (Montélimar)_b (2006-2013), Mon_c (à partir de 2014), Don (Donzère)_b (2008-2013), Don_c (à partir de 2014). a) graphe des valeurs propres (32% de l'information du tableau est décrite par le premier axe et 12% par le deuxième) ; b) projection des coordonnées factorielles des pêches, les données de chaque couple « site-période » sont regroupées au sein d'ellipses (95% des points) pour faciliter la lecture des résultats ; c) carte factorielle des espèces.

Cette analyse suggère des évolutions post-restauration pour les neuf secteurs, qui ne modifient pas l'organisation des peuplements à large échelle mais sont néanmoins significatives. Les analyses plus détaillées montrent qu'elles sont plus marquées pour les

Vieux-Rhône de Chautagne et de Pierre-Bénite. Les résultats détaillés pour les différents secteurs sont présentés ci-après.

4.1.1.1 *Vieux Rhône du Haut-Rhône : Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon*

Les trois aménagements du Haut-Rhône, de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon, sont relativement récents (respectivement 1980, 1982 et 1984) et les Vieux-Rhône diffèrent par les valeurs de débit réservé avant restauration, leur longueur et la diversité des chenaux secondaires et des îles. La réduction sévère de débit dans le Vieux-Rhône de Chautagne après la mise en service du barrage a conduit, en particulier, à l'effondrement progressif des effectifs des populations de hotu et de vandoise, et à la structuration d'un peuplement dominé par le barbeau fluviatile, le vairon et la loche franche (Harby *et al.*, 2007). Les populations des deux espèces de salmonidés (ombre commun et truite fario) se sont maintenues avec des effectifs réduits. Dans les deux autres secteurs, la diversité des types de chenaux, la longueur relativement importante des Vieux-Rhône (17,2 km à Belley et 11,4 km à Brégnier-Cordon), la présence d'affluents, et des valeurs plus élevées de débit réservé ont contribué à atténuer les effets de l'aménagement sur le peuplement piscicole.

Les valeurs de débit réservé ont été modifiées en juillet 2004 en Chautagne, en juillet 2005 à Belley et en juillet 2006 à Brégnier-Cordon.

Dans le Vieux-Rhône de Chautagne, l'abondance relative des espèces de la guildes des espèces d'eau courante est passée de 11 % (avant augmentation du débit réservé) à 24,4% (valeur moyenne) depuis 2004.

Dans le Vieux-Rhône de Belley, la valeur moyenne de l'abondance relative des espèces de la guildes des espèces d'eau courante après relèvement du débit réservé (~34%) est restée proche de la valeur pré-restauration.

L'augmentation du débit réservé dans le Vieux-Rhône de Brégnier-Cordon ne concerne que la section entre le barrage de dérivation (Champagneux) et la confluence avec le Guiers. En conséquence, les effets de cette modification sur la valeur moyenne de l'abondance relative des espèces de la guildes des espèces d'eau courante sont faibles (Figure 3).

Bien que la réponse des populations de poissons aux modifications de débit réservé soit la plus marquée dans le Vieux-Rhône de Chautagne, la proportion d'individus de la guildes des espèces d'eau courante après restauration est la plus élevée dans le Vieux-Rhône de Belley (Figure 3).

Les valeurs de cette métrique varient en fonction des années dans les trois Vieux-Rhône, cette variabilité ne suit pas celle des effectifs échantillonnés ni celle de la proportion de juvéniles de l'année dans les échantillons (Figure 4). Si la métrique agglomère les abondances relatives de 6 espèces (en général 5 car il est à peu près certain que les populations de

toxostome dans le Haut-Rhône aient disparu à la suite de l'aménagement hydroélectrique des années 80, notamment à Brégnier-Cordon), la proportion des poissons appartenant à ces espèces varie d'un site à l'autre.

Ainsi, si les patrons d'évolution temporelle de l'abondance des poissons échantillonnés sont relativement similaires pour les trois Vieux-Rhône (Figure 5) et sont principalement déterminés par les abondances de juvéniles de l'année (poissons d'âge 0+) de certaines espèces (goujon, gardon, spirilin, barbeau, chevaine, ablette et vandoise), la proportion de ces espèces varie en fonction des sites et des années.

La contribution des différentes espèces de la guildes des espèces d'eau courante et des différentes classes d'âges (exprimées *via* la taille des individus) varie pour chacun des Vieux-Rhône. Il existe en effet des différences entre les assemblages de poissons des trois Vieux-Rhône (Figure 6). Depuis l'augmentation des débits réservés, le nombre d'espèces échantillonnées dans le Vieux-Rhône de Chautagne (entre 13 et 23) est plus faible que dans les deux autres Vieux-Rhône (entre 21 et 28 à Belley et entre 19 et 30 à Brégnier-Cordon) (Figure 7). Malgré l'augmentation conséquente du débit réservé, la faune du Vieux Rhône de Chautagne se distingue de celle des deux autres Vieux-Rhône :

- 1) par des abondances relatives de loches franches et de vairons plus importantes,
- 2) par des abondances relatives très faibles de chabots, de truites et d'ombres communs d'âge supérieur à 1 an et de vandoises et,
- 3) par des proportions plus faibles de poissons de grandes tailles (chevaine, barbeau, ablette, perche commune).

Les proportions de juvéniles de l'année de goujon, chevaine, ablette et barbeau sont relativement similaires dans les trois Vieux-Rhône. Les juvéniles d'ombre commun sont échantillonnés essentiellement en Chautagne et surtout à Belley. L'ichtyofaune du Vieux-Rhône de Belley se distingue par des abondances relatives de vandoises (toutes tailles), de truites et d'ombres communs adultes relativement importantes. Enfin les abondances relatives des poissons de grandes tailles de chevaines, ablettes et barbeaux sont essentiellement élevées dans les Vieux-Rhône de Belley et de Brégnier-Cordon.

Ces caractéristiques faunistiques différentes des trois Vieux-Rhône mettent en évidence les différences de qualité (au sens large) et/ou de disponibilité des habitats au sein de chaque tronçon court-circuité, avec une diversité d'habitats dans le Vieux-Rhône de Belley et dans celui de Brégnier-Cordon probablement beaucoup plus en adéquation avec les préférences écologiques des différentes phases du cycle de vie de la plupart des espèces, notamment des plus exigeantes en termes d'habitats de reproduction et de croissance des jeunes stages de développement (salmonidés, cyprinidés et leuciscidés rhéophiles). Certaines de ces espèces étant inféodées à la guildes des espèces d'eau courante, leur contribution aux valeurs de cette métrique va donc dépendre à la fois de l'abondance des juvéniles de l'année mais également

de la possibilité pour ces juvéniles d'accomplir leur croissance jusqu'à l'âge adulte dans ces Vieux-Rhône. La contribution des différentes classes de tailles des espèces composant la guilda permet de mieux interpréter la variabilité inter-annuelle des valeurs de cette métrique et de mieux mesurer l'effet sur le moyen terme des modifications de débit réservé sur la dynamique des populations ciblées par cette mesure de restauration (Figure 8).

Pour les trois Vieux-Rhône, la contribution des juvéniles de l'année de barbeaux est toujours importante. Dans le Vieux-Rhône de Chautagne, seuls les juvéniles de l'année d'ablettes contribuent également à modifier la valeur de la métrique (figure 9). Dans les deux autres Vieux-Rhône, les autres espèces et les différentes classes de tailles contribuent de manière plus marquée.

Ceci explique le fait que la valeur de la métrique reste relativement stable et élevée au cours du temps dans le Vieux-Rhône de Belley. Des recrutements importants au sein des populations d'espèces d'eau courante pourraient, à moyen terme, se traduire par une augmentation significative et durable de la valeur de la métrique mais il ne semble pas que la modification du débit réservé ait entraîné une augmentation suffisamment importante de la capacité d'accueil du Vieux-Rhône pour l'ensemble des écophases de chaque espèce concernée. D'autres facteurs comme la modification du régime thermique et/ou de la qualité de l'eau peuvent également jouer un rôle dans l'évolution de la dynamique des populations et limiter les recrutements dans les populations.

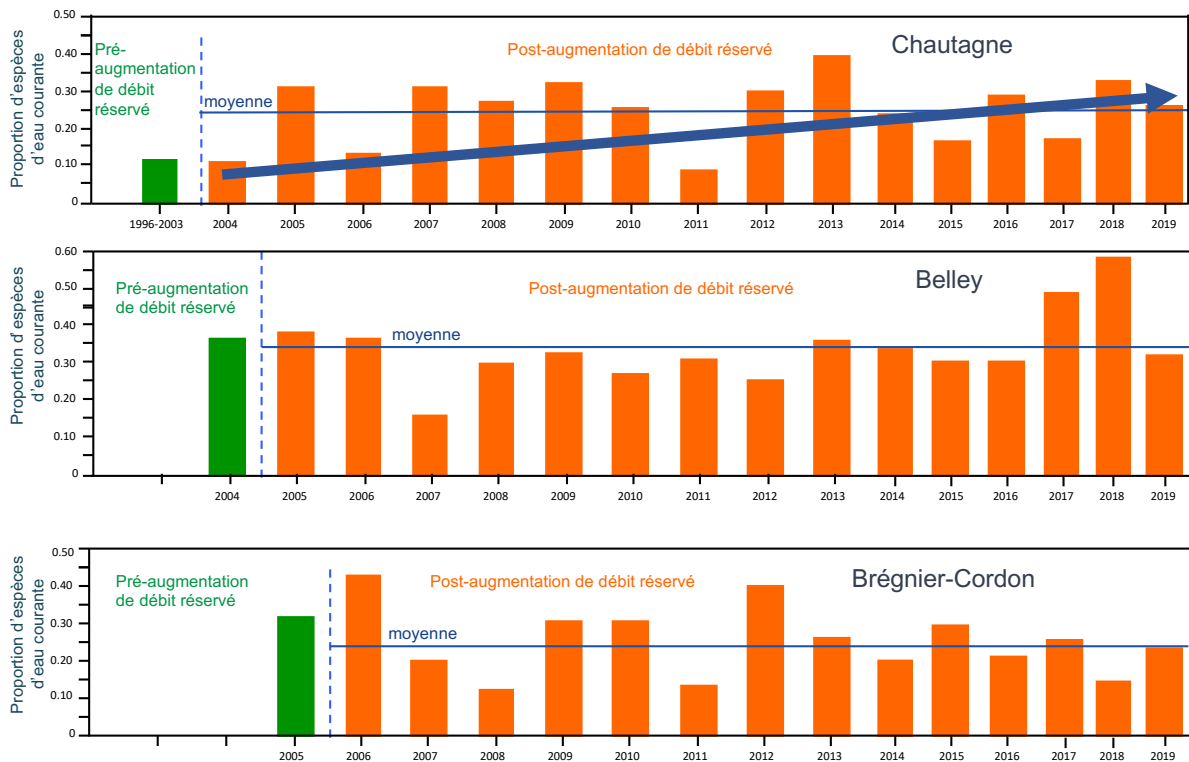


Figure 3 - Abondances relatives des espèces d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, ombre commun, vandoise) dans les Vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégner-Cordon, le trait pointillé vertical symbolise la date de changement de débit réservé. La ligne horizontale indique la valeur de la moyenne calculée sur la période correspondante.

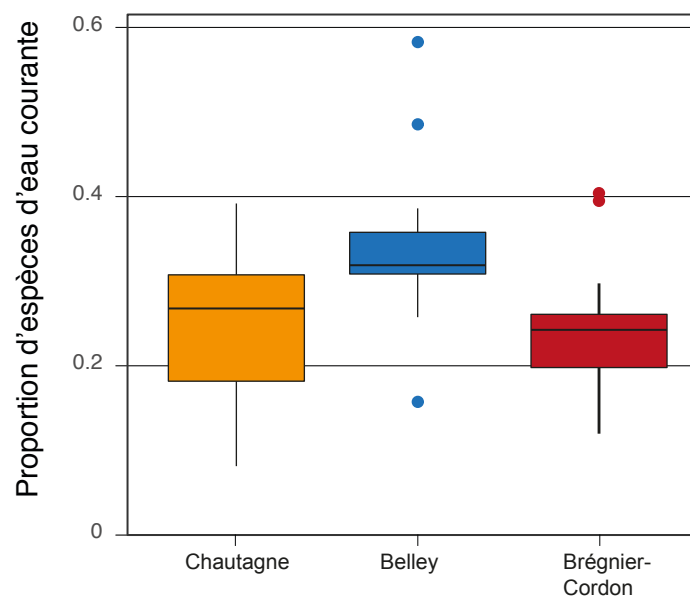


Figure 4 – Proportions d'individus appartenant aux espèces de la guildes des espèces d'eau courante dans les Vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégner-Cordon après augmentation du débit réservé.

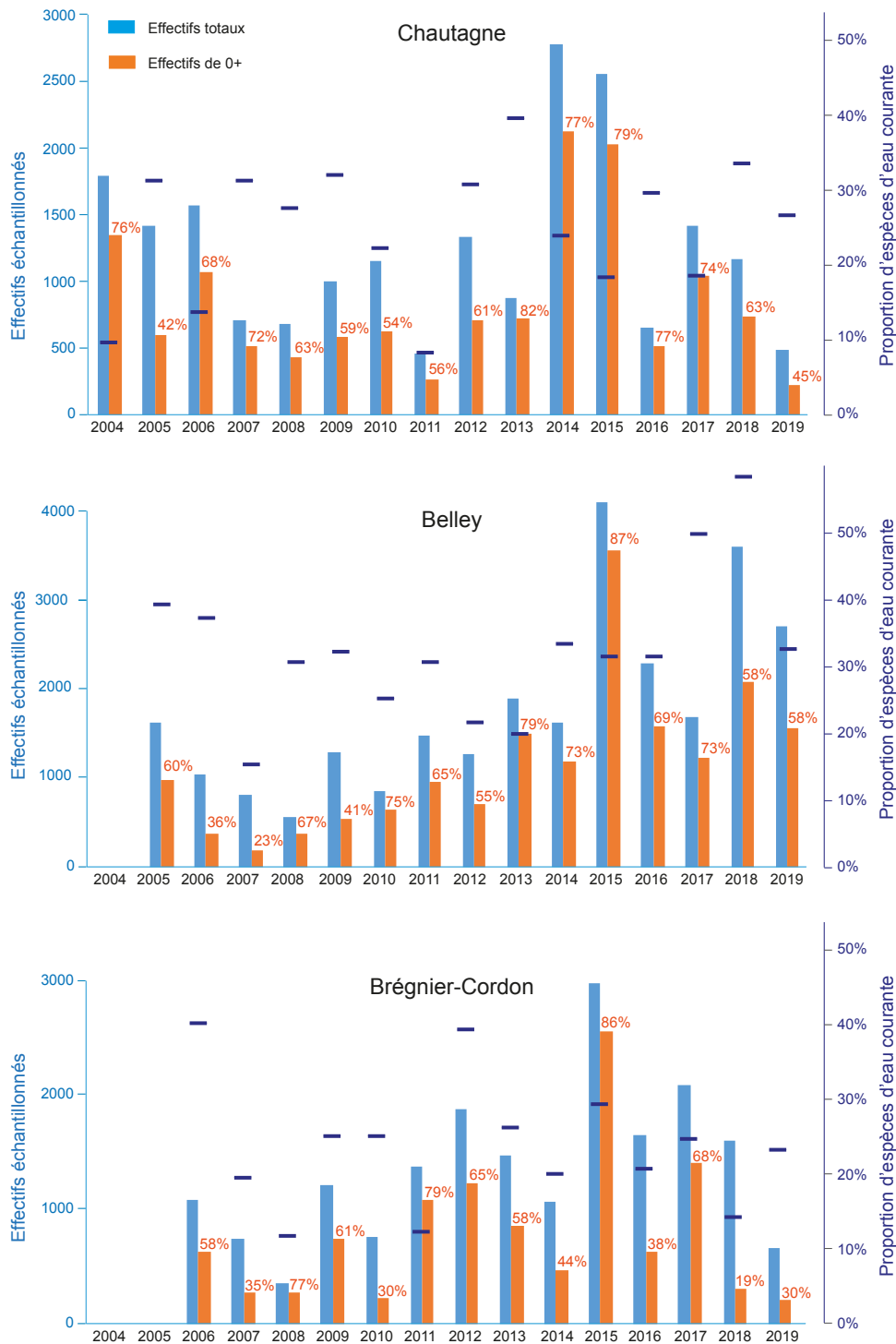


Figure 5 - Effectifs échantillonnés (totaux – en bleu – et juvéniles de l'année (0+) – en orange) dans les vieux-Rhône de Chautagne (100 E.P.A.), Belley (200 E.P.A.) et Brégner-Cordon (200 E.P.A.) après augmentation des débits réservés. Les tirets bleus foncés représentent la valeur de la proportion d'individus des espèces d'eau courante (échelle des ordonnées de droite).

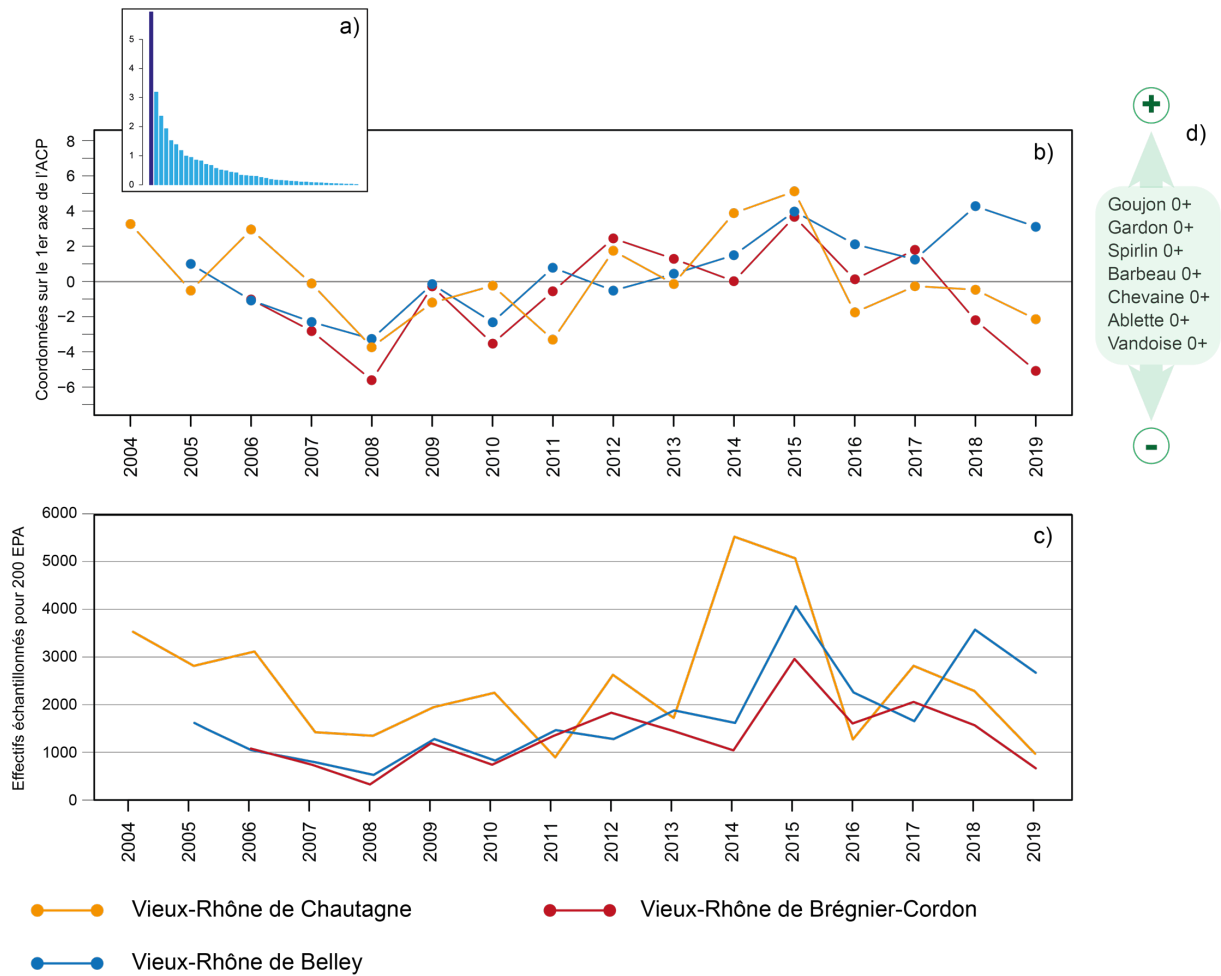


Figure 6 – Patrons d'évolution temporelle des communautés de poissons dans les Vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégner-Cordon après augmentation des débits réservés. L'information est résumée par les coordonnées factorielles sur le premier axe (b) issues d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) intra-secteurs portant sur les résultats des pêches annuelles après augmentation des débits réservés ($\log_{10} [\text{effectifs} + 1]$), les effectifs représentent le nombre de poissons appartenant à une classe de tailles donnée pour une espèce donnée, le découpage en classes de tailles conduit à conserver 2, 3 ou 4 classes en fonction de la taille des poissons adultes, la première classe regroupe les poissons nés dans l'année (0+). Le premier axe de l'analyse porte l'essentiel de l'information (a, graphe des valeurs propres) et met en évidence le rôle majeur de l'abondance des juvéniles de l'année de 7 espèces très représentatives de l'ichtyofaune du Haut-Rhône (d). Les effectifs de poissons échantillonnés chaque année (c) expliquent en grande partie l'évolution temporelle exprimée sur la figure (b).

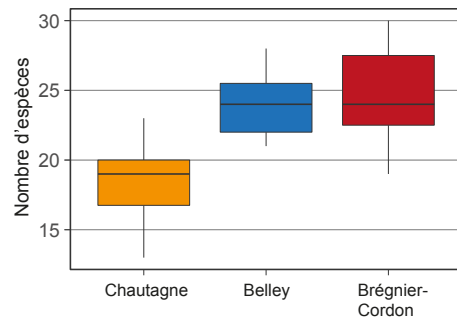


Figure 7 – Nombre d'espèces de poissons échantillonnées dans les Vieux-Rhône du Haut-Rhône depuis 2004 en Chautagne, 2005 à Belley et 2006 à Brégnier-Cordon.

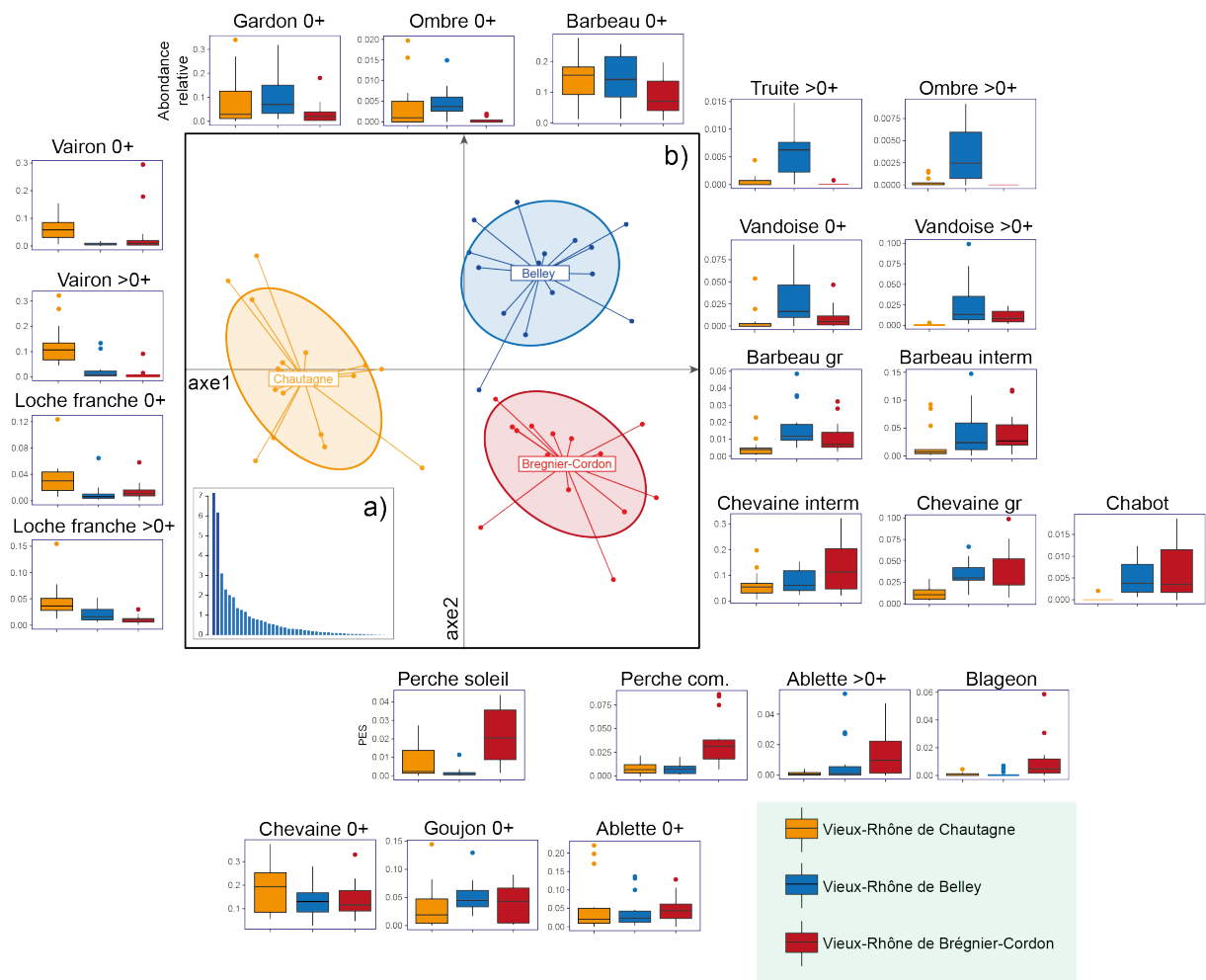


Figure 8 – Représentation des différences inter-Vieux-Rhône. a) graphe des valeurs propres d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) inter-Vieux-Rhône, la variabilité inter-Vieux-Rhône représente 22% de la variabilité totale. Cette analyse porte sur les résultats des pêches annuelles réalisées après augmentation des débits réservés (\log_{10} [effectifs +1], les effectifs représentent le nombre de poissons appartenant à une classe de tailles donnée pour une espèce donnée, le découpage en classes de tailles conduit à conserver 2, 3 ou 4 classes en fonction de la taille des poissons adultes, la première classe regroupe les poissons nés dans l'année (0+), pour les espèces de grande taille chevaine, barbeau, les poissons de taille comprise entre la taille supérieure des 0+ et 18 cm appartiennent à la classe intermédiaire (interm.), les poissons de taille supérieure à 18 cm sont notés gr.). La représentation des pêches réalisées chaque année dans le plan 1x2 de l'ACP discrimine clairement les trois Vieux-Rhône en fonction de leur faune piscicole (b). Les abondances relatives des composantes faunistiques les plus discriminantes sont positionnées autour du plan factoriel afin de mieux caractériser l'originalité de la faune de chaque Vieux-Rhône.

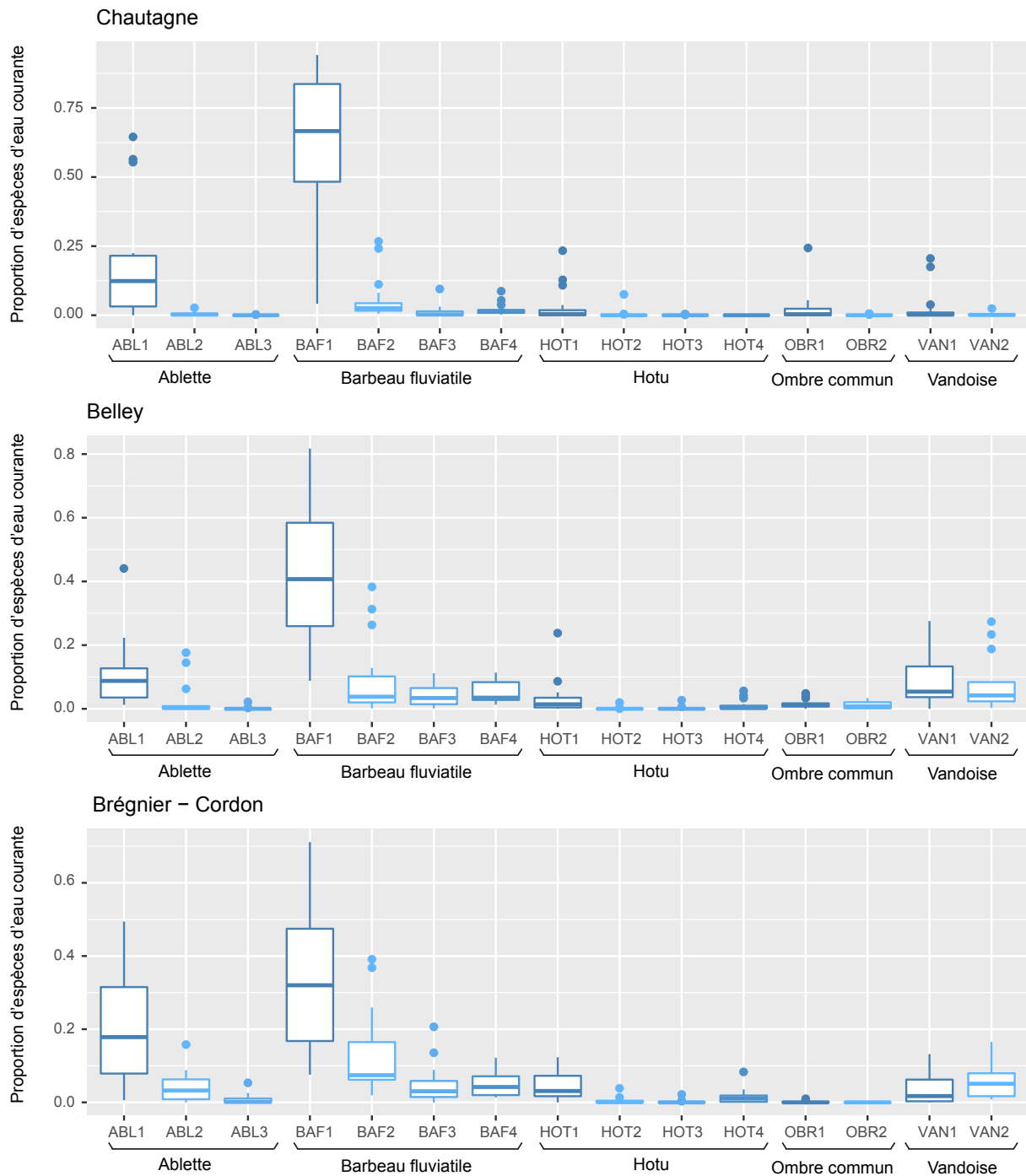


Figure 9 – Proportion des différentes classes de tailles de chacune des espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante dans les trois Vieux-Rhône du Haut-Rhône. Les limites des classes de tailles pour les différentes espèces sont les suivantes : la classe 1 représente les juvéniles de l'année, la classe 2 représente les individus dont la taille est immédiatement supérieure à la taille maximale des juvéniles de l'année et est inférieure à 12 cm, la classe 3 représente, quand c'est la dernière classe pour une espèce donnée, les individus de taille supérieure à 12 cm, si elle est suivie d'une classe 4, elle prend en compte les individus dont la taille est comprise entre 12 et 18 cm, la classe 4 regroupe les individus de tailles supérieures à 18 cm.

4.1.1.2 *Vieux-Rhône de Pierre-Bénite*

Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite est le premier site où le débit réservé a été augmenté (passage à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en septembre 2000, valeurs initiales $10\text{-}20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). C'est dans ce Vieux-Rhône que les changements de structure de peuplement de poissons ont été les plus marqués après augmentation du débit réservé (Figure 10). Le barrage de Pierre-Bénite a été mis en service en 1966.

La carte Piscicole du Rhône de Léger (1945) fait état d'un peuplement piscicole influencé par les eaux de la Saône, plus chaudes que celles du Rhône en amont de Lyon. Les principales espèces sont alors le hotu, le chevaine, le barbeau fluviatile, la brème, le gardon, le goujon, la vandoise, le brochet, la perche commune. De plus, la présence de grandes îles favorise les populations de carpe, tanche, ablette, toxostome et les anguilles. L. Léger fait état de la pêche régulière de la lamproie marine et de l'aloise au moment de la remontée de ces deux espèces (de fin avril à début juin). La truite était présente mais pas l'ombre commun.

Après la mise en service de l'aménagement hydroélectrique, la structure du peuplement dans le Vieux-Rhône a évolué, les données utilisées pour décrire l'état du peuplement avant augmentation du débit réservé ont été collectées entre 1995 et 1999 et font état d'un peuplement dominé par la loche franche, le chevaine, le gardon et le goujon. Les espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante sont mal représentées, leurs abondances relatives respectives sont : ablette 5,6%, barbeau fluviatile 4,9%, hotu 0,5% et vandoise 0,2%.

Après passage du débit à $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la proportion de poissons des espèces d'eau courante a rapidement augmenté, en moyenne elle a été multipliée par 3,6. Cette progression est due à l'augmentation des proportions d'ablettes, de barbeaux et de hotus, avec une dominance marquée de l'ablette (Figure 10), notamment après 2014, ce qui se traduit par des valeurs élevées de la métrique en 2015, 2016, 2018 et 2019. Cette augmentation marquée des proportions d'ablettes est à mettre en relation avec les conditions hydro-climatiques très particulières de ces années (températures élevées et étiages post-estivaux prolongés) favorisant le succès de reproduction et la croissance des jeunes individus.

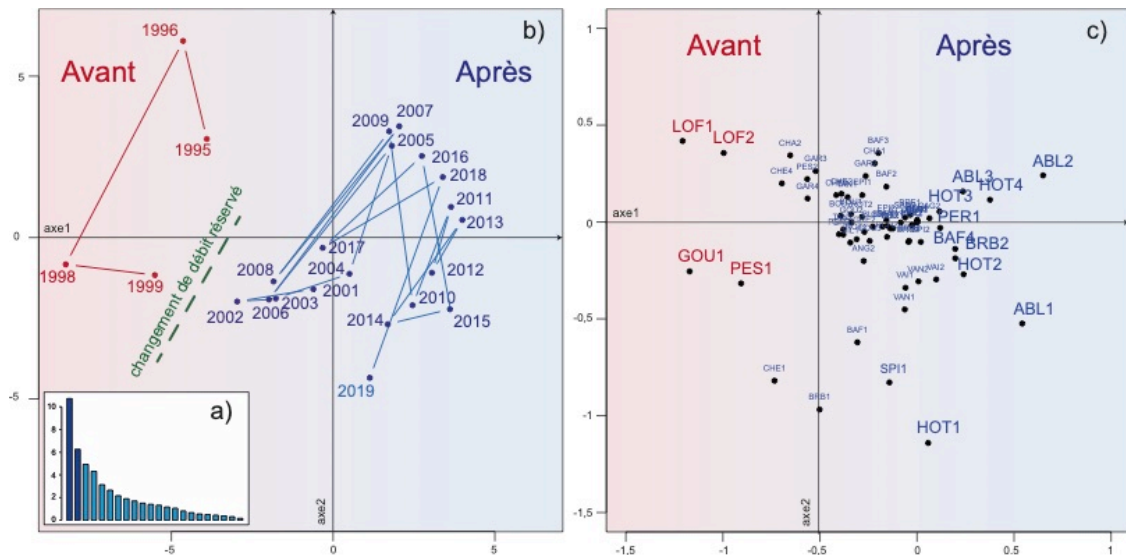


Figure 10 – Evolution temporelle de la structure du peuplement de poissons du Vieux-Rhône de Pierre Bénite exprimée à partir des résultats d'une Analyse en composantes principales (ACP) effectuée sur un tableau de données renfermant les abondances de poissons par campagne de pêche de 1995 à 2019. Pour chaque espèce plusieurs classes de tailles ont été sélectionnées afin de mettre en évidence les groupes de poissons les plus impliqués dans les changements temporels. Les limites des classes de tailles pour les différentes espèces sont les suivantes : la classe 1 représente les juvéniles de l'année, la classe 2 représente les individus dont la taille est immédiatement supérieure à la taille maximale des juvéniles de l'année et est inférieure à 12 cm, la classe 3 représente, quand c'est la dernière classe pour une espèce donnée, les individus de taille supérieure à 12 cm, si elle est suivie d'une classe 4, elle prend en compte les individus dont la taille est comprise entre 12 et 18 cm, la classe 4 regroupe les individus de tailles supérieures à 18 cm. a) graphe des valeurs propres de l'ACP, b) projection dans le plan formé par les 2 premiers axes de l'ACP des coordonnées factorielles des pêches (chaque pêche est identifiée par l'année de sa réalisation), c)) projection dans le plan formé par les 2 premiers axes de l'ACP des coordonnées factorielles des groupes de poissons appartenant à une espèce donnée et à une classe de tailles, les espèces caractéristiques des deux périodes (avant et après augmentation du débit réservé) ont été mises en évidence (taille des caractères supérieure) .

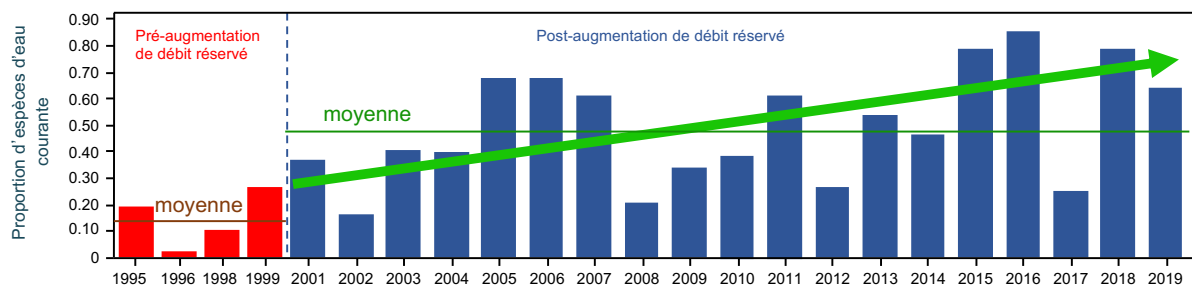


Figure 11 - Abondances relatives des espèces d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, vandoise) dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite, le trait pointillé vertical symbolise la date de changement de débit réservé. La ligne horizontale indique la valeur de la moyenne calculée sur la période correspondante.

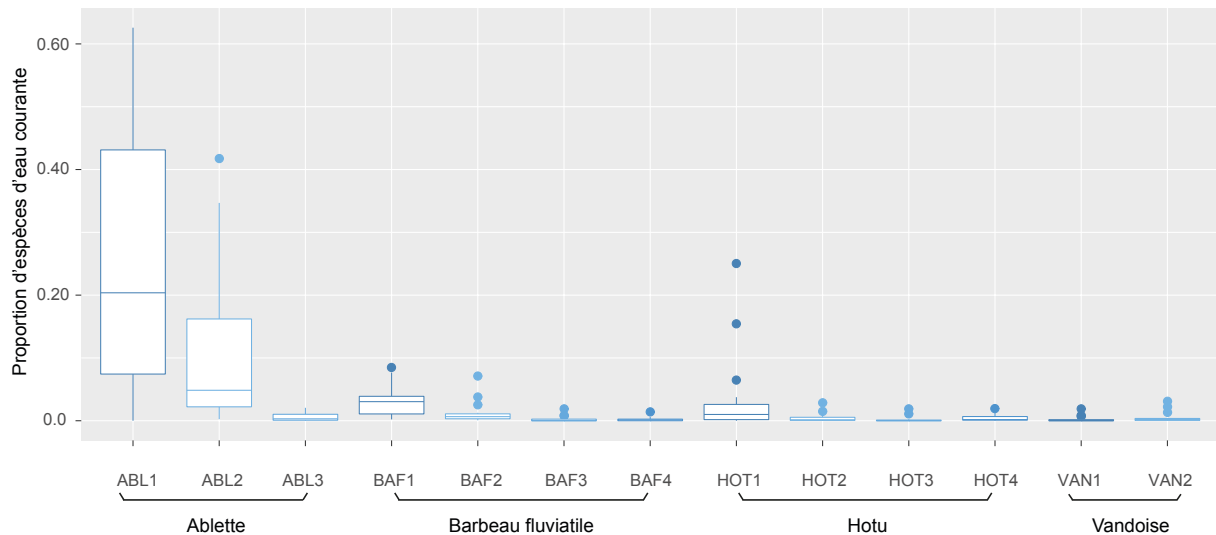


Figure 12 – Proportion des différentes classes de tailles de chacune des espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite. Les limites des classes de tailles pour les différentes espèces sont les suivantes : la classe 1 représente les juvéniles de l'année, la classe 2 représente les individus dont la taille est immédiatement supérieure à la taille maximale des juvéniles de l'année et est inférieure à 12 cm, la classe 3 représente, quand c'est la dernière classe pour une espèce donnée, les individus de taille supérieure à 12 cm, si elle est suivie d'une classe 4, elle prend en compte les individus dont la taille est comprise entre 12 et 18 cm, la classe 4 regroupe les individus de tailles supérieures à 18 cm.

4.1.1.3 Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Bais-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère

Le débit réservé a été modifié le 1^{er} janvier 2014 dans les Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Baix-Le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère-Mondragon. A Péage-de-Roussillon, en raison des enjeux écologiques multiples liés au débit réservé, il a été décidé de moduler la valeur du débit en fonction des saisons de manière à délivrer dans le Vieux-Rhône un débit plus élevé en période printanière, la valeur maximum de débit réservé est de 125 m³.s⁻¹ et la valeur plancher de 54 m³.s⁻¹.

Ces quatre secteurs du Rhône ont été fortement aménagés dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle par la construction des endiguements « Girardon », ce qui a fortement limité les capacités de divagation du fleuve au sein de la plaine alluviale. L'aménagement hydroélectrique (1952 Donzère, 1957 Montélimar, 1960 Baix-Le-Logis-Neuf et 1977 Péage-de-Roussillon) et la mise en débit réservé des tronçons court-circuités ont également altéré la qualité et la disponibilité des habitats fluviaux. Dans ce contexte, le ralentissement des vitesses d'écoulement a favorisé le réchauffement de l'eau et la sédimentation dans les tronçons aménagés du fleuve.

La structure du peuplement de poissons, initialement caractérisée par des espèces rhéophiles caractéristiques des cours d'eau tressés, dont la truite, l'apron, le toxostome, et la présence des grands migrateurs (aloses, lamproie marine, anguille, esturgeon), a subi des modifications importantes caractérisées par la quasi-disparition des espèces les plus sensibles à l'altération du substrat, de la qualité de l'eau, de la température et à la fragmentation des habitats (truite, apron, toxostome, vandoise, chabot ...). Ainsi, les données collectées depuis 2006 dans ces Vieux-Rhône mettent en évidence l'importance numérique de l'ablette (26% à Péage-de-Roussillon – PR –, 21% à Baix – BA –, 34% à Montélimar – MO –, et 30% à Donzère – DO), du gardon (22% à PR, 5% à BA, 6% à MO et 2% à DO), du chevaine (8% à PR, 9% à BA, 15% à MO et 14% à DO) et du goujon (8% à PR, 9% à BA, 7% à MO et 9% à DO) (Figure 13).

Bien que 25 des 34 espèces aient été échantillonnées dans les quatre Vieux-Rhône, l'ichtyofaune du secteur de Péage-de-Roussillon se différencie nettement de celle des trois autres Vieux-Rhône (Figures 13, 14 et 15). Elle se singularise 1) par des effectifs par unité d'effort d'échantillonnage supérieurs à ceux des autres Vieux-Rhône (Figure 15), 2) par des abondances régulièrement élevées d'espèces tolérantes et plutôt thermophiles : l'ablette, la bouvière, le *Pseudorasbora* (Figure 16), le rotengle, le silure et la tanche, la brème bordelière (0+), le chevaine (0+), le gardon (0+ et >0+) la perche commune mais aussi des espèces plus rhéophiles comme le goujon et les juvéniles de hotu (0+). Les trois autres Vieux-Rhône sont situés en aval de la confluence avec l'Isère, affluent alpin et froid du Rhône. De plus, l'eau en amont du Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon est réchauffée par le rejet thermique du CNPE de Saint-Alban. La présence du Seuil de Peyraud dans la partie aval du Vieux-Rhône provoque un ralentissement important des vitesses d'écoulement sur environ les deux tiers du Vieux-Rhône en amont du seuil, favorisant les habitats propices aux espèces lenitophiles.

La structure du peuplement de poissons est relativement similaire dans les Vieux-Rhône de Montélimar et de Donzère. Elle est caractérisée par une proportion importante d'espèces rhéophiles (barbeau fluviatile, hotu, chevaine, loche franche, goujon ou encore spirin) ou eurytopes (ablette, brème bordelière) et la présence régulière d'anguilles (Figure 13). La distribution des abondances relatives de ces espèces met en évidence une meilleure répartition des proportions entre les espèces à Donzère qu'à Montélimar où le chevaine et l'ablette dominent dans les échantillons. Dans le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf, la valeur très faible du débit réservé avant 2014 ($10 - 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) associée à une forte érosion du lit dans la partie amont et courante du Vieux-Rhône et au fait que les vitesses d'écoulement étaient très ralenties en aval du village de Baix-Le-Logis-Neuf (remous de la retenue de Montélimar) a probablement limité le développement des populations de barbeaux et de hotus et a favorisé celui des populations de vairons et de goujons. L'ablette est très abondante dans les quatre Vieux-Rhône.

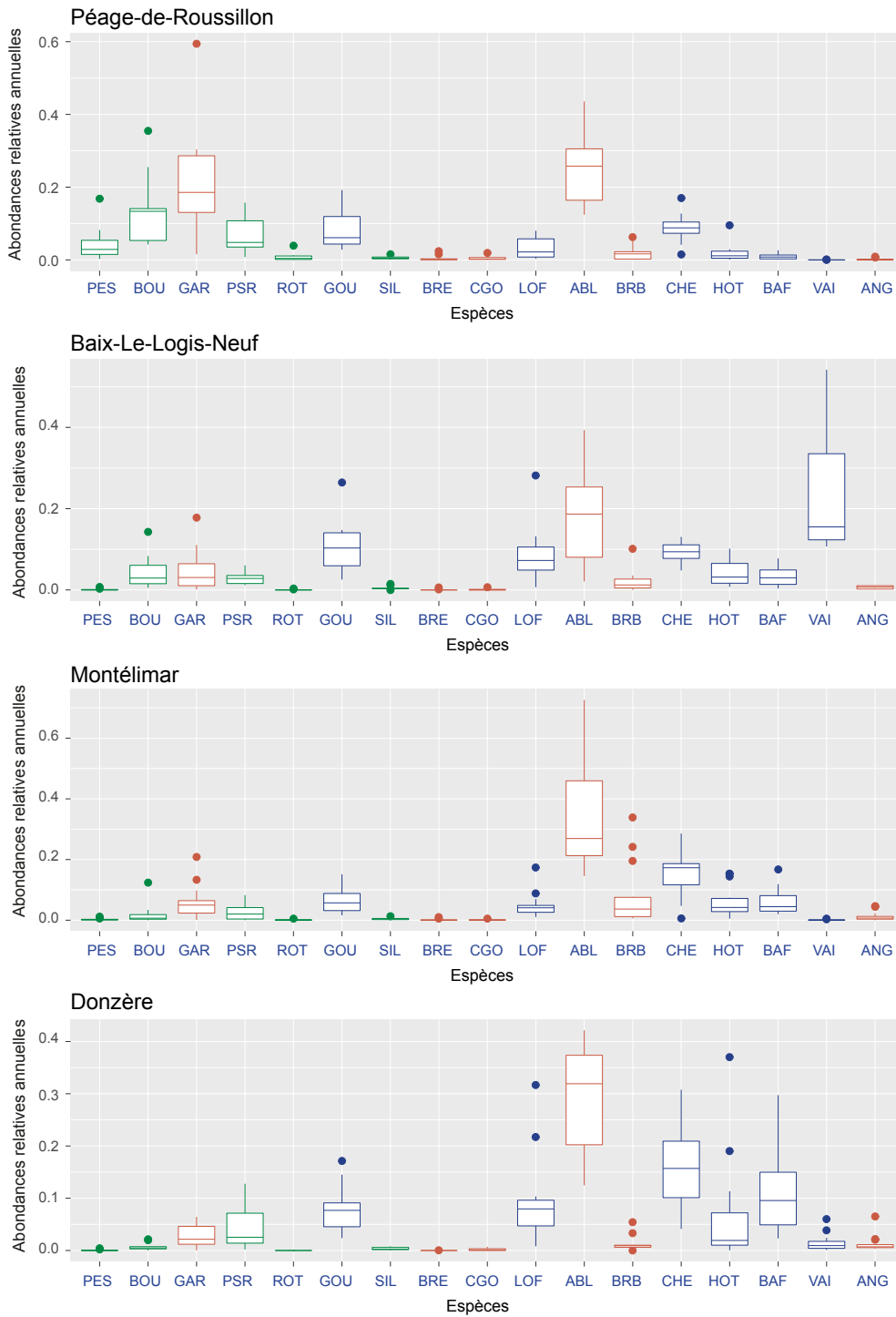


Figure 13 - Box-plots des abondances relatives annuelles de 17 espèces échantillonnées dans les Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon (2007-2019), Baix-Le-Logis-Neuf (2010-2019), Montélimar (2006-2019) et Donzère (2008-2019). Les différentes couleurs matérialisent l'appartenance de l'espèce à chacun des trois groupes écologiques définis par Schiemer & Spindler (1989) : bleu : espèces rhéophiles, rouge : espèces eurytopes, vert : espèces limnophiles.

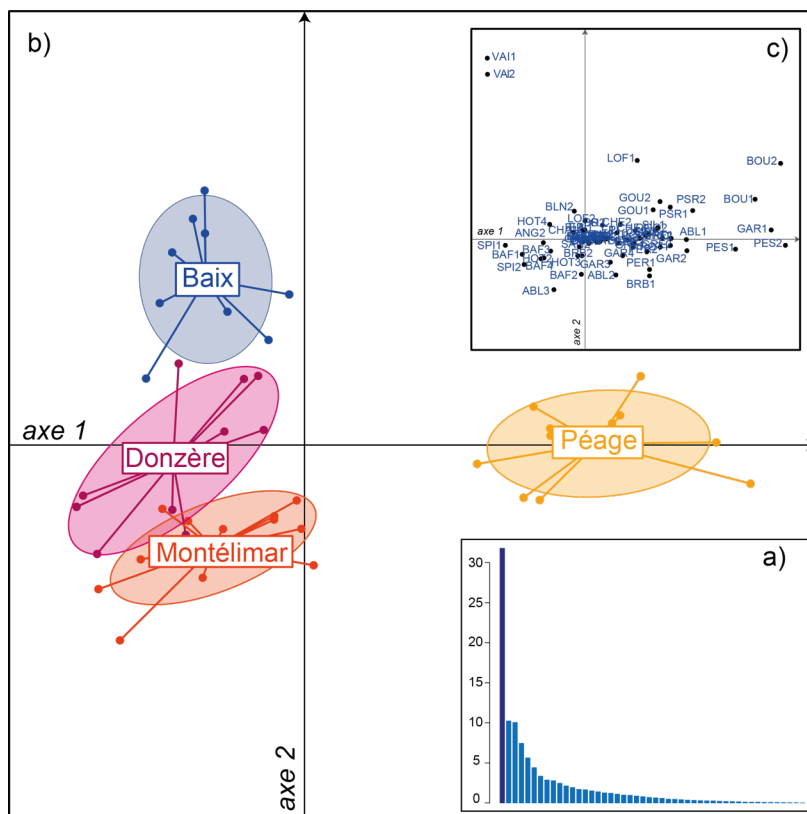


Figure 14 – Représentation de la variabilité inter-Vieux-Rhône pour les 4 secteurs de Péage-de-Roussillon, Baix le Logis-Neuf, Montélimar et Donzère. L'expression des différences inter-Vieux-Rhône est exprimée par la projection des coordonnées factorielles des pêches réalisées annuellement dans le plan défini par les 2 premiers axes d'une ACP inter-Vieux-Rhône prenant en considération les données d'abondance par classe de tailles et par espèce transformée (\log_{10} abond. +1). Pour chaque espèce plusieurs classes de tailles ont été sélectionnées afin de mettre en évidence les groupes de poissons les plus impliqués dans les changements temporels. Les limites des classes de tailles pour les différentes espèces sont les suivantes : la classe 1 représente les juvéniles de l'année, la classe 2 représente les individus dont la taille est immédiatement supérieure à la taille maximale des juvéniles de l'année et est inférieure à 12 cm, la classe 3 représente, quand c'est la dernière classe pour une espèce donnée, les individus de taille supérieure à 12 cm, si elle est suivie d'une classe 4, elle prend en compte les individus dont la taille est comprise entre 12 et 18 cm, la classe 4 regroupe les individus de tailles supérieures à 18 cm. Pour chaque Vieux-Rhône, les différentes dates d'échantillonnage sont regroupées au sein d'ellipses (95% des points) pour faciliter la lecture des résultats. Le premier axe de l'analyse est porteur de l'information essentielle ((a). La carte factorielle des groupes de classes de tailles par espèce permet d'identifier les composantes faunistiques impliquées dans la structuration spatiale des peuplements (c).

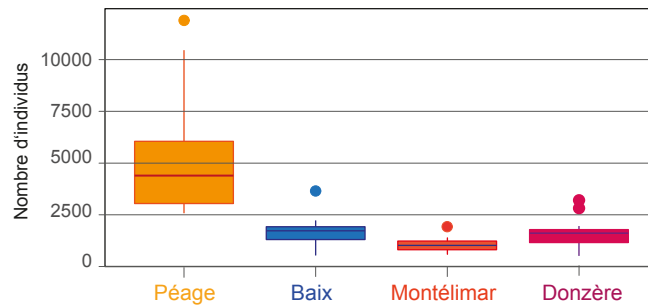


Figure 15 - Nombre de poissons capturés par pêche pour un effort de pêche identique de 200 E.P.A. dans les 4 secteurs du Bas-Rhône.

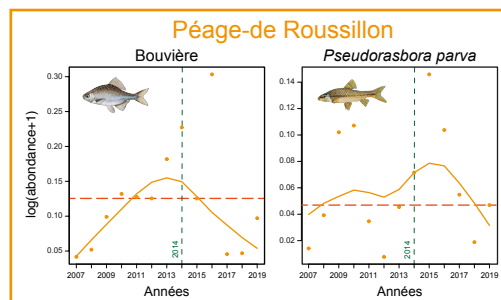


Figure 16 – Evolution temporelle de l'abondance (exprimée en log) de la bouvière et du *Pseudorasbora* dans le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon entre 2007 et 2019. . La ligne pointillée rouge représente la médiane des valeurs sur la période 2007-2019.

L'analyse de la variabilité temporelle de la structure des peuplements ne met pas en évidence d'évolution marquée après modification des débits réservés en 2014 pour les Vieux-Rhône de Montélimar et de Donzère (Figures 17 et 18). A Péage-de-Roussillon, les très forts effectifs échantillonnés après 2014 expliquent la séparation des deux périodes (avant et après 2014) sur la figure 17. Les espèces les plus impliquées dans ces changements sont l'ablette, la bouvière, le gardon, le *Pseudorasbora* et le goujon, ces changements ont peu d'influence sur la valeur de la proportion des espèces d'eau courante (Figure 18), la variabilité temporelle de cette métrique étant très liée à la variabilité de l'abondance relative des ablettes. L'augmentation significative du débit réservé à Baix-Le-Logis-Neuf a été suivie d'une diminution importante de l'abondance du vairon concomitante à une augmentation de l'abondance de l'ablette, et de manière beaucoup plus discrète du barbeau fluviatile et du hotu (Figure 19). Dans les Vieux-Rhône de Montélimar et de Donzère, la variabilité temporelle de la proportion d'individus appartenant aux espèces après 2014 est essentiellement en lien avec la variabilité de l'abondance de l'ablette, et dans une moindre mesure du barbeau et du hotu.

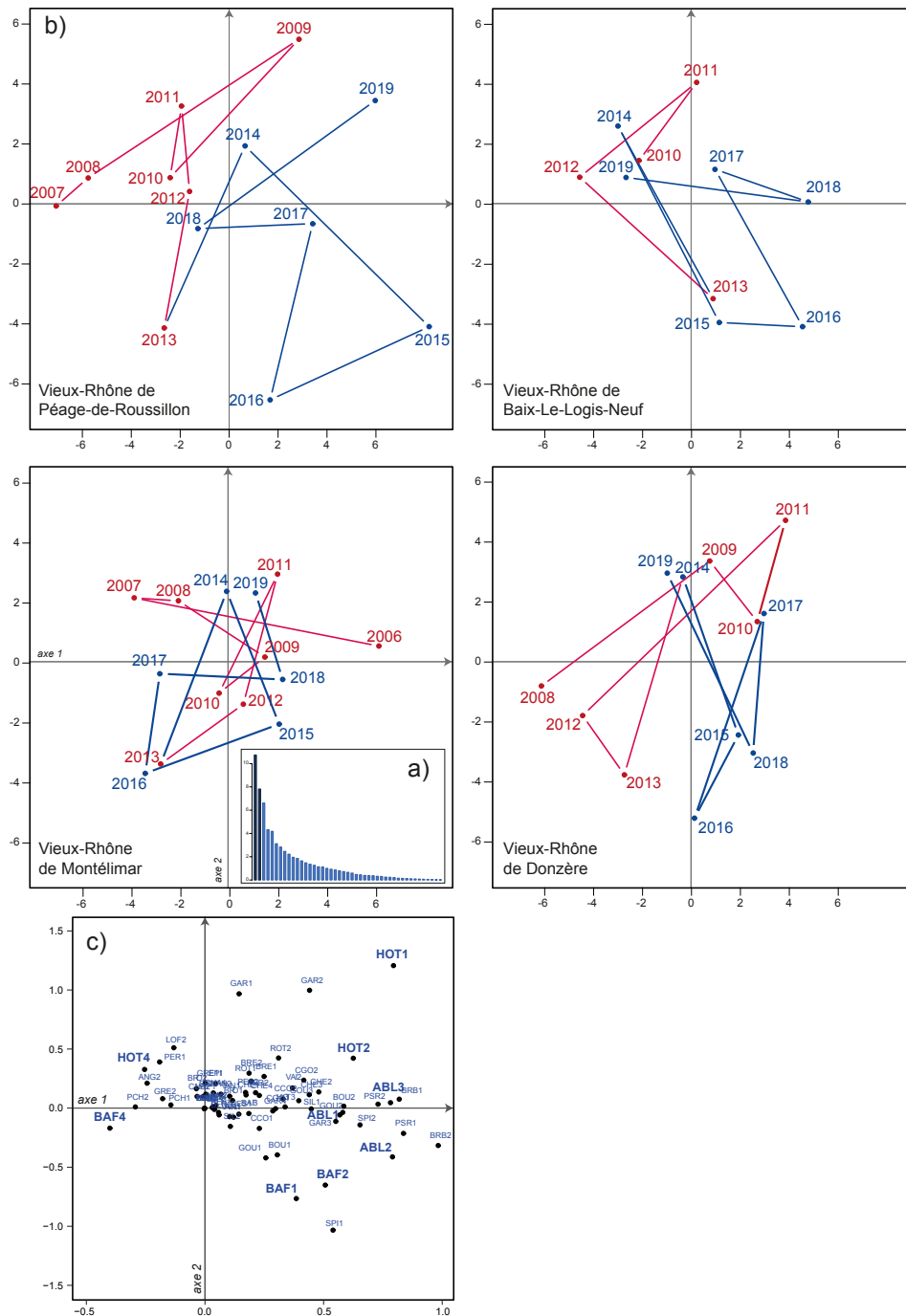


Figure 17 – Représentation de la variabilité intra-Vieux-Rhône pour les 4 secteurs de Péage-de-Roussillon, Baix le Logis-Neuf, Montélimar et Donzère. La projection des coordonnées factorielles des pêches réalisées annuellement dans le plan défini par les 2 premiers axes d'une ACP intra-Vieux-Rhône prenant en considération les données d'abondance par classe de tailles et par espèce transformée (\log_{10} abond. +1) est présentée sur les 4 graphiques supérieurs (b), ces graphiques expriment la variabilité temporelle des résultats des pêches à l'échelle de chaque Vieux-Rhône et ne permettent pas une comparaison directe entre Vieux-Rhône. Les deux premiers axes de l'analyse décrivent ~29% de la variabilité du tableau de données (a). La projection des coordonnées factorielles des groupes de classes de tailles par espèce permet d'identifier les poissons les plus impliqués dans la dynamique temporelle des peuplements.

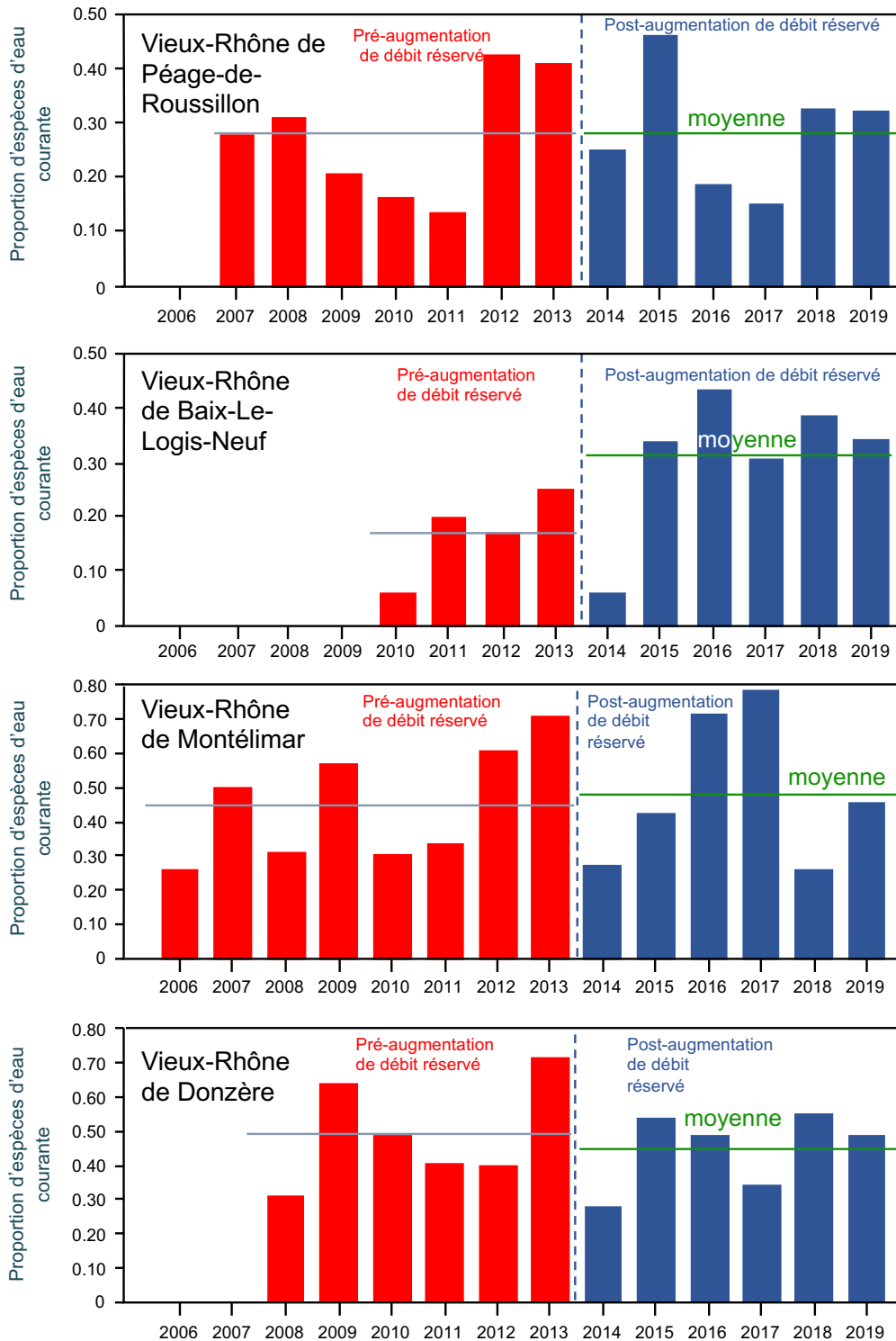


Figure 18 - Abondances relatives des espèces d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, vandoise) dans les Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Baix-le-Logis-Neuf, Montélimar et Donzère, le trait pointillé vertical symbolise la date de changement de débit réservé. La ligne horizontale indique la valeur de la moyenne calculée sur la période correspondante.

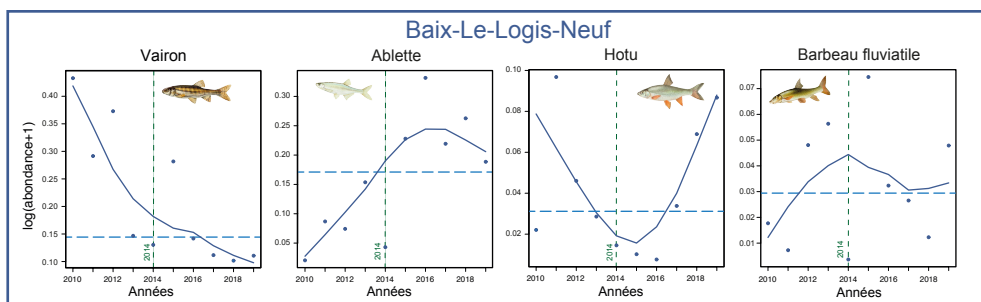


Figure 19 - Evolution temporelle de l'abondance (exprimée en log) du vairon, de l'ablette, du hotu et du barbeau fluviatile dans le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf entre 2010 et 2019.

En conclusion, pour ces quatre Vieux Rhône, l'augmentation du débit réservé est encore récente, elle a été beaucoup plus importante à Péage-de-Roussillon et à Baix-Le-Logis-Neuf qu'à Montélimar et à Donzère. La réponse des peuplements de poissons à ces modifications de débits et des variables hydrauliques associées n'est pas démontrée. Cependant, des modifications de structure de peuplement liées à une augmentation de la proportion de poissons appartenant à la guildes des espèces d'eau courante, l'ablette notamment, semblent révéler une évolution en accord avec les attentes dans le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf.

4.1.2 Réponse des communautés de macroinvertébrés benthiques aux augmentations de débit réservé.

Les macroinvertébrés benthiques, ensemble d'espèces vivant à l'interface eau-sédiment, sont très sensibles à la variabilité spatio-temporelle des habitats (Statzner *et al.*, 1994). Ils constituent également un maillon essentiel des réseaux trophiques reliant la production primaire et la productivité piscicole. De ce fait, l'examen des réponses de ces organismes aux opérations de restauration est un moyen d'en mesurer l'efficacité tant du point de vue de la restauration de la biodiversité que de celle des fonctions écologiques du fleuve Rhône. Trois grands types de résultats étaient attendus suite aux opérations de restauration. En premier lieu, les modifications des contraintes hydrauliques, en lien avec la hausse des débits réservés dans les parties court-circuités (Vieux-Rhône), devaient induire un retour à des communautés renfermant plus d'organismes rhéophiles (littéralement "aimant le courant"), capables de résister aux contraintes hydrauliques plus élevées et généralement plus exigeants en termes de qualité d'habitat et d'oxygénation des eaux, alors même que les aménagements avaient induit une évolution des communautés vers des organismes lénitophiles ("aimant les zones stagnantes") (e.g. Dessaix *et al.*, 1995 ; Dolédec *et al.*, 1996). En second lieu, la modification de la distribution de fréquences des paramètres hydrauliques liés au changement de débits

réservés (largeurs, profondeurs, vitesses de courant, contraintes au fond) peut favoriser des espèces avec des caractéristiques physiques et biologiques particulières, ce qui devrait renforcer la résilience dans les communautés. Celle-ci peut être lue par la prééminence de certains traits biologiques des taxons comme la durée de vie courte en général liée à une plus petite taille, et par une augmentation de la diversité fonctionnelle permettant cette résilience. Enfin, en troisième lieu, les modifications dans la distribution des ressources nutritives étaient susceptibles de modifier les réseaux trophiques, notamment à travers une augmentation de certaines guildes comme les filtreurs passifs dont la nutrition dépend du courant. De plus, une potentielle diversification des groupes trophiques était attendue en lien avec la modification de variabilité spatio-temporelle des habitats.

Un total de 123 campagnes d'échantillonnage, (soit 2312 prélèvements), a été réalisé (Tableau 4) depuis le début du suivi scientifique de la restauration hydrologique et écologique du Rhône initié en 1995 sur le secteur de Pierre-Bénite et étendu par la suite à 8 autres aménagements hydroélectriques (trois secteurs supplémentaires sur le Haut-Rhône et quatre sur le Bas-Rhône).

Tableau 4 - Campagnes d'échantillonnages sur les secteurs suivis du Rhône. En gris les campagnes déjà réalisées. En orange les campagnes prévues. (X) Données issues des travaux de Fruget et Dessaix (non publiés). (1) Données récoltées par l'ARALEP (IBGA). Les lignes rouges symbolisent les dates de rehaussement des débits réservés. P : Printemps, E été. Total 1 : nombre total de campagnes d'échantillonnage, Total 2 : nombre total de prélèvements.

		Haut-Rhône				Bas-Rhône				
		Chautagne	Belley	Brégnier-Cordon	Miribel	Pierre-Bénite (1)	Péage-de-Roussillon	Baix-Le-Logis-Neuf	Montélimar	Donzère-Mondragon
1995	P									
	E									
1996	P									
	E									
1997	P									
	E	X								
1998	P									
	E									
1999	P	X								
	E	X								
2000	P	X								
	E	X								
2001	P									
	E									
2002	P									
	E									
2003	P									
	E									
2004	P									
	E									
2005	P									
	E									
2006	P									
	E									
2007	P									
	E									
2008	P									
	E									
2009	P									
	E									
2010	P									
	E									
2011	P									
	E									
2012	P									
	E									
2013	P									
	E									
2014	P									
	E									
2015	P									
	E									
2016	P									
	E									
2017	P									
	E									
2018	P									
	E									
2019	P									
	E									
2020	P									
	E									
2021	P									
	E									
2022	P									
	E									
2023	P									
	E									
Total 1		23	14	12	10	22	12	10	10	10
Total 2		412	280	380	180	220	240	200	200	200

L'analyse factorielle des changements de la composition faunistique révèle que les changements faunistiques sont plus ou moins marqués selon les secteurs (Figure 20). Sur le Haut-Rhône, les deux secteurs restaurés (Chau et Bell, Figure 20) montrent des évolutions semblables et durables de la composition faunistique sensiblement plus marquées que dans le secteur partiellement restauré (Breg, Figure 20). Le secteur de Miribel non restauré ne montre pas d'évolution synchrone avec les trois autres secteurs témoignant des effets significatifs de la réhabilitation. Sur le bas-Rhône, il faut évidemment distinguer la situation observée à Pierre-Bénite. On note une situation de transition en 2001 avec un changement faible immédiatement après le relèvement des débits (2000) ; puis une évolution en 2002 et 2003 qui marque un changement radical de composition faunistique qui peut ne pas être uniquement lié à la réhabilitation mais également à des conditions hydro-climatiques particulières certaines années. Le changement marqué en 2003 se poursuit ensuite de manière relativement stable et durable témoignant d'un nouveau fonctionnement des communautés. Le recul pour les autres secteurs du Bas-Rhône est encore insuffisant pour conclure sur la robustesse des changements. On note cependant à Baix-Le-Logis-Neuf une évolution de l'année 2017, différente des années pré-restauration.

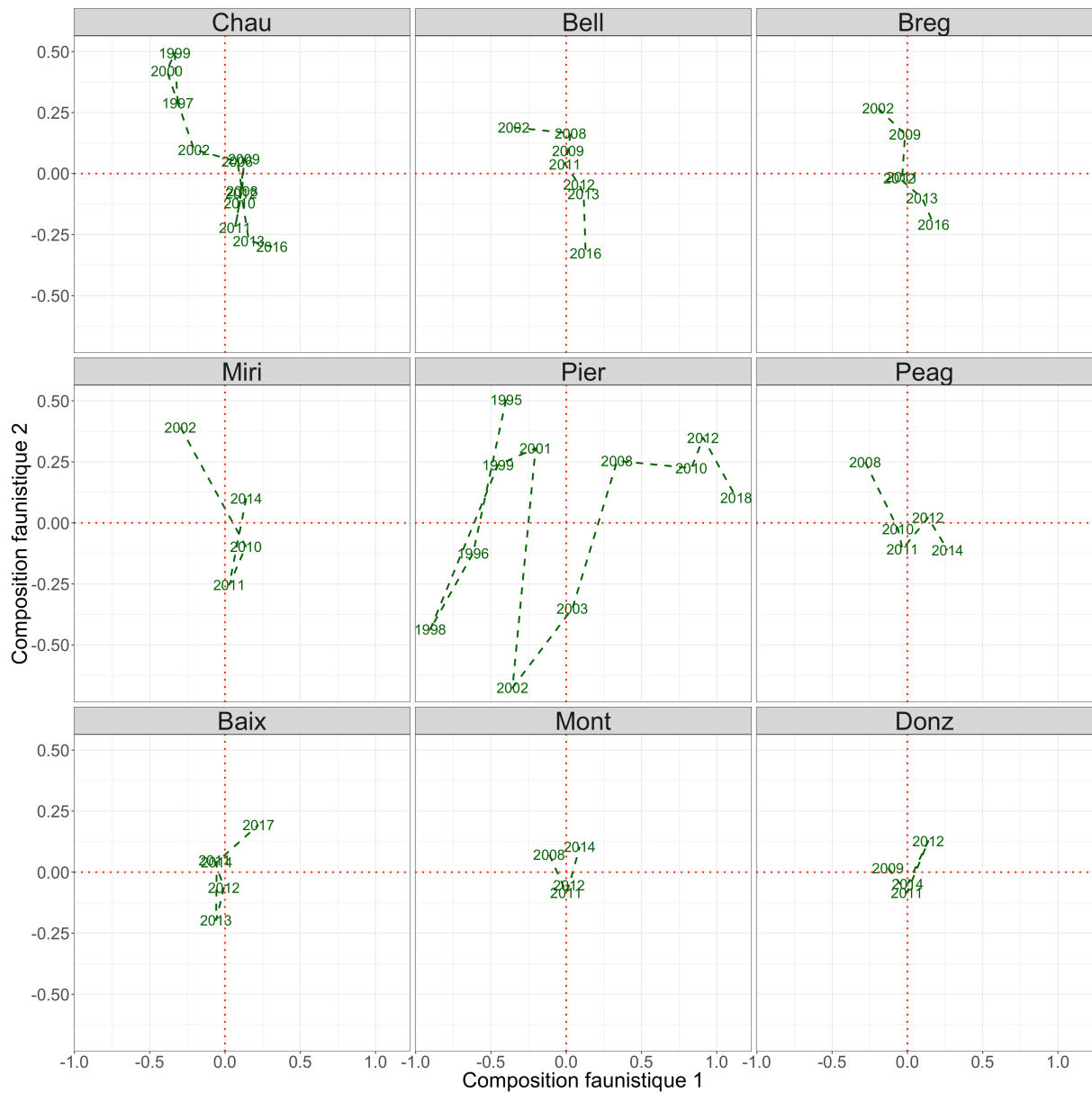


Figure 20 - Résultat de l'analyse factorielle des correspondances intra-secteurs témoignant de l'évolution interannuelle des communautés d'invertébrés par secteur.

4.1.2.1 Signification des changements observés en termes de qualité d'habitat

4.1.2.1.1 Gain de « tolérance au courant »

L'assignation à un degré élevé de tolérance au courant (rhéophilie) des taxons présents avant et après restauration repose sur un travail de modélisation, initialement effectué pour 66 taxons du Rhône (Mérigoux *et al.*, 2009) et réactualisé pour 145 taxons (Annexe 2).

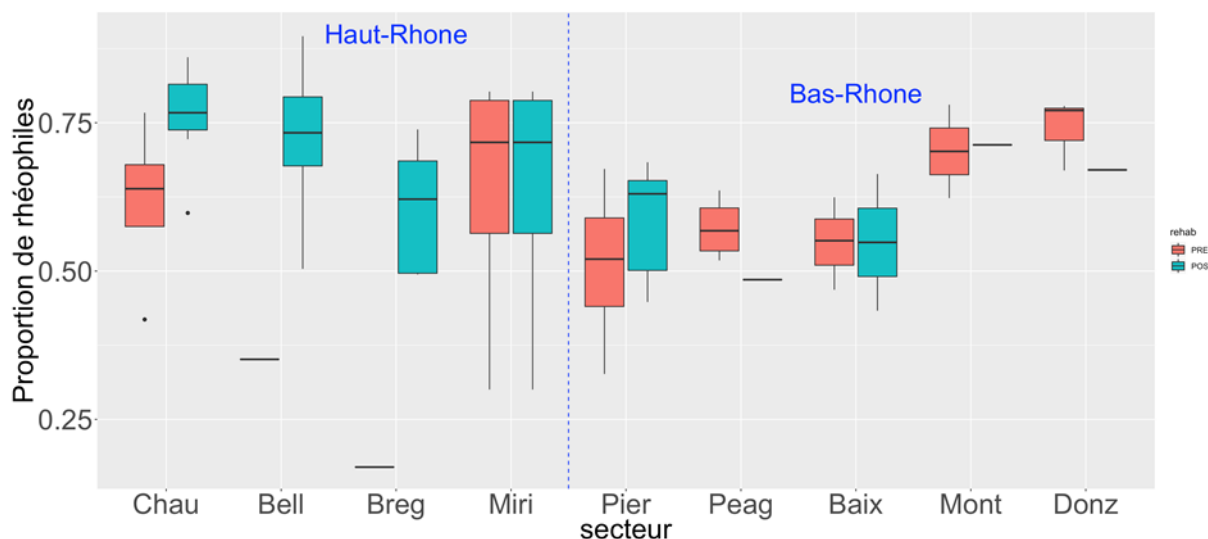


Figure 21 - Comparaison des proportions en taxons rhéophiles avant et après rehaussement des débits réservés dans les 9 secteurs court-circuités suivis dans le cadre du programme RhônEco. La ligne verticale pointillée symbolise la séparation entre le Haut-Rhône et le Bas-Rhône.

Le retour à des conditions hydrauliques plus proches de celles des grands fleuves est visible à travers l'examen des modifications de proportions de taxons rhéophiles (*Heptagenia*, *Simuliidae*, *Ancylus fluviatilis*). Celles-ci ont notablement augmenté suite au rehaussement des débits réservés dans les secteurs de Chautagne, Belley, Pierre-Bénite (Figure 21). Cet effet est également perceptible dans le vieux-Rhône de Brégnier-Cordon même si l'augmentation de débit réservé ne concernait que la partie en amont du Guiers. Compte-tenu de l'hydrologie du Rhône et du Guiers, cette modification de la valeur plancher du débit n'a pas engendré de modifications majeures des caractéristiques des habitats hydrauliques de ce tronçon du vieux-Rhône. Cependant, les proportions de deux espèces rhéophiles emblématiques de grands cours d'eau, *Potamanthus luteus* et *Heptagenia sulphurea* ont très fortement augmenté en amont de la confluence avec le Guiers.

En aval de Lyon, à l'exception de Pierre-Bénite, les données disponibles post-restauration sur les Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Montélimar et Donzère-Mondragon, ne comportent que les campagnes d'échantillonnage de l'année 2014, réalisées quelques mois seulement après le rehaussement des débits réservés et les données disponibles à Baix-Le-

Logis-neuf sont encore préliminaires (seules les campagnes de 2017 ont été dépouillées), ce qui ne permet pas de statuer sur l'efficacité en termes de modifications de l'habitat hydraulique du rehaussement des débits réservés.

Les modifications des conditions hydrauliques, plus proches de celles des grands fleuves après relèvement des débits réservés, peuvent se traduire par une variabilité saisonnière plus importante de la composition taxonomique. En l'état, plusieurs types de réponse sont observées (Figure 22). On observe une tendance à l'augmentation plus ou moins significative de cette variabilité dans certains secteurs (Belley, Brégnier, Pierre-Bénite, Baix) et une tendance à la baisse dans d'autres secteurs (Chautagne, Montélimar, Donzère).

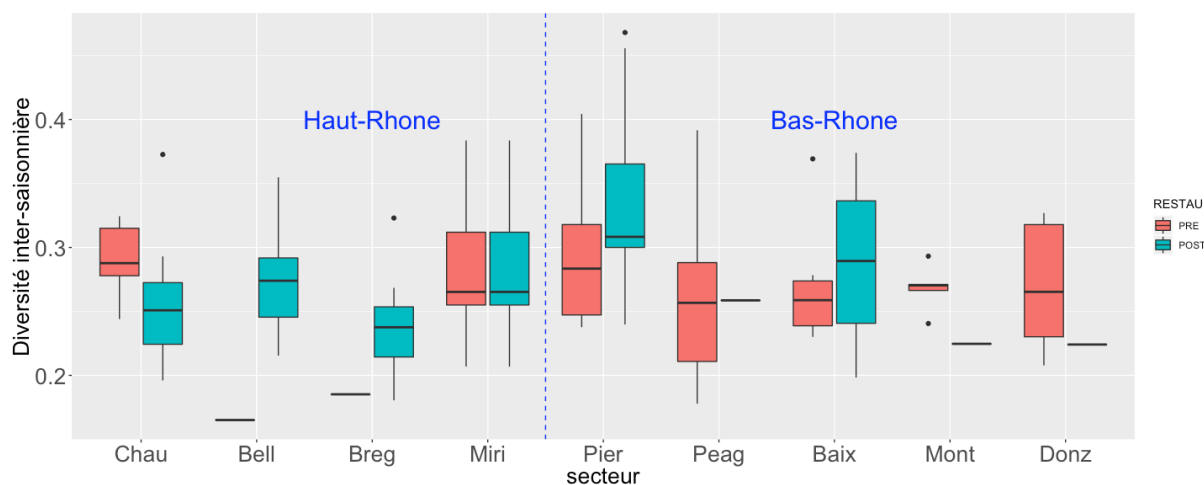


Figure 22 - Comparaison des diversités inter-saisonnières avant et après rehaussement des débits réservés dans les 9 Vieux-Rhône suivis dans le cadre du programme RhônEco.

4.1.2.1.2 Gain de qualité écologique

Plusieurs métriques permettent d'attester d'un gain de qualité des habitats en lien avec la réponse des communautés de macroinvertébrés. Comme précédemment, la faible quantité de données disponibles après rehaussement des débits réservés ne permet pas de statuer sur cet aspect pour certains secteurs (Péage-de-Roussillon, Montélimar et Donzère-Mondragon). La campagne de 2017 (travail de tri et détermination en cours) ainsi que les campagnes programmées sur la période 2019-2023 permettront d'établir un bilan plus précis des changements qui s'opèrent dans ces secteurs. Globalement, la richesse taxonomique est plus importante dans les secteurs du Haut-Rhône que dans les secteurs du Bas-Rhône (Annexe 3). Ceci est particulièrement vrai pour les taxons éphéméroptères, plécoptères et trichoptères (EPT), ce qui témoigne d'une meilleure qualité physico-chimique de l'eau dans le Haut-Rhône par rapport au Bas-Rhône. Contrairement aux attentes, la biodiversité en Insectes Ephémères, Plécoptères, Trichoptères, appelée richesse taxonomique EPT, n'augmente pas significativement après restauration de manière univoque. Par exemple, la proportion en

taxons EPT par rapport à l'abondance totale des macroinvertébrés reste stable à 20% en Chautagne mais progresse significativement de 10 à 26% à Pierre-Bénite. De plus, la richesse en Plécoptères augmente dans tous les secteurs qui ont bénéficié d'une importante augmentation de débit réservé et pour lesquels la durée d'observation est suffisante (Chautagne, Belley pour le Haut-Rhône et Pierre-Bénite, Baix-Le-Logis-Neuf pour le Bas-Rhône). Parmi ces taxons (*Amphinemura*, *Nemoura*, *Protonemura*, *Brachyptera*, *Isoperla*) pas ou peu rencontrés avant rehaussement des débits réservés figurent des taxons collectés sur le Haut-Rhône avant la construction des barrages (Perrin, 1978). Cette augmentation du nombre de taxons de Plécoptères s'accompagne d'une augmentation de leurs abondances (Annexe 4) ce qui témoigne de la réinstallation de ceux-ci face à des conditions meilleures en termes de qualité et de quantité d'eau. De manière assez inattendue, la richesse taxonomique et l'abondance en EPT pour le secteur de Brégnier-Cordon ont augmenté considérablement après 2006. Ce secteur a probablement bénéficié de la restauration écologique importante des chenaux secondaires, qui améliore les conditions d'habitat à une échelle plus large et, potentiellement, des effets positifs observés sur les secteurs amont les plus proches.

D'autres métriques voient leur valeur changer significativement avec les opérations de restauration. Par exemple, en lien avec les métriques précédentes, une augmentation de la métrique ASPT ("Average Score Per Taxon", Armitage, 1993) suggère une augmentation de la sensibilité des communautés d'invertébrés à la qualité de l'eau post-restauration. C'est ce qu'on observe dans les Vieux-Rhône de Chautagne et de Pierre-Bénite avec une augmentation significative de 5% (passage à la classe de bonne qualité) et 8% (qualité moyenne) respectivement des valeurs d'ASPT. La proportion de taxons présentant un risque à l'exposition aux contaminants toxiques augmente également significativement ce qui se matérialise par une augmentation de l'indicateur SPEAR (Liess & Von der Ohe, 2005) de 25% en Chautagne et de 35% à Pierre-Bénite. Avec une augmentation des débits, on pouvait s'attendre à une augmentation de la proportion des taxons potamiques (de grands fleuves). Cette proportion oscille entre 28 et 31% de la communauté sur l'ensemble du Rhône sans présenter de patterns en lien avec la restauration.

Enfin, parmi les espèces récoltées dans le cadre du suivi RhônEco, 22 étaient non natives du Rhône (exogènes ; Annexe 5). Ces espèces ont toutes colonisé le Bas-Rhône alors que seules 14 espèces ont été retrouvées sur le Haut-Rhône. Ceci souligne le rôle important de la Saône comme vecteur de dispersion et de colonisation pour les espèces exogènes d'origine Ponto-caspienne (e.g. Bollache *et al.*, 2004 ; Galil *et al.*, 2008).

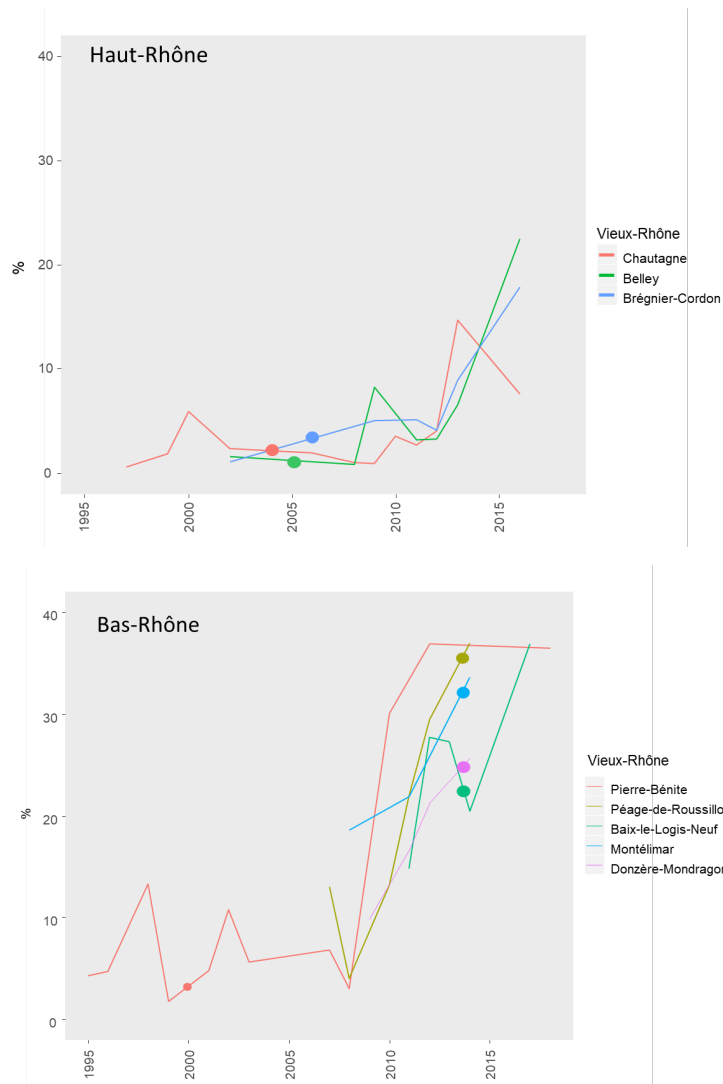


Figure 23 - Évolution de la proportion annuelle de taxons exogènes pour chaque secteur suivi. Les ronds symbolisent la date de rehaussement du débit réservé pour chaque secteur.

Ce phénomène de colonisation, observable à l'échelle du fleuve Rhône mais qui concerne également tous les grands cours d'eau européens (Galil *et al.*, 2008) a commencé à la fin du 17^{ème} siècle (Vinarski, 2017) de manière concomitante avec l'augmentation des échanges commerciaux intercontinentaux (le mollusque *Physella acuta* originaire d'Amérique du Nord est recensé sur le Rhône en 1881) et la construction de canaux (Danube-Main-Rhine ouvert en 1992) qui mettent en communication les grands fleuves européens et facilitent ainsi la diffusion des propagules (Devin *et al.*, 2005). Par ailleurs, le réchauffement climatique est probablement à l'origine des dernières vagues d'installation de crustacés thermophiles d'origine Ponto-Caspienne (Rahel & Olden, 2008). Certaines espèces exogènes ne présentent pas de caractère envahissant dans les Vieux-Rhône (e.g. *Crangonyx pseudogracilis*, *Barbronia weberi*) contrairement à d'autres (*Dikerogammarus villosus*, *Jaera istri*) connues pour leur capacité à modifier la structure des communautés en place (compétition, prédation,

modification des flux de nutriments ; Bollache *et al.*, 2004 ; Devin *et al.*, 2005). Ces interactions interspécifiques peuvent alors contrarier la réponse des taxons natifs aux actions de restauration écologique. Cependant, l'évolution de la proportion des espèces non-natives n'apparaît pas liée aux opérations de restauration. En effet, nombre d'entre elles ont été collectées dans le Rhône entre 1980 et 1990 (e.g. *Gammarus tigrinus*, *Lithoglyphus naticoides*, *Menetus dilatatus*) soit bien avant les premières opérations de restauration hydraulique et écologique (Pierre-Bénite, 2000). De même sur le Haut-Rhône, l'augmentation importante de la proportion de taxons non-natifs (*Dikerogammarus villosus*, *Corbicula fluminea*, *Potamopyrgus antipodarum* et *Hypania invalida*) a débuté en 2010, soit après la période de restauration 2004-2006. Sur le Bas-Rhône, ce même phénomène a été observé à partir de 2010-2011, soit avant les opérations de restauration de 2014 (Figure 23).

4.1.2.2 Signification des changements observés en termes de résilience et résistance des communautés

L'efficacité de l'augmentation des débits dans les Vieux-Rhône peut également être perçue à travers l'examen des caractéristiques biologiques permettant de survivre à des conditions environnementales données. Le retour à des contraintes hydrauliques plus naturelles devrait favoriser les taxons résilients caractérisés par une plus petite taille et de plus nombreux cycles de reproduction dans l'année. On observe effectivement une augmentation significative et durable de la proportion d'individus de taille inférieure à 10 mm dans les Vieux-Rhône de Chautagne et de Pierre-Bénite (Figure 24).

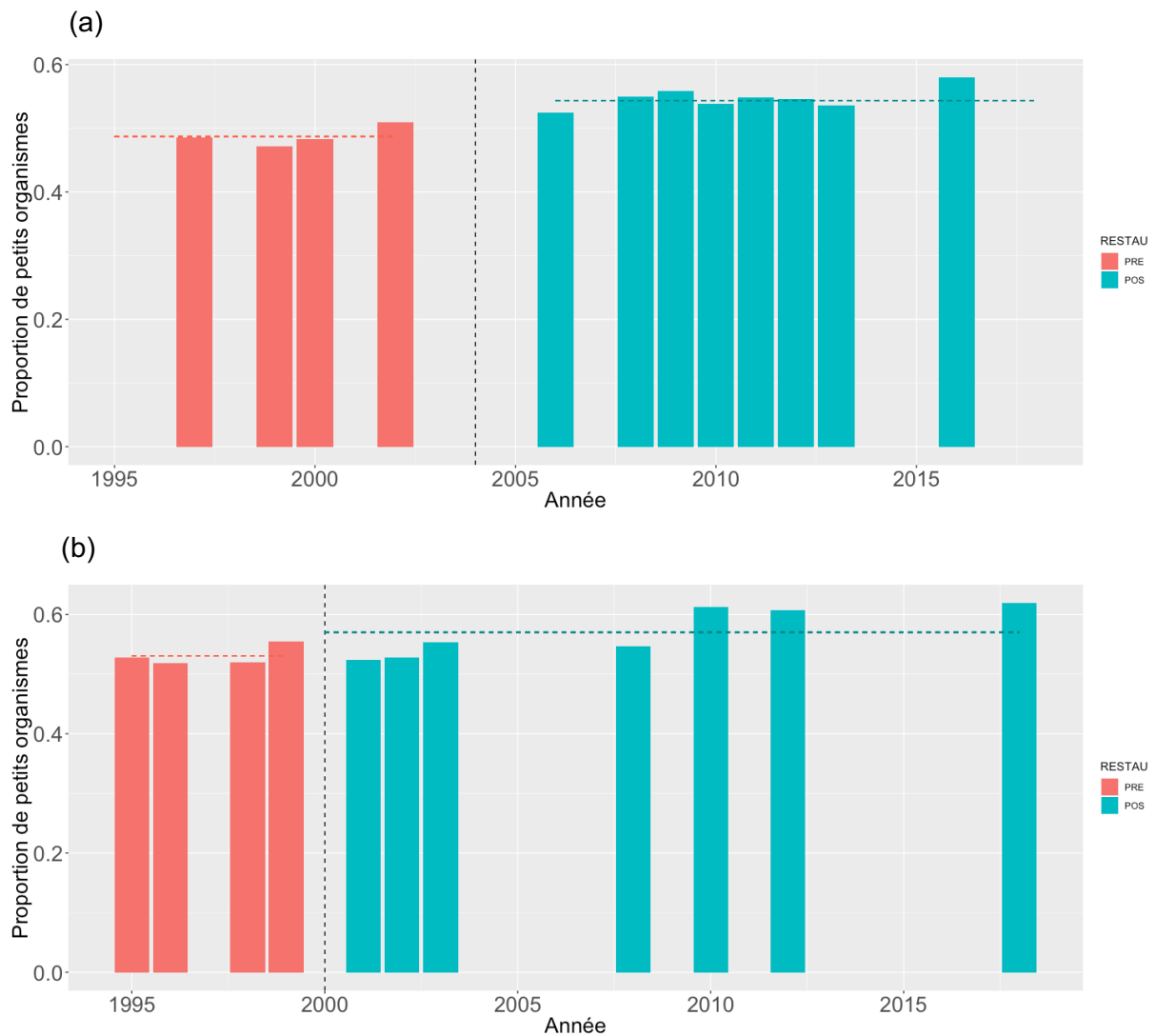


Figure 24 - Évolution temporelle de la proportion de petits organismes dans les Vieux-Rhône de Chautagne (a) et de Pierre-Bénite (b). Le trait pointillé horizontal marque la valeur moyenne avant et après restauration.

De manière concomitante, la proportion d'individus plurivoltins (deux ou plus générations par an) augmente significativement à Pierre-Bénite mais de manière plus marginale en Chautagne (Figure 25).

De plus, l'augmentation des contraintes hydrauliques devrait limiter l'abondance des taxons nageurs (car emportés par le courant) et sélectionner des taxons qui résistent au courant avec des dispositifs d'accrochage mais également de forme allongée ou aplatie donnant moins de prise au courant. La diminution de la proportion des individus nageurs est statistiquement significative dans le Vieux-Rhône de Chautagne (Figure 26a). On observe par ailleurs une tendance à l'augmentation de la proportion de formes adaptées aux contraintes hydrauliques

dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite cohérent avec les nouvelles contraintes hydrauliques post-augmentation de débit réservé (Figure 26b).

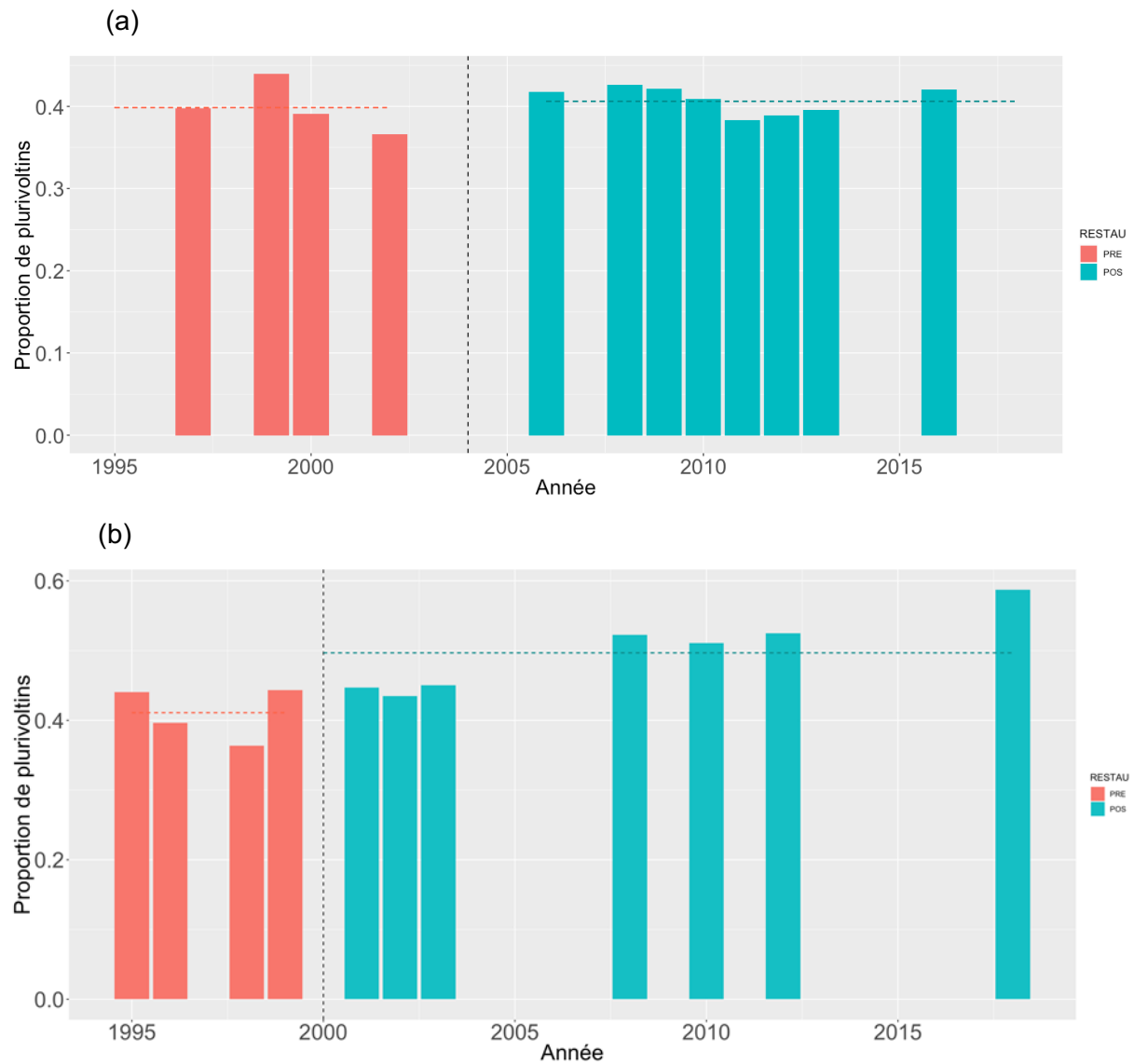


Figure 25 - Évolution temporelle de la proportion de taxons plurivoltins dans les Vieux-Rhône de Chautagne (a) et de Pierre-Bénite (b). Le trait pointillé horizontal marque la valeur moyenne avant et après restauration.

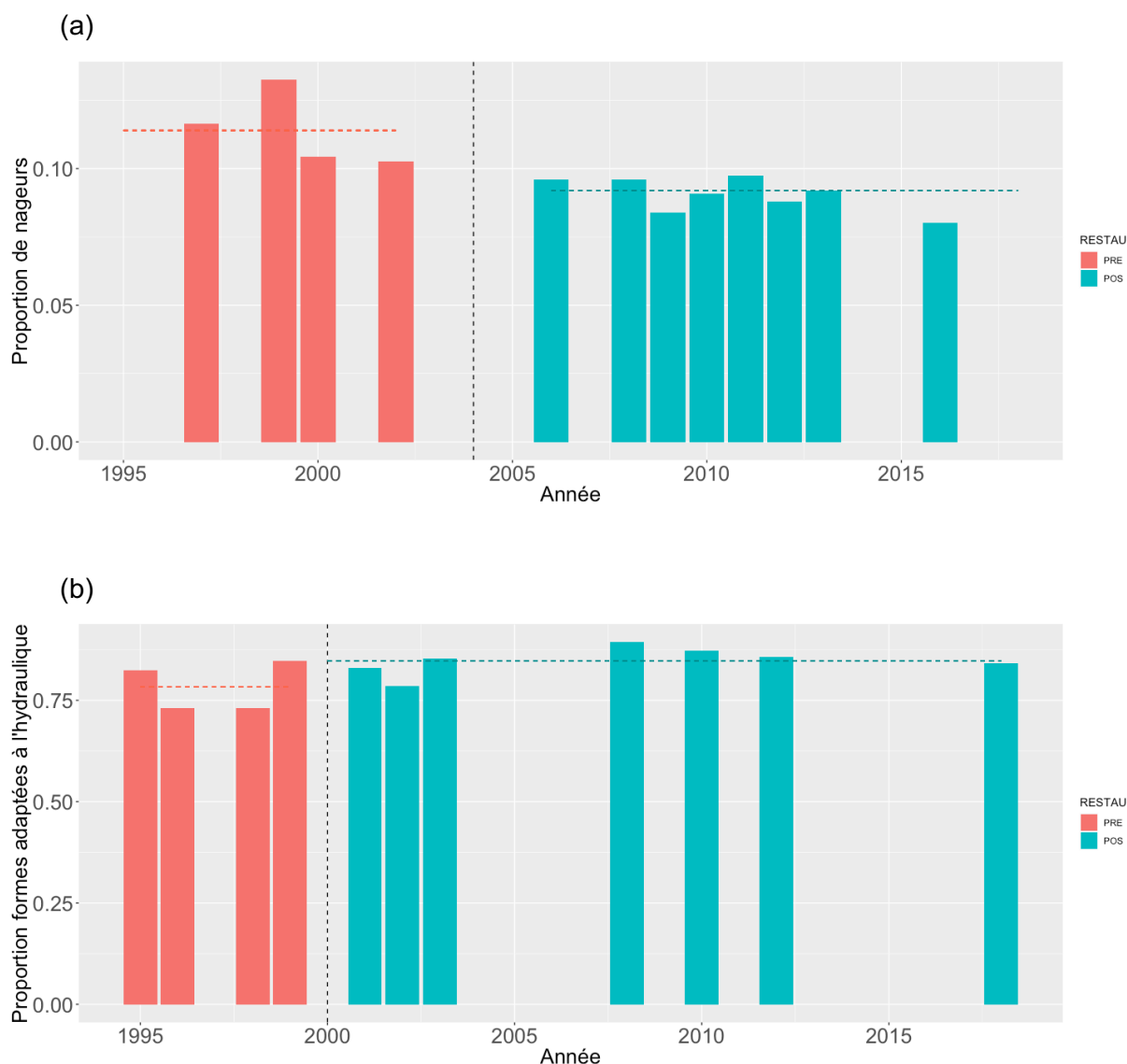


Figure 26 - Évolution temporelle de la proportion de nageurs dans le Vieux-Rhône de Chautagne (a) et des formes adaptées aux contraintes hydrauliques (allongées et aplaties) dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite (b). Le trait pointillé horizontal marque la valeur moyenne avant et après restauration.

4.1.2.3 Signification des changements observés en termes de réponses fonctionnelles et trophiques

On attire l'attention du lecteur ici sur le fait que les régimes alimentaires des taxons étudiés sont plastiques et que les observations faites ci-dessous représentent un potentiel des communautés et n'ont qu'une valeur indicative. L'augmentation des débits réservés est susceptible d'induire une augmentation en ressources alimentaires dans la colonne d'eau favorable aux filtreurs passifs (filtreurs qui se servent du courant pour se nourrir au contraire des filtreurs actifs (ex. mollusques qui créent eux-mêmes le courant alimentaire). Cette

augmentation de l'abondance des filtres passifs est effectivement observée dans certains secteurs du Haut-Rhône (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon ; Figure 27a). Ces changements sont plus ténus sur le BR (ex. Pierre-Bénite. Par contre, les proportions de filtres passifs changent peu au court du temps d'un secteur à un autre. C'est l'ensemble filtres actifs et passifs qui voient sa proportion augmenter suite aux opérations de restauration notamment de manière modeste en Chautagne, et de manière plus prononcée à Baix-Le-Logis-Neuf (Figure 27b). Ces changements peuvent être interprétés comme un retour à des conditions de milieu plus en rapport avec les zones de grands fleuves en lien avec l'évolution longitudinale des cours d'eau (Cf. Vannote *et al.*, 1980).

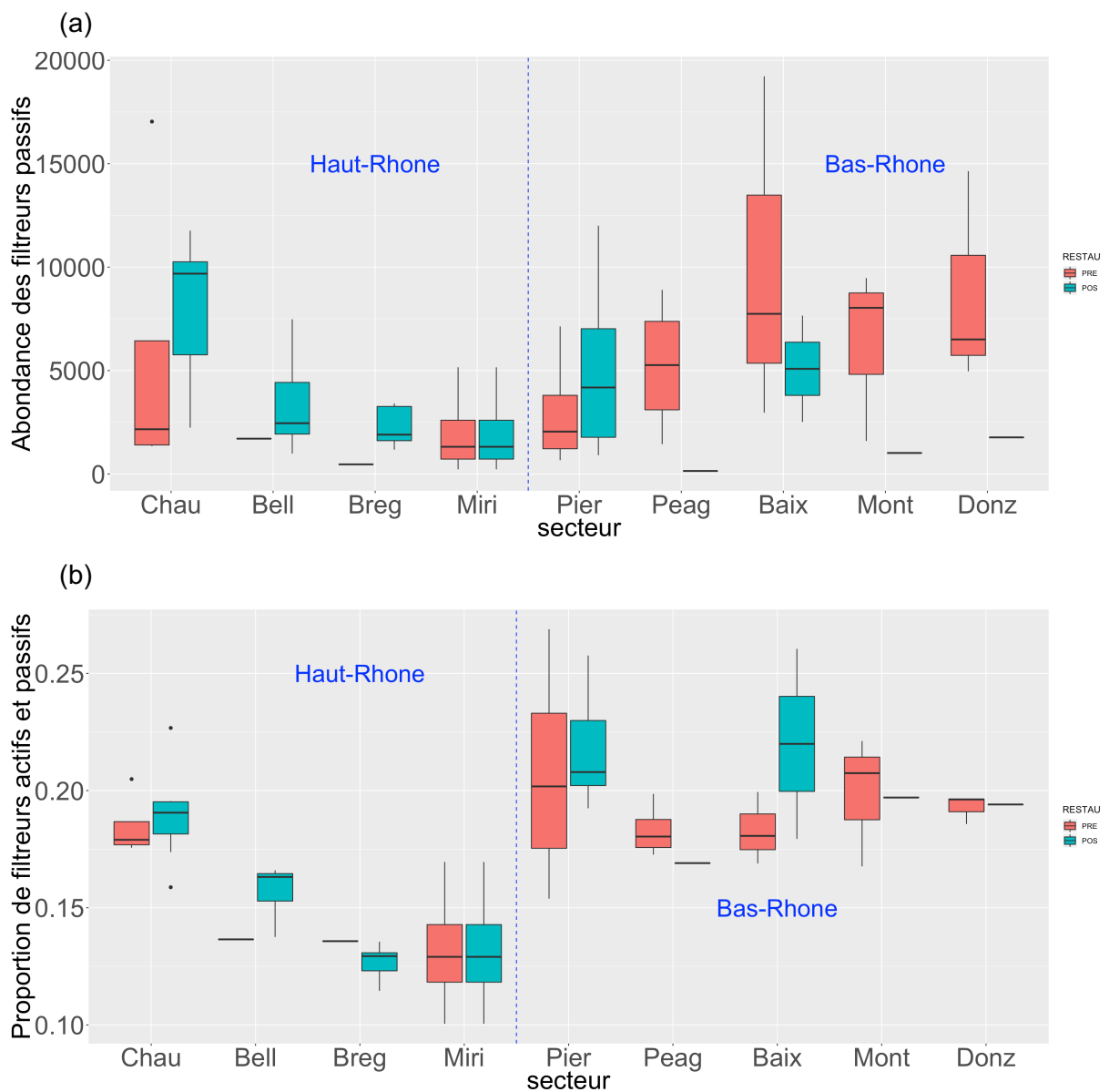


Figure 27 - Évolution longitudinale avant-après restauration de l'abondance des filtres passifs (a) et la proportion de filtres (b).

De même, l'augmentation sensible sur certains secteurs (Chautagne, Belley, Baix-Le-Logis-Neuf ; Figure 28) de la proportion de taxons brouteurs herbivores est également un signe d'évolution vers des conditions environnementales et trophiques habituelles des plus grands fleuves.

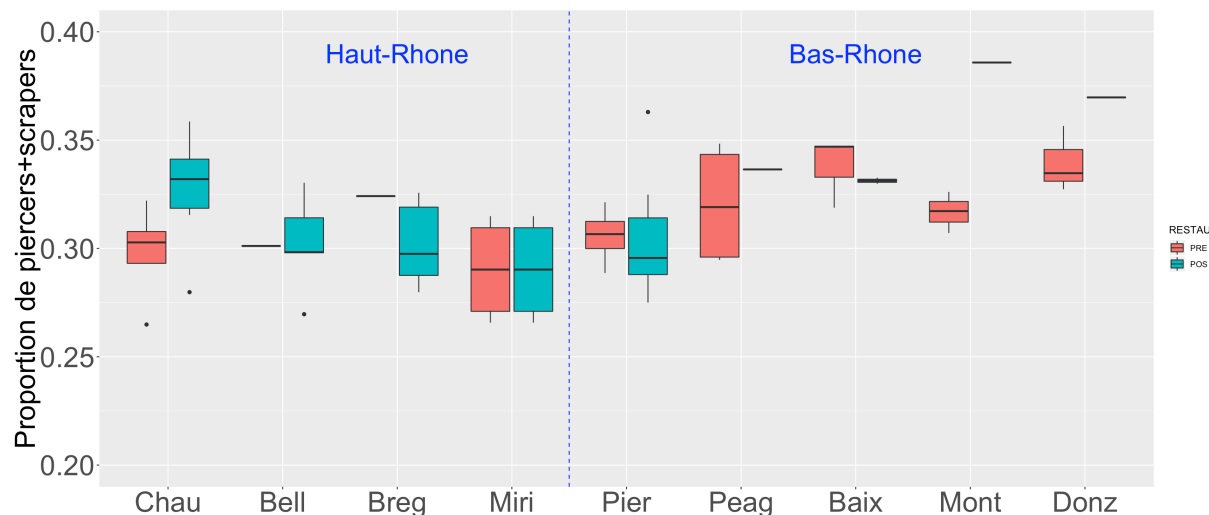


Figure 28 - Évolution longitudinale avant-après restauration de la proportion d'herbivores.

Enfin, l'augmentation des contraintes hydrauliques devrait induire également un relâchement des contraintes biotiques fréquemment à l'œuvre dans des milieux plus lenticques. Celui-ci devrait empêcher les prédateurs de dominer les communautés (Paillex *et al.*, 2009). Une tendance faible, mais généralisée, à la diminution de la proportion de prédateurs après augmentation des débits réservés induisant des conditions plus lotiques dans les Vieux-Rhône est effectivement observée (Figure 29).

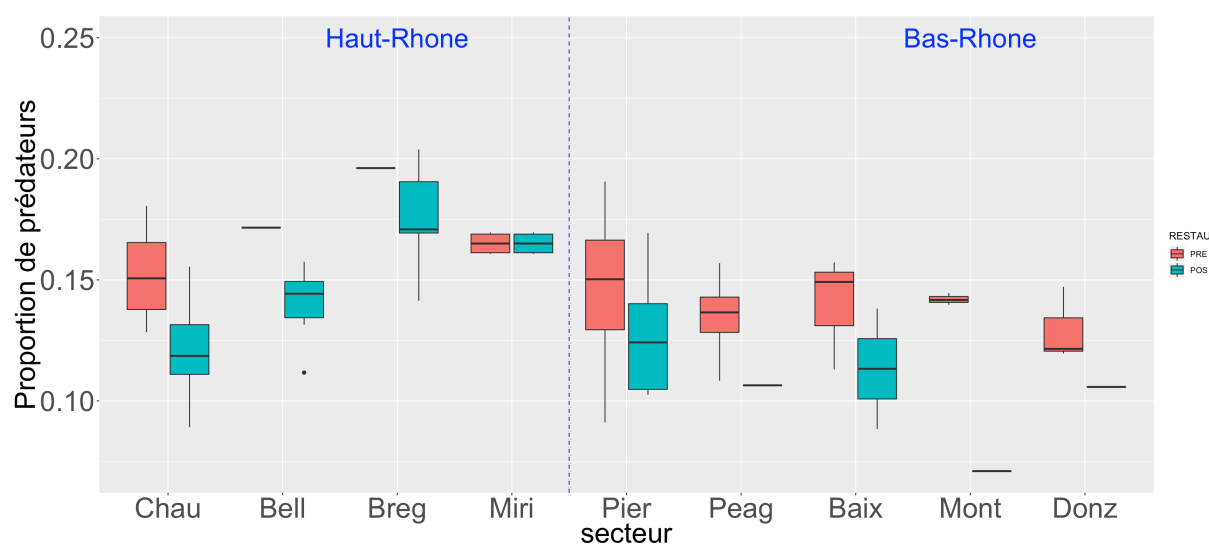


Figure 29 - Évolution longitudinale avant-après restauration de la proportion de prédateurs.

En conclusion, les secteurs suivis diffèrent les uns des autres physiquement (hydrologie, géomorphologie, thermie, ...) et biologiquement (différence de communauté Haut-Rhône/Bas-Rhône, influence des affluents, influence des taxons exogènes) ainsi les comparaisons inter-secteurs peuvent parfois se révéler délicates.

Néanmoins, à l'échelle du secteur, les changements de densités observés suite aux modifications des conditions hydrauliques engendrées par les opérations de restauration sont globalement conformes aux attentes avec une augmentation des taxons ayant de fortes affinités pour les contraintes hydrauliques élevées et une diminution des taxons ayant de fortes affinités pour les contraintes hydrauliques d'intermédiaires à faibles. L'analyse fonctionnelle renseigne également sur l'évolution des secteurs restaurés vers des conditions environnementales et trophiques plus proches de celles habituellement rencontrées dans les grands fleuves.

Enfin, les méthodes d'échantillonnage mises en œuvre dans le cadre de ce programme semblent pertinentes pour observer les changements engendrés par les opérations de restauration des débits réservés dans la mesure où celles-ci sont d'une ampleur assez importante et que suffisamment de données aient été collectées pour définir un état initial robuste (> 2 ans).

4.2 Evolution post-restauration des lônes

4.2.1 Une diversité de conditions d'habitats, de trajectoires évolutives et de durées de vie en lien avec le régime d'écoulement en crue des bras restaurés (Haut-Rhône, Pierre-Bénite)

Les bras restaurés du Haut-Rhône et du secteur de Pierre-Bénite, pour lesquels le recul temporel post-travaux est important (de 10 à 20 années post-travaux), présentent une diversité de trajectoires évolutives en termes de comblement par les sédiments fins (Figure 30). Sur les 16 bras analysés, 6 chenaux possèdent des fonds auto-entretenus par les crues. Pour les 10 autres bras, l'évolution de l'épaisseur moyenne des sédiments fins est significativement liée au temps s'écoulant depuis la restauration. Toutefois, des processus de décapage, observés pour des évènements de crue relativement fréquents (compris entre la crue biennale et décennale, selon le tronçon fluvial considéré), sont identifiables sur la majorité des bras suivis. Ces processus érosifs peuvent rajeunir les bras épisodiquement. Cette capacité de rajeunissement est très variable, en termes de fréquence et d'intensité, selon les bras. Sur les chenaux fonctionnant essentiellement comme des décanteurs, ces épisodes ponctuels permettent de ralentir le processus de comblement, sans pour autant être en mesure de l'inverser (e.g. MALOurdie en Chautagne ou PONTon à Brégnier-Cordon). A l'opposé, certains bras présentent des phases associées à des processus érosifs marqués beaucoup plus longues et/ou intenses, au cours desquelles un export significatif des dépôts initiaux est observé (BROTalet en Chautagne ou CERisiers à Brégnier-Cordon). La poursuite du suivi permettra de mieux quantifier l'incidence des processus de décapage sur les estimations de durée de vie potentielle des bras présentant une sensibilité avérée au comblement par les sédiments fins.

Les trajectoires évolutives des bras (Figure 30) ont été utilisées pour fournir une première estimation des gammes de durée de vie potentielle des bras, à partir de l'exploitation de différents modèles statistiques (pour plus de détails *cf.* Riquier *et al.*, 2017, 2019). Ces modèles sont mis à jour au fur et à mesure de l'intégration des nouvelles campagnes de relevés.

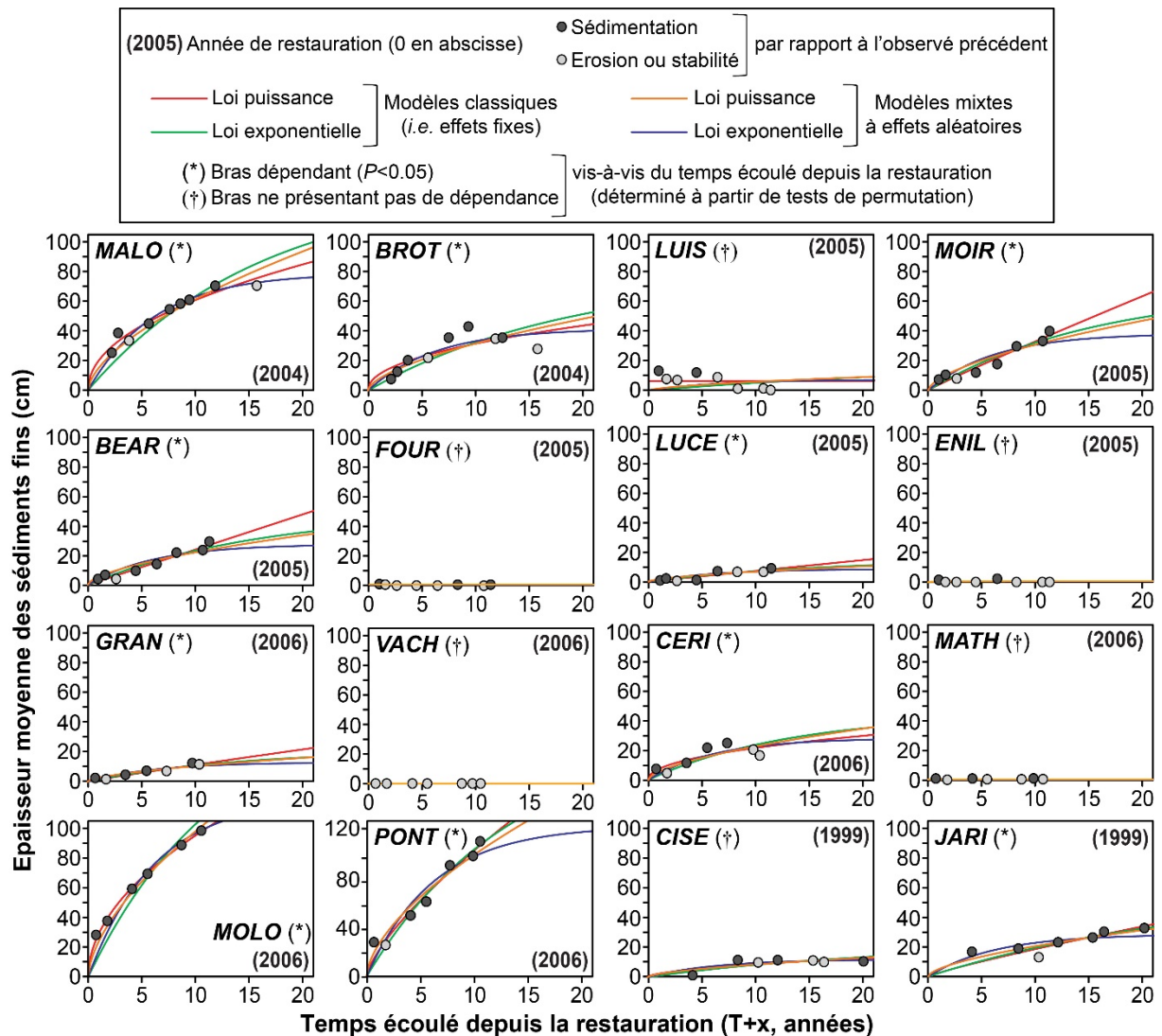


Figure 30 - Évolution du comblement moyen des bras étudiés après restauration (modifié d'après Riquier et al., 2017,2019). Les courbes colorées correspondent aux différents modèles statistiques ajustés sur ces données. Les modèles sont utilisés pour estimer la durée de vie potentielle des bras (Tableau 5).

Quatre situations sont actuellement identifiées pour les 16 bras analysés (Tableau 5) : 6 ont une durée de vie a priori infinie, leurs lits essentiellement composés de graviers/galets sont entretenues par le régime hydrologique ; 5 ont une longévité potentielle supérieure à un siècle ; 3 ont des durées de vie intermédiaires, s'étendant d'environ 3 à 8 décennies ; 2 ont une durée de vie courte, comprise entre deux et trois décennies.

Tableau 5 - Mise à jour de l'estimation de la durée de vie potentielle des bras restaurés des secteurs du Haut-Rhône et de Pierre-Bénite.

Durée de vie en années	MALO	BROT	LUIS	MOIR	BEAR	FOUR	LUCE	ENIL
	42-61 (35-47)	>100 (34-99)	auto-entretien	37-84 (51-90)	34-77 (35-93)	auto-entretien	>100	auto-entretien
	GRAN	VACH	CERI	MATH	MOLO	PONT	CISE	JARI
	>100	auto-entretien	>100	auto-entretien	26-32 (21-32)	25-27 (17-22)	auto-entretien (>100)	>100 (auto-entretien)

Les estimations affichées en caractères gras de couleur bleu correspondent aux valeurs mises à jour. Elles renvoient aux observations réalisées sur la période T0-2016 pour les bras des secteurs de Belley et de Brégnier-Cordon et sur la période T0-2019 pour les bras des secteurs Chautagne et de Pierre-Bénite. Les valeurs affichées entre parenthèses correspondent aux anciennes estimations réalisées sur la période T0/2013-2014, pour l'ensemble des bras (Riquier *et al.*, 2017, 2019). Les estimations sont affichées en caractère gras de couleur noire pour les sites où elles sont restées inchangées sur les deux périodes considérées.

Le régime d'écoulement en crue dans les bras constitue un facteur de contrôle clé des conditions d'habitat et des patrons sédimentaires observés. La caractérisation de cette connectivité de surface des bras repose sur trois descripteurs :

- la durée annuelle moyenne de fonctionnement « courant », c'est-à-dire lorsque les bras se retrouvent complètement connectés au fleuve, qui renseigne essentiellement le potentiel de décapage des bras (capacité de rajeunissement, voire d'auto-entretien). Elle peut également constituer une métrique pertinente pour expliquer le potentiel de sédimentation via des apports sableux, voire limoneux pour les bras de faible énergie ;
- les contraintes de cisaillement maximales enregistrées dans les bras après restauration en fonctionnement courant, c'est-à-dire la pression maximale s'exerçant sur le fond. Cette métrique dépend des hauteurs d'eau et de la pente globale de la ligne d'eau pour le débit considéré. Elle constitue un indicateur du potentiel de décapage des bras. Elle permet également de mieux cerner les effets potentiels des épisodes de fonctionnement « courant » (décapage versus sédimentation) ;
- l'intensité maximale des retours d'eau, qui renseigne le potentiel de sédimentation des bras par décantation (dépôts de limons), lors des épisodes de reflux (connexion aval associée à une déconnexion amont).

Les analyses ont montré que les conditions granulométriques moyennes observées en surface dans les bras après restauration (Figure 31a), ainsi que les quatre types fonctionnels associés, sont bien prédits à partir de ces descripteurs du régime d'écoulement en crue dans les bras. Il en est de même pour l'intensité d'accumulation des sédiments fins et en conséquence leur durée de vie potentielle (Figure 31b, Tableau 5). L'ensemble de ces résultats a permis de mettre en évidence que la restauration des bras du Rhône constitue une solution à la fois pertinente et pérenne dans le contexte de l'évolution post-aménagement du Rhône actuel. L'intérêt des descripteurs du régime d'écoulement utilisés réside dans le fait qu'ils sont, au moins en partie, dépendants de la géométrie et de la topographie des bras (e.g. cote de débordement amont ou conditions de pente), sur laquelle il est possible d'intervenir lors des travaux. Ces modèles, qui restent encore largement perfectibles (Cf. §5), constituent d'ores et déjà des outils opérationnels pertinents pour : (i) guider la conception technique des futurs bras à restaurer du Rhône, ou encore (ii) anticiper les effets potentiels de mesures de gestion adaptative des sites déjà restaurés, en termes d'ajustement hydro-sédimentaire des bras. Des avancées récentes montrent qu'il est possible d'enrichir cette « boîte à outils », notamment en couplant les données de macrofaunes benthiques avec les modèles d'évolution hydromorphologique des bras (Cf. §4.2.5). Enfin, ces modèles ont également démontré leur utilité au-delà du cadre de la problématique de la restauration du fleuve (étude d'impact des opérations de gestion sédimentaire de 2012 et de l'APAVÉR 2016), ce qui illustre bien l'importance de la dimension observatoire à long termes du suivi.

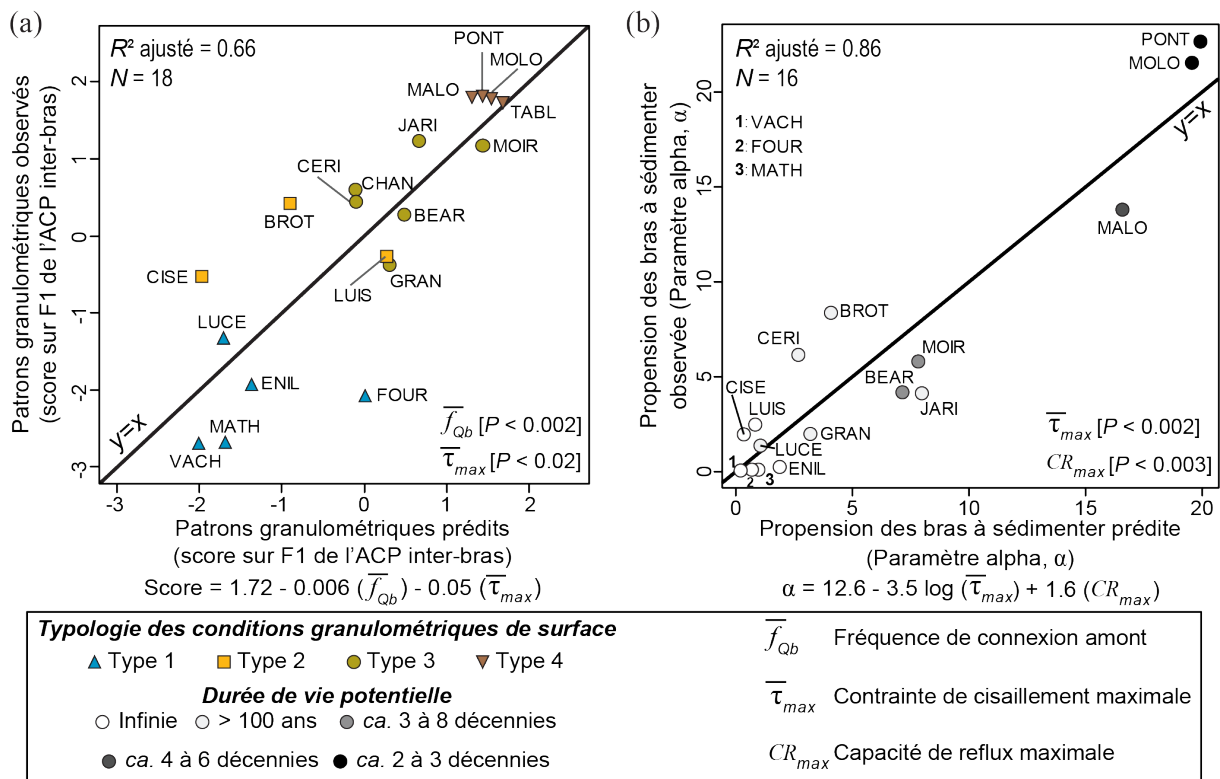


Figure 31 - Exemple de relations statistiques permettant de prédire (a) les conditions granulométriques moyennes post-restauration et (b) la propension des bras à accumuler des sédiments fins à partir de leurs caractéristiques d'écoulement en crue [tiré de Riquier, 2019 ; modifié et adapté d'après Riquier et al. (2015) et Riquier et al. (2017)].

4.2.2 Vers une prédiction *a priori* des conditions hydromorphologiques des bras restaurés et non restaurés généralisée à l'ensemble du corridor rhodanien

Depuis les années 2010, les efforts de restauration des îlons ont porté sur les secteurs du Rhône en aval de Lyon (Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, Vieux-Rhône de Montélimar et de Donzère-Mondragon). Toutefois, si les modèles de prédiction des vitesses de comblement et des patrons granulométriques ont été validés sur les secteurs du Haut-Rhône (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon) et de Pierre-Bénite, la question de leur généralisation se pose. Autrement dit, ces modèles peuvent-ils être utilisés dans des contextes sensiblement différents (bras restaurés *versus* bras non-restaurés, bras situés sur des secteurs du fleuve qui enregistrent des flux sédimentaires différents, tant en termes de granulométrie des flux que de quantité de la charge sédimentaire en transit). L'importance des données acquises

depuis le début du suivi, permet à présent d'explorer cette problématique. Pour le quinquennal 2014-2018, les efforts ont porté sur les modèles de prédiction des vitesses de comblement.

Des analyses (ANCOVA associées à des tests post-hoc de Tukey) ont été réalisées pour tester l'effet de la localisation des bras le long du corridor rhodanien sur les relations statistiques liant vitesses de comblement (variable à prédire) et les descripteurs du régime d'écoulement des bras (variables explicatives). D'un point de vue général, les modèles produits confirment que les descripteurs de l'hydrodynamisme des écoulements constituent un paramètre de contrôle de premier ordre des vitesses de comblement, et ce quels que soient les tronçons ou le statut, restauré ou non-restauré, des bras (Figure 32). Plus la capacité de reflux est élevée et plus les vitesses de comblement sont élevées et, plus la fréquence de débordement amont est forte, plus les vitesses de comblement sont faibles. Le pouvoir prédictif de l'intensité maximale des retours d'eau est bon, voire très bon selon les secteurs. Cependant, il est moins bon sur les secteurs du bas-Rhône en aval de l'Isère, tout en restant largement acceptable. Le fait que certaines îles non-restaurées suivies de ce secteur soient relativement cloisonnées par les endiguements constitue un facteur de contrôle additionnel qui peut expliquer que l'on observe une plus forte variabilité des réponses. Le pouvoir prédictif de la fréquence de débordement amont est plus faible, mais reste correct. Les observations réalisées sur les îles du Haut-Rhône et de Pierre-Bénite avaient montré que cette métrique gagnait à être combinée avec une autre (capacité de reflux ou intensité des crues) pour lisser ses effets antagonistes d'un bras à un autre (apports sédimentaires *versus* processus érosifs).

Les analyses ne permettent pas de mettre en évidence de différences statistiques significatives entre les bras des différents secteurs du fleuve testés, en termes de relations entre fréquence de fonctionnement courant et vitesse de comblement ou d'intensité des écoulements (métriques non représentées ici, calcul en voie de finalisation). Il en va de même pour ce qui concerne l'intensité maximale des retours d'eau, à l'exception des bras non-restaurés du Haut-Rhône. En effet, à intensité de reflux équivalente, ces derniers présentent des vitesses de comblement significativement plus faibles que celles observées dans les bras restaurés du Haut-Rhône et ceux restaurés ou non-restaurés du Rhône-moyen et du Bas-Rhône. D'un point de vue pratique, ces résultats sont très encourageants et montrent qu'en ce qui concerne les vitesses de comblement, les modèles produits sur les bras restaurés du Haut-Rhône et de Pierre-Bénite (Figure 31b) sont généralisables aux secteurs du Rhône-moyen et du Bas-Rhône et peuvent donc dès à présent être utilisés pour encadrer les travaux à venir.

Le comportement différencié des bras non-restaurés du Haut-Rhône pose question. Il peut s'expliquer par des différences de géométrie notables avec les autres bras. Il est fort probable qu'il résulte de la combinaison de différents facteurs explicatifs potentiels : (i) le fait que ces chenaux tressés étaient initialement plutôt étroits et peu profonds, ce qui renvoie à une

capacité de piégeage des fines relativement faible, (ii) un remplissage initial (lorsque les bras sont encore connectés à leurs deux extrémités) par la charge de fond souvent important de ces bras qui diminue d'autant plus la capacité de piégeage (Dépret *et al.*, 2017 ; Figure 4), et (iii) le fait que ces bras étaient souvent perchés au-dessus du chenal principal, ce qui limite de facto le volume de matières en suspension entrant dans les bras lors des épisodes de reflux.

Enfin, une analyse comparative de la trajectoire évolutive de bras non-restaurés endigués et d'autres « naturels » (non-endigués) qui ont évolué librement a été réalisée sur un jeu de données regroupant des bras du Haut-Rhône et du Rhône en aval de Lyon. Cette étude (Dépret *et al.*, 2017) a permis de mettre en évidence une opposition marquée entre les bras aménagés et les bras naturels (Figure 33). De manière inattendue, les bras naturels (que l'on recense exclusivement sur le Haut-Rhône) se ferment beaucoup plus rapidement que les bras ayant été déconnectés « prématurément » par des digues. Il a été démontré que ce constat était lié au fait que la mise en place des endiguements a tronqué la phase de remplissage des bras connectés amont-aval par la charge de fond, dans un contexte de transport solide actif. Ces ouvrages ont ainsi été à l'origine de la création d'entités paysagères fonctionnant de façon relativement originale, comparativement au fonctionnement des bras naturels (non endigués). Actuellement, les mesures de restauration privilégiées sur le Rhône en aval de Lyon sont d'une part de restaurer des bras vifs connectés en permanence avec le fleuve, puis de redynamiser les marges alluviales de manière à redonner la possibilité au fleuve de venir éroder à nouveau ses berges et de réintroduire la charge alluviale stockée en arrière des digues. Ces mesures sont le plus souvent combinées avec des opérations de réinjection des matériaux grossiers issus des travaux de génie civil. Dans ce contexte et au regard des résultats présentés précédemment (Figure 32), il apparaît primordial de veiller à l'interopérabilité de ces différentes mesures et de générer rapidement un retour d'expérience sur l'ajustement des bras vifs (e.g. dynamique de la charge de fond, érosion latérale).

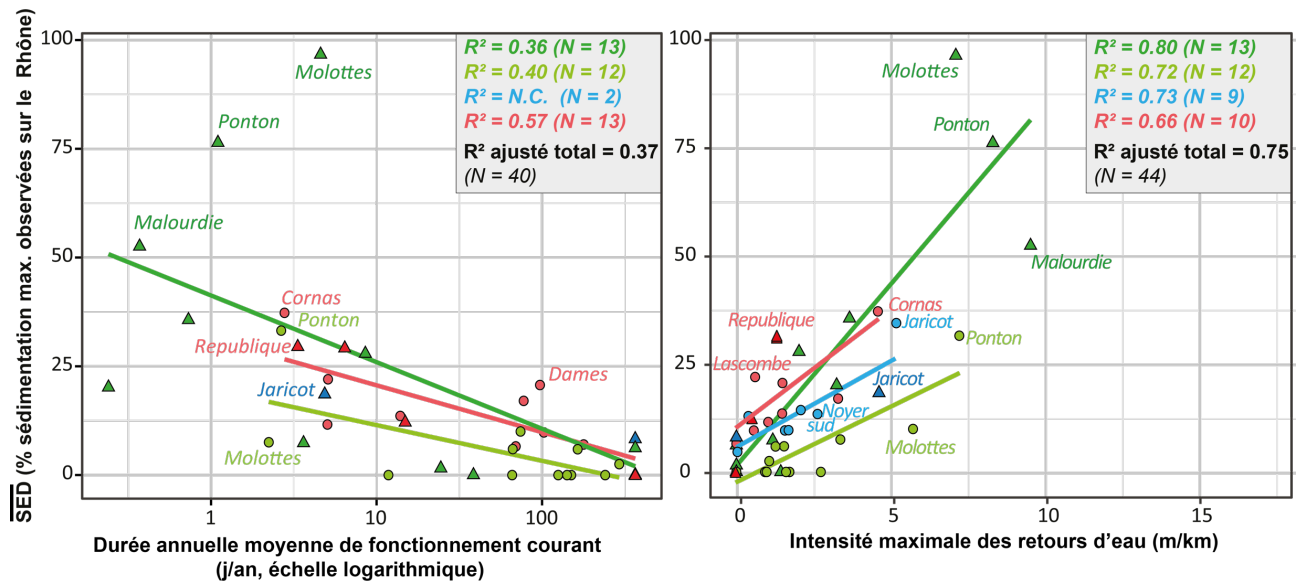


Figure 32 - Exemples de relations statistiques liant les vitesses de comblement moyennes normalisées (\overline{SED}) et les descripteurs de l'hydrodynamisme des écoulements de bras restaurés et non-restaurés dans différents tronçons du Rhône. Les modèles considèrent sans distinction les bras restaurés et non-restaurés pour les secteurs du Rhône moyen et du Bas-Rhône. Ces catégories de bras sont distinguées pour le Haut-Rhône. Les noms des lônes enregistrant les vitesses de comblement les plus élevées sont affichées pour chaque groupe. L'analyse du comblement des différents bras suivis est réalisée dans les fiches de synthèse par secteur. Les taux de sédimentation étant intimement lié à l'âge des bras, ces derniers sont rapportés à une loi de sédimentation maximale observée dans les bras le long du corridor rhodanien. Ainsi, pour chaque bras les taux de sédimentation sont exprimés en part relative de la sédimentation maximale observée le long du Rhône selon l'âge des bras.

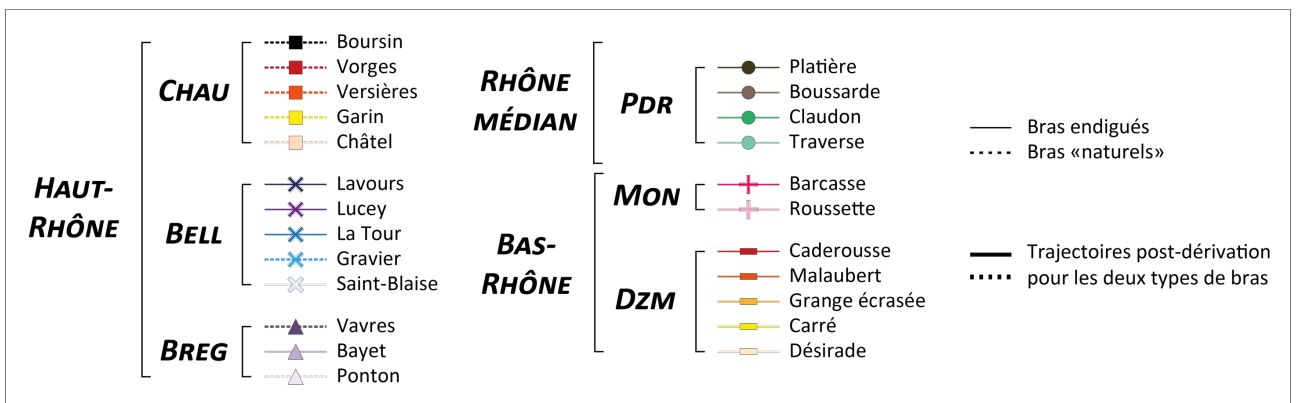
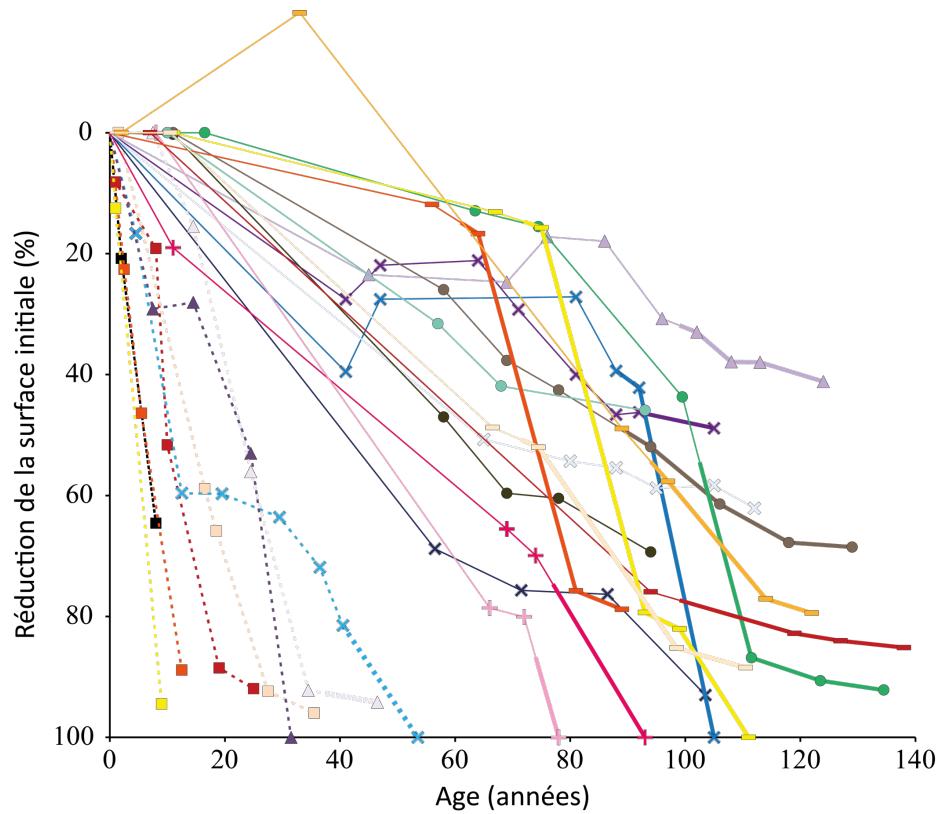


Figure33 - Réduction de la surface active des bras rapportés à leur surface active initiale versus l'âge des lônes (temps écoulé depuis la déconnexion amont). Une valeur de 100% signifie que le bras est complètement atterri. (Adapté d'après Dépret et al., 2017)

4.2.3 Réponse des communautés de macroinvertébrés à la réhabilitation écologique des lônes.

4.2.3.1 1. Résultats globaux sur l'ensemble des secteurs alluviaux étudiés (2003-2017).

4.2.3.1.1 Secteurs, lônes étudiées et calendrier.

De 2003 à 2017 inclus, les peuplements d'invertébrés aquatiques ont été suivis dans 39 lônes du Haut- et du Bas-Rhône (Tableau 6). La répartition par secteurs est la suivante : Belley, 7 lônes ; Brégnier-Cordon, 12 lônes ; Péage-de-Roussillon, 6 lônes ; Montélimar, 1 lône ; Donzère, 13 lônes. Sur le Rhône (Brégnier essentiellement) et à Donzère des lônes non restaurées ont été étudiées pour plusieurs raisons. A Brégnier-Cordon afin de disposer de témoins lotiques et lenticues, mais aussi pour évaluer l'état des populations du gastéropode *Anisus vorticulus* dans des sites non concernés par la restauration. A Donzère des sites ont été sélectionnés et étudiés avant que ne soient désignées les lônes effectivement restaurées. Ils jouent donc de fait le rôle de témoins. Si sur le Haut-Rhône, une seule campagne (printemps + été) est disponible avant restauration, sur le Bas-Rhône, trois campagnes sont disponibles avant restauration dans la majorité des cas mais très peu de lônes ont fait l'objet pour l'instant de suivis « longs » après restauration. Ce n'est le cas que de la lône des Saintes à Péage-de-Roussillon (4 campagnes entre 2013 et 2017) et de la lône de la Roussette à Montélimar (3 campagnes de 2014 à 2016).

4.2.3.2 Une image globale des communautés d'invertébrés de la zone alluviale du Rhône.

Pour la première fois, une description globale des données obtenues concernant les invertébrés aquatiques des lônes des cinq secteurs étudiés est proposée ici. Elle se base sur l'exploitation des données d'abondance de 283 taxons mesurées dans 2'250 échantillons élémentaires (0.25m²) et agrégées par lônes et par campagne, formant un total de 197 unités lône*campagne.

La description de cet ensemble (Figure 34) fait d'abord apparaître une distinction entre lônes lotiques (groupes 1 et 3) et lônes lenticues (groupes 2 et 4). Secondairement, les assemblages benthiques distinguent clairement les secteurs du Haut- et du Bas-Rhône qui

possèdent des caractéristiques faunistiques distinctes. A cette échelle de description, les changements faunistiques pouvant être causés par la restauration ne sont pas perceptibles.

Chaque secteur d'étude et groupe de lînes se distingue par les valeurs des métriques faunistiques (Figures 35 et 36) et par des espèces caractéristiques qui y sont plus fréquentes et abondantes que dans l'ensemble des relevés (Tableau 7).

Si les secteurs du Haut-Rhône peuvent être considérés globalement comme plus diversifiés que ceux du Bas-Rhône (richesse totale significativement plus élevée), c'est surtout le fait des insectes EPT, significativement plus riches sur le Haut-Rhône, particulièrement à Belley et dans les milieux lotiques. Avec 57 taxons EPT (pour 10'000 individus), le secteur de Belley est le premier des secteurs étudiés pour cette métrique. Par contre, la richesse des mollusques gastéropodes n'est pas différente à Brégnier-Cordon et à Donzère, de même qu'entre les milieux lentiques du Haut- et du Bas-Rhône. Les espèces exogènes sont nettement plus représentées dans les secteurs du Bas-Rhône, dans les milieux lotiques et lentiques. Sur le Bas-Rhône, les assemblages benthiques comportent en moyenne 20% ou plus d'individus appartenant à ces espèces, alors que cette moyenne est inférieure à 10% sur le Haut-Rhône. Il y a près de sept espèces exogènes de plus (pour 25'000 individus) sur le Bas-Rhône. Le secteur de Péage-de-Roussillon montre les valeurs de densités benthiques les plus élevées, les richesses les plus faibles et la composante exogène la plus marquée (21 espèces et en moyenne près de 40% de l'abondance constituée d'exogènes).

Les taxons les plus caractéristiques des secteurs et des groupes décrits précédemment ont été identifiés par le calcul et le test de la significativité de leur valeur indicatrice au sens de De Cáceres & Legendre (2009) (Tableau 6). Il s'agit des taxons qui sont significativement plus fréquents et abondants dans le groupe de lînes considéré que dans l'ensemble des échantillons. Seuls les taxons présents dans plus de 25% des échantillons du groupe sont conservés.

Les taxons caractéristiques des lînes du Haut-Rhône se distinguent par le fait qu'ils ne sont pas exogènes et indiquent globalement une bonne qualité des milieux tant lotiques (*Potamanthus luteus*, *Theodoxus fluviatilis*, *Silo nigricornis*), que lentiques (*Hippeutis complanatus*, *Valvata cristata*). Sur le Bas-Rhône, plusieurs espèces exogènes sont caractéristiques, comme *Dikerogammarus villosus* qui domine ou remplace les gammarus indigènes dans plus de 89% des échantillons lotiques ou *Jaera istri*, observé pour la première fois vers 2007 et qui est présent dans près des deux tiers de ces mêmes échantillons. Les taxons caractéristiques des lînes du Bas-Rhône sont par ailleurs globalement plus tolérants et ubiquistes (*Caenis luctuosa*, *Baetis*, *Calopteryx splendens*, *Ischnura elegans*). Les milieux lentiques sont très mal caractérisés (une seule espèce, *I. elegans*) et ne possèdent en

commun avec ceux du Haut-Rhône, que des taxons très ubiquistes (*Cloeon dipterum*, *Gyraulus parvus*).

- POINTS ESSENTIELS

- Les 19 lînes suivies sur le Haut-Rhône (Belley et Brégnier) possèdent des communautés d'invertébrés globalement plus riches et plus diversifiées entre elles que les 20 lînes suivies sur le Bas-Rhône (Péage, Montélimar, Donzère). Ceci est particulièrement marqué en ce qui concerne les insectes EPT.
- La prégnance des espèces exogènes au bassin du Rhône est beaucoup plus marquée sur le Bas-Rhône, en nombre d'espèces et en abondance relative dans les communautés.
- Des espèces typiques de bonnes conditions potamiques (*Theodoxus fluviatilis*, *Potamanthus luteus*) ou lenticues (*Valvata cristata*, *Hippeutis complanatus*) sont bien représentées sur le Haut-Rhône mais font défaut ou sont rares sur le Bas-Rhône.
- Les lînes les plus lotiques du Bas-Rhône (PLAT, NOYN, NOYS, DION) sont entretenues hydrologiquement par des affluents non fluviaux. La restauration de l'influence fluviale sur ces sites et la création de chenaux latéraux courants constituent des enjeux forts du suivi faunistique sur le Bas-Rhône.

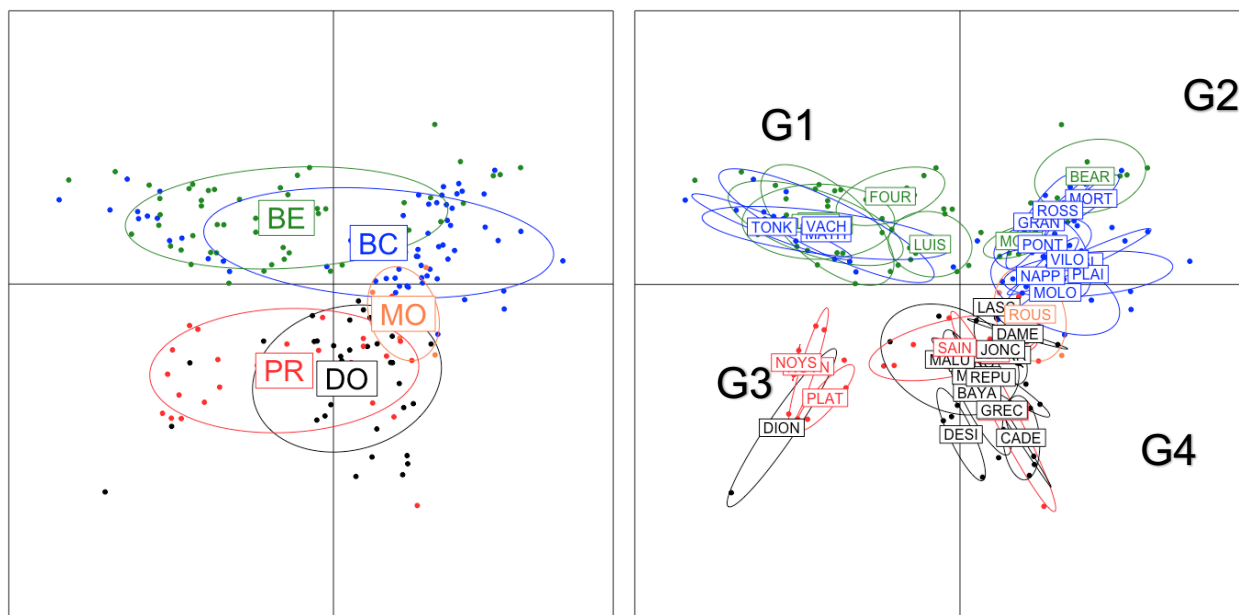


Figure 34 – Analyse en Composantes Principales (ACP) décrivant le jeu de données complet acquis de 2003 à 2017 concernant les assemblages d'invertébrés benthiques (283 taxons dans 39 lômes du Haut-et du Bas-Rhône). Les données élémentaires (2'250 échantillons) sont agrégées par lôme et par période (les 197 points positionnés sur les graphiques). A gauche, les points sont regroupés par secteur : BE – Belley (7 lômes), BC – Brégnier-Cordon (12 lômes), PR – Péage-de-Roussillon (6 lômes), MO – Montélimar (1 lôme), DO – Donzère (13 lômes). A droite, les points sont regroupés par lômes. Sur ce graphique, 4 groupes de lômes sont proposés :

G1 : lômes lotiques et semi-lotiques du Haut-Rhône : TONK, VACH, ENIL, MATH, LUIS, FOUR, CHAN ;

G2 : lômes lentiques du Haut-Rhône : MOIR, BEAR, GRAN, MOLO, PONT, VILO, ROSS, CRBL, NAPP, MORT, PLAI ;

G3 : lômes lotiques du Bas-Rhône : DION, PLAT, NOYN, NOYS ;

G4 : lômes lentiques et semi-lotiques du Bas-Rhône : ILON, SAIN, BOUS, ROUS, GREC, DAME, LASC, MALU, BARO, DESI, MALA, CARR, REPU, BAYA, CADE, JONC. (Voir Tableau x1 pour les codes des lômes).

Le plan factoriel résume 13% de la variabilité du jeu de données initial. Les différences entre secteurs (8% de la variabilité résumée par l'ACP) et entre lômes (39% de la variabilité résumée par l'ACP) sont significatives ($p=0.001$).

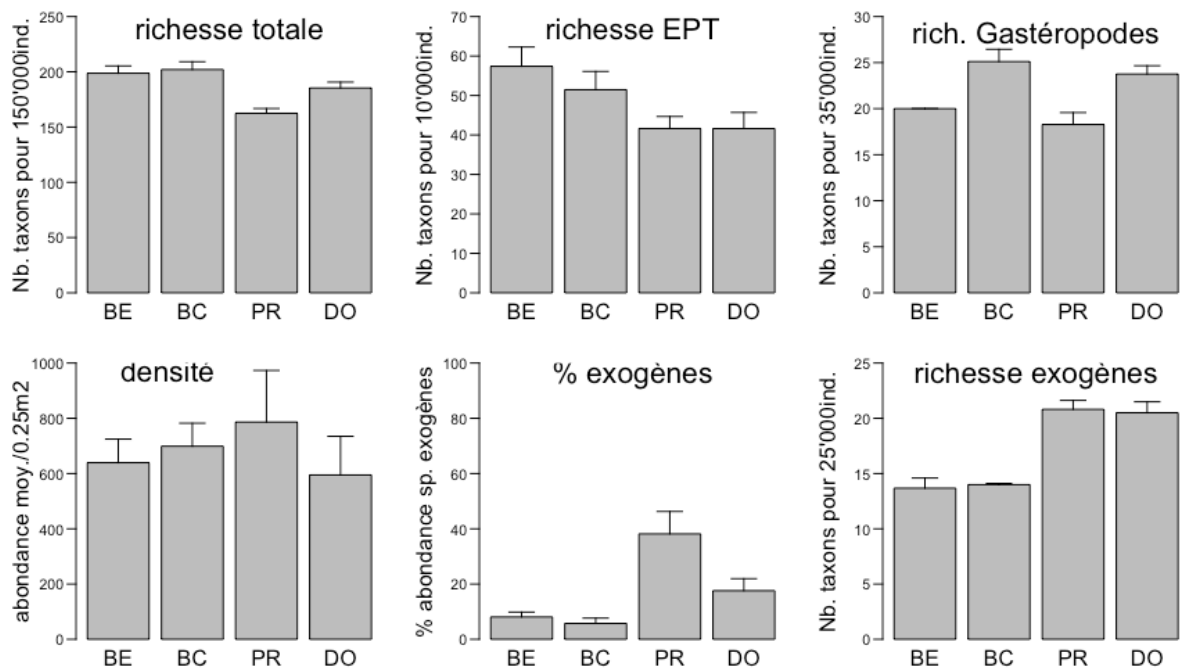


Figure 35 – Valeurs de six métriques faunistiques dans les lônes des secteurs de Belley, Brégnier-Cordon, Péage-de-Roussillon et Donzère. Les richesses sont standardisées pour un nombre d'individus égal entre secteurs. Les densités et pourcentages d'exogènes sont les moyennes par lônes et par périodes. Les valeurs sont représentées avec leur intervalle de confiance à 95%.

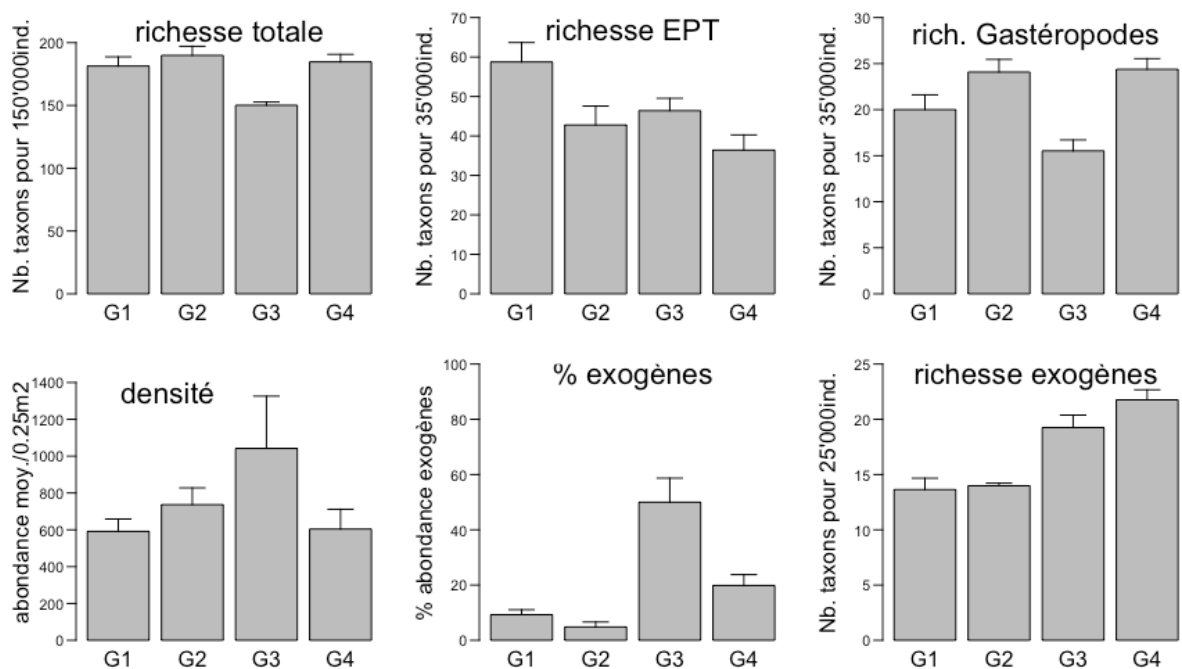


Figure 36 – Valeurs de six métriques faunistiques dans quatre groupes de lônes (Figure x1). Les richesses sont standardisées pour un nombre d'individus égal entre groupes. Les densités et pourcentages d'exogènes sont les moyennes par lônes et par périodes. Les valeurs sont représentées avec leur intervalle de confiance à 95%.

Tableau 7 - Taxons les plus caractéristiques des secteurs et des groupes décrits en Figure 34. Il s'agit des taxons qui sont significativement plus fréquents et abondants dans le groupe de lômes considéré que dans l'ensemble du jeu de données. Seuls les taxons présents dans plus de 25% des échantillons du groupe considéré sont mentionnés et leur fréquence dans l'ensemble des échantillons du groupe est indiquée. N : nombre d'échantillons dans le groupe considéré ; EPT : insectes Ephéméroptères, Plécoptères & Trichoptères ; GA : mollusques gastéropodes ; exo : espèces considérées comme exogènes au bassin du Rhône.

				Haut-Rhône lotique	Haut Rhone	Haut-Rhône lentique	Bas-Rhône lotique	Bas-Rhône	Bas-Rhône lentique	Haut- & Bas-Rhône lotique	Haut- & Bas-Rhône lentique
				G1	G1+G2	G2	G3	G3+G4	G4	G1+G3	G2+G4
n				720	1542	822	156	708	552	876	1374
Amphipoda	<i>Gammarus pulex/fossarum</i>			84.7							
Ephemeroptera	<i>Potamanthus luteus</i>	EPT		72.8							
Gasteropoda	<i>Theodoxus fluviatilis</i>	GA		31.8							
Trichoptera	<i>Silo nigricornis</i>	EPT		26.9							
Hirudinea	<i>Glossiphonia / Albuglossiphonia</i>			42.6							
Gasteropoda	<i>Gyraulus albus</i>	GA		29.1							
Gasteropoda	<i>Hippeutis complanatus</i>	GA				59.4					
Gasteropoda	<i>Valvata cristata</i>	GA				40.6					
Bivalvia	<i>Sphaerium sp</i>					34.9					
Trichoptera	<i>Athripsodes aterrimus</i>	EPT				33.2					
Amphipoda	<i>Dikerogammarus villosus</i>		exo				89.1				
Ephemeroptera	<i>Caenis luctuosa</i>	EPT					72.4				
Isopoda	<i>Jaera istri</i>		exo				65.4				
Trichoptera	<i>Hydroptila sp</i>	EPT					58.3				
Ephemeroptera	<i>Baetis sp</i>	EPT					50				
Amphipoda	<i>Gammarus tigrinus</i>		exo				44.9				
Diptera	Simuliidae ind						42.3				
Odonata	<i>Onychogomphus forcipatus</i>						31.4				
Odonata	<i>Calopteryx splendens</i>						28.2				
Amphipoda	<i>Gammarus roeselii</i>		exo				27.5				
Gasteropoda	<i>Ferrissia clessiniana</i>	GA	exo				26.7				
Odonata	<i>Ischnura elegans</i>							28.4			
Gasteropoda	<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	GA	exo							82	
Bivalvia	<i>Corbicula fluminea</i>		exo							63.9	
Ephemeroptera	<i>Caenis macrura</i>	EPT								52.3	
Gasteropoda	<i>Ancylus fluviatilis</i>	GA								49.8	
Trichoptera	<i>Psychomyia pusilla</i>	EPT								46.3	
Polychaeta	<i>Hypania invalida</i>		exo							43.7	
Coleoptera	<i>Esolus sp</i>									33.3	
Ephemeroptera	<i>Heptagenia cf sulphurea</i>	EPT								31.1	
Turbellaria	<i>Girardia tigrina</i>		exo							29.6	
Diptera	<i>Atrichops crassipes</i>									29.5	
Trichoptera	<i>Goera pilosa</i>	EPT								26.9	
Ephemeroptera	<i>Cloeon dipterum</i>	EPT									75.8
Bivalvia	<i>Musculium lacustre</i>										36.4
Odonata	<i>Coenagrion sp</i>										36.2
Gasteropoda	<i>Gyraulus parvus</i>	GA	exo								32.5

4.2.3.3 Un bilan concernant 11 lômes du Haut-Rhône, 10 ans après restauration.

4.2.3.3.1 Lômes prises en compte et calendrier.

Un ensemble cohérent de 11 lômes sert de base à la description des trajectoires temporelles post-restauration des assemblages d'invertébrés benthiques. Ces lômes offrent cinq périodes de suivi comparables (Tableau 8). L'analyse est menée au niveau de la lôme (et non pas des stations d'échantillonnage) et les échantillonnages de printemps et d'été sont agrégés pour

une même période. Dans le cas des lînes Molottes et Ponton, les stations « amont », non concernées par la restauration ne sont pas utilisées ici.

4.2.3.3.2 Bilan global des métriques faunistiques.

Les métriques faunistiques (Figure 37) montrent globalement peu de différences significatives entre périodes. Les seuls changements significatifs concernent la richesse en insectes EPT et les espèces exogènes. Aux quatre périodes post-restauration, la richesse en insectes EPT est significativement plus élevée que lors de la période pré-restauration. En valeur médiane, le nombre de taxons de ce groupe passe de 11 par lîne avant restauration à plus de 15. Le nombre d'espèces non-indigènes au bassin du Rhône augmente également significativement après restauration. Il passe en effet de 3 par lîne en valeur médiane à 6 -7 à partir de t02, mais ne montre pas de tendance significative à partir de cette période. La fraction de l'abondance des communautés appartenant à ces espèces exogènes fluctue au cours du suivi, mais atteint plus de 10% à t10.

4.2.3.3.3 Restauration et trajectoire temporelle des communautés d'invertébrés.

La description des changements de composition des assemblages benthiques montre avant tout un effet spatial prédominant qui correspond au remplacement progressif des taxons et à la différenciation des communautés le long du gradient de connectivité latérale des lînes avec le Rhône (Figure 38 A). Au-delà de cet effet qui se maintient dans le temps du suivi, un effet temporel est notable (Figure 38 B). Il s'exprime comme une différenciation accrue des communautés après restauration. En d'autres termes, les communautés observées à partir de t02 sont plus distinctes les unes des autres que dans la situation pré-restauration. La diversité beta (inter-lînes) a augmenté à l'échelle des zones alluviales de Belley et Brégnier à travers les 11 cas suivis. Cet effet est statistiquement significatif (Figure 38 C) et s'est maintenu dans le temps jusqu'à t10. Il est dû au fait que les actions de restauration ont induit des trajectoires de changement divergentes en fonction de la nature de ces actions et des conditions créées dans les lînes (Figure 38 D). La figure 39 illustre le cas de 16 taxons dont les changements témoignent de la diversification observée à l'échelle de l'ensemble des lînes restaurées. Ces taxons sont globalement peu fréquents / abondants dans les lînes avant restauration. Plusieurs voient leur fréquence et abondance augmenter après restauration dans la plupart des sites (*Pisidium*, *Haitia acuta*, *Potamopyrgus antipodarum*, *Valvata piscinalis*). De nombreux taxons potamiques et / ou rhéophiles augmentent dans les sites reconnectés (*Heptagenia*, *Hydropsyche conturbernalis*, *Psychomyia pusilla*). *Theodoxus fluviatilis* indique

la bonne qualité de l'habitat périlithique dans les milieux lotiques restaurés. D'autres taxons s'accroissent également dans les sites restaurés non-lotiques où ils témoignent également d'une bonne qualité de l'habitat benthique (comme les mollusques bivalves *Musculium lacustre* et *Sphaerium*). Des espèces exogènes participent à ces tendances et contribuent donc également à la diversification inter-lônes observée (*Crangonyx pseudogracilis*, *Dikerogammarus villosus*, *P. antipodarum*, *H. acuta*).

Les trajectoires observées peuvent être mises en relation avec la typologie de Riquier et al. (2017) qui prend en compte le fonctionnement hydrologique et sédimentologique des lônes restaurées (Figure 40). Cet exercice révèle concordances et cas particuliers. Les lônes à fortes contraintes hydrauliques et considérées comme s'auto-entretenant (ENIL, FOUR, MATH, VACH) montrent des trajectoires faunistiques très convergentes (vers une communauté potamique typique), à l'exception de FOUR, non totalement connectée au tronçon court-circuité de Belley, et dont la faune traduit un retour vers des caractéristiques plus lentiques à t10. A l'opposé, les deux lônes à faibles contraintes hydrauliques et reflux important, considérées comme à durée de vie courte (PONT, MOLO) montrent également une forte convergence faunistique au cours du suivi et des caractéristiques intermédiaires entre les communautés les plus lotiques et les plus lentiques. Avec des contraintes hydrauliques variables à faibles et une durée de vie longue, les lônes BEAR et MOIR montrent des trajectoires proches, la première évoluant plus rapidement que la seconde vers un stade plus atterri. LUIS, considérée comme la seule lône étudiée non totalement connectée et en auto entretien, montre le changement faunistique le plus faible des 11 cas suivis. Sa trajectoire sur 10 ans ne sort en effet pas de l'enveloppe des situations pré-restauration. Enfin, Les lônes LUCE et GRAN, regroupée dans la typologie de Riquier *et al.* (2017) comme ayant une durée de vie longue et des contraintes hydrauliques variables à faibles, sont très divergentes du point de vue faunistique. La première, lotique et connectée en permanence au RCC montre une trajectoire très proche des lônes à contraintes fortes et auto entretien. GRAN converge fortement vers l'état des lônes BEAR et MOIR.

- POINTS ESSENTIELS

- Onze îles de Belley et Brégnier-Cordon suivies pendant dix ans après leur restauration montrent un enrichissement en insectes EPT qui témoigne de l'augmentation de leur hydraulicité et de leur qualité globale. Une diminution concomitante des mollusques gastéropodes n'est pas observée, ce qui conforte l'idée d'un succès de la restauration dans ces secteurs et à ce stade du suivi.
- Le nombre d'espèces exogènes a augmenté pendant la même période, de même que leur abondance relative dans les communautés, mais les valeurs sont loin d'atteindre celles observées sur le Bas-Rhône.
- Le résultat le plus marquant est l'amplification post-restauration de la diversité des communautés entre îles à l'échelle des deux secteurs étudiés. Cet effet correspond 1) à l'initiation par les divers modes de restauration, de fonctionnements hydrauliques et sédimentologiques diversifiés, 2) à l'amplification de l'abondance et de la fréquence d'invertébrés ayant des exigences écologiques contrastées en réponse à ces patterns hydro-sédimentologiques.
- Ces résultats d'observation doivent demeurer entourés d'une marge de prudence relative au faible recul temporel disponible concernant les fluctuations faunistiques pré-restauration.

Tableau 8 - Calendrier d'échantillonnage des invertébrés aquatiques dans les 11 lînes restaurées de Belley et Brégnier-Cordon de 2003 à 2016. P & E : printemps et été. En bleu : élévation du débit réservé dans le secteur concerné. Les chasses suisses de 2012 et l'APAVER 2016 sont indiqués. Ces échantillons sont restreints aux sites et années permettant une comparaison homogène des lînes des deux secteurs à des périodes comparables par rapport à leur restauration. 2003-2005 : pré-restauration ; 2007-08 : t2 ; 2009-10 :t4 ; 2011-12 : t6 ; 2015-16 :t10. L'année 2011 a été assimilée à la période t4 dans l'analyse pour la lîne VACH

			2003	2003	2004	2004	2005	2005	2006	2006	2007	2007	2008	2008	2009	2009	2010	2010	2011	2011	2012	2012	2013	2013	2014	2014	2015	2015	2016	2016
			P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E
Belley																														
Luisettes	LUIS	amont																												
	LUIS	amont-new																												
	LUIS	aval																												
Moiroud	MOIR	amont																												
	MOIR	amont-new																												
	MOIR	aval																												
Fournier	FOUR	amont																												
	FOUR	aval																												
Béard	BEAR	amont																												
	BEAR	aval																												
	BEAR	aval-new																												
Lucey	LUCE	amont																												
	LUCE	aval																												
En L'île (Yenne)	ENLI	amont																												
	ENLI	aval																												
	ENLI	aval-new																												
Brégnier																														
Granges	GRAN	amont																												
	GRAN	aval																												
Vachon	VACH	amont																												
	VACH	aval																												
Mathan	MATH	amont																												
	MATH	aval																												
Molottes	MOLO	aval																												
Ponton	PONT	aval																												

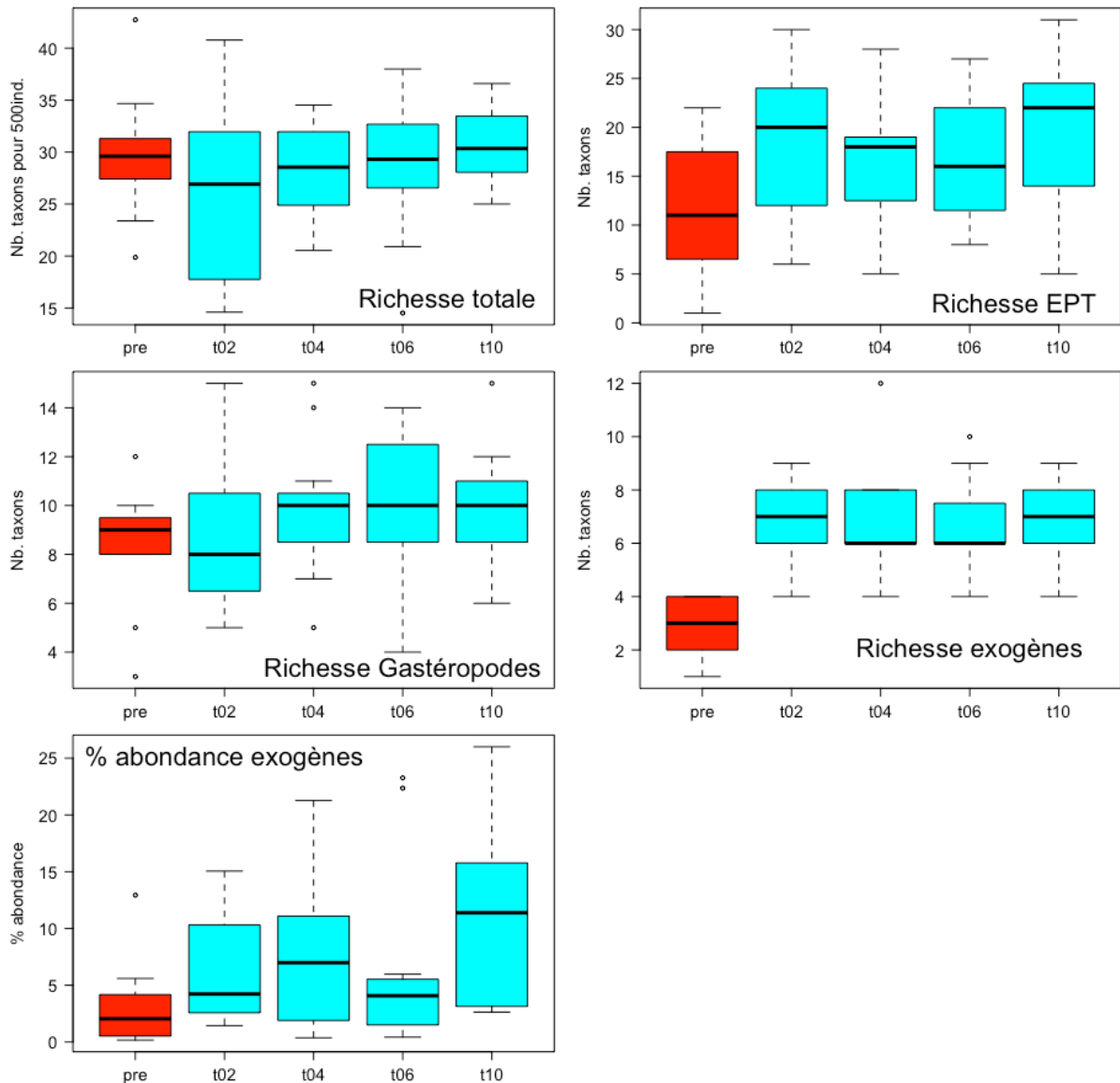


Figure 37 – Valeurs de cinq métriques faunistiques pour les 11 lînes de Belley et Brégnier-Cordon avant restauration (pre) et après restauration (t2 à t10) (2003-2016). Chaque box-plot résume la distribution des valeurs des 11 lînes à chaque période. Les différences significatives entre périodes sont (tests de Wilcoxon appariés, seuil $p=0.05$):

Richesse EPT : la richesse pré-restauration est significativement différente de toutes les périodes post-restauration

Richesse en espèces exogènes : la richesse pré-restauration est significativement différente de toutes les périodes post-restauration

Abondance relative des exogènes : l'abondance pré-restauration est significativement différente de l'abondance à t10.

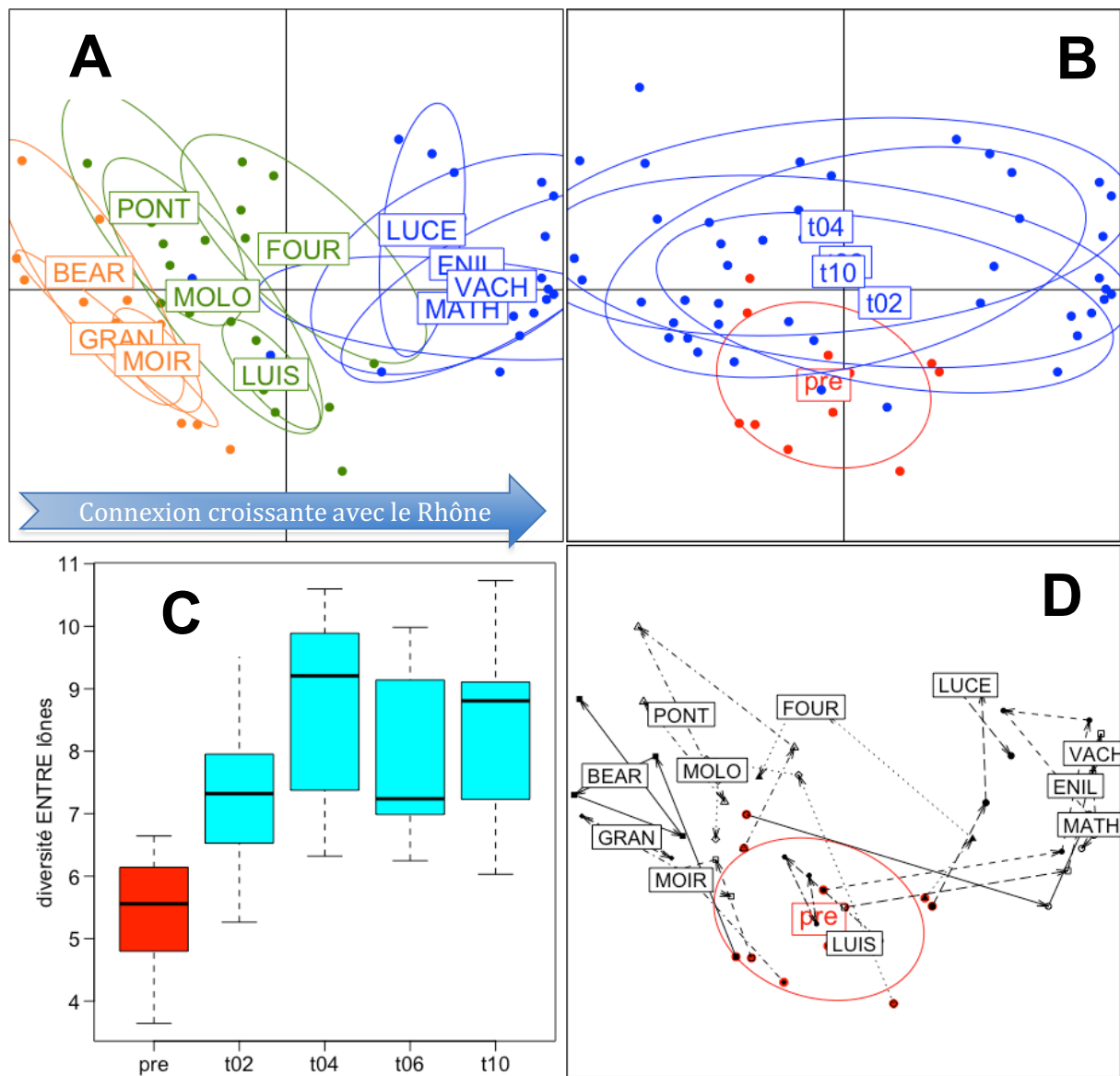


Figure 38 – Analyse en Composantes Principales (ACP) décrivant les données acquises de 2003 à 2016 concernant les assemblages d'invertébrés benthiques de 11 lônés de Belley et Brégner-Cordon., avant (pre) et après leur restauration (t2 à t10). Les données élémentaires (690 échantillons) sont agrégées par lône et par période (les 55 points positionnés sur les graphiques). A : les points sont regroupés par lônés ; B : les points sont regroupés par périodes par rapport à la restauration ; C : les boxplots expriment la diversité des assemblages faunistiques entre lônés pour chaque période (diversité beta) ; la période pré-restauration diffère significativement de toutes les périodes post-restauration (anova, $p < 0.02$ pour les 4 comparaisons) ; D : trajectoires temporelles de l'assemblage faunistique des 11 lônés à partir de leur état pré-restauration résumé par une ellipse.

Le plan factoriel résume 45% de la variabilité du jeu de données initial. Les différences entre lônés (50% de la variabilité résumée par l'ACP) et entre périodes (11% de la variabilité résumée par l'ACP) sont significatives ($p = 0.001$ et $p = 0.048$, respectivement).

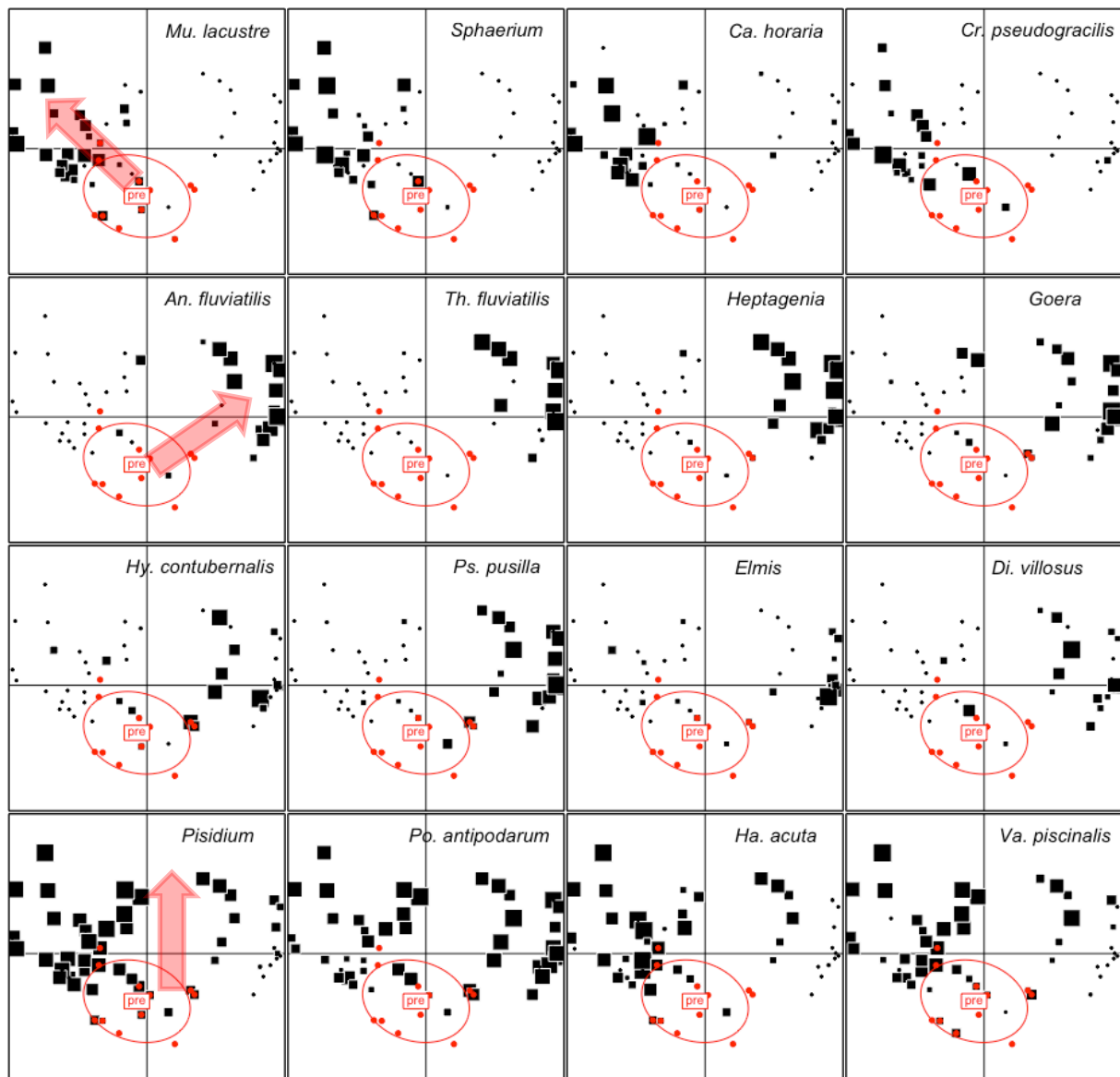


Figure 39 – Variations temporelles de l'abondance de 16 taxons illustrant les trajectoires temporelles des lînes restaurées et l'amplification de la diversité faunistique entre lînes après restauration. Les 55 points (lînes x périodes) sont positionnés par l'ACP (Figure 38). L'ellipse rouge résume la diversité des communautés avant restauration. La surface des carrés noirs est proportionnelle au logarithme de l'abondance moyenne du taxon considéré pour une période et une lîne donnée.

Trois types de changements temporels sont suggérés (flèches rouges) :

ligne du haut : taxons dont la fréquence et l'abondance augmentent dans les lînes les moins connectées,

deux lignes médianes : taxons dont la fréquence et l'abondance augmentent dans les lînes les plus connectées,

ligne du bas : taxons dont la fréquence et l'abondance augmentent dans les lînes des deux types.

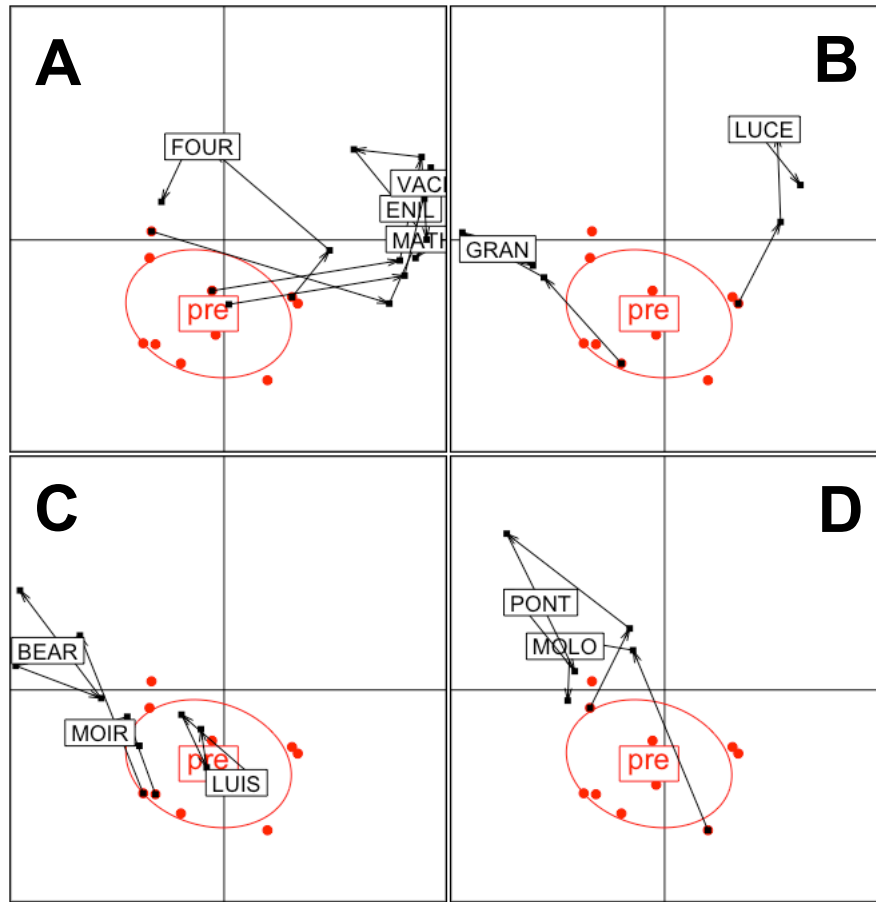


Figure 40 – Trajectoires temporelles des assemblages faunistiques à partir de leur état pré-restauration (Figure 38), regroupées en fonction de catégories basées sur la durée de vie modélisée et le régime de contraintes hydrauliques et de reflux par l’aval des 11 îlones (d’après Riquier et al., 2017). A : contraintes hydrauliques fortes, reflux nul, auto entretien de la îlone ; B : contraintes hydrauliques variables à fortes, reflux variable, durée de vie longue (> 50 ans) ; C : contraintes hydrauliques variables à faibles, reflux variable à fort, durée de vie longue (> 50 ans, cas de BEAR et MOIR) ou auto entretien (LUIS) ; D : contraintes hydrauliques faibles, reflux fort, durée de vie courte (< 50 ans).

4.2.3.4 Un bilan concernant 20 îlones du Bas-Rhône (2007 – 2017).

4.2.3.4.1 Îlones prises en compte et calendrier.

Vingt îlones ont été suivies à l’aval de Lyon depuis 2007 au Péage-de-Roussillon (6 îlones), depuis 2009 à Montélimar (1 îlone) et depuis 2009 (8 îlones) ou 2014 (5 îlones) à Donzère. Le calendrier de suivi (Tableau 6) a été moins homogène que sur le Haut-Rhône à cause de travaux de restauration plus échelonnés dans le temps ou des dates de désignation des îlones effectivement restaurées (à Donzère). Quoi qu’il en soit, pour l’ensemble de ces secteurs, il a

été possible d'acquérir pour la quasi-totalité des lînes, des données pré-restauration portant sur 3 années. Nous disposons donc ici d'états pré-restauration plus complets que sur les secteurs du Haut-Rhône suivis pour les assemblages d'invertébrés.

4.2.3.4.2 Éléments marquants de l'état initial et premiers changements post-restauration.

L'analyse globale menée ici présente donc avant tout un état pré-restauration des systèmes étudiés. Les données déjà disponibles pour les premiers systèmes restaurés (Montélimar et Péage-de-Roussillon) peuvent être positionnées par rapport à cet état initial (Figure 41).

Les communautés d'invertébrés des lînes suivies sur le Bas-Rhône, considérées globalement, présentent quatre caractéristiques principales qui les distinguent de la situation observée à l'amont de Lyon. Les deux premières ont été mentionnées précédemment dans l'analyse globale des 39 lînes étudiées :

La richesse totale des communautés et la richesse en insectes EPT est globalement plus faible dans les lînes du Bas-Rhône

La part des espèces exogènes, tant en nombre d'espèces qu'en proportion d'individus est, de façon très marquée, plus élevée pour les lînes du Bas-Rhône.

Les deux autres caractéristiques apparaissent dans l'analyse de la diversité des assemblages taxonomiques entre lînes (Figure 41) :

Le paramètre principal qui structure la diversité inter-lînes n'est pas, comme sur le Haut-Rhône, le niveau de connectivité des chenaux avec le fleuve, mais la dichotomie entre chenaux lotiques du fait de leur alimentation non fluviale (complexe de la Platière au Péage-de-Roussillon, complexe Malaubert – Dion à Donzère), et l'ensemble des autres lînes globalement plus stagnantes. L'influence du Rhône sur les sites étudiés est globalement extrêmement faible et n'apparaît pas comme le déterminant principal de la diversité faunistique à l'échelle des secteurs.

Un second paramètre structurant est un gradient de permanence des plans d'eau. En effet, plusieurs des sites étudiés sont temporaires et ont souvent été observés à sec au cours des suivis. C'est le cas de la lîne des Dames, de l'amont de la Grange Ecrasée, de Lascombe, de l'amont de la Roussette. D'autres sites ou portions de sites étaient très proches d'un état temporaire (la Sainte, le Carré, l'amont de Malaubert).

A l'intérieur de cet état de référence, les premières trajectoires de changements faunistiques post-restauration pouvant être décrites (Figure 41 en bas), paraissent beaucoup plus mineures que celles observées sur le Haut-Rhône. A Péage-de Roussillon, les dérives sur quatre ans (t+2, t+4) pour la Platière, la Boussarde et l'Ilon sont largement superposées à

l'état initial. Les deux changements les plus importants à cette échelle sont observables dans le cas de la Sainte (Péage-de-Roussillon) et de la Roussette (Montélimar). Dans les deux cas, les dérives sur trois ou quatre ans vont le même sens, avec l'enrichissement logique de la communauté qui accompagne le passage à un système aquatique plus permanent, et semi-lotique dans le cas de la Sainte, mais aussi avec un développement important des espèces exogènes.

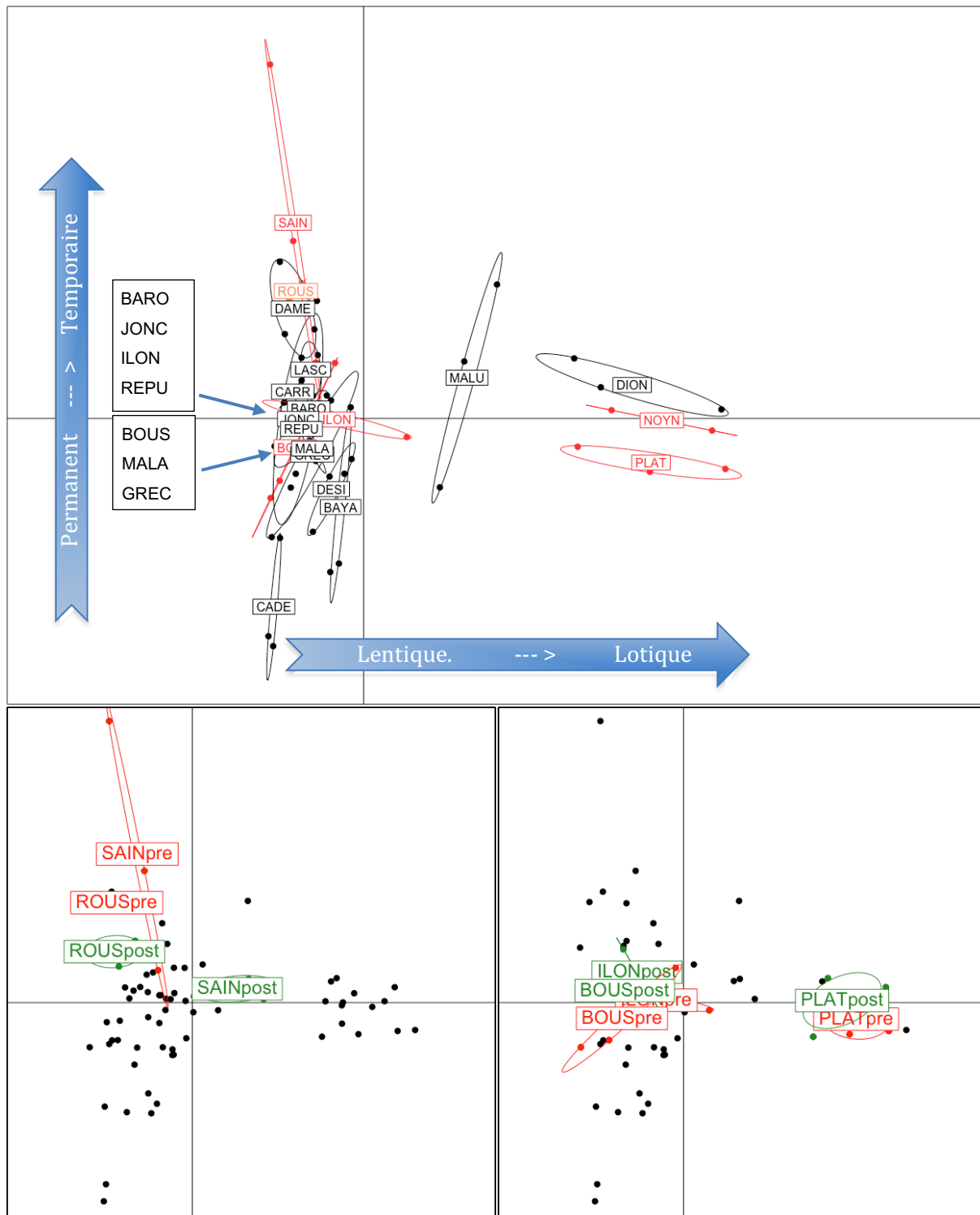


Figure 41 – *En haut* : Analyse en Composantes Principales (ACP) décrivant les données acquises de 2007 à 2016 concernant les assemblages d'invertébrés benthiques de 20 îlots de Péage-de-Roussillon (en rouge), Montélimar (en orange – ROUS) et Donzère (en noir) avant leur restauration. Les données élémentaires (558 échantillons) sont agrégées par îlot et par période (les 59 points positionnés sur le graphique).

En bas : aux données précédentes, sont ajoutées les données post-restauration (156 échantillons, 14 îlots* périodes) pour les îlots restaurés du Péage-de-Roussillon et de Montélimar (ROUS). Les états pré- et post-restauration sont identifiés pour les îlots de la Sainte et la Roussette (*à gauche*), la Boussarde, le complexe de la Platière et l'Ilon (*à droite*).

4.2.4 Assemblages de poissons dans les lônes

Les annexes fluviales sont généralement considérées comme des habitats de reproduction privilégiés pour les espèces qui déposent leurs œufs sur des végétaux (espèces phytophiles et litho-phytophiles) ou qui construisent des nids dans des milieux soumis à des contraintes hydrauliques faibles (perche-soleil, sandre, poisson-chat...) mais également comme des habitats de croissance privilégiés pour les très jeunes stades développement, c'est-à-dire les larves et juvéniles au cours de leur première saison de croissance (Zeug & Winemiller, 2008 ; Gorski *et al.*, 2011). La réhabilitation des lônes dans le système rhodanien répond à plusieurs objectifs en lien avec le déroulement du cycle de vie des poissons : (i) recréer des bras secondaires courants, généralement assez peu profonds et avec des vitesses d'écoulement moins fortes que celles du chenal principal, ces chenaux constituent des habitats privilégiés pour certaines espèces rhéophiles comme les salmonidés, le chabot, les juvéniles (i.e. les poissons non-matures sexuellement) de grands Leuciscidae comme le barbeau fluviatile, le hotu, le chevaine et la vandoise, et (ii) réhabiliter des lônes de type parapoton, connectées par leur extrémité aval en dehors des périodes de crues et qui peuvent être le siège du frai des espèces phytophiles et litho-phytophiles et constituer des zones de nurserie de qualité pour les jeunes stades de poissons (forte productivité, contraintes hydrauliques faibles ou nulles, température plus élevées que dans les chenaux courants, possibilité de mieux échapper à la prédation). L'accessibilité à ces milieux est un facteur déterminant pour les poissons (connectivité hydrologique) leur eutrophisation peut poser problème (anoxie potentielle).

4.2.4.1 Lônes du Haut-Rhône

Depuis leur réhabilitation, 14 lônes ont été échantillonnées dans les secteurs de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon. Suite à une première synthèse des résultats en 2014, le suivi des lônes Malourdie, Béard, Fournier, Chantemerle et Granges a été arrêté. L'eau de la lône de la Malourdie provient du contre canal de rive gauche de l'aménagement de Chautagne, l'alimentation de la lône Béard est essentiellement d'origine sous-terraine, les parties amont de la lône des Luisettes et de la lône Fournier sont alimentées par le sous-écoulement, elle se réchauffe ensuite dans la partie la plus aval de ces lônes, la lône des Granges est également alimentée par le sous-écoulement. Cette forte composante sous-terraine de l'eau confère à ces lônes une capacité d'accueil pour les poissons relativement faible en raison de la limpidité des eaux, de leur caractère oligotrophe et de leurs caractéristiques thermiques (température plus fraîche en été).

Trois métriques avaient été identifiées au début du programme pour caractériser l'état des assemblages de poissons dans les lônes restaurées : les effectifs échantillonnés par campagne de pêche, la proportion de juvéniles de l'année (0+) dans les échantillons et la proportion d'individus appartenant à des espèces phytophiles et litho-phytophiles.

Les lînes dans lesquelles les abondances de poissons sont les plus élevées sont celles qui sont ouvertes à l'aval et au sein desquelles les dépôts réguliers de sédiments fins sont importants et qui sont considérées comme des décanteurs (Riquier *et al.*, 2017) : Brotalet, Molottes et Ponton (Figure 42). C'est également dans ces trois lînes que les proportions de juvéniles de l'année sont les plus élevées (respectivement en moyenne 82%, 81% et 80%) attestant du rôle important de nurserie joué par ces annexes fluviales. La proportion d'individus appartenant aux espèces phytophyles et litho-phytophiles est plus faible dans les bras secondaires réhabilités (Anse de Yenne, Vachon, Cerisiers et Mattant).

D'un point de vue général, l'analyse de l'évolution temporelle des données piscicoles collectées dans les lînes réhabilitées et des Vieux-Rhône met en évidence une diversité des types de structure de ces assemblages de poissons (Figure 43) depuis la réhabilitation des lînes : 1) des ressemblances de structure entre les assemblages de poissons des Vieux-Rhône et ceux des lînes connectées à l'amont et à l'aval, Vachon, Cerisiers et Mattant et dans une moindre mesure Anse de Yenne, et 2) des assemblages de poissons des lînes connectées uniquement par l'aval (Brotalet, Molottes, Ponton, Malourdie, Granges), voire non-connectées directement au vœux-Rhône (Luisettes, Moiroud) qui se distinguent nettement des assemblages de poissons des Vieux-Rhône. Les entités faunistiques les plus représentatives de la faune des Vieux-Rhône et des bras connectés en amont et en aval sont plutôt rhéophiles (Figure 43 d) tandis que les entités faunistiques les plus représentatives de la faune des lînes et des bras connectés à leur extrémité aval montrent une nette préférence pour les milieux plutôt stagnants (bouvière, tanche, rotengle...).

Bien que la variabilité temporelle de la structure des assemblages de poissons, notamment l'abondance des différentes espèces, soit relativement importante (la variabilité intra-lîne représente 57% de la variabilité totale du jeu de données), aucune tendance nette d'évolution post-restauration ne se dessine pour les lînes suivies. Quelques évolutions subtiles peuvent être détectées, en lien notamment avec l'évolution de la sédimentation dans les lînes et plus précisément au niveau des connexions aval. Ainsi, les dépôts de sédiments fins à l'entrée aval de la lîne des Molottes et de celle du Ponton tendent progressivement à limiter la largeur du chenal et la hauteur d'eau. Ceci qui peut constituer un frein à l'utilisation de ces annexes par les poissons, favorisant les espèces plutôt résidentes (bouvière, *Pseudorasbora*, tanche, éventuellement brochet) et limitant l'accès au géniteurs et/ou aux juvéniles d'espèces utilisant de manière temporaire ces annexes (juvéniles de barbeaux, de chevaine, gardons, brèmes, goujons...) (Figure 44). Ce phénomène semble plus marqué pour la lîne du Ponton que pour celle des Molottes, sans doute à cause d'une sédimentation plus forte à l'entrée de la lîne et des variations régulières de débits et de hauteurs d'eau en lien avec la production hydroélectrique. Cette évolution progressive de la structure des assemblages de poissons dans ces lînes devra faire l'objet d'une surveillance particulière au cours des années futures,

l'efficacité du rôle de nurserie de ces annexes risquant d'être altérée si leur accessibilité par les géniteurs et/ou les jeunes larves de poissons devient de plus en plus limitée.

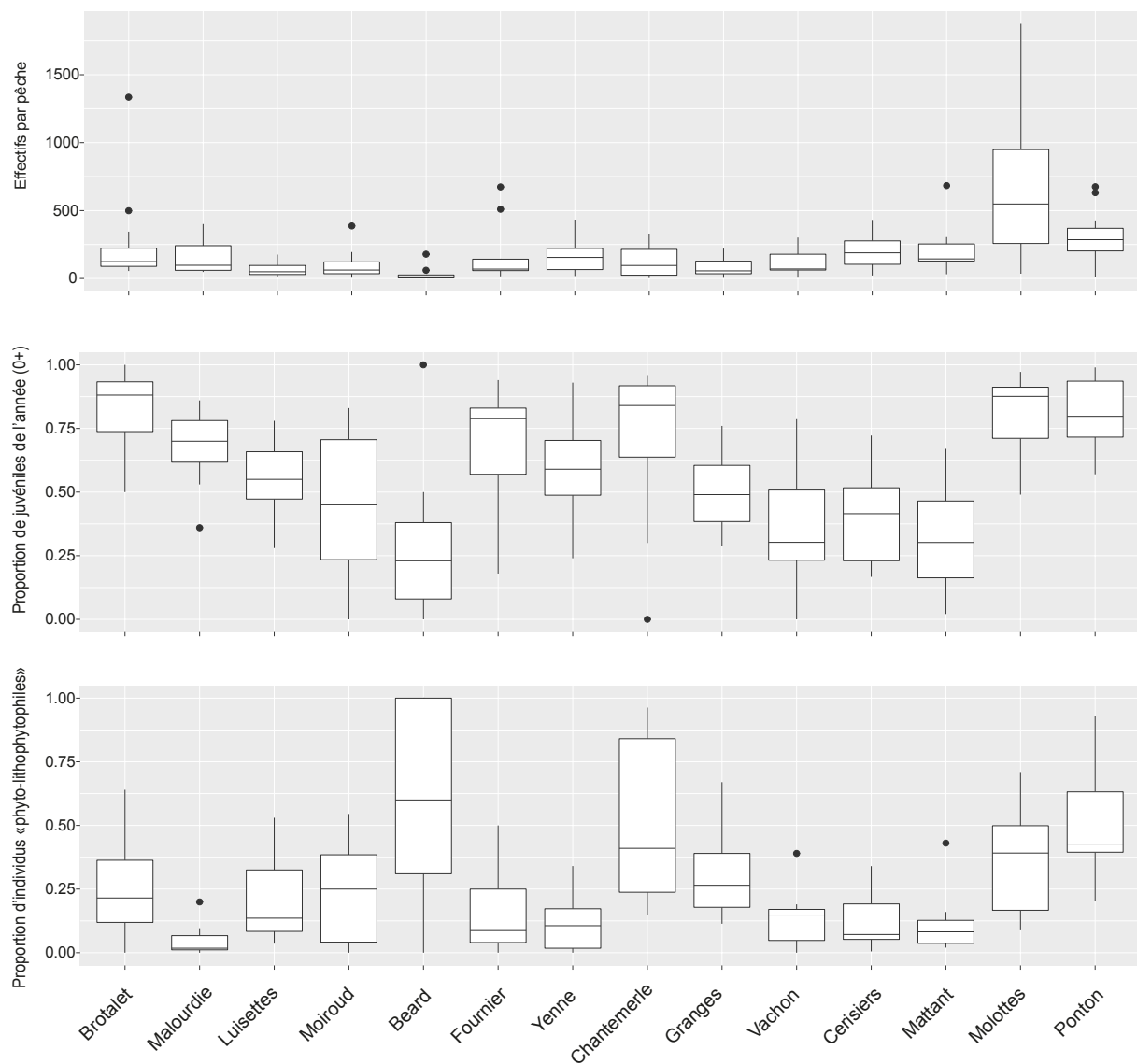


Figure 42 – Box-plots des abondances par pêche (effort de pêche 25 E.P.A.), de la proportion de juvéniles de l'année (0+) pour chaque pêche et de la proportion d'individus appartenant à des espèces phytophiles et litho-phytophiles pour les 14 lônes suivies sur le Haut-Rhône (Brotalet 2004-2019, Malourdie 2004-2013, Luisettes 2005-2014, Moiroud 2005-2019, Fournier 2005-2013, Anse de Yenne 2005-2019, Granges 2006-2013, Vachon, Censiers, Mattant, Molottes et Ponton 2006-2019).

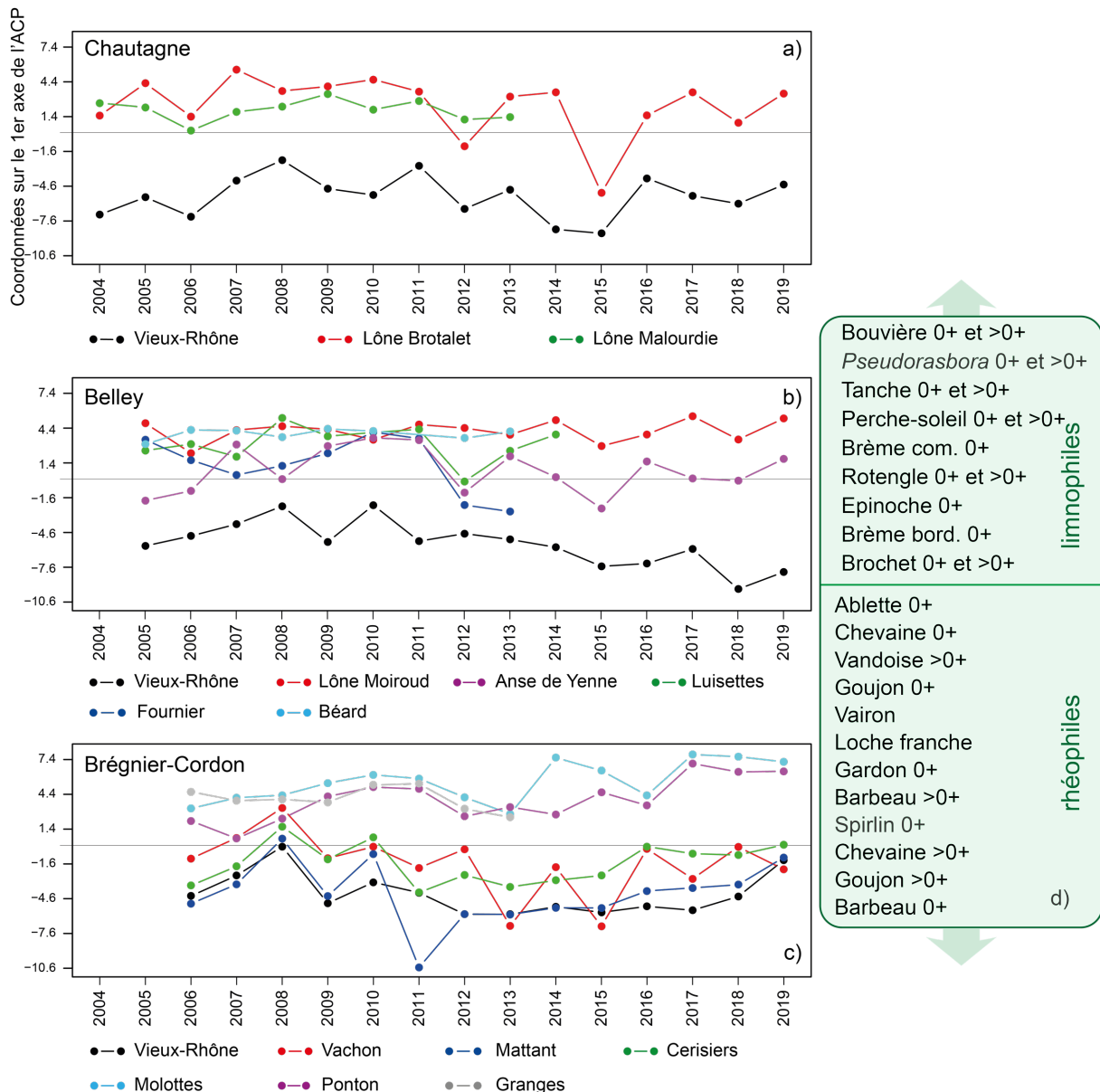


Figure 43 - Patrons d'évolution temporelle des communautés de poissons dans les Vieux-Rhône de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon et les lônes après augmentation des débits réservés et la réhabilitation des annexes fluviales. L'information est résumée par les coordonnées factorielles sur le premier axe (a, b et c) issues d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) intra-secteurs (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon) portant sur les résultats des pêches annuelles ($\log_{10} [\text{effectifs} + 1]$), les effectifs représentent le nombre de poissons appartenant à une classe de tailles donnée pour une espèce donnée, le découpage en classes de tailles conduit à conserver 2, 3 ou 4 classes en fonction de la taille des poissons adultes, la première classe regroupe les poissons nés dans l'année (0+). L'effort d'échantillonnage a été standardisé (50 E.P.A.) pour permettre les comparaisons. Le premier axe de l'analyse décrit 27% de la variabilité du jeu de données et met en évidence le rôle majeur de l'abondance des juvéniles de l'année de 21 espèces très représentatives de l'ichtyofaune du Haut-Rhône (d).

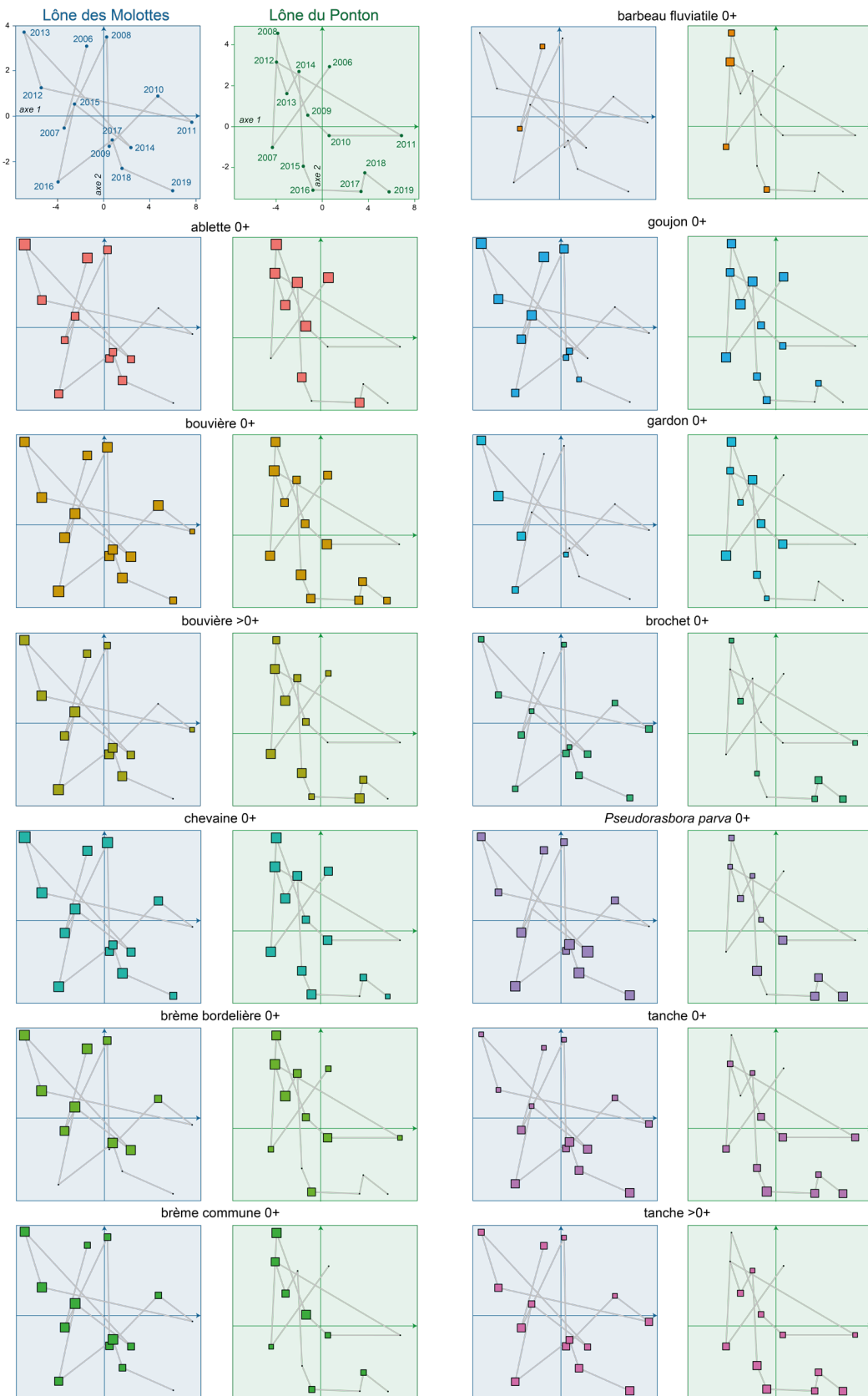


Figure 44 – Projection dans le plan 1-2 d'une ACP intra-lônes des coordonnées factorielles des pêches réalisées dans la lône des Molottes (en bleu) et dans la lône du Ponton (en vert) et projection sous forme de carrés dont la taille est proportionnelle à l'abondance (exprimée en $\log(\text{abondance} + 1)$) de quelques entités faunistiques caractéristiques de ces annexes fluviales.

4.2.4.2 Lônes du Bas-Rhône

La restauration des annexes du Bas-Rhône étant récente, 2012-2014 à Péage-de-Roussillon et 2015-2019 à Donzère, les données issues des suivis ne permettent pas encore de mettre en évidence des trajectoires claires d'évolution post-restauration.

A Péage-de-Roussillon, l'alimentation de la lône de la Platière depuis le canal d'aménée de l'aménagement hydroélectrique en 1992 a transformé cette lône en un milieu lotique présentant une diversité d'habitats importante qui a été enrichie par le recreusement des lônes du Noyer Nord, de l'Illon et du Noyer Sud. Ce « système Platière » constitue une annexe fluviale de première importance pour ce secteur. Les effectifs échantillonnés sont en moyenne deux fois supérieurs à ceux enregistrés dans le Vieux-Rhône (Figure 45) et la quasi-totalité des classes de tailles des espèces rencontrées sont échantillonnées. Les secteurs courants possèdent des caractéristiques d'habitats (profondeur faible, vitesses d'écoulement modérées) appréciées par les classes d'âges intermédiaires des barbeaux et hotus. Après restauration, c'est-à-dire démantèlement des digues Girardon, la lône de la Boussarde peut être considérée comme un bras secondaire du Vieux-Rhône.

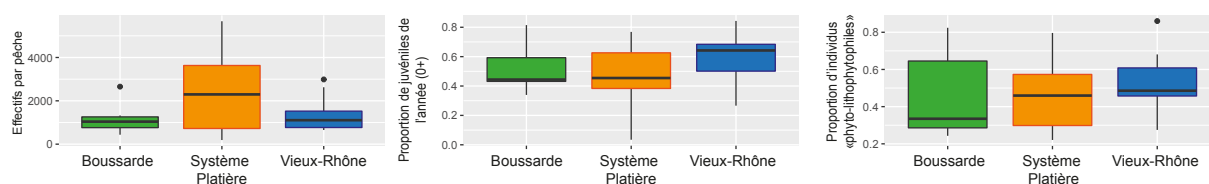


Figure 45 – Box-plots des abondances par pêche (effort de pêche 50 E.P.A.), de la proportion de juvéniles de l'année (0+) pour chaque pêche et de la proportion d'individus appartenant à des espèces phytophiles et litho-phytophiles pour la lône de la Boussarde (2013-2018), l'ensemble des lônes du système Platière (2007-2018) et le Vieux-Rhône (2007-2019).

A Donzère, la réhabilitation des lônes Granges écrasée, Dames Banc Rouge et Désirade dans le futur, consiste à reconnecter ces anciens bras en démantelant les digues Girardon et en recreusent le lit pour recréer des bras courant à la place des chenaux anciens, souvent déconnectés et/ atterris. Les suivis futurs permettront de caractériser l'utilisation de ces nouveaux habitats par les espèces du Vieux-Rhône.

4.2.5 Perspective : aide à la définition des objectifs et gestion.

Modélisation prédictive des assemblages d'invertébrés d'un chenal latéral après une reconnexion hydrologique avec le fleuve

4.2.5.1 Contexte et méthodes

L'élaboration d'un outil d'analyse prédictive de l'évolution des assemblages d'invertébrés d'un bras latéral après restauration a constitué un objectif du programme RhonEco dès ses origines. Il vise à comparer plusieurs types de restauration du point de vue de leurs conséquences sur les métriques de diversité biologique. Les approches initiales allant dans ce sens ont utilisé des variables d'habitat local traduisant l'effet de la connectivité latérale avec le fleuve et permettant d'estimer un indice synthétique indirect de connectivité (Paillex *et al.*, 2009, 2007 ; Castella *et al.*, 2015). Si cet indice montre de bonnes relations d'une part avec des mesures hydrologiques de connectivité (Riquier *et al.*, 2015), d'autre part avec les métriques faunistiques, son applicabilité concrète demeure faible car il ne fait pas appel à des variables directement modifiables lors des opérations de restauration (fréquence des débits de connexion, altitude des bouchons alluviaux).

Une seconde génération de modèles a donc été élaborée pour répondre au même objectif mais utilisant comme variables prédictives des métriques faunistiques 1) des variables hydrologiques contrôlables par les gestionnaires d'ouvrages hydroélectriques (débits en aval de barrages ; données CNR), 2) des données sédimentaires collectées dans le cadre de RhonEco, mesurées localement dans les lônes (données ENS de Lyon et Univ. Saint-Etienne). Des méthodes de type « machine learning » (ici des « gradient boosted models », gbm) ont été utilisés pour modéliser l'occurrence (présence absence) des 127 taxons les plus fréquents dans les lônes du Haut-Rhône à partir de durées de connexion des lônes calculées sur des durées variables (de 1 mois à 1 an) avant les périodes d'échantillonnage des communautés benthiques. Ces durées de connexion incluent autant le débordement amont que le reflux aval dans les lônes. Les performances prédictives de ces modèles ont été testées à deux niveaux : 1) par une validation statistique croisée qui montre que l'algorithme utilisé fournit des scores encourageants (voir annexe), 2) par une comparaison des valeurs de richesses taxonomiques observées (issues du suivi RhonEco) avec les valeurs de prédites issues des modèles.

Deux scénarios ont été testés : 1) la reconnexion complète avec le chenal principal d'un chenal de tressage déconnecté et 2) une reconnexion seulement par l'aval conduisant à un stade semi-lotique, (Figure 46). Les communautés d'invertébrés benthiques ont été prédites

suivant ces deux scénarios, dès la première année post-reconnexion et jusqu'à la déconnexion complète du chenal (≈260 ans pour le scénario 1 et ≈130/180 ans pour le scénario 2 ; Figure 47) en prenant en compte l'évolution naturelle des bouchons amont et aval qui régissent les durées de connexions hydrologiques du chenal latéral avec le chenal principal du fleuve. La prédiction des communautés à chaque date est obtenue par assemblage des prédictions d'occurrence individuelles de tous les taxons modélisés. Le présent rapport fait état du premier scénario en montrant l'évolution de deux richesses taxonomiques (gastéropodes et éphéméroptères, plécoptères et trichoptères = insectes EPT). Des données observées issues du programme RhonEco ont permis une comparaison avec les valeurs prédites.

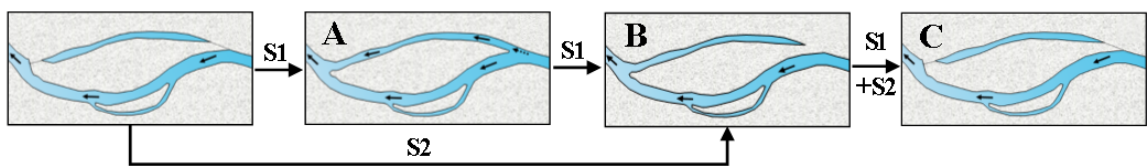


Figure 46 - Présentation des deux scénarios S1 et S2 de reconnexion et de succession modélisés. Dans le présent rapport, seul le scénario S1 est détaillé.

4.2.5.2 Résultats et discussion

La Figure 47 montre l'évolution au cours de la succession des deux métriques de richesse (insectes EPT en rouge et mollusques gastéropodes en bleu, Figure 47.2). Les trois lettres font référence aux différents stades de connexions du chenal latéral avec le chenal principal : A=chenal lotique connecté à l'amont et à l'aval, B=chenal semi-lotique connecté seulement à l'aval et C=chenal lentique isolé du chenal principal en débit moyen (Figure 47.1). Les courbes rouge et noire font état des durées des deux processus différents de connexion entre le chenal latéral et le chenal principal : overflow=connexion amont par débordement et backflow=connexion aval par reflux depuis le chenal principal.

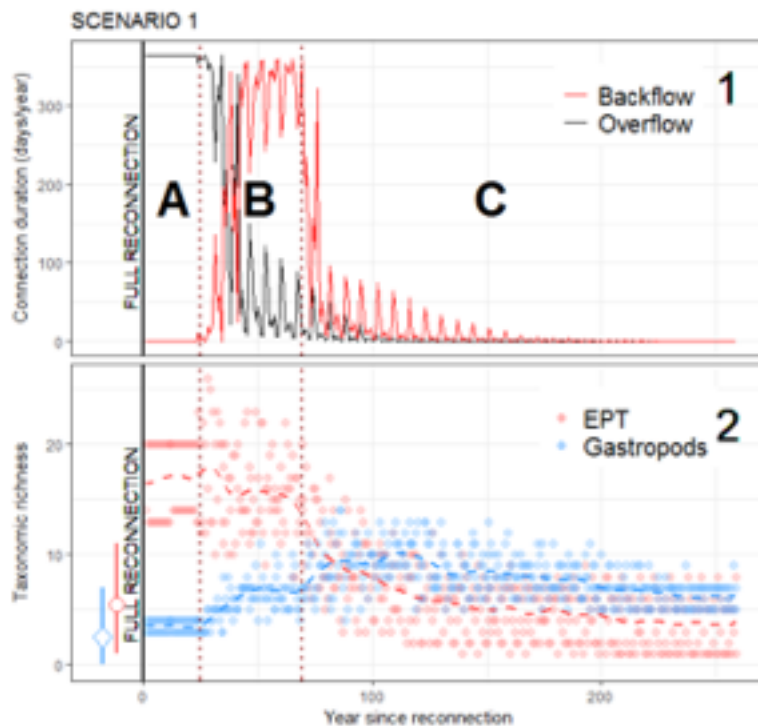


Figure 47 - Succession temporelle d'un chenal latéral après une reconnexion complète avec le chenal principal. (1) durée de connexion : backflow (connexion par l'aval) et overflow (connexion par l'amont) utilisés comme prédicteurs et (2) richesse en EPT (en rouge) et en gastéropodes (en bleu). Les courbes de tendances sont basées sur une régression de type LOESS. Dans le graphique (1) : A=chenal lotique connecté à l'amont et à l'aval, B=chenal semi-lotique connecté seulement à l'aval et C=chenal lentique isolé du chenal principal en débit bas. Dans le graphique (2), les moyennes des richesses ainsi que les écarts min/max des richesses observées avant reconnexion ont été ajoutées pour comparaison. Chaque point sur le graphique (2) représente une valeur de richesse calculée à partir du jeu de données prédit rassemblant les occurrences de 127 taxons

Pour les gastéropodes, la reconnexion complète amont et aval a peu d'effet direct sur la richesse (richesse moyenne pré-reconnexion = 2.5, richesse moyenne lors du début de l'étape A = 3.5). Cependant, dès le début de la déconnexion amont, on remarque une augmentation rapide de la richesse qui atteint son maximum au début de l'étape C de déconnexion (entre les années 75 – 125, richesse maximum de 14 à l'année 86). Par la suite, la richesse décroît lentement avec l'isolement progressif du chenal jusqu'aux alentours de 7 taxons en moyenne.

Dans le cas des EPT, la reconnexion complète permet de tripler la richesse moyenne (richesse moyenne pré-reconnexion = 5.5, richesse moyenne lors du début de l'étape A = 16.5) avec une richesse maximum de 26 à l'année 28. La transition vers la phase d'isolement (après l'année 56) cause une forte diminution de la richesse EPT jusqu'à une valeur située en dessous de la richesse moyenne pré-reconnexion à partir de l'année 150.

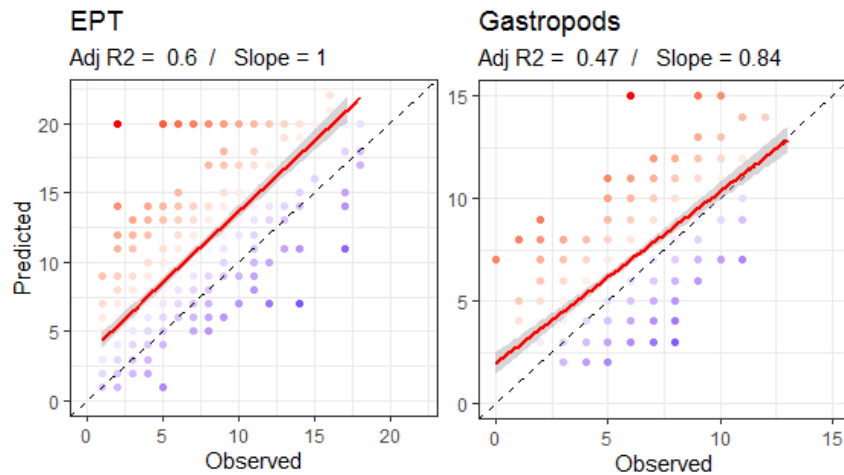


Figure 48- . Relation linéaire entre les richesses prédites (issues des modèles) et observées pour la richesse en insectes EPT (à gauche) et la richesse en gastéropodes (à droite). La ligne pointillée représente la droite $y=x$. La couleur des points fait référence aux résidus négatifs (bleus) ou positifs (rouges). Le r^2 ajusté et la pente de la relation sont affichés en haut de chacun des graphiques.

La Figure 48 montre la relation entre les valeurs prédites et les valeurs observées afin de tester l'efficacité de prédiction pour la richesse taxonomique en EPT (Figure 48 à gauche) et en gastéropodes (Figure 48 à droite). Les R^2 ajustés pour les deux métriques sont de 0.47 et 0.60 respectivement. L'efficacité de prédiction du modèle est relativement bonne pour ces deux richesses taxonomiques avec une pente de la relation située autour de 1 (statistiquement rejetée pour la richesse en gastéropodes). Cependant, le modèle montre une constante surestimation de 3 points de la richesse en EPT. Concernant les gastéropodes, cette surestimation est située entre 2 pour des valeurs de richesses observées inférieures à 5 puis tend vers 0 pour des richesses observées supérieures à 10.

La modélisation introduite ici à l'échelle d'un chenal latéral, permet :

- l'utilisation de variables hydrologiques (durées de connexion) directement liées aux paramètres concrets de la restauration des lônes et des débits réservés,
- l'intégration des deux composantes de la connectivité latérale des milieux annexes : connexion amont par débordement et connexion aval par reflux,
- la comparaison d'options de restauration pour un même chenal latéral,
- d'envisager la modélisation de la réponse des communautés benthiques dans plusieurs chenaux d'un secteur alluvial soumis à des options de restauration variées.

5 Discussion et perspectives

L'augmentation du débit réservé dans les Vieux-Rhône et la réhabilitation écologique des anciens bras constituent les deux leviers d'action utilisés pour la restauration écologique du Rhône. L'évaluation des effets des procédures de restauration écologique a jusqu'à présent été réalisée de manière relativement disjointe pour les deux types de milieux restaurés : les Vieux-Rhône et les îlons.

La planification d'un suivi qui s'inscrit sur le long terme est un atout indispensable pour évaluer correctement les changements induits par la restauration (analyse avant-après restauration) d'une part et les trajectoires d'évolution des milieux et des communautés aquatiques après restauration d'autre part. Les travaux réalisés dans le cadre de la publication du numéro spécial de la revue *Freshwater Biology* (juin 2015) ont montré l'importance de la qualité et de la quantité de données nécessaires pour détecter et estimer correctement les changements de structure des communautés aquatiques en lien avec la restauration du Rhône (Vaudor *et al.*, 2015). Ces résultats ont fortement motivé l'intensité des échantillonnages réalisés dans le cadre de l'établissement de l'état physique et biologique pré-restauration dans les secteurs du Bas-Rhône en aval de Pierre-Bénite et la poursuite de la collecte des données dans les secteurs restaurés en priorité (Haut-Rhône et Pierre-Bénite).

Les changements de structures des communautés des peuplements de poissons et de macroinvertébrés benthiques dans les Vieux-Rhône en réponse aux augmentations de débit réservé sont, comme cela avait été montré antérieurement, plus marqués et conformes aux prédictions des modèles pour les Vieux-Rhône pour lesquels les changements de débit ont été importants (Chautagne, Pierre-Bénite), ceci semble se confirmer pour le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf. En revanche, pour le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, les changements attendus de structure des communautés de macroinvertébrés et de poissons ne sont pas encore observés bien que l'augmentation de débit réservé ait été significative. Il est probable que d'autres facteurs comme le ralentissement des vitesses d'écoulement dû à la présence du seuil de Peyraud et la granulométrie très grossière des fonds (pavage) limitent le développement des populations des espèces de poissons d'eau courante. Le suivi post-restauration des peuplements de macroinvertébrés est sans aucun doute encore trop partiel pour que des conclusions pertinentes puissent être tirées. Dans tous les secteurs, l'évolution récente des conditions hydro-climatiques avec des températures estivales et post-estivales élevées et des étiages prolongés dans des conditions thermiques exceptionnelles favorisent le développement d'espèces thermophiles à pontes multiples comme l'ablette dont les effectifs ont fortement augmenté depuis 2015. Cette espèce appartenant à la guildes des espèces d'eau

courante, cette amélioration du succès de sa reproduction en lien avec l'hydrologie et les facteurs climatiques, booste la valeur de la proportion d'individus d'espèces d'eau courante. Le suivi des opérations de réhabilitation des lônes a permis de mieux comprendre leur structuration morpho-sédimentaire, les facteurs structurant leur évolution et ainsi de caractériser leurs trajectoires temporelles et de dégager des pistes de réflexion pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire des bras. Les résultats acquis les dernières années sont très encourageants et ont déjà donné lieu à la production de différents outils prédictifs (patrons granulométriques longitudinaux, vitesses de comblement) dont les implications opérationnelles sont fortes, notamment pour : (i) guider la conception technique des futurs bras à restaurer du Rhône, ou encore (ii) anticiper les effets potentiels de mesures de gestion adaptative des sites déjà restaurés. À ce titre, une application "Shiny", constituant un outil d'aide à la décision/gestion des bras du Rhône et prenant la forme d'une interface web "presse bouton", est en cours de développement.

Plusieurs réflexions sont en cours pour poursuivre les travaux dans le cadre de RhônEco.

- Amélioration des modèles de durée de vie : aller au-delà du comblement sédimentaire des bras par les sédiments fins

Les modèles permettant d'estimer la durée de vie des bras restent encore largement perfectibles. Les améliorations possibles sont nombreuses et les développements y afférant d'ores et déjà engagés. Par exemple, le recul temporel à présent disponible va permettre de mieux caractériser les événements décapants, de cerner leurs effets sur les linéaires suivis et de quantifier l'influence des processus érosifs sur la capacité de rajeunissement (voire d'auto-entretien des fonds à long terme) des bras sensibles à la sédimentation fine et donc sur leur durée de vie. Jusqu'à présent, le seul facteur de contrôle qui était pris en considération pour l'estimation de la pérennité potentielle des bras était le comblement par les sédiments fins. Les observations *in situ* montrent que pour une partie non négligeable des bras, d'autres facteurs sont à considérer comme l'abaissement des lignes d'eau consécutif à la poursuite de l'incision du lit mineur du Rhône. Au même titre que les événements décapants, cette dynamique des niveaux de base doit être intégrée aux processus d'estimations de durée de vie. Enfin, ces estimations reposent sur des moyennes calculées à l'échelle des bras et ne considèrent donc pas la variabilité longitudinale des hauteurs d'eau et des vitesses de sédimentation. Les bras les plus prompts à se combler feront l'objet d'analyses plus poussées en ce sens.

- Approfondir les réflexions sur les bras courants permanents : ajustements post-travaux, trajectoire(s) évolutive(s) et conditions d'habitat

Jusqu'à présent, le retour d'expérience sur l'ajustement post-travaux des bras courants permanents est limité et les enjeux de connaissance autour de ce type de bras sont de plus en plus évidents (e.g. interopérabilité avec la redynamisation des marges alluviales ou les opérations d'injection sédimentaire, dynamique d'atterrissement indépendante d'un comblement par les fines avérée sur certains bras vifs (cf. par exemple les fiches synthèse des secteurs de Belley, Brégnier-Cordon ou Pierre-Bénite). Au-delà de l'exploitation approfondie des informations d'ores et déjà disponibles (évolution des hauteurs d'eau), un protocole de suivi complémentaire dédié à ces bras est en cours de mise en œuvre. Il permettra de mieux cerner les ajustements morpho-sédimentaires en jeu dans les bras courants permanents (e.g. transfert de la charge de fond, érosion latérale), de caractériser finement les patrons granulométriques longitudinaux des particules composant leur lit (photographies subaquatiques) et de confronter ces données avec des variables hydrauliques. A titre illustratif, 200 galets équipés de transpondeurs passifs ont d'ores et déjà été injectés à Donzère-Mondragon : la lône de la Grange écrasée (CNR, 10/04/2019, 200 particules), des Dames (CNR, 10/04/2019, 200 particules) et du Banc-Rouge (UMR 5600 EVS, 18/11/2019, 200 particules). En ce qui concerne le Haut-Rhône, 100 particules par bras ont été injectées dans les lônes d'En l'île (UMR 5600 EVS, 19/11/2019), de Fournier (UMR 5600 EVS, 19/11/2019) pour le secteur de Belley et dans la lône de Vachon (UMR 5600 EVS, 12/02/2020) pour le secteur de Brégnier-Cordon. Ces données, combinées aux apports d'autres techniques déployées (e.g. piézomètres, accéléromètres, acquisitions topographiques et granulométriques), permettront d'apporter un regard nouveau sur les ajustements post-travaux s'opérant dans ces bras actifs.

Parallèlement, l'état actuel des travaux menés sur les communautés d'invertébrés des lônes dans le cadre des suivis RhônEco ouvre trois groupes de perspectives.

- Conséquences des retours d'expérience des suivis menés sur le Haut-Rhône : quelles actions futures sur la diversité des lônes à l'échelle des secteurs ?

L'observation principale issue des suivis d'invertébrés sur le Haut-Rhône est la diversification des communautés benthiques à l'échelle des secteurs et la pérennité de cet accroissement de diversité sur les 10 années de suivi. Si la cause du phénomène paraît bien être la diversité des actions de restauration individuelles menées sur les lônes, les dynamiques sédimentaires observées et modélisées peuvent laisser attendre, à terme, une réduction de la

diversité des conditions hydro-sédimentaires à l'échelle de l'ensemble des chenaux restaurés. Se pose donc la question de savoir si des actions ponctuelles sur certains sites doivent être menées, seules, ou en conjonction avec les démantèlements de digues et berges prévus afin de maintenir cette tendance.

- Développement de modèles prédictifs de la diversité des assemblages benthiques à partir de variables hydrauliques et sédimentologiques.

En lien avec le point précédent, des travaux ont été effectués pour remplacer la métrique de connectivité latérale de Paillex *et al.* (2007) par des variables plus « opérationnelles » directement liées aux actions de restauration en termes de fréquences de connexion. Ils laissent penser qu'il est possible de prédire, pour un chenal donné, les changements de richesse et de composition des assemblages d'invertébrés à partir d'une combinaison des durées de connexion amont et aval des chenaux. L'étape suivante, qui nécessite probablement des mises au point statistiques, est de rechercher comment ces modèles, développés à l'échelle du chenal individuel, peuvent être développés afin de prédire des changements de diversité à l'échelle d'une zone alluviale en fonction de divers scénarios de modifications hydrauliques et sédimentaires. Ces modèles sont destinés à venir compléter la « boîte à outils » RhônEco.

- Sur le Bas-Rhône : un contexte nouveau pour la restauration des lônes.

Les états initiaux obtenus sur les lônes du Bas-Rhône font apparaître une situation qui diffère en plusieurs points de ce qui a été observé à l'amont de Lyon : le très faible niveau global de connectivité latérale des milieux alluviaux, des milieux lotiques entretenus par des affluents entrant dans la zone alluviale, une forte prégnance des espèces exogènes (qu'il s'agisse des invertébrés, mais également des plantes aquatiques comme les jussies). Dans ces conditions, l'enjeu des suivis de milieux restaurés sera de mesurer si les actions entreprises (recréation de chenaux latéraux courants alimentés par le fleuve, augmentation des fréquences de connexion au fleuve *via* des arasements de bouchons alluviaux), auront un effet de diversification comparable à ce qui a pu être observé à l'amont de Lyon.

Le but de ces actions de restauration est *in fine* d'essayer de retrouver une mosaïque d'habitats caractéristiques des grands fleuves et la biodiversité normalement associée, en essayant d'inscrire cet objectif sur le long terme. Si, pour des raisons techniques, l'évaluation des gains écologiques dans les Vieux-Rhône (chenaux courants) et dans les annexes fluviales restaurées est réalisée de manière séparée, la mise en relation des différents types de milieux

via la variabilité temporelle du régime hydrologique (connectivité hydrologique des différentes composantes spatiales du système fluvial) confère à cet ensemble des caractéristiques fonctionnelles globales. La richesse écologique des plaines alluviales tient au fait qu'elles sont le siège d'une grande diversité de processus physiques et écologiques dont l'efficacité est liée à l'hétérogénéité de cette mosaïque d'habitats et aux échanges entre les différents compartiments de la plaine alluviale dans les dimensions longitudinale, transversale et verticale. La restauration écologique du Rhône est fondée sur des principes de réhabilitation des composantes physiques du milieu, suggérant une restauration implicite des processus écologiques associés aux différents types de milieux.

Dans le cadre du programme RhônEco, les travaux de recherche se sont attachés dans un premier temps à mettre en relation les changements des variables physiques modifiées par les actions de restauration et la structure des communautés aquatiques et ont montré des réponses significatives des communautés aquatiques aux modifications des débits réservés dans les Vieux-Rhône et de la connectivité hydrologique dans les îlons.

Cependant, la modélisation des réponses des communautés d'invertébrés s'est révélée beaucoup plus difficile lorsque le rôle des facteurs hydrologiques et hydrauliques était moins prégnant, c'est-à-dire dans les milieux peu perturbés par les changements de débit où les interactions biotiques jouent un rôle beaucoup plus structurant sur les assemblages d'espèces (Castella *et al.*, 2015).

Dans ce contexte, les processus de transfert d'énergie et de matières dans les réseaux trophiques jouent un rôle déterminant dans la régulation de l'abondance et de la distribution spatiale des organismes. Actuellement, la totalité des outils mis en place dans le programme RhônEco s'intéresse à la structure des communautés, les questions fonctionnelles étant abordées seulement de manière indirecte par les traits écologiques et biologiques des espèces.

Ce sont en partie ces processus qui déterminent la pertinence des îlons en tant que nurserie pour les très jeunes poissons. Les nurseries piscicoles jouent incontestablement un rôle de nourricerie pour de nombreuses espèces potamiques. La relation étroite qui existe entre la quantité de la ressource et la fréquentation des juvéniles de poissons dans les nurseries met en évidence un rôle trophique majeur dans la croissance et la survie des jeunes poissons (Carrel, 1986; Copp, 1987).

Face au déclin piscicole généralisé (Tonkin *et al.*, 2019), il est apparu nécessaire d'intégrer dans l'étude des communautés une analyse des relations trophiques notamment en étudiant les relations entre les ressources énergétiques disponibles, les assemblages de juvéniles de poissons, et *in fine* l'impact de l'efficacité de ces transferts d'énergie sur le recrutement au sein des populations.

Ainsi, dans cet objectif, une étude a été initiée afin de caractériser la réponse trophique de certaines espèces piscicoles face aux facteurs environnementaux susceptibles de modifier la capacité d'accueil des nurseries. Dans ce contexte, des analyses isotopiques ont fourni des outils qui rendent compte directement du fonctionnement trophique de ces systèmes péri-fluviaux.

A titre d'exemple, la Figure 49 montre un changement de régime alimentaire pour l'ablette (planctonophage) et le chevesne (polyphage). En effet, même si l'ablette et le chevesne semblent faire les mêmes choix alimentaires dans la lône des Molottes, avec un régime alimentaire centré sur la consommation le zooplancton en juillet/août puis de seston en octobre, cette tendance n'est pas retrouvée dans la partie aval de la lône du Ponton où la contribution du biofilm semble plus importante dans les régimes alimentaires des deux espèces. Ces changements de régimes alimentaires sont en partie calés sur la dynamique saisonnière de la disponibilité des ressources mais sont également imputables aux différences de fonctionnement trophique des nurseries. Ces premiers résultats motivent la poursuite de travaux de recherche sur les déterminants de la production des ressources trophiques dans les annexes fluviales réhabilitées, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

Ces travaux doivent être menés à des échelles spatio-temporelles fines et devraient permettre de mieux comprendre les différences inter-lônes qui sont parfois difficiles à interpréter uniquement à partir de l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des communautés. Le cas des deux lônes de Molottes et du Ponton est très démonstratif, ces deux lônes ayant des caractéristiques morpho-sédimentaires assez voisines. Ainsi, les questions sur l'influence de la thermie (approvisionnement phréatique) et de l'effet naturel de déconnexion des nurseries sont sans doute des pistes à privilégier.

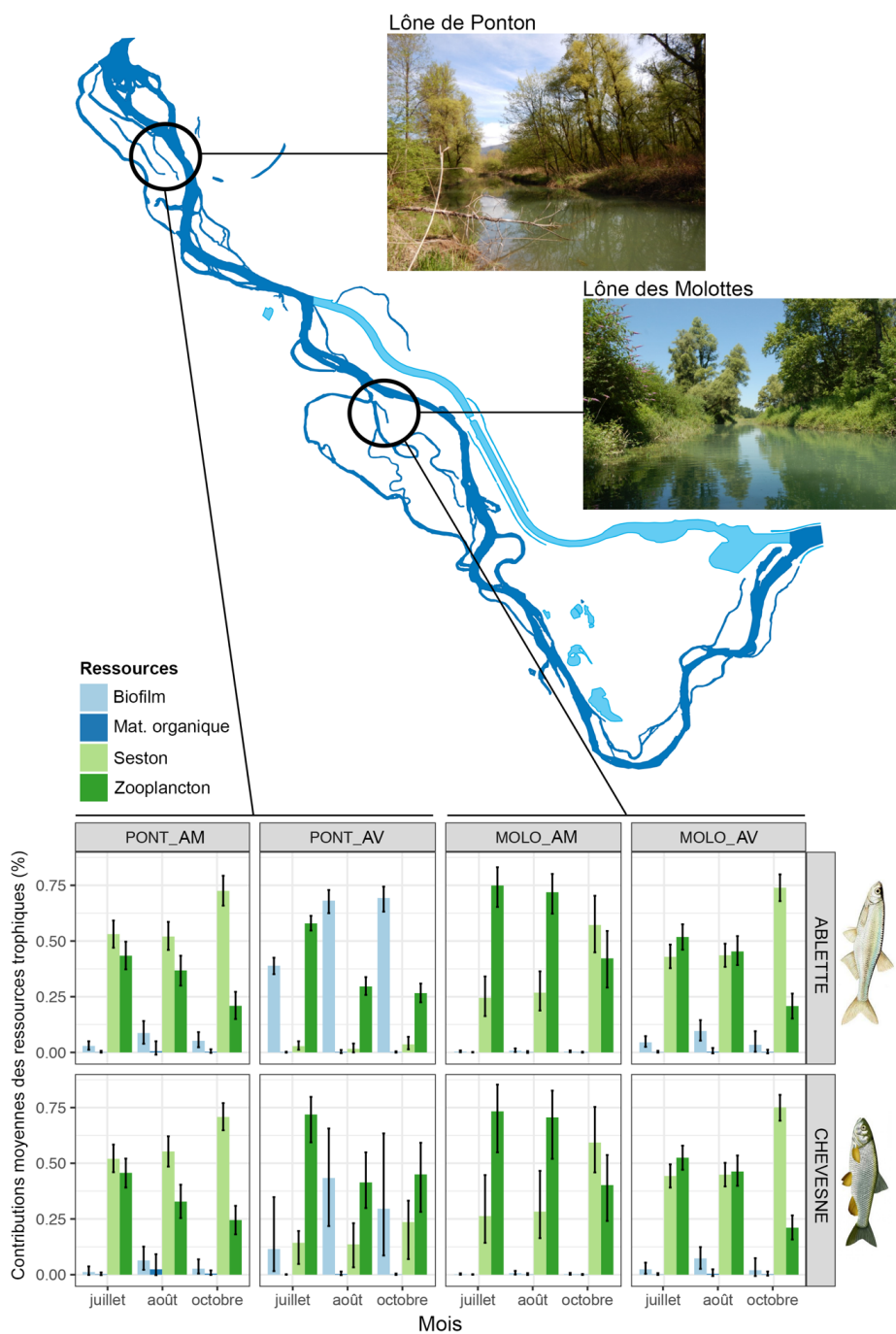


Figure 49 - Contributions moyennes des ressources trophiques dans les régimes alimentaires de deux espèces de juvéniles de poissons dans chacune des stations PONT (Ponton amont et aval) et MOLO (Molottes amont et aval) au cours des 3 campagnes d'échantillonnages de 2018. Les deux stations sont situées dans le secteur de Brégnier-Cordon et présentent un fonctionnement hydrologique général semblable (fréquence de connexion par l'amont avec le chenal principal faible et connexion permanente à l'aval).

En complément, le recours à d'autres types d'approches concernant l'origine de la matière organique peut se révéler important pour développer des indicateurs d'un état fonctionnel. Ces

perspectives écologiques visent à poursuivre le travail entrepris afin de comprendre comment les mesures de gestions doivent être conduites afin d'améliorer et de maintenir le fonctionnement d'une nurserie piscicole. Ce type d'études permettrait de faire le lien entre la structure des communautés, les traits d'histoire de vie des espèces qui les composent et la variabilité de ces traits le long de gradients de variables environnementales en lien avec la restauration des milieux.

Un travail d'analyse conjointe des données collectées dans les Vieux-Rhône et dans les lônes (macroinvertébrés benthiques et poissons) afin de mieux comprendre les dynamiques spatio-temporelles d'occupation des différents types d'habitats au sein des plaines alluviales rhodaniennes va être entrepris dans le cadre d'un travail de master puis de thèse.

En conclusion, les résultats obtenus dans le cadre de RhônEco mettent en évidence les gains écologiques en lien avec les procédures de restauration mis en œuvre. Ces retours d'expérience ouvrent la réflexion sur les améliorations potentielles de la qualité écologique des secteurs restaurés.

Ainsi, les résultats relatifs aux augmentations de débits réservés montrent que des améliorations seraient sans doute possibles dans les secteurs du Haut-Rhône. En Chautagne, la simplification du lit mineur avec un écoulement qui s'effectue majoritairement dans un seul chenal limite la capacité d'accueil de ce Vieux-Rhône, autrefois caractérisé par un chenal tressé. Des aménagements dont la vocation serait de stimuler la re-création de chenaux multiples dans ce secteur pourraient contribuer à renforcer les populations des espèces d'eau courante.

L'évolution de la manière de décliner la problématique de la restauration écologique du Rhône en prenant en compte l'héritage en termes d'impacts des aménagements « Girardon » dans les secteurs en aval de Lyon a stimulé la vision globale de la restauration à l'échelle de la plaine alluviale.

Ainsi, la combinaison de plusieurs leviers, augmentation des débits réservés, réhabilitation des lônes, démantèlement des marges, réinjection de sédiments dans les Vieux-Rhône offre des perspectives nouvelles en termes d'objectifs écologiques. Cette démarche, envisagée dans le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf, ouvre des perspectives intéressantes en termes de réhabilitation écologique dans un secteur fortement altéré par les aménagements anciens et récents. Dans le Vieux-Rhône de Belley et de Brégnier-Cordon, l'intégration de cette réflexion milite en faveur du démantèlement des digues anciennes (secteur amont et aval en rive droite du seuil Fournier à Belley, île des Molottes à Brégnier-Cordon) afin de stimuler la dynamique fluviale et de compléter la mosaïque d'habitats dans la plaine alluviale. Il existe donc encore des potentialités d'amélioration durable de la qualité écologique du Rhône et les progrès réalisés pour les évaluer ouvrent des perspectives intéressantes.

Bibliographie

- Armitage P. D., Moss D., Wright J. F., & Furse M. T. (1983) The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water research*, 17(3), 333-347.
- Bollache L., Devin S., Wattier R., Chovet M., Beisel J. N., Moreteau J. C., Rigaud T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 160(1), 57-66.
- Carrel G. (1986) *Caractérisation physico-chimique du Haut-Rhône français et de ses annexes ; incidences sur la croissance des populations d'alevins*, Thèse Université de Lyon. Lyon 1.
- Castella E., Béguin O., Besacier Monbertrand A.L., Hug Peter D., Lamouroux N., Mayor Siméant H., McCrae D., Olivier J.M., Paillex A. (2015) Realised and predicted changes in the invertebrate benthos after restoration of connectivity to the floodplain of a large river. *Freshwater Biology*. 60 : 1131-1146.
- Copp G.H. (1987) *Le rôle et le fonctionnement des milieux aquatiques du haut-Rhône français comme sites de reproduction et de nurserie pour les poissons du fleuve*, Thèse Université de Lyon. Lyon 1.
- De Cáceres M., Legendre P. (2009) Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology*, 90(12): 3566-3574.
- Dépret, T., Riquier, J., Piégay, H. (2017) Evolution of abandoned channels: Insights on controlling factors in a multi-pressure river system. *Geomorphology*, 294: 99-118.
- Dessaix, J., Fruget, J. F., Olivier, J. M., & Beffy, J. L. (1995) Changes of the macroinvertebrate communities in the dammed and by-passed sections of the French upper Rhône after regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 10(2-4), 265-279.
- Devin S., Bollache L., Noel P. Y., & Beisel J. N. (2005) Patterns of biological invasions in French freshwater systems by non-indigenous macroinvertebrates. *Hydrobiologia*, 551(1), 137-146.
- Doledec S., Dessaix J., & Tachet H. (1996) Changes within the Upper Rhône River macrobenthic communities after the completion of three hydroelectric schemes: anthropogenic effects or natural change? *Archiv Fur Hydrobiologie*, 136, 19-40.
- Galil, B. S., Nehring, S., & Panov, V. (2008) Waterways as invasion highways—Impact of climate change and globalization. In *Biological invasions* (pp. 59-74). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Górski K., De Leeuw, J. J., Winter, H. V., Vekhov, D. A., Minin, A. E., Buijse, A. D. & Nagelkerke, L. A. J. (2011) Fish recruitment in a large, temperate floodplain: the

- importance of annual flooding, temperature and habitat complexity. *Freshwater Biology* **56**, 2210-2225.
- Harby A., Olivier J.M., Méricoux S., Malet E. (2007) A mesohabitat method used to assess minimum flow changes and impacts on the invertebrates and fish fauna in the Rhône River, France. *River Research and Applications*, **23**: 525-543.
- Lamouroux N., Olivier J.M., Persat H., Pouilly M., Souchon Y. & Statzner B. (1999) Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. *Freshwater Biology*, **42**, 275-299.
- Lamouroux N. & Capra H. (2002) simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology*, **47**, 1543–1556.
- Léger, L. 1945. Etude sur l'hydrobiologie et l'économie piscicole du département du Rhône avec une carte et un graphique. *Travaux du Laboratoire d'Hydrobiologie et de Pisciculture de l'Université de Grenoble* 37-40: 1-14.
- Liess M., Von der Ohe P.C. (2005) Analysing effects of pesticides on invertebrate communities in stream. *Environmental Toxicology and Chemistry* **24**(4): 954-965.
- Méricoux, S., Lamouroux, N., Olivier, J. M., & Doledec, S. (2009) Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. *Freshwater Biology*, **54**(6), 1343-1356.
- Nelva, A., H. Persat, D. Chessel D. (1979) Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichtyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage ponctuel d'abondance. *Compte rendu hebdomadaire des séances de l'Académie des sciences. Paris, D* **289**:1295-1298.
- Paillex A., Castella E. & Carron G. (2007) Aquatic macroinvertebrate response along a gradient of lateral connectivity in river floodplain channels. *Journal of the North American Benthological Society*. **26**, 779–796.
- Paillex, A., Dolédec, S., Castella, E., Méricoux, S. (2009) Large river floodplain restoration: predicting species richness and trait responses to the restoration of hydrological connectivity. *Journal of Applied Ecology*, **46**(1), 250-258.
- Perrin J. F. (1978). Signification écologique des peuplements benthiques du Haut-Rhône français (Thèse de doctorat).
- Rahel F. J., Olden J. D. (2008) Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation biology*, **22**(3), 521-533.
- 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.

- 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*, 295: 507-528.
- Riquier J., Piégay H., Lamouroux N., Vaudor L. (2019) Pertinence et pérennité de la restauration de chenaux latéraux : modèles issus de 15 ans de suivi sur le Rhône. *La Houille Blanche*, n°2, p. 101-108.
- Schiemer F., Spindler T. (1989) Endangered fish species of the Danube river in Austria. *Regulated Rivers: Research & Management* **4**, 397-407.
- Statzner B., Resh V. H., & Roux A. L. (1994) The synthesis of long-term ecological research in the context of concurrently developed ecological theory: design of a research strategy for the Upper Rhône River and its floodplain. *Freshwater biology*, 31(3), 253-263.
- Tonkin J.D., Poff N.L.R., Bond N.R., Horne A., Merritt D.M., Reynolds L. V., *et al.* (2019) Prepare river ecosystems for an uncertain future. *Nature* **570**, 301–303.
- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E. (1980) The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137.
- Vaudor L., Lamouroux N., Olivier J.-M. & Forcellini M. (2015) How sampling and population characteristics influence the statistical power to detect changes in abundance after restoration in a large river. *Freshwater Biology*, 60, 1192-1207.
- Vinarski M. (2017) The history of an invasion: phases of the explosive spread of the physid snail *Physella acuta* through Europe, Transcaucasia and Central Asia. *Biological Invasions* 19(4): 1299-1314.
- Zeug S. C., Winemiller K. O. (2008) Relationships between hydrology, spatial heterogeneity, and fish recruitment dynamics in a temperate floodplain river. *River Research and Applications* 24, 90-102.

Annexes

Annexe 1

Les travaux réalisés au cours de la période 2003-2006 ont permis de définir les métriques et les indicateurs. Pour chacun des deux grands types de restauration les indicateurs retenus sont les suivants.

Mesure des effets des modifications du régime des débits réservés (peuplements des vieux-Rhône courants)

Peuplement piscicole

Indicateurs	Métriques
Richesse spécifique	Nombre d'espèces
Structure du peuplement	Fréquence des différentes espèces
Espèces cibles	Distribution en classes de la taille des espèces cibles
Proportion d'espèces eaux vives	Effectifs des espèces : BAF, SPI, BLN, LOF, CHA*
Proportion d'espèces eaux courantes	Effectifs des espèces : OBR, BAF, ABL, HOT, TOX, VAN*

* BAF : barbeau fluviatile, SPI : spirilin, BLN : Blageon, LOF : loche franche, CHA : chabot, OBR : ombre commun, ABL : ablette, HOT : hotu, TOX : toxostome, VAN : vandoise.

Les indicateurs résultent des travaux réalisés avant restauration (Lamouroux *et al.*, 1999).

L'augmentation des valeurs de débits réservés devrait engendrer une augmentation de la proportion « d'espèces d'eaux courantes ».

Peuplement d'invertébrés du chenal

Indicateurs	Métriques
Proportion d'espèces des habitats lotiques	Abondance relative des espèces rhéophiles
Proportion d'espèces des habitats lentiques	Abondance relative des espèces limnophiles

Ces indicateurs ont été développés dans le présent programme avec les données collectées avant restauration.

Le modèle d'habitat statistique FSTress (Lamouroux, 1997), adapté aux invertébrés benthiques, permet de prédire des densités d'espèces à un débit donné à l'échelle du tronçon et donc de prévoir des changements faunistiques et de fonctionnement du milieu induits par des modifications de débits. Les courbes de préférence hydrauliques de 145 taxons ont été réalisées (voir annexe 2). Les deux métriques utilisées résultent de ces travaux.

Les taxons rhéophiles sont inféodés à des habitats présentant des contraintes hydrauliques fortes ($FST \geq 8$ soit une force minimum exercée au fond du cours d'eau supérieure à $3.93 \cdot 10^{-1} N \cdot m^{-2}$). Ces taxons devraient être favorisés par les augmentations de débits dans le chenal principal et dans les lônes courantes.

Les taxons "intermédiaires" sont inféodés à des habitats présentant des contraintes hydrauliques moyennes ($FST \geq 5$ et $FST < 8$).

Les taxons limnophiles sont inféodés à des habitats présentant des contraintes hydrauliques faibles (FST < 5 soit une force minimum exercée au fond du cours d'eau inférieure à $1.66 \cdot 10^{-1} \text{N.m}^{-2}$). Ces taxons devraient être défavorisés par les augmentations de débits dans le chenal principal et dans les lônes courantes mais devraient trouver des conditions favorables dans les lônes plus stagnantes.

Par exemple, le couplage des modèles biologiques et hydrauliques par FSTress prévoit pour les 3 secteurs du Haut-Rhône :

- qu'une **augmentation des débits induira une augmentation des densités des taxons rhéophiles** tels que par exemple *Ancyclus fluviatilis*, *Dreissena polymorpha*, *Baetis vardarensis* et *Hydropsyche contubernalis*.

- qu'une **augmentation des débits induirait une diminution des densités des taxons limnophiles** tels que par exemple *Caenis luctuosa*, *Micronecta spp.*, *Polycentropus flavomaculatus* et *Potamopyrgus antipodarum*.

Mesure des effets de la réhabilitation physique des lônes (annexes fluviales)

Géomorphologie des lônes

Les deux questions posées dans le programme sont :

- Quelle est la durée de vie d'une lône restaurée ? Y a-t-il un comblement du bras par sédimentation ? Existe-t-il des phénomènes de décapage ralentissant le processus, voire l'inversant ? Cette durée est-elle modifiée par la restauration ? Ce premier ensemble de questions est abordé en confrontant le taux de sédimentation (épaisseur des sédiments déposés sur une période de temps donnée) et la hauteur d'eau moyenne de la lône qui est susceptible d'enregistrer le comblement.

- La restauration modifie-t-elle les conditions d'habitat dans la lône ? Ces conditions d'habitat dépendent de l'écoulement et des caractéristiques granulométriques du lit. L'objectif est ici de déterminer si les conditions d'habitat sont modifiées par rapport aux conditions initiales et si ces nouvelles conditions vont se maintenir durablement. Pour caractériser cette évolution, un suivi de la granulométrie moyenne et de la variabilité granulométrique intra-lône est réalisé. Il est complété par un suivi automatisé des hauteurs d'eau.

Indicateurs	Métriques
Espérance de vie de l'état restauré	Comblement post-restauration
Conditions d'habitat intra-lône	Granulométrie du substrat

Les résultats obtenus permettent d'établir une première typologie des lônes restaurées et de proposer les premiers modèles d'évolution (comblement) post-restauration.

Peuplement d'invertébrés des lônes

Indicateurs	Métriques
Richesse taxonomique et statut des espèces	Richesse taxonomique totale Richesse spécifique des taxons Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères Richesse spécifique des mollusques gastéropodes % d'individus appartenant à des espèces non-indigènes Nombre d'espèces exogènes par site Densité moyenne (en nombre d'individus / m ²) des espèces exogènes par site
Caractéristiques biologiques et écologiques des taxons	% broyeur % collecteurs filtreurs % prédateurs % taxons plurivoltins % taxons se déplaçant à la surface du substrat % taxons à dérive comportementale

(1) *richesse taxonomique totale* : obtenue sur les données brutes (déterminées sur des niveaux taxonomiques hétérogènes)

(2) *richesse en Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT)* : nombre de taxons (calculé au niveau du genre ou de l'espèce) appartenant aux Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères, groupes pour lesquels un niveau de détermination plus homogène est obtenu. C'est un indicateur de diversité biologique classiquement utilisé dans l'évaluation des systèmes d'eau courante. Cette richesse augmente avec la qualité du milieu et avec l'intensité du courant.

(3) *richesse en mollusques gastéropodes* : le nombre d'espèces appartenant à ce groupe diminue avec l'intensité du courant s'exerçant dans les milieux. C'est un bon indicateur de la qualité et de la complexité de l'habitat en milieu stagnant.

Du fait de l'hétérogénéité de nombreux invertébrés récoltés dans chaque prélèvement et du lien entre l'abondance et la richesse taxonomique, un calcul de richesses taxonomiques mesurées sur des échantillons égaux du point de vue de l'abondance a été effectué par la technique dite "de raréfaction" (Heck et al., 1975 ; Krebs, 1999). Cette technique simule le tirage aléatoire d'un nombre fixé d'individus à l'intérieur de chaque échantillon à comparer. Le nombre d'individus est déterminé à partir de l'effectif du moins abondant des échantillons comparés. Les richesses raréfiées ont une valeur comparative entre sites et non une valeur absolue. Les calculs ont été faits avec la fonction "rarefy" du jeu de fonctions "vegan" développé pour le logiciel R (Ihaka & Gentleman, 1996) par J. Oksanen et B. O'Hara. La fonction calcule une richesse raréfiée pour un nombre d'individus donné à partir de la formule de Hurlbert (1971) et l'accompagne d'une erreur standard calculée selon Heck et al (1975).

(4) *densité des EPT* : nombre d'individus au m² des insectes Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (cf métrique 2).

(5) *densité totale* : nombre total d'individus au m²

Quatre métriques ont été consacrées à décrire les espèces exogènes au bassin du Rhône. Ces espèces appartiennent majoritairement aux groupes des macrocrustacés (amphipodes, décapodes), des mollusques (bivalves et gastéropodes) et des annélides polychètes.

(6) *l'abondance relative des espèces exogènes* au bassin rhodanien a été calculée par rapport à l'abondance totale dans les relevés.

(7) *l'abondance relative des espèces exogènes (sans Gyraulus parvus)* Le mollusque gastéropode exogène *Gyraulus parvus* colonise préférentiellement les milieux stagnants où il peut atteindre de très fortes densités. Cette métrique a été calculée pour mieux caractériser le comportement des espèces exogènes dans les milieux courants.

(8) *la densité des espèces exogènes* : nombre d'individus au m² des espèces appartenant à ce groupe

(9) *la richesse en espèces exogènes* : le nombre d'espèces appartenant à ce groupe

A la suite des propositions de Merritt et al. (2002) pour adapter aux milieux aquatiques alluviaux des métriques développées pour les systèmes d'eau courante, six métriques basées sur les caractéristiques biologiques des taxons (traits) ont été employées ici :

(10) *le pourcentage de taxons épibenthiques* se déplaçant à la surface du substrat sans mode de fixation spécifique ("sprawlers") exprime la disponibilité en proies pour les oiseaux et les poissons à alimentation benthique.

(11) *le pourcentage de filtreurs* exprime l'importance relative de la matière organique en suspension.

(12) *le pourcentage de broyeurs* renseigne sur la disponibilité en matière organique grossière.

(13) *le pourcentage de taxons plurivoltins* (pouvant accomplir plus d'un cycle de développement par an) exprime la proportion d'espèces potentiellement pionnières à développement rapide.

(14) *le pourcentage de dérivants* (taxons possédant une aptitude moyenne à forte à la dérive comportementale) exprime la disponibilité en proies pour les poissons se nourrissant dans la colonne d'eau.

(15) *le pourcentage de prédateurs* exprime l'intensité du contrôle des prédateurs sur les proies.

Ces métriques sont calculées à partir des nombres d'individus totaux. Les informations relatives au calcul de ces métriques ont été essentiellement tirées de Tachet *et al.* (2000) (voltinisme), Colling (1996) (groupes trophiques), Merritt & Cummins (1996) (relation au substrat), De Crespin De Billy & Usseglio-Polatera (2002) (mode de dérive) et localement adaptées à l'aide d'autres sources pour certains taxons.

Sauf en cas d'indication contraire, les calculs ont été effectués au niveau des sites en amalgamant les résultats des deux saisons d'échantillonnage (mars-mai et juillet-septembre) pour une même situation (pré- ou différentes dates post-restauration).

Ces métriques ont été testées sur le jeu de données pré et post-restauration en prenant en compte des annexes témoins non-restaurées.

Peuplement piscicole des lônes

Indicateurs	Métriques
Richesse spécifique piscicole	Nombre d'espèces
Indicateur d'eaux stagnantes	Abondance relative des espèces phytophiles et litho-phytophiles
Espèces cibles	Abondance absolue des espèces cibles

Richesse spécifique : le nombre d'espèces présentes renseigne sur la fréquentation des annexes fluviales par les différentes espèces de poissons en particulier pour la reproduction et la phase de croissance des jeunes stades de développement.

La proportion d'espèces phytophiles et litho-phytophiles (Balon, 1975) renseigne sur la fréquentation des annexes par les espèces déposant leurs œufs sur des supports végétaux (caractéristiques des annexes fluviales : tanche, perche, brochet...)

L'abondance des espèces cibles : bouvière, rotengle, tanche et brochet renseigne sur l'évolution de ces populations dans les annexes fluviales et devrait augmenter au cours du temps en période post-restauration.

Annexe 2

Assignation des taxons a une catégorie de **gilde de rhéophilie** selon le travail de modélisation en cours (Forcellini *et al.*, *in prep*).

Taxons	Code	Préférences
<i>Agapetus_spp._tot</i>	AGAP_I	rheophile
<i>Ancyclus_fluviatilis</i>	AFLU_i	ubiquiste
<i>Antocha_spp.</i>	AVIT_I	ubiquiste
Asellidae_tot	ASEL_i	ubiquiste
<i>Asellus_aquaticus</i>	AAQU_i	ubiquiste
<i>Atherix_spp._tot</i>	ATHE_I	rheophile
<i>Athripsodes_albifrons</i>	AALB_I	ubiquiste
<i>Athripsodes_cinereus</i>	ACIN_I	ubiquiste
<i>Athripsodes_spp._tot</i>	ATSP_I	ubiquiste
<i>Atrichops_crassipes</i>	ACRA_I	limnophile
Baetidae_(non_Baetis)	BAET_I	limnophile
<i>Baetis_fuscatus</i>	BFUS_I	rheophile
<i>Baetis_lutheri</i>	BLUT_I	rheophile
<i>Baetis_muticus</i>	AMUT_I	rheophile
<i>Baetis_rhodani</i>	BRHO_I	rheophile
<i>Baetis_spp._tot</i>	BASP_I	rheophile
<i>Baetis_vardarensis</i>	BVAR_I	rheophile
<i>Brachyptera_spp._tot</i>	BRSP_I	rheophile
<i>Caenis_luctuosa</i>	CLUC_I	intermédiaire
<i>Caenis_luctuosa_macrura</i>	CALM_I	intermédiaire
<i>Caenis_macrura</i>	CMAC_I	ubiquiste
<i>Caenis_rivulorum</i>	CRIV_I	ubiquiste
<i>Caenis_spp._tot</i>	CASP_I	ubiquiste
<i>Centroptilum_luteolum</i>	CLUT_I	limnophile
<i>Ceraclea_dissimilis</i>	CDIS_I	ubiquiste
<i>Ceraclea_spp._tot</i>	CESP_I	ubiquiste
<i>Chelicorophium_curvispinum</i>	CCUR_i	rheophile
<i>Chelicorophium_curvispinum_sowinskyi</i>	CCSP_i	rheophile
<i>Chelicorophium_sowinskyi</i>	CSOW_i	ubiquiste
<i>Chelicorophium_spp._tot</i>	CHEL_i	rheophile
<i>Cheumatopsyche_lepida</i>	CLEP_I	rheophile
Chironomini	CHSP_I	limnophile
<i>Chloroperla_spp.</i>	CHLO_I	intermédiaire
Clinocerinae	CLIN_I	ubiquiste
<i>Corbicula_fluminea</i>	CFLU_i	ubiquiste
<i>Dendrocoelum_lacteum</i>	DLAC_i	ubiquiste
<i>Dicranota_spp.</i>	DICR_I	ubiquiste
<i>Dikerogammarus_villosus</i>	DVIL_i	ubiquiste

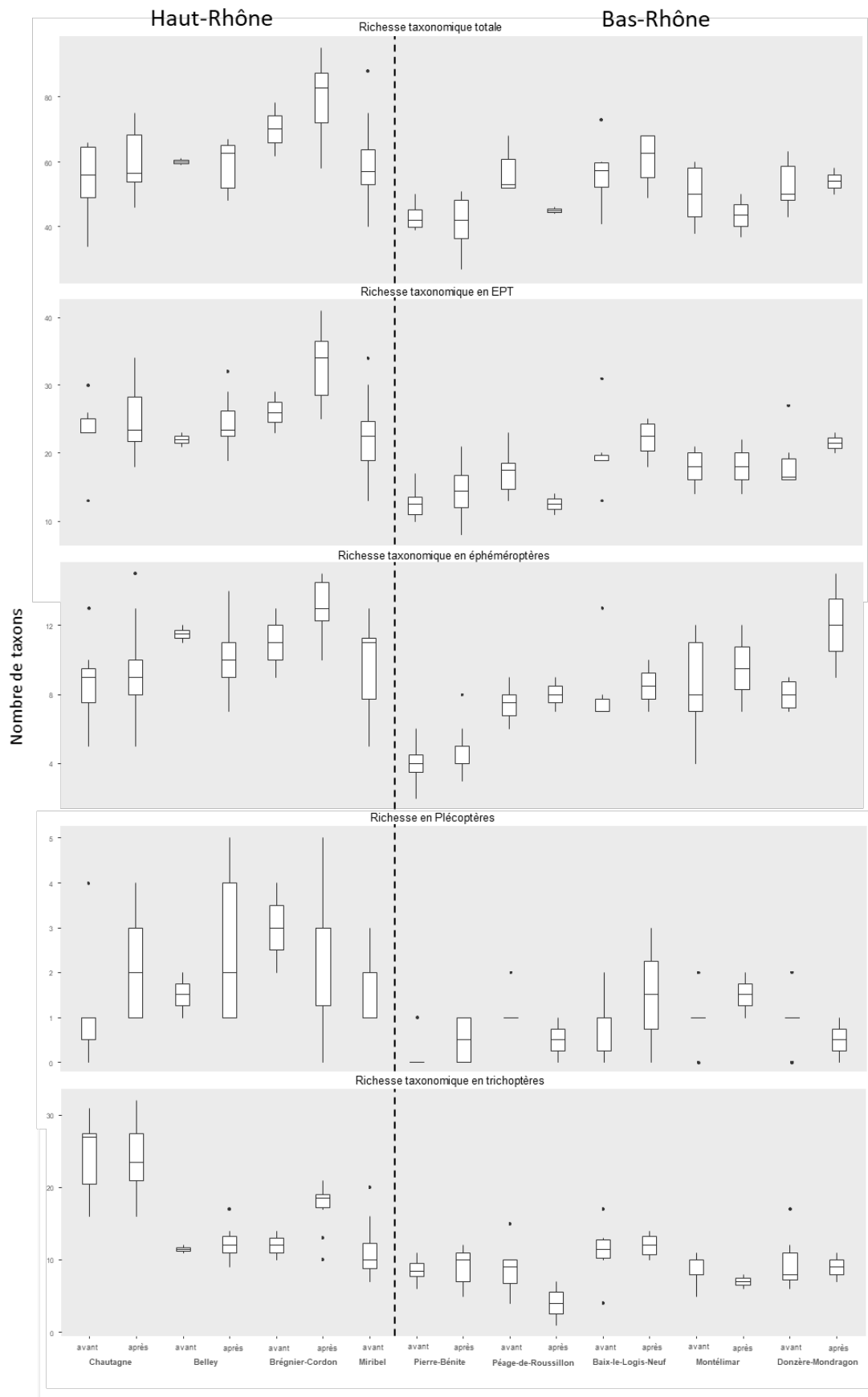
Taxons	Code	Préférences
<i>Dinocras_cephalotes</i>	DCEP_I	rheophile
<i>Dinocras_spp._tot</i>	DISP_I	rheophile
<i>Dreissena_polymorpha</i>	DPOL_i	ubiquiste
<i>Dryops_spp.</i>	DRSP_I	ubiquiste
<i>Ecdyonurus_gp._venosus</i>	EVEN_I	ubiquiste
<i>Ecdyonurus_spp._tot</i>	ECSP_I	ubiquiste
<i>Ecdyonurus_venosus</i>	EVENO_I	ubiquiste
<i>Elmis_a_spp._tot</i>	ELSP_a	rheophile
<i>Elmis_spp._tot</i>	ELSP_I	rheophile
<i>Epeorus_spp._tot</i>	EPSP_I	rheophile
<i>Ephoron_virgo</i>	EVIR_I	ubiquiste
<i>Erpobdella_octocolata</i>	EOCT_i	intermédiaire
<i>Erpobdella_spp._tot</i>	ERSP_i	ubiquiste
<i>Esolus_a_spp._tot</i>	ESSP_a	rheophile
<i>Esolus_spp.</i>	ESSP_I	ubiquiste
<i>Ferrissia_clessiniana</i>	FFRA_i	ubiquiste
<i>Gammarus_fossarum</i>	GFOS_i	ubiquiste
<i>Gammarus_pulex</i>	GPUL_i	ubiquiste
<i>Gammarus_spp._tot</i>	GASP_i	ubiquiste
<i>Girardia_tigrina</i>	DTIG_i	rheophile
<i>Glossiphonia_complanata</i>	GCOM_i	ubiquiste
<i>Glossiphonia_spp._tot</i>	GLOSS_i	ubiquiste
<i>Glossosoma_boltoni</i>	GBOL_I	rheophile
<i>Glossosoma_spp._tot</i>	GLSP_I	rheophile
<i>Goera_pilosa</i>	GPIL_I	limnophile
<i>Gyraulus_albus</i>	GALB_i	ubiquiste
<i>Gyraulus_parvus</i>	GPAR_i	ubiquiste
<i>Gyraulus_spp._tot</i>	GYSB_i	ubiquiste
<i>Habroleptoides_confusa</i>	HACO_I	ubiquiste
<i>Habroleptoides_spp._tot</i>	HABR_I	ubiquiste
<i>Habrophlebia_lauta</i>	HLAU_I	ubiquiste
<i>Habrophlebia_spp._tot</i>	HAPS_I	ubiquiste
<i>Haitia_acuta</i>	PACU_i	ubiquiste
<i>Helobdella_stagnalis</i>	HSTA_i	limnophile
Hemerodromiinae	HEME_I	ubiquiste
<i>Heptagenia_spp._tot</i>	HESP_I	rheophile
<i>Heptagenia_sulphurea</i>	HSUL_I	rheophile
<i>Hexatoma_spp.</i>	HEXA_I	intermédiaire

Taxons	Code	Préférences
<i>Hydraena_a_spp._tot</i>	HYDRA_a	rheophile
<i>Hydropsyche_contubernalis</i>	HCON_l	rheophile
<i>Hydropsyche_exocellata</i>	HEXO_l	rheophile
<i>Hydropsyche_incognita</i>	HINC_l	rheophile
<i>Hydropsyche_instabilis</i>	HINS_l	rheophile
<i>Hydropsyche_modesta</i>	HMOD_l	ubiquiste
<i>Hydropsyche_siltalai</i>	HSIL_l	rheophile
<i>Hydropsyche_spp._tot</i>	HYSP_l	rheophile
<i>Hydroptila_spp._tot</i>	HDSP_l	ubiquiste
<i>Hypania_invalida</i>	HINV_i	ubiquiste
<i>Isoperla_spp._tot</i>	ISSP_l	rheophile
<i>Jaera_istri</i>	JIST_i	rheophile
<i>Lepidostoma_hirtum</i>	LHIR_l	ubiquiste
<i>Lepidostoma_spp._tot</i>	LEPI_l	ubiquiste
<i>Leuctra_geniculata</i>	EGEN_l	limnophile
<i>Leuctra_spp._tot</i>	LESP_l	rheophile
<i>Limnius_a_spp._tot</i>	LISP_a	rheophile
<i>Limnius_spp._tot</i>	LISP_l	rheophile
<i>Limnius_volckmari</i>	LVOL_l	ubiquiste
<i>Limnomysis_benedeni</i>	LIBE_i	limnophile
<i>Micronecta_spp._tot</i>	MISP_i	limnophile
<i>Mysidae_tot</i>	MYSI_i	intermédiaire
<i>Nemoura_spp._tot</i>	NESP_l	ubiquiste
<i>Oecetis_spp._tot</i>	OESP_l	ubiquiste
<i>Onychogomphus_spp._tot</i>	ONSP_l	ubiquiste
<i>Orectochilus_villosus</i>	OVIL_l	ubiquiste
<i>Orthocladiinae</i>	ORTH_l	rheophile
<i>Orthotrichia_spp.</i>	ORSP_l	ubiquiste
<i>Oulimnius_a_spp._tot</i>	OUSP_a	rheophile
<i>Oulimnius_spp._tot</i>	OUSP_l	ubiquiste
<i>Piscicola_geometra</i>	PGEO_i	ubiquiste
<i>Platambus_maculatus</i>	PMAC_l	limnophile
<i>Polycelis_nigra_tenuis</i>	PONT_i	ubiquiste
<i>Polycentropus_flavomaculatus</i>	PFLA_l	intermédiaire
<i>Polycentropus_spp._tot</i>	POSP_l	intermédiaire
<i>Potamanthus_luteus</i>	PLUT_l	ubiquiste
<i>Potamopyrgus_antipodarum</i>	PANT_i	ubiquiste
<i>Proclleon_bifidum</i>	PBIF_l	limnophile

Taxons	Code	Préférences
<i>Proclleon_spp._tot</i>	PROC_l	limnophile
<i>Protonemura_spp._tot</i>	PRSP_l	rheophile
<i>Psychodidae</i>	PSSP_l	ubiquiste
<i>Psychomyia_pusilla</i>	PPUS_l	ubiquiste
<i>Radix_auricularia</i>	RAUR_i	ubiquiste
<i>Radix_spp._tot</i>	RASP_i	ubiquiste
<i>Rhithrogena_semicolorata</i>	RSEM_l	rheophile
<i>Rhithrogena_spp._tot</i>	RHPS_l	rheophile
<i>Rhyacophila_spp._tot</i>	RHSP_l	rheophile
<i>Riolus_spp._tot</i>	RISP_l	ubiquiste
<i>Schmidtea_polychroa_lugubris</i>	DUPL_i	ubiquiste
<i>Sericostoma_personatum_flavicorne</i>	SEPF_l	ubiquiste
<i>Sericostoma_spp._tot</i>	SESP_l	ubiquiste
<i>Serratella_ignita</i>	SIGN_l	ubiquiste
<i>Setodes_argentipunctellus</i>	SARG_l	ubiquiste
<i>Setodes_spp._tot</i>	SETO_l	ubiquiste
<i>Silo_nigricornis</i>	SNIG_l	ubiquiste
<i>Silo_spp._tot</i>	SILO_l	ubiquiste
<i>Simuliidae_tot</i>	SIMU_l	rheophile
<i>Stratiomyidae_tot</i>	STRA_l	ubiquiste
<i>Tanypodinae</i>	TANY_l	ubiquiste
<i>Tanytarsini</i>	TASP_l	ubiquiste
<i>Theodoxus_fluviatilis</i>	TFLU_i	ubiquiste
<i>Tinodes_dives</i>	TDIV_l	rheophile
<i>Tinodes_spp._tot</i>	TISP_l	rheophile
<i>Tipula_spp._tot</i>	TIPA_l	ubiquiste
<i>Tipulidae</i>	TIPU_l	ubiquiste
<i>Torleya_major</i>	TMAJ_l	ubiquiste
<i>Valvata_cristata</i>	VCRI_i	ubiquiste
<i>Valvata_piscinalis</i>	VPIS_i	ubiquiste
<i>Valvata_spp._tot</i>	VASP_i	ubiquiste

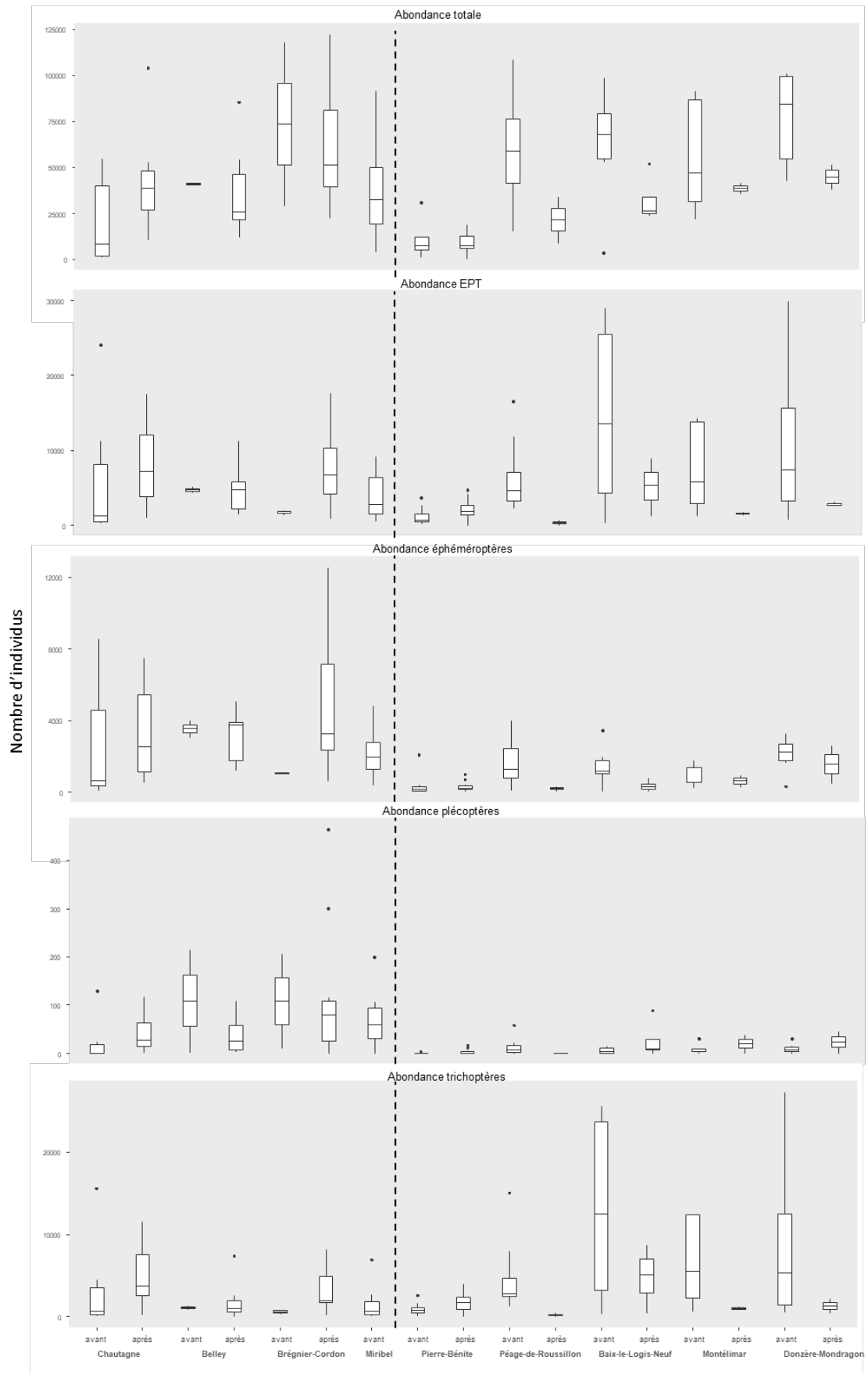
Annexe 3

Comparaison avant après rehaussement des débits réservés des richesses taxonomiques corrigées sur l'ensemble des secteurs suivis dans le cadre de RhônEco.



Annexe 4

Comparaison avant après rehaussement des débits réservés des abondances totales observées sur l'ensemble des secteurs suivis dans le cadre de RhônEco.

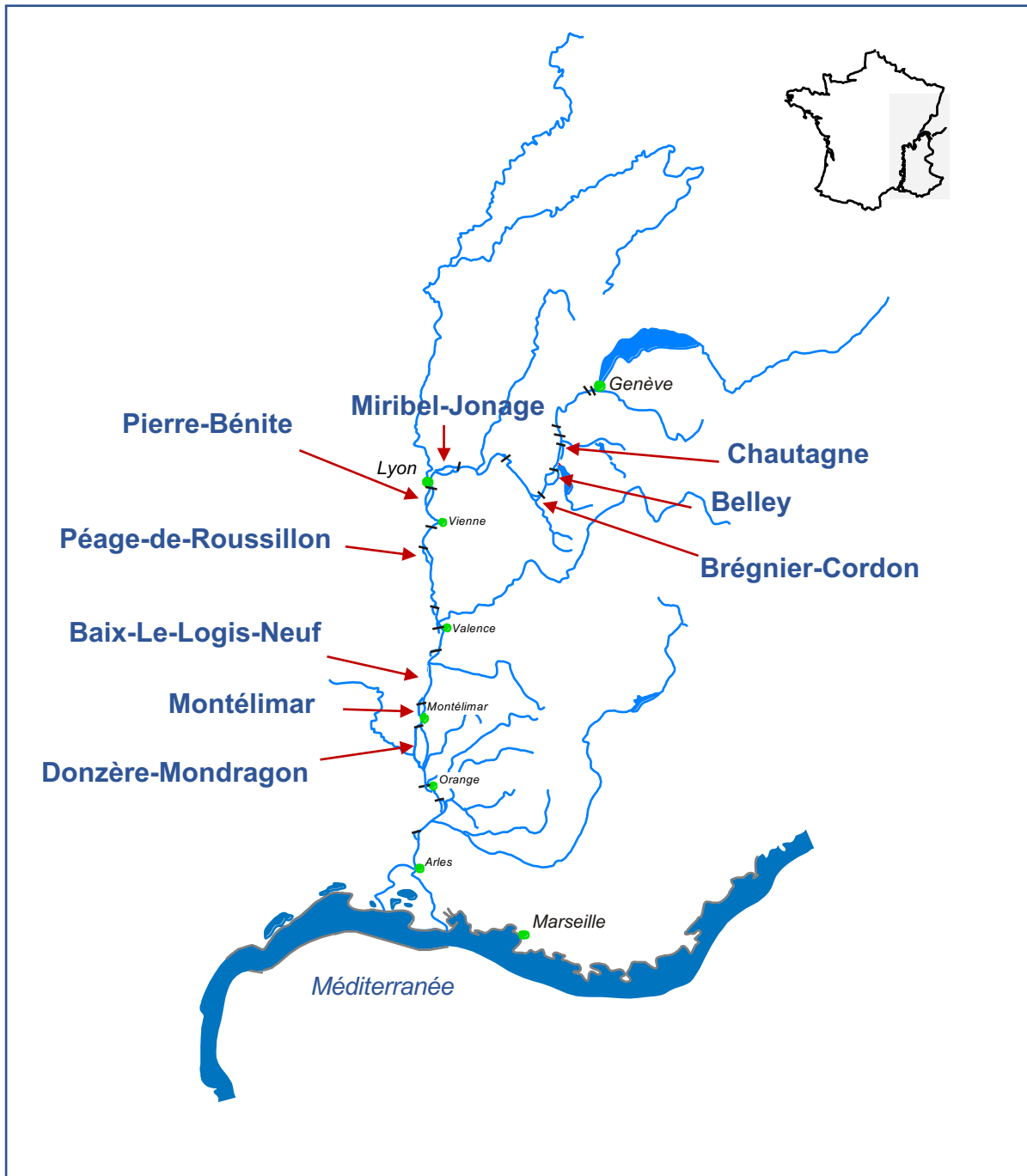


Annexe 5

Bilan des espèces exogènes collectées dans le cadre du suivi RhônEco.

Phylum / Sub-Phylum	Taxon	Origine	1 ^{er} observation sur le HR	1 ^{er} observation sur le BR	Chautagne	Belley	Bregnier-Cordon	Miribel-Jonage	Pierre-Bénite	Péage de Roussillon	Baix-le-Logis-Neuf	Montélimar	Donzère-Mondragon	
Crustacea	<i>Atyaephyra desmarestii</i>	Europe du sud		2000					X	X		X	X	
	<i>Chelicorophium curvispinum</i>	Ponto-Caspienne		2002					X	X		X	X	
	<i>Chelicorophium sowinskyi</i>	Ponto-Caspienne		2010					X	X	X	X	X	
	<i>Crangonyx pseudogracilis</i>	Amérique du Nord	2004	1995		X	X	X		X				
	<i>Dikerogammarus villosus</i>	Ponto-Caspienne	2004	1999	X	X	X	X	X	X		X	X	
	<i>Gammarus roeselii</i>	Europe centrale et de l'Est	2002	avant 1985				X		X		X	X	
	<i>Gammarus tigrinus</i>	Amérique du Nord		1995					X	X		X	X	
	<i>Hemimysis anomala</i>	Ponto-Caspienne		2010					X			X	X	
	<i>Limnomysis benedeni</i>	Ponto-Caspienne		2010				X	X	X		X	X	
	<i>Jaera istri</i>	Ponto-Caspienne		2008		X		X	X	X		X	X	
	<i>Orconectes limosus</i>	Amérique du Nord		1976	avant 1985			X	X					
	Mollusca	<i>Corbicula fluminea</i>	Asie	1990	1993	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		<i>Dreissena polymorpha</i>	Ponto-Caspienne	Après 1852	?	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		<i>Dreissena rostriformis</i>	Ponto-Caspienne		2016					X	X	X		
<i>Gyraulus parvus</i>		Amérique du Nord	1994	1997	X	X	X	X		X	X		X	
<i>Lithoglyphus naticoides</i>		Ponto-Caspienne		1995					X	X				
<i>Menetus dilatatus</i>		Amérique du Nord		1995					X	X		X	X	
<i>Physella acuta</i>		Méditerranée/Amérique du Nord	1881	?	X	X	X	X	X	X		X	X	
<i>Potamopyrgus antipodarum</i>		Nouvelle Zélande	1978	?	X	X	X	X	X	X		X	X	
Annelida	<i>Barbronia weberi</i>	Asie	2013	2011		X	X			X	X	X	X	
	<i>Hypania invalida</i>	Ponto-Caspienne	2008	2002		X	X	X	X	X	X	X	X	
Platyhelminthes	<i>Dugesia tigrina</i>	Amérique du Nord	1968	?	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Présentation synthétique par site



Secteur de Chautagne

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 8.9 km de long dont ~ 7 courants, comportant 2 seuils franchissables (PK 143.030 et 143.650), alimentée par le barrage de Motz et ne recevant aucun affluent (Figure 1).

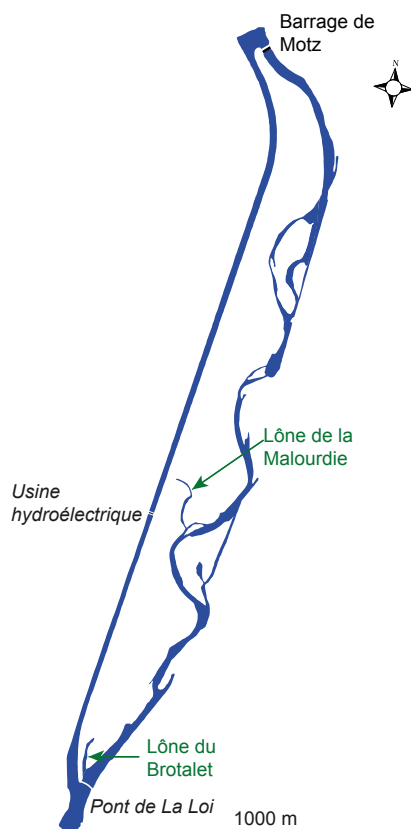


Figure 1 – Secteur de Chautagne

La restauration

Premier secteur restauré du Haut-Rhône (2004), caractérisé par des vitesses fortes qui ont doublé après restauration.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2004 ($m^3.s^{-1}$)			10					20				10
Vitesse ($m.s^{-1}$)			0.35									
Débit minimum >2004 ($m^3.s^{-1}$)			50				70		50			
Vitesse ($m.s^{-1}$)			0.74									

Deux lônes ont été réhabilitées : la lône de la Malourdie (alimentée en partie par le contre-canal de rive gauche de l'aménagement et en partie par le sous-écoulement) et la lône du Brotalet (située à l'extrémité aval du Vieux-Rhône et principalement alimentée par d'intenses retours d'eaux résultant de la proximité du canal de restitution). La partie amont du Brotalet est partiellement alimentée par le sous-écoulement et la turbidité y est généralement plus faible que dans la zone aval plus influencée par le remous de l'aménagement hydroélectrique.

Secteur tressé typique avant l'aménagement, puis contraint par des endiguements « insubmersibles » en rive gauche et par la construction de la ligne de chemin de fer en rive droite (1760-1860), le secteur de Chautagne ne comportait que peu de lônes potentiellement réhabilitables. La lône de Malourdie a été recreusée et reconnectée au vieux-Rhône par l'aval, la lône de Brotalet a été élargie, approfondie, et sa longueur a été augmentée en creusant le banc de galets à l'amont.

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

Un suivi hydrobiologique a été réalisé dans le vieux-Rhône de Chautagne depuis la mise en service de l'aménagement hydroélectrique (1980).

L'évolution progressive du peuplement de poissons, suite à la mise en débit réservé du Vieux-Rhône, a conduit à un basculement de la structure du peuplement marqué par une raréfaction du hotu et de la vandoise et une augmentation marquée des densités de loches franches et de vairons et un maintien des populations de barbeau fluviatile et de chevaine. Les populations de truite fario et d'ombre commun ont subsisté, mais avec de faibles effectifs. Suite à l'augmentation des débits réservés, les modifications de structure de peuplement attendues (augmentation des proportions d'espèces "d'eau courante" : barbeaux fluviatiles, ombres communs, ablettes, hotus, et vandoises) ont été observées, la proportion moyenne des espèces d'eau courante est passée de 11 % (avant augmentation du débit réservé) à 24,4% depuis 2004 (Figure 2). Néanmoins, certaines populations d'espèces caractéristiques du Haut-Rhône (hotu et vandoise en particulier) n'ont pas montré d'amélioration notable de leur état depuis 2004. Parmi les espèces d'eau courante, la proportion de barbeaux fluviatiles est relativement importante (en moyenne cette espèce représente 16,7% des effectifs échantillonnés depuis 2004). La proportion d'ablettes varie d'une année à l'autre : l'abondance relative moyenne de l'espèce entre 2004 et 2019 est de 5,5%. Pour ces deux espèces, les juvéniles de l'année représentent une fraction très importante des effectifs échantillonnés (95% en moyenne pour l'ablette et 85% pour le barbeau) ce qui contraste avec les résultats obtenus dans les

vieux-Rhône de Belley et de Brégnier-Cordon (Figures 3 et 4). Ceci met en évidence la très faible contribution des autres espèces à la valeur de cette métrique (hotu, vandoise, ombre commun). Les populations d'ombre commun et de truite fario semblent se maintenir, les effectifs échantillonnés dans le cadre du suivi sont restés faibles depuis 2004. La variabilité inter-annuelle du succès de reproduction des alettes et des barbeaux explique la forte variabilité interannuelle observée de la proportion d'espèces d'eau courante depuis 2004. Parmi les 28 espèces rencontrées dans ce vieux-Rhône, les proportions de chevaine (~25% des poissons échantillonnés) et de vairon (~19%) sont importantes, le gardon, la loche franche et le goujon sont également bien représentés, mais dans des proportions moindres (entre 8 et 9%).

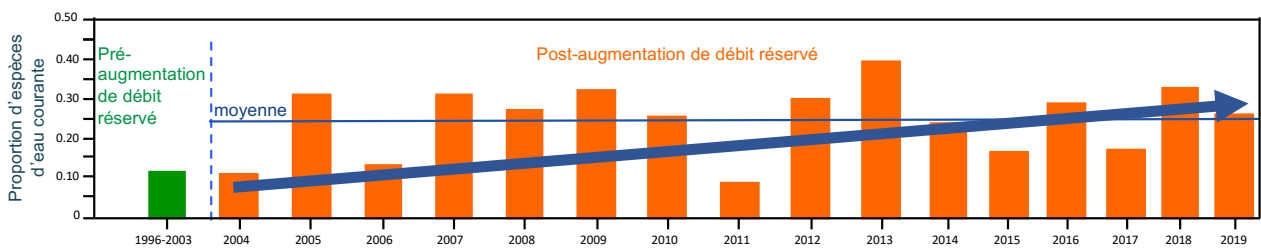


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Chautagne sur la période 1996-2003 (état pré-restauration) et après 2004 (augmentation des débits réservés). La ligne horizontale représente la valeur de la moyenne sur la période post-restauration.

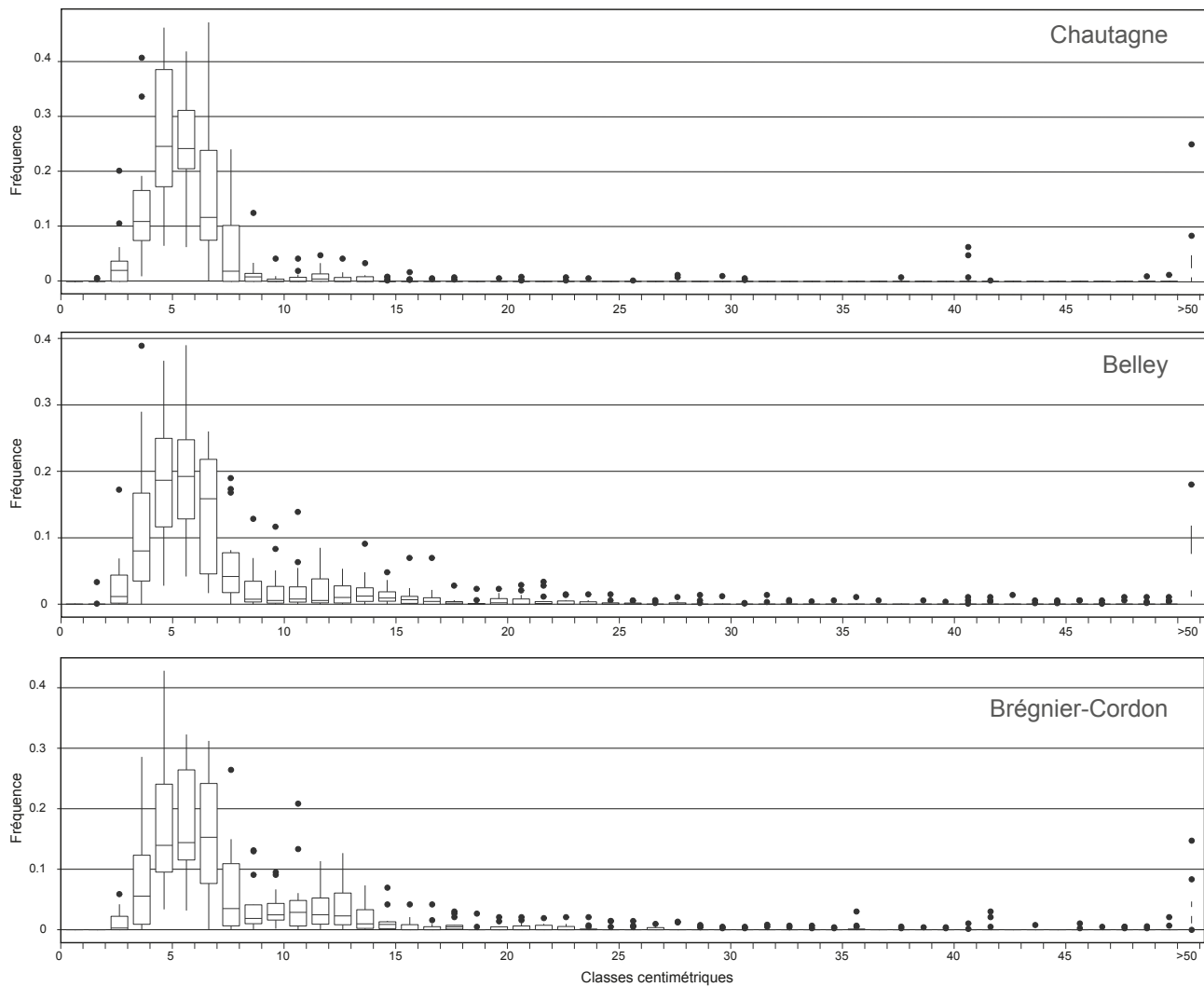


Figure 3 – Distributions en classes de tailles centimétriques des barbeaux fluviaux échantillonnés après modification des débits réservés dans les vieux-Rhône de Chautagne (2004-2019), Belley (2005-2019) et Brégner-Cordon (2006-2019). Les box-plots prennent en considération les valeurs annuelles des abondances relatives pour chaque classe de taille.

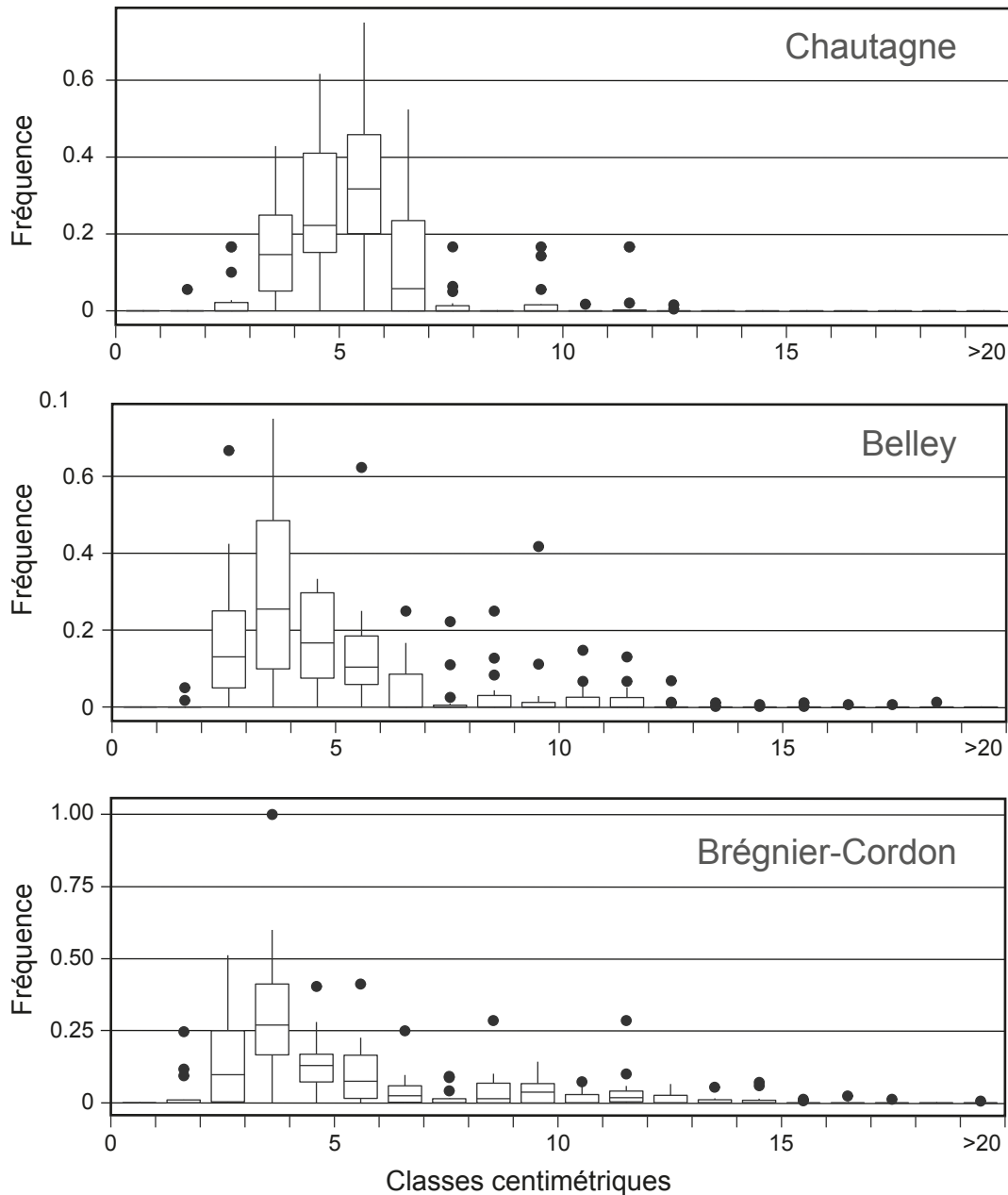


Figure 4 – Distributions en classes de tailles centimétriques des ablettes échantillonnées après modification des débits réservés dans les vieux-Rhône de Chautagne (2004-2019), Belley (2005-2019) et Brégner-Cordon (2006-2019). Les box-plots prennent en considération les valeurs annuelles des abondances relatives pour chaque classe de taille.

Avant modification des débits réservés, la communauté de macroinvertébrés benthiques était dominée par des taxons tolérants une large gamme de conditions hydrauliques (*Gammarus fossarum*, *Gammarus pulex*, ...) ainsi que par des taxons rhéophiles (*Orthocladinae*, *Hydropsyche* juvéniles, *Baetis fuscatus*, ...) ou encore typiques des grands cours d'eau de plaine (*Potamanthus luteus*, *Psychomyia pusilla*), en cohérence avec la diversité d'habitats initialement présente dans ce secteur.

Globalement, et en accord avec les attentes, la proportion de certains taxons rhéophiles, déjà largement majoritaires dans ce secteur, a augmenté considérablement (+24 %, Figure 5) après rehaussement du débit réservé (*Baetis* spp., *Heptagenia* juvéniles, Orthocladiinae, Simuliidae, Hemerodromiinae, *Theodoxus fluviatilis*, *Ancylus fluviatilis*). Après 2004, l'augmentation de la proportion de certains taxons semble directement liée à l'augmentation du débit réservé comme par exemple celle des filtreurs passifs (Simuliidae), leur mode d'alimentation étant fortement dépendant des conditions hydrologiques (flux de MES dans la colonne d'eau). La proportion de certains taxons aux préférences hydrauliques intermédiaires a également augmenté comme pour les Trichoptères *Glossosoma* spp. et *Hydroptila* spp. Certains plécoptères rhéophiles et indicateurs d'une bonne qualité physico-chimique de l'eau (n°1 au classement IBGN, AFNOR, 1992, 2004), peu ou pas collectés lors des campagnes pré-restauration, ont été régulièrement retrouvés après l'augmentation du débit réservé comme les *Amphinemura* spp. et *Brachyptera* spp. Inversement et en accord avec les attentes, la proportion des taxons qui ont une préférence pour des contraintes hydrauliques faibles, initialement peu présents avant restauration, a fortement diminué (*Dendrocoelum lacteum*, *Erpobdella octoculata*, *Glossiphonia complanata* et les Polycentropodidae). Enfin, les effectifs de certains taxons ont diminué (ex : *Limnius* spp.) ou sont restés relativement stables (ex : *Leuctra* spp.) en dépit de l'augmentation du débit réservé. D'autres paramètres environnementaux (qualité du substrat, thermie, compétition inter/intra spécifique, ...) ont pu limiter le développement de ces populations.

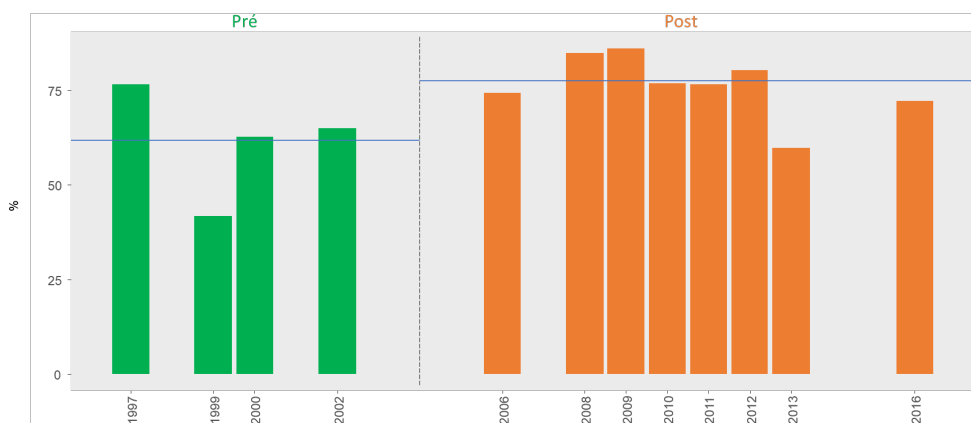


Figure 5 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles dans le Vieux-Rhône de Chautagne. La ligne pointillée verticale marque la date de modification du débit réservé. La ligne horizontale représente la valeur de la moyenne sur la période post-restauration.

Après une forte hausse de la proportion des taxons appartenant à la guildes des rhéophiles durant la période 2006-2012 (+30%), les valeurs de cette métrique ont légèrement diminué à partir de 2013 (Figure 5).

Enfin, la proportion des 2 espèces de crustacés *Gammarus fossarum* et *Gammarus pulex*, initialement très abondants dans ce secteur et plutôt indifférents aux contraintes hydrauliques, a

fortement diminué à partir de 2006 (Figure 6). Ceci est probablement lié à l'arrivée dans ce secteur en 2004 du crustacé exogène *Dikerogammarus villosus*, une espèce très compétitrice et potentiellement nuisible pour la faune locale (Bollache *et al.*, 2004 ; MacNeil & Platvoet, 2005 ; Dessaix & Fruget, 2014).

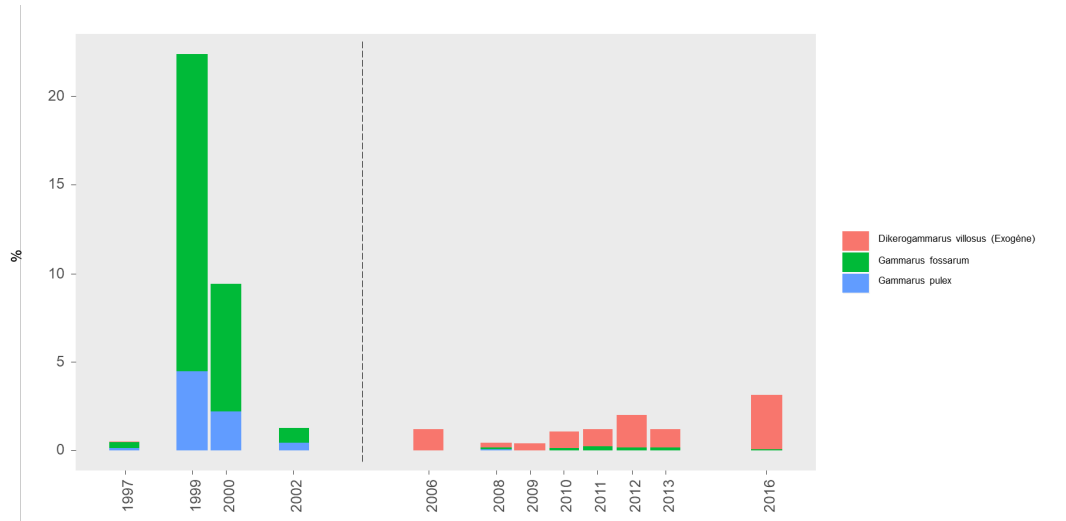


Figure 6 - Abondance moyenne annuelle des 3 espèces de crustacés Gammaridae dans le Vieux-Rhône de Chautagne (*Gammarus fossarum*, *G. pulex* et *Dikerogammarus villosus*).

Réhabilitation des lônes

Les deux lônes réhabilitées ont des caractéristiques physico-chimiques et biologiques différentes en raison de la nature de leur alimentation en eau.

La lône de la Malourdie reste fraîche tout au long de l'année, les eaux sont très claires, elle abrite peu d'espèces de macrophytes. Après restauration, le comblement de ce bras a été rapide (Figure 7) et l'intensité de ce phénomène a progressivement décliné au cours du temps. Les dépôts de sédiments, essentiellement constitués de limons, se structurent de manière uniforme et homogène sur le fond, soulignant clairement que la lône fonctionne essentiellement comme un « décanteur » (piège à sédiments). La durée de vie du bras en tant qu'habitat aquatique est actuellement estimée à 40-60 ans. Le suivi a permis de mettre en évidence que la lône présente une certaine capacité de rajeunissement (Figure 7 ; d'octobre 2006 à octobre 2007, de 2015 à 2019). A la suite des travaux de restauration, le bouchon amont constitué de matériaux grossiers a eu tendance à prograder dans la lône (~19 m entre 2004 et 2012). Ce constat corrobore bien le fait que les écoulements peuvent être relativement compétents, lorsque le bras est connecté par l'amont. Toutefois, le bouchon semble s'être stabilisé depuis, suite à la fixation de la nappe de progradation par la végétation. Nous avons également déterminé que sur la période 2004-2013, 50% de l'atterrissement observé était lié au comblement de la lône par les sédiments fins. Les 50% restants sont liés à un abaissement de la ligne d'eau (~60 cm

pour le débit réservé) sur cette période, consécutif à des ajustements du lit mineur au droit de l'extrémité aval du bras (migration d'un radier, notamment). L'évolution de l'extrémité aval de la Malourdie est également complexe. La lône s'est allongée de 80 mètres entre 2004 et 2019, suite à l'atterrissement du banc latéral et du bras courant situés à proximité du bras. Ce nouveau linéaire présente une faible hauteur d'eau et une pente notable, ce qui peut rendre plus difficile l'accès à la lône pour les poissons. En octobre 2019, la présence d'un barrage de castor, localisé au niveau de l'extrémité aval initiale de la lône, a provoqué un rehaussement de la hauteur d'eau observée dans le bras pour le débit réservé d'environ 30 cm.

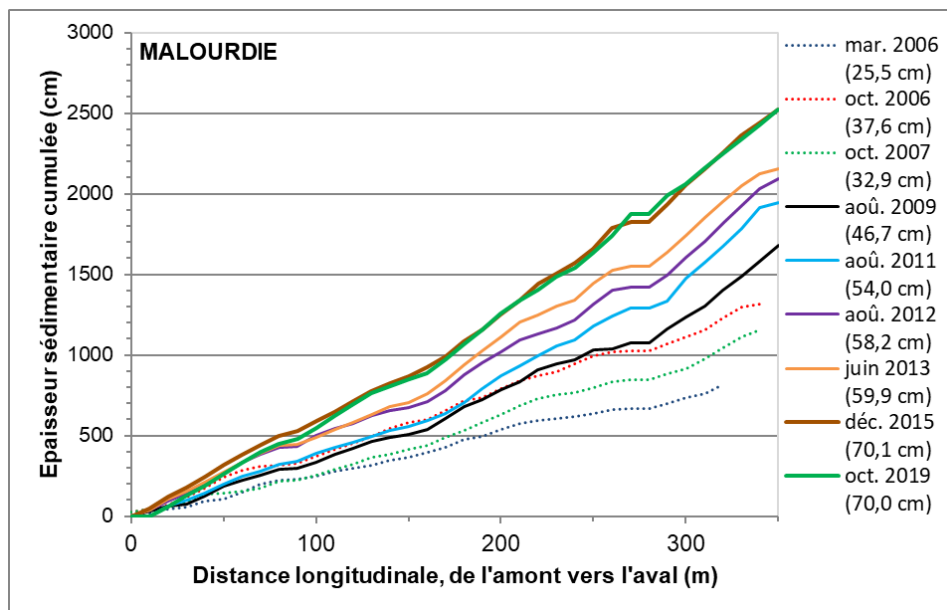


Figure 7 – Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans la lône de la Malourdie.

N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante.

Elle offre peu d'habitats favorables pour les poissons et en particulier pour la reproduction et le développement des jeunes stades. Les principales espèces trouvées dans cette lône sont l'épinoche et la loche franche. Les densités sont généralement très faibles. La connexion aval permet aux poissons de grande taille de pénétrer temporairement dans la lône (brochet). Les ajustements morpho-sédimentaires récents de l'extrémité aval de la lône devraient limiter ces mouvements à l'avenir.

La lône du Brotalet a été recreusée dans sa partie aval sur une longueur cumulée d'environ 830 m (~680 m pour le bras principal). Les retours d'eau en provenance du Rhône et l'intensité des crues en fonctionnement courant (i.e. contraintes de cisaillement) sont élevés. Ce fonctionnement se retrouve dans les caractéristiques granulométriques des dépôts, avec une prédominance des stations sableuses (amont et partie centrale du bras) sur les stations limoneuses (aval du bras). Il permet également d'expliquer la trajectoire évolutive oscillante suivie par la lône : les phases où le remplissage par les

fines prédominantes sont ponctuées par des périodes au cours desquelles la lône enregistre des épisodes décapants plus ou moins intenses (Figure 8). Les relevés effectués entre 2013 et 2019 confirment que la lône possède une importante capacité de rajeunissement par auto-curage lors des crues, lorsque le contexte hydrologique est favorable. Autrement dit, le suivi démontre ainsi que les valeurs relativement importantes de contraintes hydrauliques estimées en crue dans ce bras sont épisodiquement en mesure de contrecarrer la tendance à l'accumulation de fines imputable à la forte sensibilité du bras aux retours d'eau en provenance du Rhône. La durée de vie du bras est actuellement estimée à plus de 100 ans. Toutefois, les 100 premiers mètres amont de la lône se trouvent dans un état de comblement avancé (75% du total des dépôts de fines est observé sur les 100 premiers mètres amont). Le banc de galets situé à l'amont de la zone en eau permanente tend à progresser dans cette dernière (~14 m de 2005 à 2012 au niveau de la branche amont de rive droite). Le front de progradation des matériaux grossiers constituant le bouchon semble à présent en grande partie fixé, suite au développement d'un cordon de végétation arbustive à l'interface lône/bouchon.

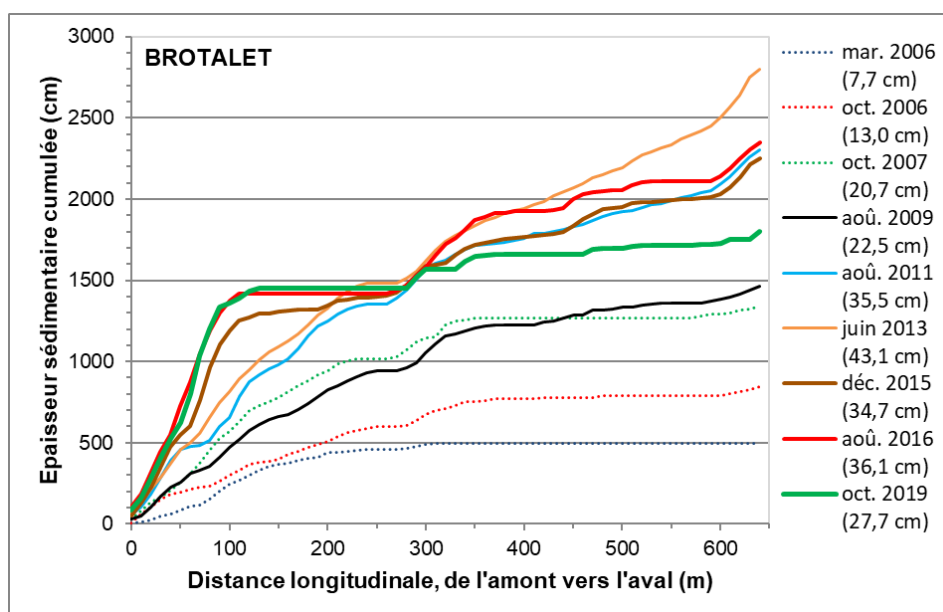


Figure 8 – Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans la lône du Brotalet. N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante.

Après travaux, une végétation aquatique abondante s'est développée dans la lône de Brotalet. Cette caractéristique, associée à une profondeur relativement importante (très souvent supérieure à 1 m), confère à ce milieu une capacité d'accueil importante pour la faune piscicole. Depuis 2004, 20 espèces (ablette, barbeau, Blennie fluviatile, bouvière, brèmes bordelière et commune, brochet, carpe, chevaine, épinoche, gardon, goujon, loche franche, perche commune, perche-soleil, Pseudorasbora parva, rotengle, tanche, vairon, vandoise) ont été échantillonnées dans cette lône (en moyenne 9

espèces chaque année). Les espèces les plus fréquemment échantillonnées sont le chevaine, le goujon, la tanche, le vairon et le brochet.

Potentiel d'évolution du site : pistes

Les vitesses d'écoulement sont déjà très élevées dans le chenal et les simulations d'augmentation de débit, comme sur la plupart des chenaux déjà restaurés, montrent qu'il ne faut pas attendre de gains d'habitat importants pour de nouvelles augmentations raisonnables des débits minimums. En revanche, les observations réalisées depuis 2004 montrent que les crues ont encore un effet morphogène dans le Vieux-Rhône de Chautagne (e.g. site des « bancs latéraux », méandre de la Malourdie). La création de nouveaux bras courants (ex: étude hydraulique du potentiel d'épis obliques – déflecteurs), pourrait apporter des capacités d'accueil nouvelles pour certaines espèces, notamment pour les jeunes poissons (les lônes actuelles ne jouent pas ce rôle) et les invertébrés rhéophiles potentiellement présents. L'absence de connectivité longitudinale et de connexion avec des affluents est un frein notable à la recolonisation de ce secteur par des géniteurs de hotu et de vandoise. Un rétablissement des connexions avec les autres secteurs du Haut-Rhône serait probablement très bénéfique.

Références :

- AFNOR, 1992, 2004, Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), *Association française de normalisation*, Norme homologuée T 90-350.
- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- Dessaix, J., & Fruget, J. F. (2014) Evolution sur le long terme des peuplements de Crustacés du Rhône. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 4(1), 43-49.
- MacNeil, C., & Platvoet, D. (2005) The predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* on native *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda); influences of differential microdistribution and food resources. *Journal of Zoology*, 267(1): 31-38.

Secteur de Belley

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 17.2 km de long dont ~12 courants, comportant 3 seuils (Fournier PK 129, Lucey PK 125.275, Yenne PK 117.900), alimentée par le barrage de Lavours et le Canal de Savières (connexion avec le Lac du Bourget) et recevant le Sérán (Figure 1).

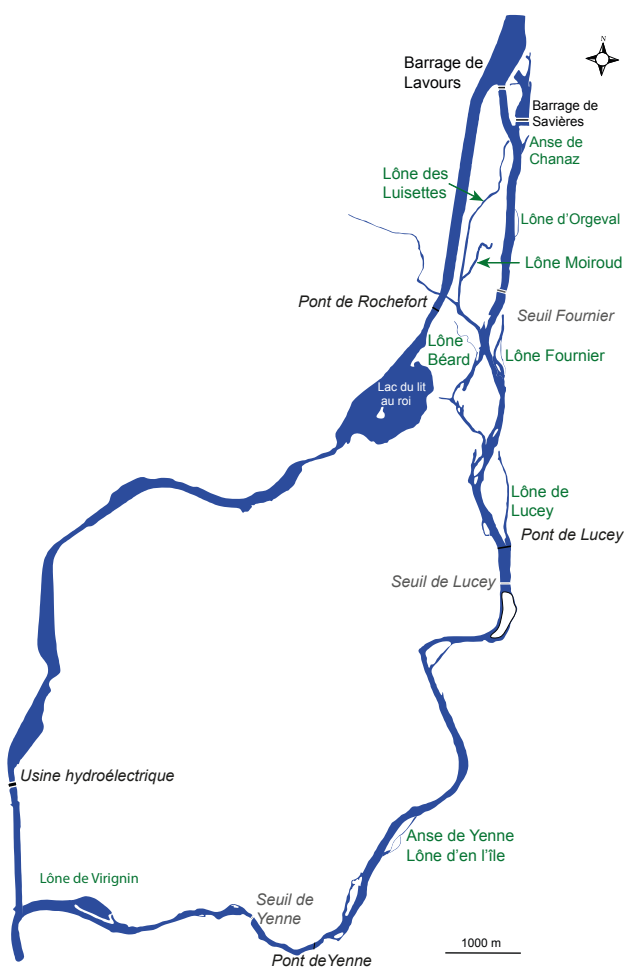


Figure 1 – Secteur de Belley

La restauration

Second secteur restauré du Haut-Rhône, les opérations de restauration se sont déroulées en 2005.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2005 (m ³ .s ⁻¹)	25		28			20			28		25	
<i>Vitesse (m.s⁻¹)</i>	0,25											
Débit minimum >2005 (m ³ .s ⁻¹)	60		90	100	90	80			60			
<i>Vitesse (m.s⁻¹)</i>	0,44											

Neuf lônes ont été réhabilitées : l'Anse de Chanaz, la lône des Luisettes, la lône Moiroud, la lône Béard, la lône d'Orgeval, la lône Fournier, la lône de Lucey, l'Anse de Yenne (ou lône d'En l'Île), la lône de Virignin. L'objectif général à l'échelle du secteur était d'augmenter la diversité d'habitats au sein de la plaine alluviale en recréant différents types d'annexes fluviales. Le projet consistait à augmenter la surface en eau et à reconnecter les annexes au chenal courant, soit par les extrémités amont et aval, soit par l'aval uniquement. Pour certaines, le creusement du lit avait pour objectif d'augmenter l'alimentation par la nappe alluviale (Luisettes amont, Béard, Fournier). Pour d'autres, il s'agissait de recréer des chenaux secondaires plus ou moins courants (Lucey, Anse de Yenne). Dans l'ensemble, la suppression des bouchons alluviaux, l'amélioration des modalités de connexion au Vieux-Rhône et le re-creusement, par terrassement ou dragages, a pour but général d'augmenter les capacités d'accueil pour le frai des poissons (notamment brochet) et des amphibiens, et de fournir des refuges aux organismes en période de crue.

Ce tronçon court-circuité est relativement long et possède encore, après la mise en service de l'aménagement hydroélectrique, une diversité de bras secondaires et d'habitats aquatiques relativement forte malgré un taux d'endiguement assez important. Il communique avec le Lac du Bourget *via* le Canal de Savières et reçoit le Séran. Secteur tressé typique avant l'aménagement dans sa partie amont et encaissé dans les gorges dans sa partie aval, ce secteur abritait bon nombre des espèces de poissons du Rhône dont l'ombre commun et l'apron et les grands migrateurs (alose, lamproie marine et anguille) y étaient signalés (Léger, 1943).

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

Avant augmentation des débits réservés, le Vieux-Rhône de Belley présentait déjà une diversité d'habitats importante et abritait la plupart des espèces de poissons du Haut-Rhône. Les espèces typiques étaient bien représentées (cyprinidés rhéophiles, truite fario, ombre commun, lote, blennie fluviatile...) et trouvaient dans ce secteur les habitats nécessaires à l'accomplissement de leur cycle vital. Par ailleurs, les changements hydrauliques observés à Belley sont plus faibles que ceux observés dans les vieux-Rhône de Chautagne ou de Pierre-Bénite. En conséquence, la modification des débits réservés en juillet 2005 n'a pas induit de changements majeurs dans la structure du peuplement en place. La proportion des individus appartenant à la guildes des espèces d'eau courante est restée proche de la valeur pré-augmentation de débit réservé (Figure 2). Depuis juillet 2005, 33 espèces de poissons ont été échantillonnées dans ce vieux-Rhône (entre 21 et 28 espèces suivant les années). Le chevaine (abondance relative moyenne = 25%) et le barbeau fluviatile (ab. rel. moy. = 21%) sont les 2 espèces les plus abondantes. Le gardon et le goujon sont également relativement abondants (11%) ainsi que la vandoise (6%) et l'ablette (5%). Les populations de truite fario et d'ombre commun sont régulièrement échantillonnées avec des individus de toutes tailles, ce qui témoigne d'une reproduction *in situ* encore efficace dans ce tronçon du fleuve, même si des déversements de poissons issus de pisciculture sont réalisés régulièrement. La contribution moyenne (2005-2019) des différentes espèces d'eau courante est la suivante : barbeau fluviatile 62%, vandoise 16%, ablette 14%, hotu 5% et ombre commun 3%. L'ensemble des classes de tailles ont été régulièrement échantillonnées pour ces espèces. La présence régulière de ces espèces dans les échantillonnages annuels ainsi que le fait que des poissons appartenant à différentes classes d'âge sont présents témoignent de la diversité des conditions d'habitat nécessaire à l'accomplissement du cycle de vie de ces espèces fluviales. L'augmentation des proportions des poissons d'espèces d'eau courante en 2017 et 2018 pourrait être interprétée comme une réponse à moyen terme à la modification des valeurs de débit réservé mais la confirmation de cette éventuelle tendance devra être évaluée dans les années futures.

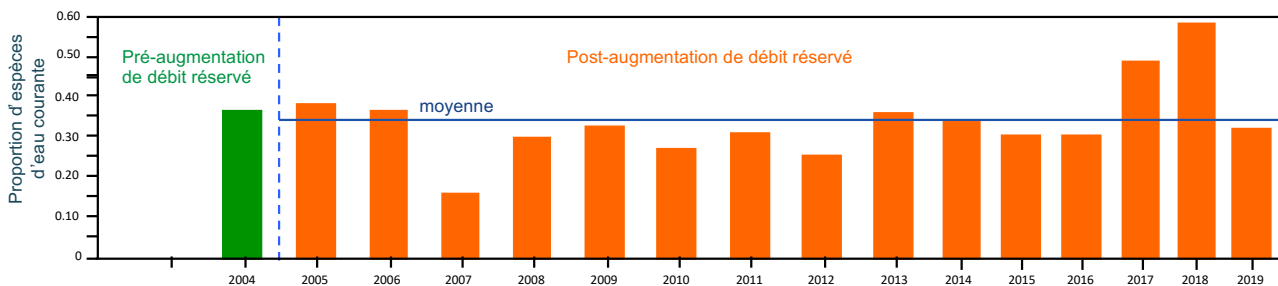


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Belley sur la période 2004-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). La ligne horizontale représente la valeur de la moyenne sur la période post-restauration.

Comme pour les poissons, le peuplement de macroinvertébrés bénéficiait, avant restauration, de la diversité d'habitats initialement présente sur ce secteur. La communauté était dominée par des taxons tolérants une large gamme de conditions hydrauliques (*Gammarus fossarum*, *Gammarus pulex*, *Serratella ignita*, ...) ou bien par des taxons rhéophiles (*Orthocladiinae*, *Baetis fuscatus*, ...) ou encore typiques des grands cours d'eau de plaine (*Potamanthus luteus*). Cependant, la proportion de taxons rhéophiles a augmenté significativement suite au rehaussement des débits réservés (+ 105 %, Figure 3). Cette augmentation concerne essentiellement les Ephemères *Heptagenia* (juvéniles), *Potamanthus luteus*, certaines espèces de Trichoptères comme *Hydropsyche siltalai* ou encore les Diptères Simuliidae. Comme observé dans le secteur de Chautagne, l'augmentation de la proportion de certains taxons semble directement liée à l'augmentation du débit réservé. C'est par exemple le cas des filtreurs passifs (*Hydropsyche* juvéniles, Simuliidae) car leur mode d'alimentation est fortement dépendant des conditions hydrologiques (flux de MES dans la colonne d'eau). De plus, certaines espèces indicatrices d'une bonne qualité physico-chimique de l'eau (n°1 au classement IBGN, AFNOR, 1992, 2004) et qui avaient disparues du secteur (*Nemoura* spp., *Amphinemura* spp., *Protonemura* spp., *Rhithrogena semicolorata*) ont été à nouveau échantillonnées après restauration des débits. Parallèlement, les proportions de taxons limnophiles, initialement peu représentés, ont continué de décroître. Comme dans le vieux-Rhône de Chautagne, la proportion des taxons appartenant à la guildes des rhéophiles a augmenté au cours de la période 2008-2012 (+125 %) et une légère baisse de la proportion de cette guildes a été observée au cours de la période 2013-2016 (Figure 3).

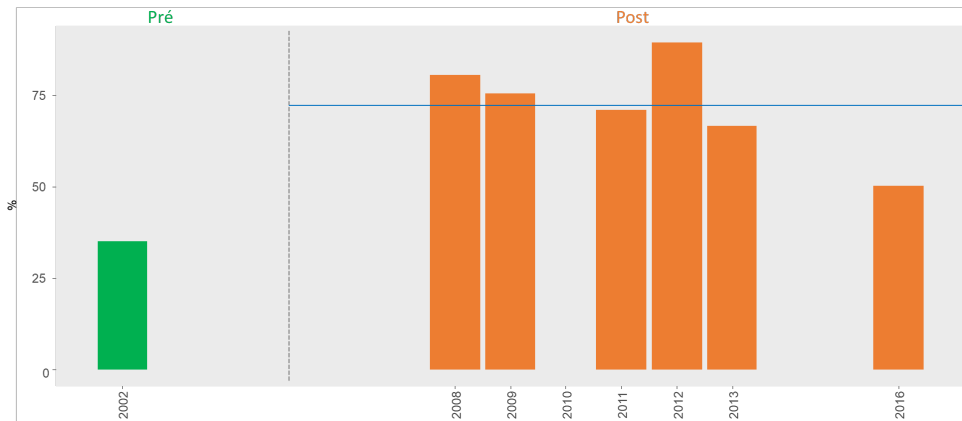


Figure 3 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles. La ligne pointillée verticale marque la date de modification du débit réservé

Il existe toutefois une hétérogénéité des réponses des taxons par rapport aux prédictions des modèles. En effet, contrairement aux attentes, les effectifs de certains taxons ont peu varié (ex : *Heptagenia sulphurea* ou *Hydropsyche incognita*) ou même décré (ex : *Leuctra* spp. ou *Esolus* spp.) suite à l'augmentation du débit réservé, suggérant l'influence marquée d'autres paramètres environnementaux (qualité du substrat, thermie, compétition inter/intra spécifique, ...). L'arrivée après restauration de taxons exogènes peut également en partie expliquer ce phénomène. En effet, 6 nouveaux taxons exogènes plus ou moins envahissants ont été collectés après 2005 et peuvent potentiellement atténuer les effets des opérations de restauration. Parmi ces taxons, l'espèce de crustacé *Dikerogammarus villosus* est la plus susceptible de perturber la communauté en place (Bollache *et al.*, 2004 ; MacNeil & Platvoet, 2005 ; Dessaix & Fruget, 2014). Contrairement à ce qui est observé dans le vieux-Rhône de Chautagne, où les populations de *Gammarus* se sont effondrées suite à l'arrivée de *Dikerogammarus villosus*, celles du vieux-Rhône de Belley, malgré une diminution importante, semblent mieux résister, notamment l'espèce *Gammarus fossarum* (Figure 4).

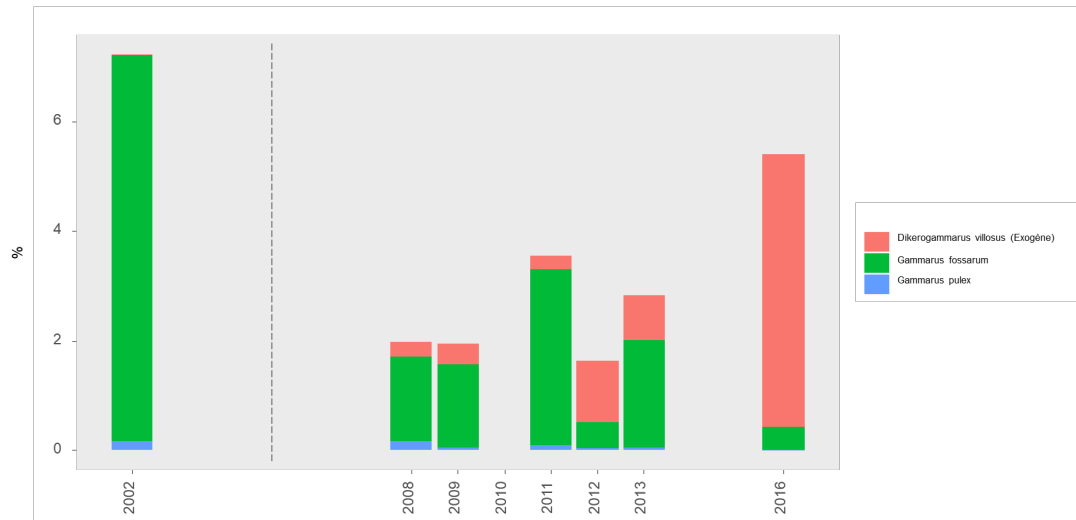


Figure 4 - Abondance moyenne annuelle des 3 espèces de crustacés Gammaridae (*Gammarus fossarum*, *G. pulex* et *Dikerogammarus villosus*).

Réhabilitation des lônes

Parmi les lônes réhabilitées, le suivi scientifique ne concerne pas l'Anse de Chanaz, la lône d'Orgeval et la lône de Virignin.

A l'échelle du secteur, le fonctionnement hydrodynamique des bras suivis est varié. Cette diversité se retrouve dans les patrons granulométriques longitudinaux de surface des bras, leur vitesse de comblement par les fines et de fait leur durée de vie potentielle en tant qu'habitats aquatiques. Les bras enregistrant continuellement (Lucey, En l'Île) ou fréquemment (Luisettes amont, Fournier) des écoulements vifs possèdent des fonds composés essentiellement d'alluvions grossières, régulièrement décapés par les crues. Ces écoulements sont, à priori, suffisamment puissants pour assurer l'auto-entretien de ces bras sur le long terme (durée de vie > 100 ans). Toutefois, on notera qu'au cours des dernières années la lône de Lucey présente des accumulations de fines non négligeables, localisées sur un linéaire d'environ 200 mètres en amont du passage à gué busé (épaisseur moyenne de 24,5 cm en 2016 ; cf. Figure 6). La capacité du bras à évacuer ces dépôts est à surveiller. D'autre part, depuis leur restauration, les lônes de Fournier et d'En l'Île enregistrent une diminution des hauteurs d'eau mesurées qui est indépendante du comblement par les sédiments fins (déclin de la hauteur d'eau médiane rapportée à un débit de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de 39 cm pour En l'île et de 31 cm pour Fournier sur la période 2006-2016 ; Figure 5). Sur les deux bras, cet abaissement n'est pas continu : un fort déclin est observé à la suite de la restauration, suivi d'une phase de stagnation (~2008-2011), avant de repartir à la baisse de manière moins prononcée. On notera qu'il a récemment été observé (octobre 2018) que l'extrémité amont de l'anse de Yenne est désormais déconnectée du vieux-Rhône pour la valeur minimale du débit réservé, soit $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui renvoie à un débit réservé observé 6 mois/an hors déversement dans le vieux-Rhône. Pour rappel, à l'heure actuelle, les estimations de pérennité

potentielle des bras reposent uniquement sur une modélisation tendancielle de l'accumulation de fines. Les résultats présentés dans la figure 5 démontrent qu'il est à présent primordial de mener des investigations supplémentaires pour déterminer si les atterrissements observés sur ces bras vifs (e.g. En l'île, Fournier) sont consécutifs à un remplissage par la charge de fond, à un abaissement de la ligne d'eau induit par la poursuite de l'enfoncement du lit mineur du Rhône (voire suite à un élargissement des bras) ou à la combinaison de ces différents facteurs.

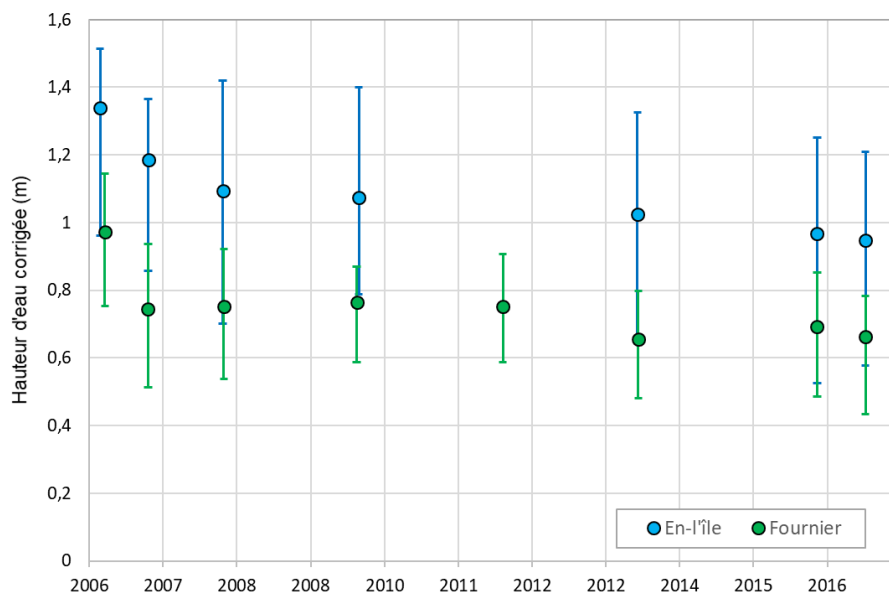


Figure 5 – Evolution des hauteurs d'eau corrigées post-restauration dans les lônes d'En-l'île et de Fournier. Seules les campagnes directement exploitables sont retenues. Les hauteurs d'eau sont ramenées à un débit de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vieux-Rhône. Les points représentent les valeurs médianes et les barres permettent de visualiser les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles.

Les autres bras (Moiroud, Béard) présentent une sensibilité marquée au comblement par les fines. La granulométrie des dépôts et les vitesses de comblement sont fonction de la fréquence et de l'intensité des crues en fonctionnement lotique et des retours d'eau. Ces bras présentent des dépôts essentiellement limoneux et localement sableux (dans les deux cas, les stations aux extrémités amont des bras). L'analyse de l'évolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine pour ces deux lônes pointe clairement la prédominance des processus de retour d'eau : l'essentiel du remplissage sédimentaire est observé sur l'aval des sites et décroît à mesure que l'on s'approche de l'amont (Figure 6). Depuis le début du suivi, un seul épisode de décapage significatif des dépôts de fines, permettant de rajeunir épisodiquement les bras, a été observé sur Moiroud et Béard (Figure 6 ; d'octobre 2006 à octobre 2007, à la suite de trois événements supérieurs à la crue biennale). Ces pulsations hydrologiques restent trop rares et brèves (Béard, qui enregistre des écoulements puissants une fois connectée par l'amont) ou pas assez puissantes (Moiroud) pour assurer jusqu'à présent leur auto-entretien. Au regard de l'ensemble des bras restaurés suivis, ces bras possèdent des durées de

vie « intermédiaires », allant d'environ 40 à 85 années pour Moiroud et de 35 à 90 années pour Béard, selon les scénarios considérés. Enfin, de manière inattendue, ces deux bras présentent un surcroît de sédimentation fine à la suite des opérations de gestion sédimentaire de la retenue de Verbois de 2012 et de l'APAVÉR de 2016. L'excès de sédimentation estimé tend à être moindre lors de l'APAVÉR de 2016 que lors des opérations de 2012 (Moiroud : ~ +10 cm en moyenne en 2012 et ~ +5 cm en 2016 ; Béard : ~ +4 cm en moyenne en 2012 et en 2016). La connexion aval des eaux superficielles de la lône Béard avec celle du Sérán est très limitée. Les niveaux d'eau dans ce bras sont influencés par le vieux-Rhône et le Sérán. Des épisodes de déconnexion sont susceptibles de se produire en période estivale (notamment août-septembre, lorsque le Sérán est à l'étiage).

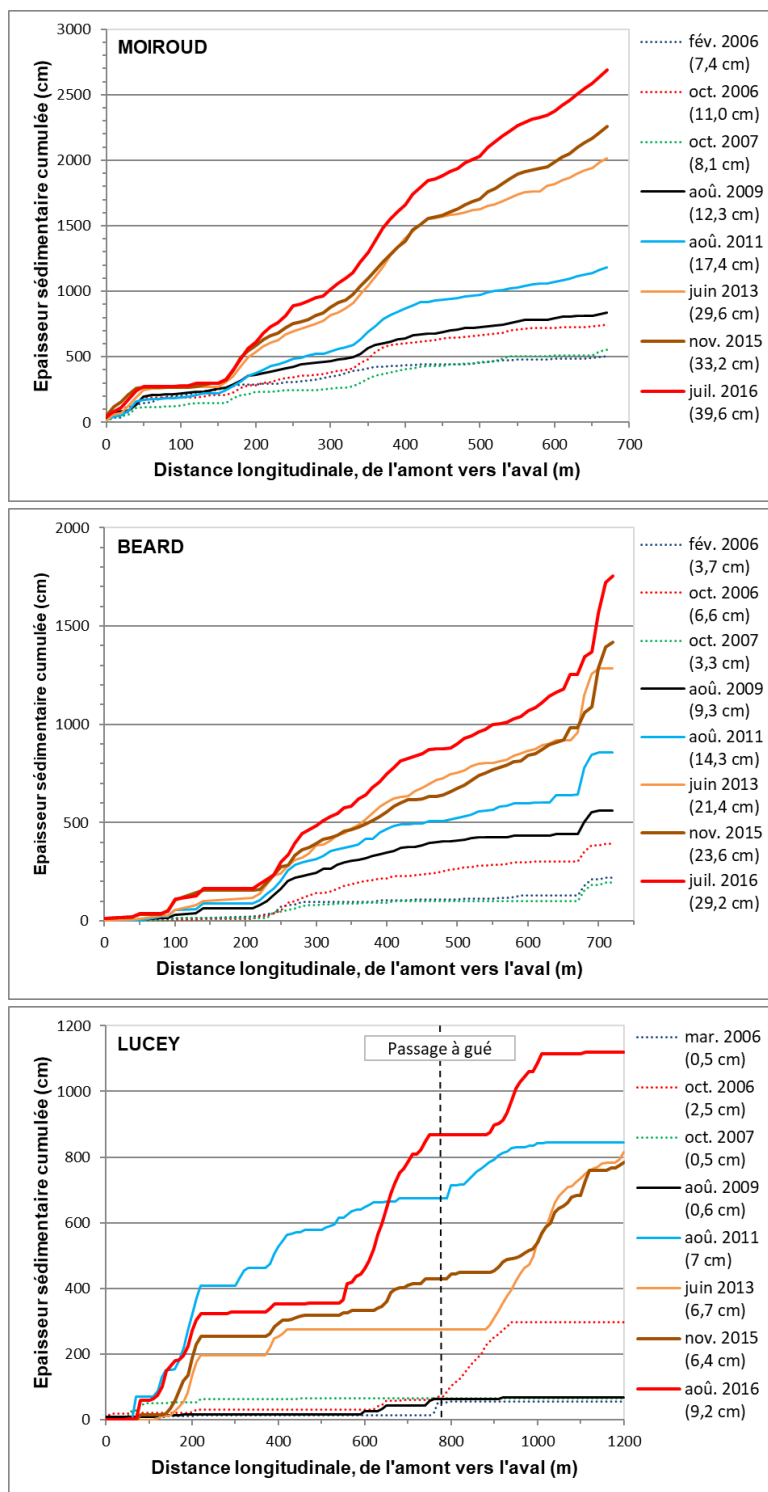


Figure 6 - Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans les bras présentant une sensibilité avérée à ce type d'alluvionnement sur le secteur de Belley : îlons de Lucey, de Moiroud et de Béard.

N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante.

L'analyse des peuplements (macroinvertébrés et poissons) met en évidence une diversité de types de fonctionnement à la fois en relation avec l'importance (relative) de l'alimentation phréatique et du degré de connectivité avec le Vieux-Rhône.

Les lônes suivies à Belley sont remarquables par leur niveau de richesse pour les insectes EPT (Éphéméroptères, Plécoptères et Trichoptères) et pour les mollusques gastéropodes. Les lônes Fournier, Luisettes, Lucey et En l'Île sont les plus riches en insectes EPT des 39 lônes du Rhône étudiées depuis 2003. Ce constat est stable sur l'ensemble du suivi. Localement (Lucey), cette richesse est même en hausse relativement régulière depuis 2003. Cette forte richesse en insectes EPT est associée à des richesses moyennes à fortes pour les mollusques gastéropodes. C'est dans les lônes Béard et Moiroud qu'ont été enregistrées les plus fortes richesses pour ce groupe, dans l'ensemble du référentiel étudié. A Béard, cette richesse est également en hausse tendancielle sur la durée du suivi. Même dans les lônes les plus actives, la restauration de la connectivité n'a pas fait chuter la richesse de ce groupe. La prégnance des espèces exogènes demeure faible, même si leur proportion tend à augmenter dans les lônes les plus connectées lors des dernières années du suivi (Lucey, En l'Île, Chantermerle) (Figure 7).

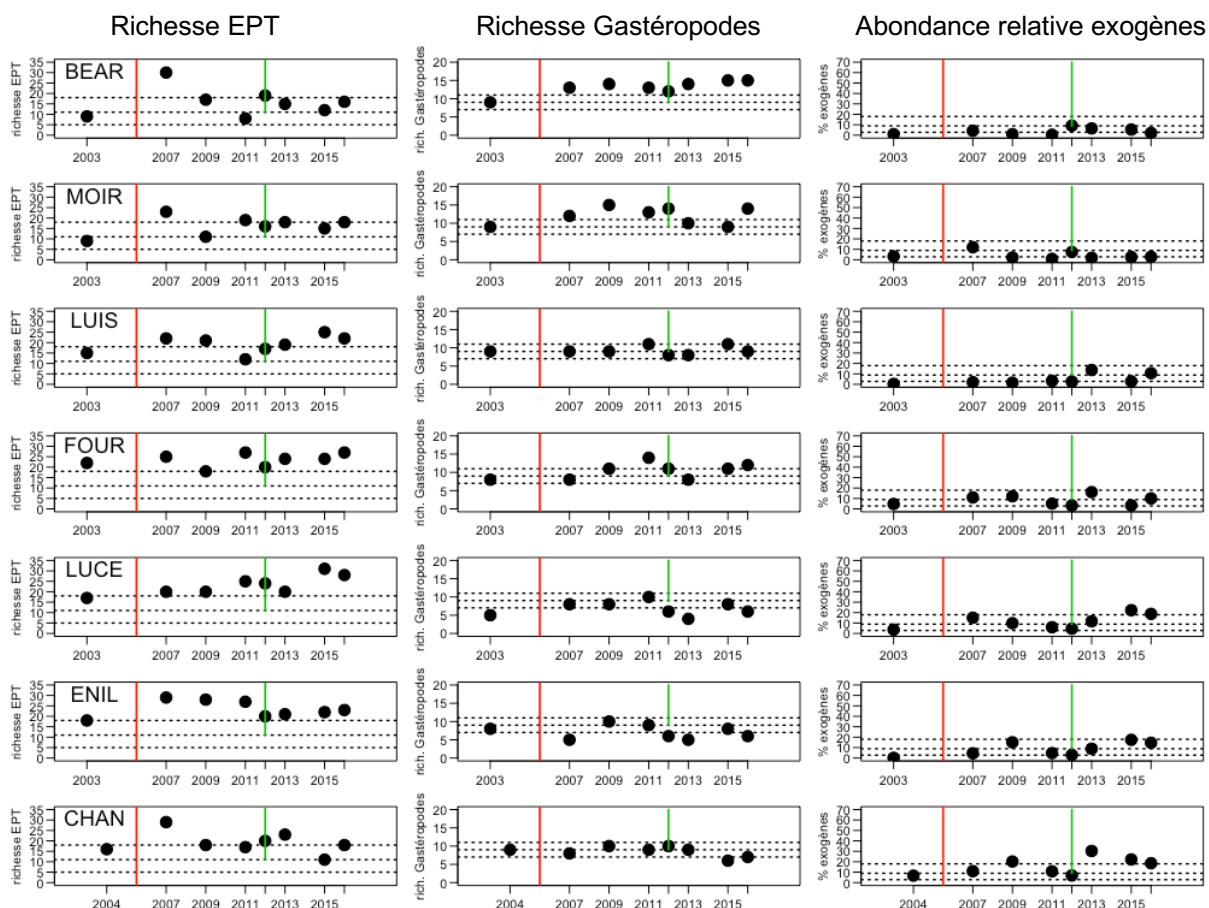


Figure 7 - Changements temporels de trois métriques faunistiques dans les 7 lônes suivies à Belley de 2003 à 2016. La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, la ligne verte l'épisode APAVER 2012. Les lignes horizontales tirées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 lônes étudiées de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

La restauration n'a pas homogénéisé la gamme de communautés d'invertébrés aquatiques des lônes. Bien au contraire, la variété des types de restauration et de conditions locales a conduit à un panel actuel de situations diversifiées. Cette diversification est mesurable autant à l'échelle des lônes, que du secteur entier. A Béard, par exemple, les trois sites étudiés montrent des trajectoires divergentes dans leurs changements faunistiques. Ainsi, à la fin du suivi, la lône peut être considérée comme ayant une diversité faunistique accrue le long de son linéaire. Au niveau du secteur, la diversité faunistique entre lônes restaurées s'est de la même façon accrue progressivement au cours des 10 années de suivi (Figure 8).

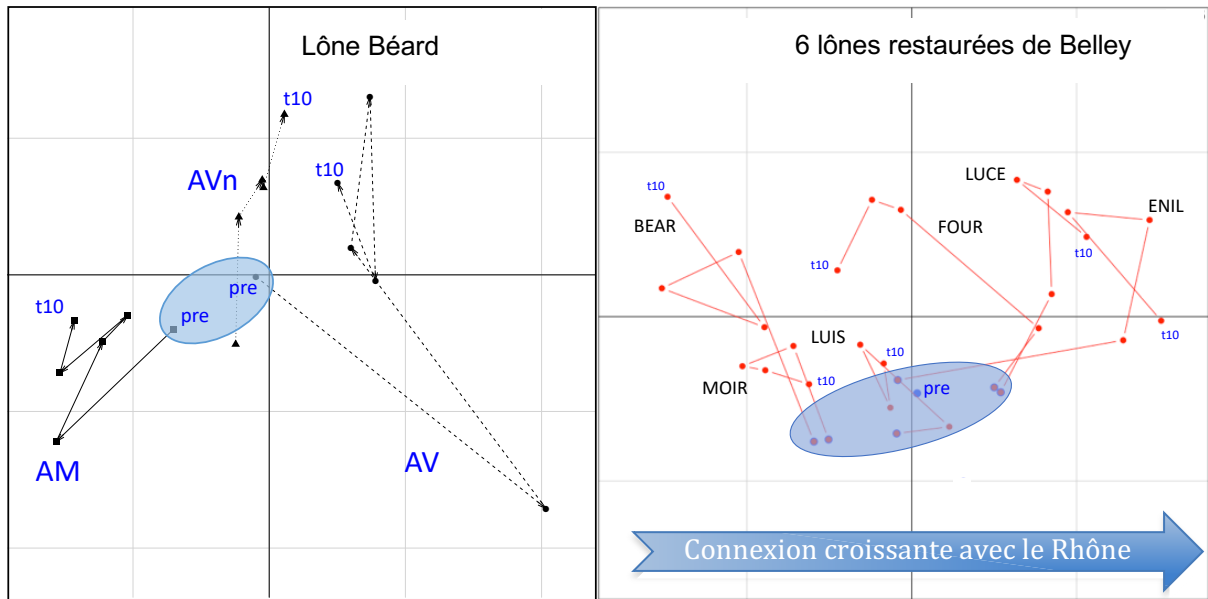


Figure 8 - Trajectoires temporelles des changements faunistiques post-restoration à Belley: à gauche à l'échelle d'une lône (trois stations AM, AVn et AV de la lône Béard), à droite à l'échelle du secteur (six lônes restaurées). Dans les deux images, la distance entre points (stations ou lônes) exprime la différence de leur composition en macroinvertébrés. Aux deux échelles spatiales, la composition des communautés dans chaque site s'éloigne au cours du temps des conditions initiales, traduisant une diversification des conditions d'habitat après la restauration. Les ellipses bleues matérialisent la diversité des communautés pré-restoration. pre : 2003-04, t10 : 2015.

Si l'impact de l'événement APAVER de 2012 demeure faible à l'examen des métriques de richesse, il convient de souligner la disparition du gastéropode *Theodoxus fluviatilis*. L'espèce avait atteint des densités moyennes remarquables (supérieures à 150 ind./0.25m² à Lucey) qui peuvent être interprétées comme un succès certain de la restauration des chenaux latéraux lotiques (Lucey, En l'Île). Après le printemps 2012, l'espèce disparaît totalement des échantillonnages postérieurs et n'a pas été retrouvée par la suite (Figure 9).

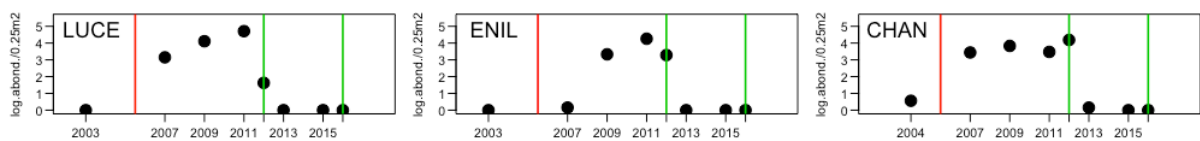


Figure 9 - Changements temporels du logarithme de l'abondance moyenne du gastéropode *Theodoxus fluviatilis* dans les 3 lônes suivies à Belley de 2003 à 2016 où il était présent. La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, les lignes vertes les épisodes des chasses de 2012 et APAVER 2016. 1 \approx 2 individus; 2 \approx 6 ind.; 3 \approx 19 ind.; 4 \approx 54 ind.; 5 \approx 148 ind./ 0.25m².

Concernant les poissons, les lônes connectées par l'aval au Vieux-Rhône, ne constituent pas, à Belley, des sites privilégiés pour la reproduction et le grossissement des juvéniles des espèces du Vieux-Rhône, soit parce qu'elles sont partiellement alimentées par des eaux phréatiques froides (Luisettes, Béard, Fournier) soit parce que l'accès est difficile (Moiroud, Luisettes). La recolonisation

post-réhabilitation de la lône Moiroud par les espèces caractéristiques de ce type de milieu (bouvière, rotengle, tanche) a été relativement lente et a été observée depuis 2012. La reconnexion amont et aval de l'Anse Yenne a permis la recolonisation du bras par les espèces du fleuve, notamment le chevaine, le goujon, le vairon, la vandoise, le barbeau fluviatile et l'ablette et des espèces typiquement inféodées aux milieux courants comme la truite et le chabot mais aussi des espèces limnophiles comme la bouvière, la tanche, l'épinoche et le rotengle. La réduction progressive de la connectivité de la lône avec le chenal principal a probablement limité la fonction de nurserie qui pourrait être inféodée à cette annexe fluviale. Les résultats des échantillonnages les plus récents reflètent sans doute plus l'intensité du piégeage des poissons au sein de la lône au gré des événements hydrologiques que la fonctionnalité des habitats pour les différentes écophases des espèces rencontrées.

Potentiel d'évolution du site : pistes

Le régime de débits réservés du site peut être considéré comme satisfaisant compte-tenu de la qualité des habitats aquatiques du Vieux-Rhône, reflétée par la biodiversité du secteur (34 espèces de poissons échantillonnées dans cette plaine alluviale). Les indicateurs utilisés pour mesurer les effets des modifications de débits sur les peuplements de macroinvertébrés et de poissons montrent une tendance d'évolution dans le sens des attentes pour les macroinvertébrés et une situation plus stable en ce qui concerne le peuplement de poissons. Les données acquises sur les lônes restaurées montrent que la réhabilitation des annexes lenticues (non connectées en permanence à l'amont) a concerné des milieux essentiellement mésotrophes à méso-eutrophes, en général peu utilisés par les poissons. Une réflexion pourrait être menée pour réhabiliter des annexes avec des caractéristiques physico-chimiques différentes (moins d'alimentation phréatique, température estivale plus élevée...) et mieux connectées par l'aval au Vieux-Rhône. Certains sites peu connectés et à évolution sédimentaire rapide (Béard aval) représentent des « hot-spot » de diversité concernant les végétaux et les invertébrés, une réflexion sur leur pérennité devra être menée (nouveau curage, création de sites similaires dans d'autres bras ?).

Le comportement des espèces exogènes et d'espèces emblématiques (*Theodoxus fluviatilis*), l'interaction avec les phénomènes d'abaissement des retenues et le réchauffement militent pour la poursuite du suivi de certaines lônes du secteur qui offrent la plus longue série temporelle de données faunistiques pour des milieux alluviaux du Rhône français.

Potentiel d'évolution du site : pistes

L'aménagement de ce secteur tressé a conduit progressivement à la disparition de la plupart des chenaux secondaires courants peu profonds, propices aux classes d'âges intermédiaires de plusieurs espèces de poissons rhéophiles. La réhabilitation de tels bras, sans augmentation de débit supplémentaire, pourrait également être une piste de restauration de l'habitat aquatique. Cette démarche pourrait être conduite dans le cadre de la réflexion sur le démantèlement potentiel des digues en rive droite entre le seuil Fournier et le seuil de Lucey, cela favoriserait la remise en mouvement des sédiments, la création d'un chenal à bras multiples au niveau du confluent Rhône-Séran, et un meilleur transit sédimentaire.

Une réflexion pourrait être menée sur une éventuelle amélioration de la qualité des habitats entraînée par une modification des caractéristiques des seuils artificiels du chenal non équipés à ce jour.

Références :

- AFNOR, 1992, 2004, Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), *Association française de normalisation*, Norme homologuée T 90-350.
- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- Dessaix, J., & Fruget, J. F. (2014) Evolution sur le long terme des peuplements de Crustacés du Rhône. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 4(1), 43-49.
- MacNeil, C., & Platvoet, D. (2005) The predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* on native *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda); influences of differential microdistribution and food resources. *Journal of Zoology*, 267(1): 31-38.

Secteur de Brégnier-Cordon

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 11.4 km de long dont ~8 courants, comportant 1 seuil équipé d'une passe à poissons (seuil des Molottes PK 94.850), alimenté par le barrage de Champagneux et recevant le Guiers (affluent de rive gauche, confluence équipée d'une passe à poissons) (Figure 1).

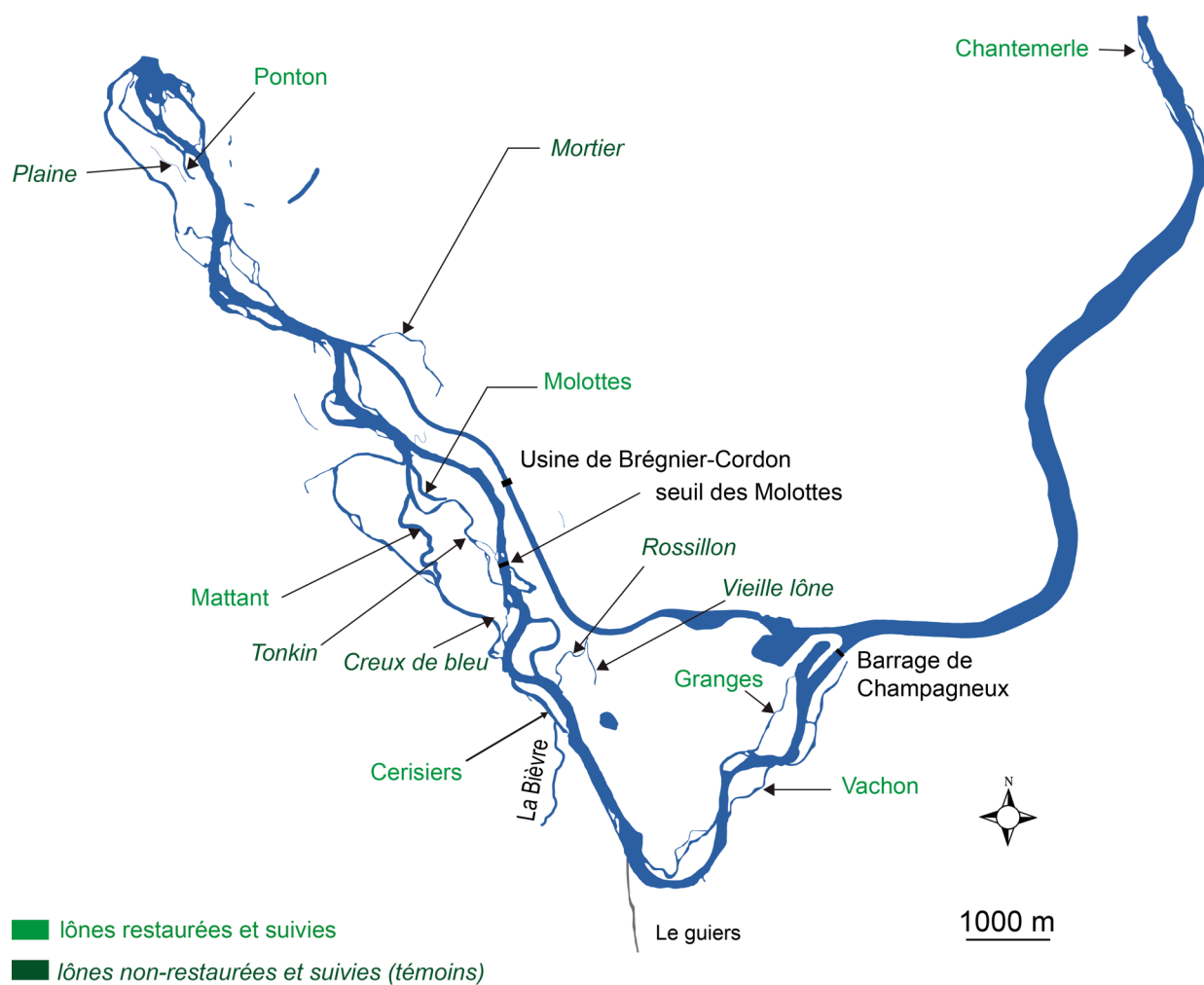


Figure 1 – Secteur de Brégnier-Cordon

La restauration

Troisième secteur restauré du Haut-Rhône, les opérations de restauration se sont déroulées en 2006.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2006 ($m^3.s^{-1}$)	80		100		150			100		80		
<i>Vitesse ($m.s^{-1}$)</i>	0,39											
Débit minimum >2006 ($m^3.s^{-1}$)*	80		100		150			100		80		
<i>Vitesse ($m.s^{-1}$)</i>	0,39											

* à partir de juillet 2006 le débit minimum à l'aval du barrage de Champagneux est passé de 25 $m^3.s^{-1}$ à 65 $m^3.s^{-1}$.

Dès la construction de l'aménagement et l'établissement de son cahier des charges (1984), le caractère exceptionnel de cette plaine alluviale a conduit à la définition de valeurs de débits réservés particulièrement élevées par rapport aux deux aménagements situés en amont. C'est pourquoi les objectifs du programme de restauration n'incluaient pas de modification du régime hydrologique dans le vieux-Rhône, excepté en amont de la confluence avec le Guiers. Neuf lônes ont été réhabilitées en aval du barrage de Champagneux en 2005-2006 : la lône des Granges, la lône du Vachon, la lône des Cerisiers (qui reçoit la Bièvre), la lône Mattant (ou Mathan), la lône des Molottes, la lône de l'Ilon, la lône des Sables, la lône Marquisat et Colonnes, la lône du Ponton. En amont de l'aménagement, l'entrée amont de la lône de Chantemerle (en aval de la restitution de l'aménagement de Belley) a été modifiée pour favoriser l'écoulement depuis le chenal. L'objectif général à l'échelle du site était d'augmenter la diversité d'habitats au sein de la plaine alluviale en recréant différents types d'annexes fluviales et d'améliorer la connexion avec la Bièvre au niveau de la lône des Cerisiers. Dans la plupart des cas, le projet consistait à augmenter la surface en eau et à reconnecter les annexes au chenal courant, soit par les extrémités amont et aval (Vachon, Mattant, Islon), soit par l'aval uniquement.

La suppression des bouchons alluviaux, l'amélioration des modalités de connexion au Vieux-Rhône ou au Rhône et le re-creusement, par terrassement ou dragages, a pour but général 1) d'augmenter la diversité des types d'annexes fluviales et de favoriser leur colonisation par une biodiversité caractéristique de ces milieux : espèces végétales, macroinvertébrés, poissons, amphibiens, 2) de stimuler les processus écologiques au sein des différents bras en fonction de leur degré de connectivité avec le chenal courant, le sous-écoulement et la nature des fonds sédimentaires, et 3) de fournir des refuges aux organismes en période de crue.

Depuis le 4 décembre 2013, le site est intégré dans le périmètre de la réserve naturelle nationale du Haut-Rhône (décret N°2013-1123).

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, la diversité des chenaux et la présence de nombreux affluents accessibles (dont le Guiers était le plus important) permettaient la coexistence d'une ichthyofaune abondante et diversifiée regroupant des espèces aux exigences écologiques variées (truite, cyprinidés d'eaux vives, perche, tanche, brochet, carpe, brèmes, lotte, anguille...). L'endiguement progressif du fleuve, puis l'aménagement hydroélectrique ont induit une forte régression de la diversité et de l'abondance des différents types de chenaux et annexes fluviales ainsi qu'une réduction très forte de la connectivité longitudinale, latérale, et avec les affluents. Il est également probable qu'en plus de ces altérations physiques du système fluvial, la pollution chimique du fleuve ait eu un effet négatif non-négligeable sur la santé des populations aquatiques. Malgré ces aménagements successifs, une certaine diversité de types de chenaux et d'annexes a pu être préservée au sein de l'hydrosystème dans le lit majeur du vieux-Rhône de Brégner-Cordon et le secteur situé entre la confluence du vieux-Rhône et du canal de fuite de l'aménagement et la retenue de Sault-Brénaz.

Après 2006, le suivi de la restauration a permis d'échantillonner 36 espèces de poissons dont les plus abondantes sont le chevaine (31%), le barbeau fluviatile (15%), le goujon (13%), le spirilin (8%) et l'ablette (6%). L'augmentation du débit réservé est très partielle puisqu'elle ne concerne que l'amont du Vieux-Rhône et que les conditions hydrologiques dans ce vieux-Rhône sont peu différentes de celles qui prévalaient avant 2006. Les effets potentiels de cette augmentation de débit réservé sur le peuplement de poissons ne sont donc pas perceptibles (Figure 2). La proportion moyenne (2006-2019) d'espèces d'eau courante est de 24%. Au sein de cette guildes, la contribution des barbeaux fluviatiles est majoritaire (en moyenne 59%), celle des ablettes relativement importante (25%) est celle des autres espèces (vandoises de 9%, hotus de 7% et ombres communs de 0,1%) relativement faible.

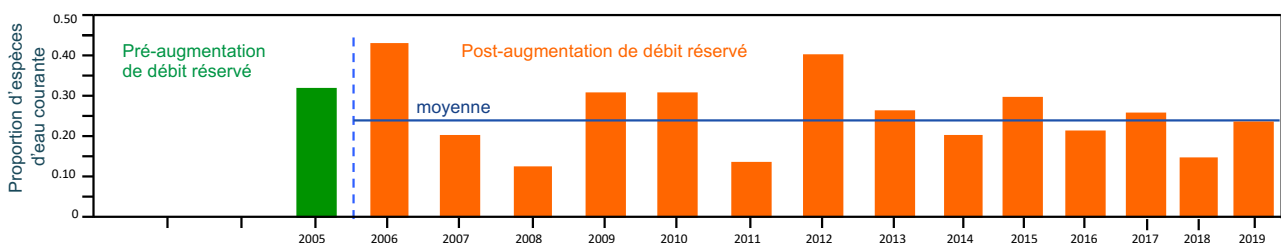


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Brégner-Cordon sur la période 2005-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). La ligne horizontale représente la valeur de la moyenne sur la période post-restoration.

Avant 2006, en raison de la grande diversité des habitats hydrauliques dans le vieux-Rhône, le peuplement de macroinvertébrés était dominé par des taxons tolérant une large gamme de conditions hydrauliques (*Gammarus fossarum*, *Gammarus pulex*, ...) ou par des taxons rhéophiles (Orthoclaadiinae, *Ancylus fluviatilis*, *Esolus spp.*, ...) ou encore typiques des grands cours d'eau de plaine (*Potamanthus luteus*, *Psychomyia pusilla*). La proportion des taxons rhéophiles a augmenté (+258 %, Figure 3) après modification du débit réservé bien que le rehaussement de débit ne concerne que la section du vieux-Rhône en amont de la confluence avec le Guiers. Néanmoins, contrairement aux secteurs de Chautagne et Belley où la proportion d'un nombre important de taxons rhéophiles a considérablement augmenté après la restauration, cette augmentation a essentiellement été portée par les diptères Orthoclaadiinae (+194 %). Même si une légère augmentation de la proportion de certains taxons rhéophiles est observée (*Hydropsyche* juvéniles, *Baetis fuscatus*, *Baetis* juvéniles, Orthoclaadiinae, Simuliidae, *Theodoxus fluviatilis*), elle est beaucoup plus faible que dans les secteurs de Chautagne et Belley où l'augmentation de débit réservé a été plus importante.

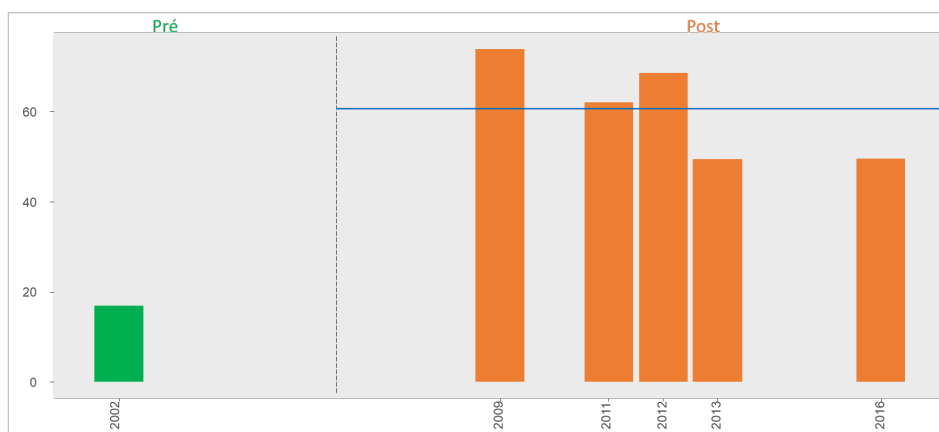


Figure 3 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep)

Par ailleurs, l'augmentation de la proportion des éphémères *Potamanthus luteus* et *Heptagenia sulphurea* (Figure 4), espèces emblématiques des grands cours d'eau, est plus marquée dans la station située en amont de la confluence avec le Guiers.

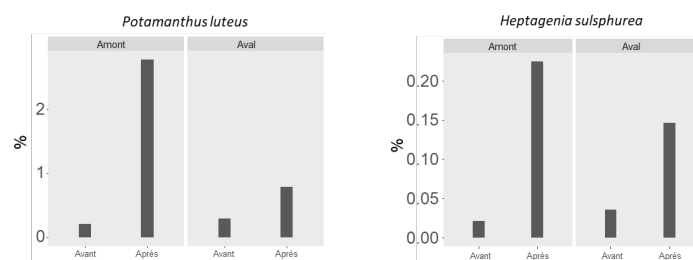


Figure 4 - Comparaison des proportions avant-après restauration

Contrairement au secteur de Chautagne, où les populations de *Gammarus* se sont effondrées suite à l'arrivée dans ce secteur de *Dikerogammarus villosus*, les populations du secteur de Brégnier-Cordon, notamment celle de *Gammarus fossarum*, semblent mieux résister malgré une diminution importante (Figure 5). Il est probable que la taille de la population de *Gammarus* avant l'arrivée de l'exogène soit un facteur déterminant (densité moyenne de 2720 individus.m⁻² dans les vieux-Rhône de Belley et de Brégnier-Cordon et de 560 individus.m⁻² dans le vieux-Rhône de Chautagne).

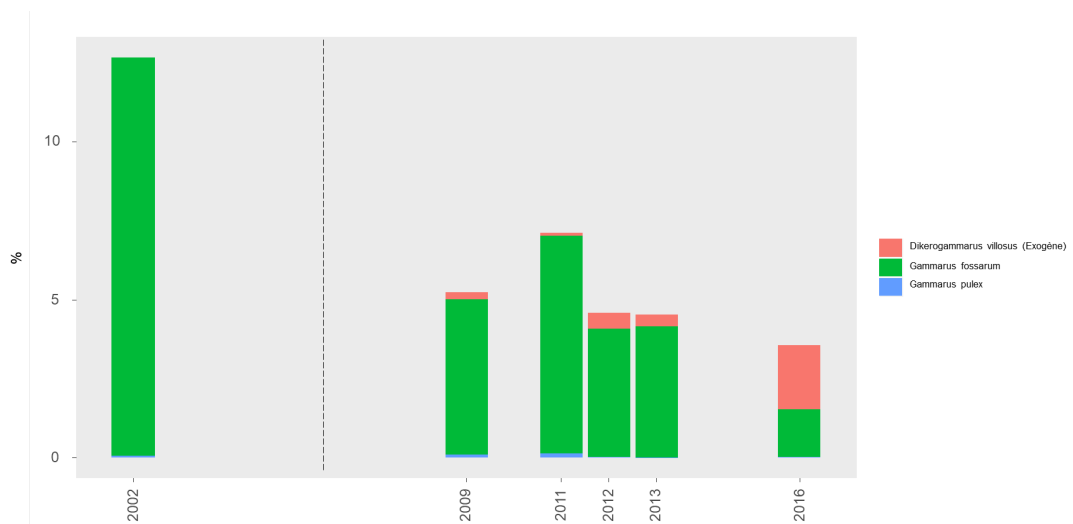


Figure 5 - Abondance moyenne annuelle des Crustacés Gammaridae adultes

Réhabilitation des lônes

Parmi les lônes réhabilitées, le suivi scientifique ne concerne pas la lône de l'Ilon, la lône des Sables et la lône de Marquisat et Colonnes. L'analyse de la dynamique hydrosédimentaire et des peuplements des lônes (macroinvertébrés et poissons) met en évidence une diversité de types de fonctionnement à la fois en relation avec l'importance (relative) de l'alimentation phréatique et du degré de connectivité avec le Vieux-Rhône.

A l'échelle du secteur, le fonctionnement hydrodynamique des bras suivis est varié. Cette diversité se retrouve dans les patrons granulométriques longitudinaux de surface des bras, leur vitesse de comblement par les fines et de fait leur durée de vie potentielle en tant qu'habitats aquatiques. Les bras enregistrant un fonctionnement courant permanent (Vachon, Mathan) possèdent des fonds composés essentiellement d'alluvions grossières, régulièrement décapés par les crues. Ces bras ne sont donc pas concernés par un comblement par les sédiments fins. Toutefois, comme observé sur certains bras de Belley, la lône de Vachon enregistre une diminution des hauteurs d'eau mesurées (déclin de la hauteur d'eau médiane rapportée à un débit de 100 m³.s⁻¹ de 21 cm sur la période 2006-2016 ; Figure 6). Comme évoqué auparavant sur les bras vifs du vieux-Rhône de Belley, à l'heure actuelle, les estimations de pérennité potentielle des bras reposent uniquement sur une modélisation

tendancielle de l'accumulation de fines. Il apparaît donc essentiel de mener des investigations supplémentaires pour déterminer si les atterrissements observés sont consécutifs à un remplissage par la charge de fond, à un abaissement de la ligne d'eau induit par la poursuite de l'enfoncement du lit mineur du Rhône (voire suite à un élargissement des bras) ou à la combinaison de ces différents facteurs.

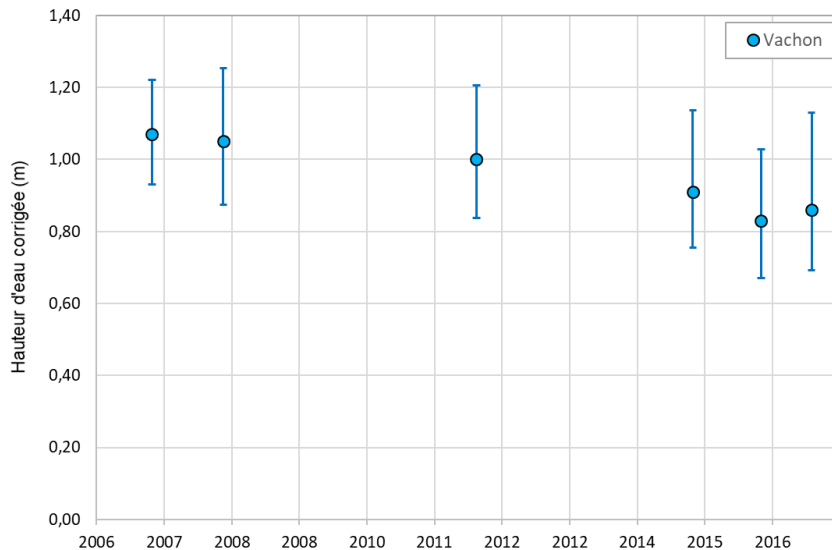


Figure 6 – Evolution des hauteurs d'eau corrigées post-restauration dans la lône de Vachon. Les hauteurs d'eau sont ramenées à un débit de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vieux-Rhône. Seules les campagnes directement exploitables sont retenues. Les points représentent les valeurs médianes et les barres permettent de visualiser les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles.

La lône des Cerisiers, bras vif semi-permanent enregistrant un fonctionnement courant environ 207 jours/an en moyenne sur la période 2006-2016, possède un fonctionnement atypique notamment du fait qu'elle reçoit la Bièvre. La restauration a consisté en un curage localisé, réalisé sur un linéaire d'environ 100 mètres au niveau du confluent lône/Bière. Le reste de la lône n'a pas fait l'objet de travaux. Malgré cette forte connectivité de surface avec le fleuve, l'intensité des écoulements en crue dans la lône reste limitée en comparaison aux autres bras vifs permanents ou semi-permanents suivis sur l'ensemble du corridor Rhodanien. Ainsi, la lône présente une certaine sensibilité au comblement par les fines. Toutefois, à l'instar de la lône du Brotalet (Chautagne), elle présente malgré tout une trajectoire oscillante entre phases de remplissage sédimentaire et événements décapants de faibles amplitudes. La durée de vie du bras, estimée à partir des épaisseurs moyennes, est actuellement évaluée à plus d'un siècle. Néanmoins, la sédimentation fine peut être relativement conséquente localement. Les dépôts se réalisent dans trois secteurs préférentiels (Figure 7) avec, de l'amont vers l'aval : le confluent lône/Bière (linéaire restauré, apports essentiellement sableux non négligeables de la Bièvre), une zone située à 500 m en aval de l'extrémité amont (à la suite immédiate du troisième radier, où la lône tend à se rétracter au cours des dernières années), et l'aval de la lône. Les dépôts sont essentiellement constitués de sables ou de limons grossiers. Une réflexion autour de la

redynamisation de ce bras (renforcement de sa capacité d'auto-entretien), notamment à partir d'une reconfiguration de la connexion amont, est en cours (SHR, CNR, GeoPeka)

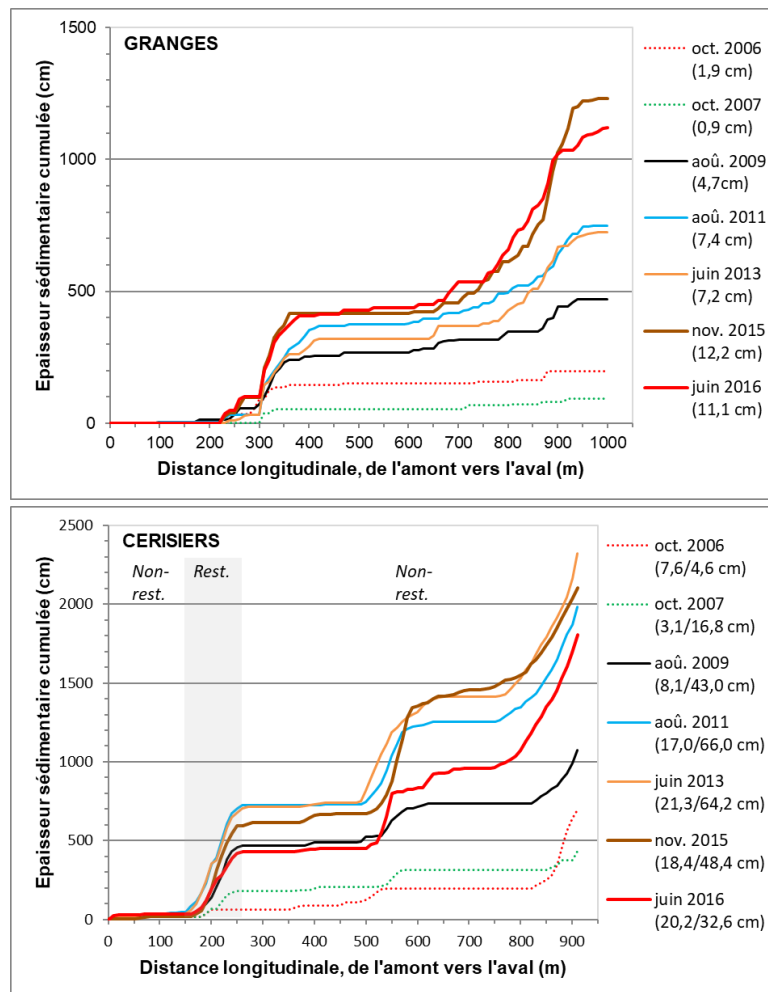


Figure 7 - Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans les bras présentant une sensibilité avérée à ce type d'alluvionnement sur le secteur de Brégner-cordon : lône des Granges et des Cerisiers.

N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante. Pour Cerisiers, les valeurs affichées pour les sections non-restaurées et la section restaurée sont dissociées (non-restaurées/restaurée).

La lône des Granges possède un fonctionnement lotique environ 5,3 jours /an (période 2006-2016). Lors de ces événements, elle enregistre des écoulements relativement puissants qui devraient lui assurer une longue durée de vie (estimée à plus d'un siècle). Le patron longitudinal de sédimentation fine est relativement stable dans le temps (Figure 8). De l'amont vers l'aval, on dénombre : (i) une première zone amont d'environ 300 m avec des fonds composés essentiellement de sédiments grossiers (particules > 2 mm) que le bras semble capable d'auto-entretenir ; (ii) une première zone de dépôt préférentielle très localisée (~80 m linéaire), où l'on retrouve une prédominance des sables et où les processus de décapage semblent pour l'instant limités ; (iii) d'environ 380 m à 650 m depuis l'amont, on observe une zone essentiellement graveleuse que la lône auto-entretient ; puis (iv) sur les 350 derniers mètres aval du bras, on retrouve une zone de dépôt préférentielle de limons, déposés lors

des épisode de reflux, que la lône semble avoir du mal à évacuer ces dernières années malgré l'occurrence d'évènements de crue conséquents (notamment en juin 2016, avec un débit de pointe à $\sim 1250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au Pont de Cordon).

Les lônes de Molottes et du Ponton sont les bras sur lesquels on enregistre les vitesses de comblement les plus élevées. Ces lônes sont très sensibles aux retours d'eau en provenance du Rhône et possèdent des écoulements très peu puissants en face de fonctionnement courant. Ainsi, ces bras fonctionnent essentiellement comme des décanteurs (pièges à sédiments) et disposent d'une capacité de rajeunissement très limitée. Ce fonctionnement hydro-sédimentaire se traduit par des dépôts structurés de manière uniforme et homogène le long du linéaire restauré, relativement court de ces bras. Les dépôts sont essentiellement composés de limons très fins à fins, avec des teneurs en argiles s'échelonnant de 5 à 15% selon les années considérées. Ces deux lônes possèdent les durées de vie estimées les plus courtes, avec des estimations s'échelonnant de 25 à 32 ans pour Molottes et de 25 à 27 ans pour Ponton. On notera que pour ces deux bras, les premiers épisodes de « quasi » déconnexion avale (de 5 à 10 cm de hauteur d'eau) ont été observés *in situ* en 2017 (débit de $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vieux-Rhône au Pont-de-Cordon pour Molottes et $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le Rhône non court-circuité à Lagnieu pour Ponton). Enfin, on notera que ces deux bras présentent une « sur-sédimentation » à la suite des opérations de gestion des sédiments stockés dans la retenue de Verbois de 2012 et de 2016. L'excès de sédimentation estimé est beaucoup plus important lors des opérations de 2012 que lors de l'APAVÉR de 2016. La lône du Ponton, localisée sur le Rhône non court-circuité, est beaucoup plus sensible à ces évènements que la lône des Molottes (Ponton : $\sim +20$ cm en moyenne en 2012 et $\sim +7$ cm en 2016 ; Molottes : $\sim +3$ cm en moyenne en 2012 et $\sim +1$ cm en 2016).

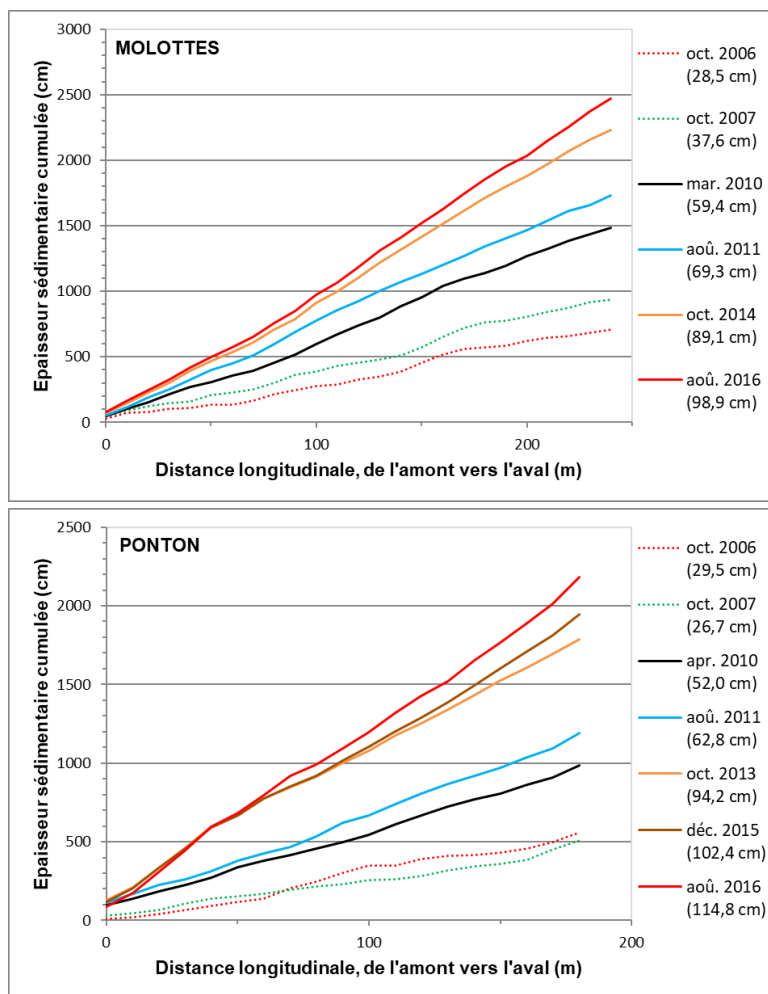


Figure 8 - Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans les bras présentant une sensibilité avérée à ce type d'alluvionnement sur le secteur de Brégnier-Cordon : lônes des Molottes et du Ponton.
 N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante.

En ce qui concerne les peuplements de macroinvertébrés, le secteur de Brégnier-Cordon (12 lônes suivies) présente la particularité d'avoir permis le suivi des communautés de macroinvertébrés benthiques de 7 lônes « témoins » non restaurées en parallèle à 5 lônes restaurées. Comme à Belley, la diversité des modes de restauration a conduit à une diversification notable des communautés entre ces cinq lônes. Les deux lônes totalement reconnectées (Mathan, Vachon) ont évolué vers des communautés potamiques typiques, alors que les trois lônes curées ou reconnectées à l'aval (Granges, Molottes, Ponton) ont évolué vers un état distinct à la fois des milieux lotiques précédents et des témoins lentiques (Figure 9). Une des caractéristiques faunistiques de cette évolution est l'accroissement des mollusques bivalves inféodés à l'interface eau-sédiment (*Pisidium*, *Sphaerium*, *Musculium lacustre*). Les métriques de richesses faunistiques n'atteignent pas des valeurs aussi élevées qu'à Belley, notamment concernant les insectes EPT, mais les lônes Granges, Ponton et surtout Molottes se situent dans la partie supérieure de la gamme de richesse pour les gastéropodes,

en raison de la juxtaposition le long de leur linéaire de mouilles isolées et d'une portion avale bien connectée au Rhône. Comme à Belley, ces évolutions sont relativement stables après restauration. On note également des croissances régulières de la richesse en insectes EPT dans les lônes Ponton et Vachon (Figure 10). L'abondance relative des espèces exogènes demeure faible tout au long du suivi. Le suivi des métriques et de la composition des communautés dans les lônes témoins montre une très grande stabilité et des dérives de la composition faunistique globalement plus faibles que dans les lônes restaurées (Figure 11).

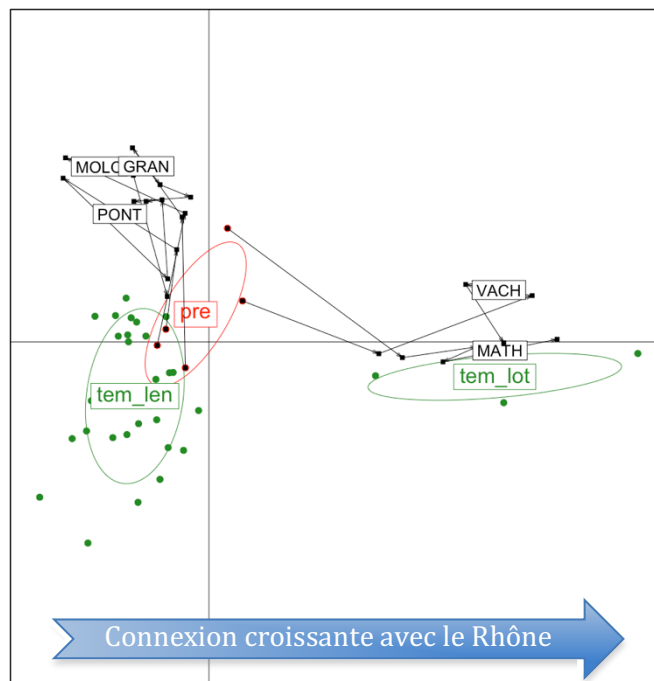


Figure 9- Trajectoires temporelles des changements faunistiques post-restauration à Brégnier-Cordon (2003-2016). La distance entre points (lône à une période donnée) exprime la différence de leur composition en macroinvertébrés. Les 5 lônes restaurées (trajectoires noires) montrent une divergence de leurs changements faunistiques par rapport à la situation pré-restauration (ellipse rouge). Le bilan est une augmentation de la diversité entre lônes. Les ellipses vertes représentent les témoins lentiques (tem_len, 6 lônes) et le témoin lotique (tem_lot, lône du Tonkin), n'ayant pas été concernés par la restauration.

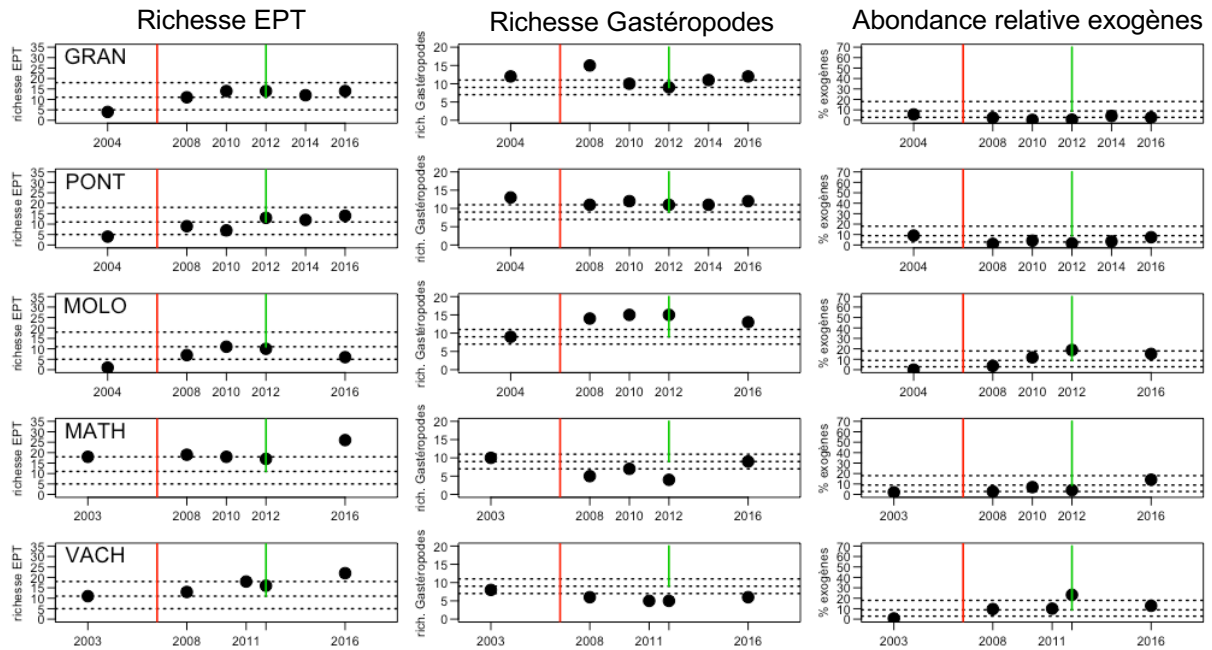


Figure 10 - Changements temporels de trois métriques faunistiques dans 5 îlots restaurés à Brégner-Cordon (2003-2016). La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, la ligne verte l'épisode de chasses de 2012. Les lignes horizontales tiretées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 îlots étudiés de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

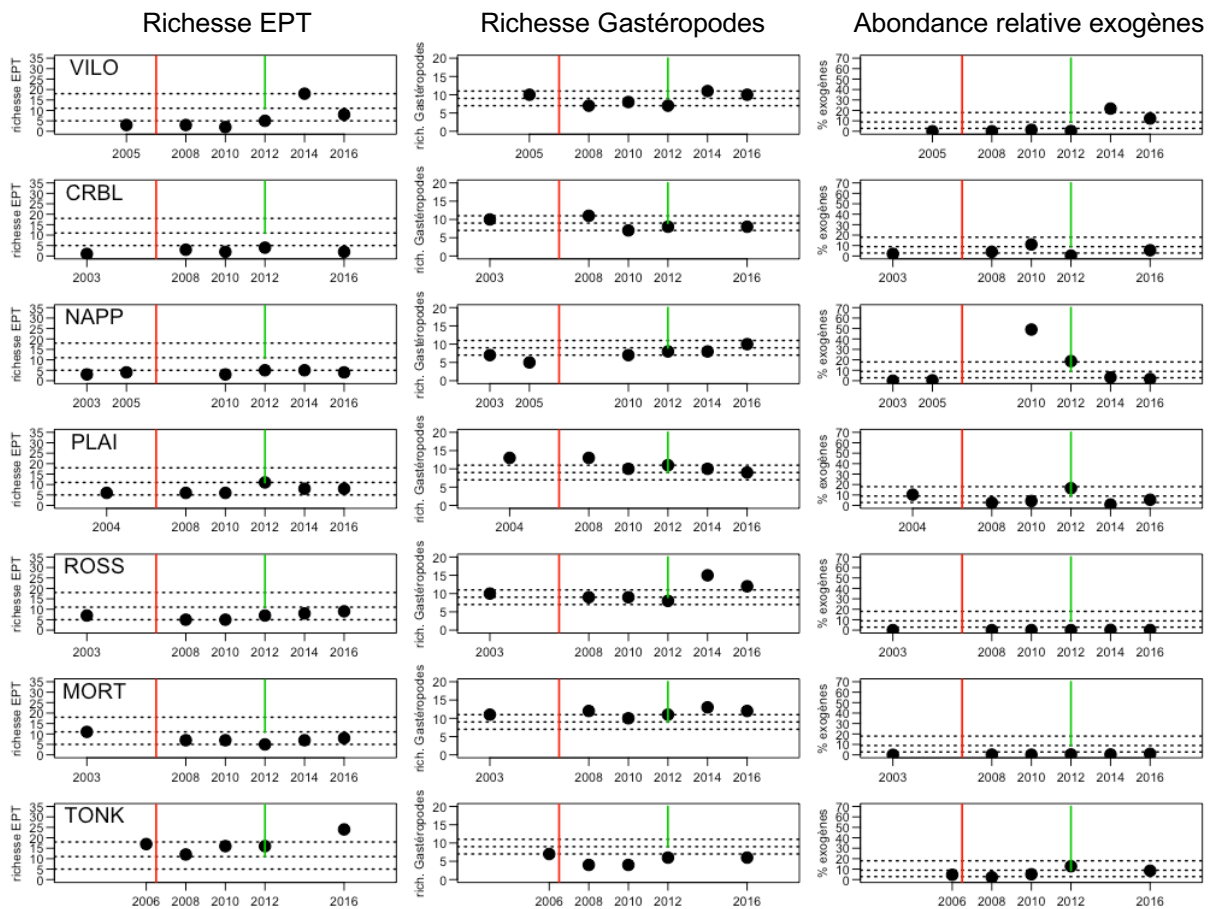


Figure 11 - Changements temporels de trois métriques faunistiques dans 7 îlots non-restaurés et servant de « témoins » à Brégner-Cordon (2003-2016). La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, la ligne verte l'épisode de chasses de 2012. Les lignes horizontales tiretées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 îlots étudiés de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

Comme dans le secteur de Belley, le gastéropode *Theodoxus fluviatilis*, témoin d'un milieu fluvial de haute qualité, était présent dans la lône témoin du Tonkin et s'était installé à de fortes densités dans les chenaux latéraux courants restaurés (Mathan, Vachon). L'espèce n'a pas été retrouvée après l'événement des chasses du printemps 2012 (Figure 12). Une population relictuelle a été découverte en 2018 dans le contre-canal rive gauche de l'aménagement de Brégner-Cordon, un peu en amont de l'usine hydro-électrique. Une source potentielle de recolonisation pour le fleuve existe donc, mais les peuplements ne se sont pas encore rétablis dans les lônes où ils étaient présents après restauration (ce que confirment les données 2019 non présentées ici).

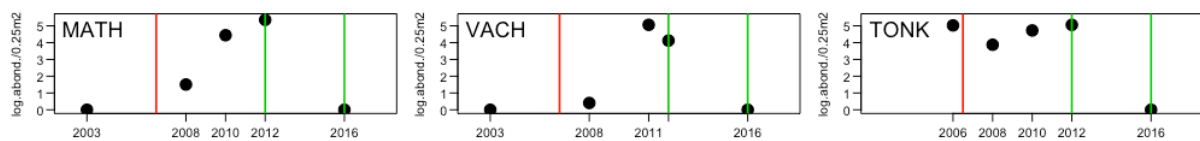


Figure 12 - Changements temporels du logarithme de l'abondance moyenne du gastéropode *Theodoxus fluviatilis* dans les 3 lônes suivies à Brégner-Cordon de 2003 à 2016 où il était présent. La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, les lignes vertes les épisodes de chasses de 2012 et APAVER 2016. 1 \approx 2 individus; 2 \approx 6 ind.; 3 \approx 19 ind.; 4 \approx 54 ind.; 5 \approx 148 ind./ 0.25m².

Le secteur de Brégner-Cordon héberge également le gastéropode emblématique *Anisus vorticulus*, listé en annexe de la Directive Habitats. Sa présence concerne cinq lônes parmi les témoins lenticques couverts ici. L'espèce a disparu de la lône des Nappes après 2003 à la suite de l'assèchement puis du curage de celle-ci. Dans les quatre autres sites, elle montre des fluctuations importantes d'effectifs au cours des années de suivi, sans que celles-ci puissent être mises de façon simple en relation avec l'histoire des milieux. Ainsi, le Creux de Bleu, la lône de Rossillon et l'amont de la lône de la Plaine sont trois sites en évolution rapide vers un stade temporaire, mais qui montrent des fluctuations d'effectifs très contrastées. Les effectifs les plus élevés ont été observés dans le Creux de Bleu (Ile Molottes) (Figure 13).

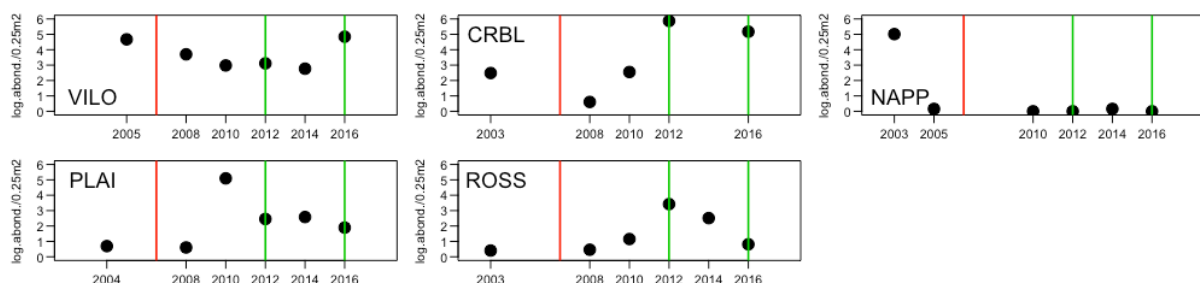


Figure 13 - Changements temporels du logarithme de l'abondance moyenne du gastéropode *Anisus vorticulus* dans les 5 lônes suivies à Brégner-Cordon de 2003 à 2016 où il était présent. La ligne verticale rouge indique la restauration du secteur, les lignes vertes les épisodes de chasses de 2012 et APAVER 2016, bien que ces événements n'aient a priori pas d'impact sur les lônes concernées. 1 \approx 2 individus; 2 \approx 6 ind.; 3 \approx 19 ind.; 4 \approx 54 ind.; 5 \approx 148 ind./ 0.25m².

Concernant les poissons, les 3 lônes connectées aux 2 extrémités, amont et aval, (Vachon, Cerisiers et Mattant) abritent des assemblages d'espèces très similaires de ceux du vieux-Rhône avec des particularités en lien avec les caractéristiques hydro-morphologiques de chacune de ces 3 lônes. Dans ces lônes, 27-28 espèces ont été échantillonnées depuis 2006 avec une composante rhéophile majoritaire (barbeau, goujon, chevaine, loche, spirilin, hotu, chabot, vandoise, ablette). Dans la lône des Cerisiers, la présence de sections très peu courantes, propices aux dépôts de sédiments fins et au développement de macrophytes explique que des espèces plus lénitophiles (épinoche, gardon brème bordelière, tanche, bouvière) soient régulièrement échantillonnées. Ces lônes ne constituent pas particulièrement des habitats de croissance privilégiés pour les juvéniles de l'année (0+), la proportion moyenne de poissons d'âge 0+ (période 2006-2019) dans les échantillons étant comprise entre 33 et 38%. En revanche, pour les deux lônes connectées par l'aval (Molottes et Ponton), dont le rétablissement de la connectivité avec le chenal a progressivement favorisé la fonction de nurserie, la proportion moyenne (2006-2019) de juvéniles de l'année dans les échantillons est voisine de 80%. Cette utilisation de ces habitats (milieu ~stagnant, substrat fin et développement important de la végétation aquatique) par les poissons de l'année concerne à la fois des espèces dont la reproduction peut se dérouler *in situ* (ablette, bouvière, brèmes, perche fluviatile, tanche, rotengle, brochet et des espèces non-natives comme le poisson-chat, la perche-soleil et le *Pseudorasbora parva*) et des espèces pour lesquelles les processus de dispersion des très jeunes stades de développement conduisent à l'utilisation de ces lônes lors de la phase de croissance des juvéniles au cours de leur premier été (chevaine, barbeau fluviatile, goujon, vandoise), soit 23 espèces dans la lône des Molottes et 21 dans celle du Ponton. Cette fonctionnalité semble plus marquée dans la lône des Molottes que dans celle du Ponton, notamment entre 2012 et 2016. Depuis 2017, les effectifs échantillonnés dans ces 2 lônes ont décliné, sans doute à cause du développement d'un bouchon sédimentaire au niveau de la connexion aval (consécutif aux opérations de chasses des retenues de Verbois et de Chancy-Pougny de 2012 et APAVER de 2016) réduisant potentiellement l'accessibilité pour les poissons.

Potentiel d'évolution du site : pistes

Le régime de débits réservés est peu modifié par rapport à la situation antérieure et offrirait peu de gains d'habitat pour des augmentations raisonnables du débit. Les résultats acquis depuis 2006 mettent surtout en évidence la variabilité interannuelle de structure de peuplement pour les poissons et en particulier des succès de reproduction des différentes espèces. Les populations des espèces d'eau courante (ablette, barbeau, hotu, vandoise) semblent fonctionner correctement. On notera que l'ombre

commun est quasi-absent des échantillonnages réalisés, il y a pourtant une bonne capacité d'accueil dans le Vieux-Rhône pour cette espèce.

La réhabilitation des lônes, associée à la présence de lônes non-restaurées dans ce secteur offre une diversité d'habitats importante au sein de la plaine alluviale et un contexte unique pour suivre les fluctuations naturelles des communautés alluviales et donc évaluer de façon comparative les changements dans les milieux restaurés. Les suivis réalisés montrent que les milieux réhabilités évoluent progressivement depuis 2006. Les processus de sédimentation sont variables en fonction des degrés de connectivité de surface des lônes avec le Rhône.

Un travail en cours (thèse de Pierre Marle) porte sur les processus de transfert trophique dans deux lônes du secteur (Ponton, Molottes), en apparence proches du point de vue de leur fonctionnement hydrologique, mais contrastées dans leur fonctionnement ichtyologique, vise à d'obtenir une compréhension fine de processus fonctionnels au sein de lônes parapotamiques et, à terme, des éléments de guidage pour la restauration ou la gestion de tels milieux.

Le secteur de Brégnier-Cordon, en raison de ses caractéristiques géomorphologiques et de son régime de débits réservés a toujours été considéré comme un secteur privilégié d'un point de vue écologique. Le programme de restauration a remis en connexion des milieux qui s'étaient atterris depuis la mise en service du barrage. Plusieurs pistes de réflexion sur ce secteur peuvent être envisagées : évaluer les bénéfices potentiels de la poursuite de la réhabilitation de nouvelles lônes tout en laissant évoluer les lônes actuellement restaurées, démanteler une partie des digues anciennes afin de réactiver certains paléo-chenaux lors des événements hydrologiques et de manière à potentiellement amorcer les processus d'auto-entretien de lônes restaurées.

Secteur de Miribel-Jonage

Le Canal de Miribel

Aménagé vers 1848, le Canal de Miribel, n'est pas, comme dans le cas des autres aménagements hydro-électriques à dérivation du Rhône, un Vieux-Rhône au sens strict, puisqu'il s'agit d'un ancien canal de navigation. Ce tronçon de 18 km environ reçoit la Sereine, un affluent de rive droite au droit du péage autoroutier de Beynost Nord et comporte un seuil en aval du Pont de l'Île à Miribel. Un autre seuil est présent en aval de la confluence avec le Canal de Jonage. Le barrage de Jons est équipé d'une passe à poissons.

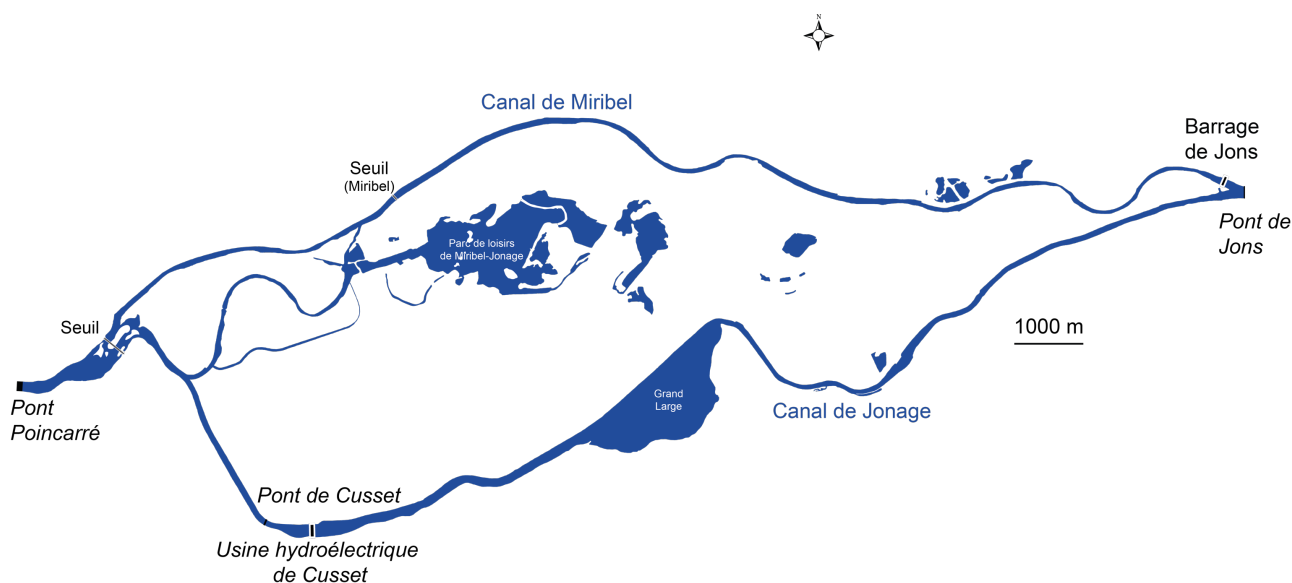


Figure 1 – Secteur de Miribel-Jonage

La restauration

La valeur du débit réservé n'a pas été modifiée, elle varie entre 30 et 60 m³.s⁻¹.

Débits réservés : Canal de Miribel

En prévision d'une éventuelle modification du débit réservé, des données concernant les peuplements de macroinvertébrés benthiques (depuis 2002) et de poissons (depuis 2007) ont été collectées. Fin 2018, il a été décidé de suspendre ce suivi en attendant que des décisions soient prises en matière de restauration écologique du Canal de Miribel.

La structure du peuplement de poissons du Canal de Miribel diffère sensible de celle des Vieux-Rhône en amont. Dans ce secteur, le nombre d'espèces échantillonnées au cours des 12 années de suivi a varié entre 15 (2008) et 22 (2012) mais était le plus souvent compris entre 16 et 20. Le spirilin et le vairon sont les deux espèces dont les abondances relatives ont été les plus élevées au cours de

cette période (Figure 2) variant entre 20 et 57% pour le spirilin et entre 7 et 55% pour le vairon. Ces deux espèces de petite taille sont généralement abondantes dans des cours d'eau de tailles plus modeste comme l'Ain, le spirilin est une espèce plutôt thermophile dont l'abondance a fortement augmenté au cours des dernières décennies dans le secteur du Rhône en aval de Sault-Brénaz. Parmi les autres espèces abondantes, les populations de barbeaux fluviatiles, de hotus, de chevaines, d'ablettes, de loches franches, de goujons et de silures sont les mieux représentées.

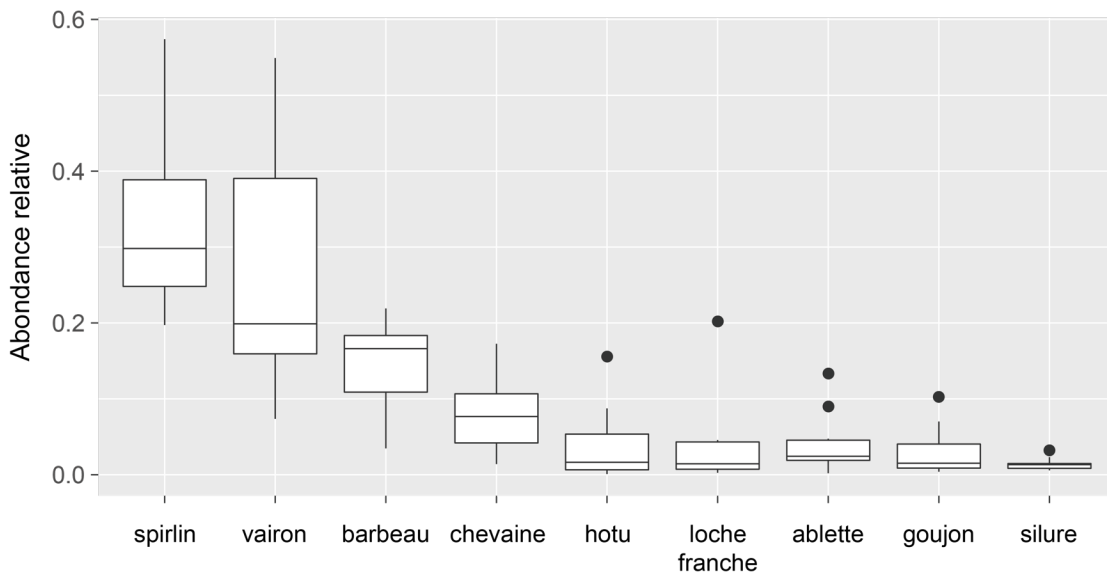


Figure 2 - Box-plots des abondances relatives des 9 espèces dont la proportion dans les échantillons est supérieure à 1% sur la période 2007-2018.

L'examen de l'évolution de la proportion d'espèces d'eau courante au cours de la période d'échantillonnage (Figure 3) montre que les valeurs varient entre 7,7% (2008) et 41,4% (2018). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées en 2011, 2012 et 2018. Le barbeau fluviatile est l'espèce de la guildes qui contribue majoritairement à la proportion d'espèces d'eau courante dans les échantillons, le hotu et l'ablette contribuent de manière beaucoup moins marquée et variable suivant les années mais parfois de manière significative, comme en 2011 pour le hotu et en 2018 pour l'ablette (Figure 4).

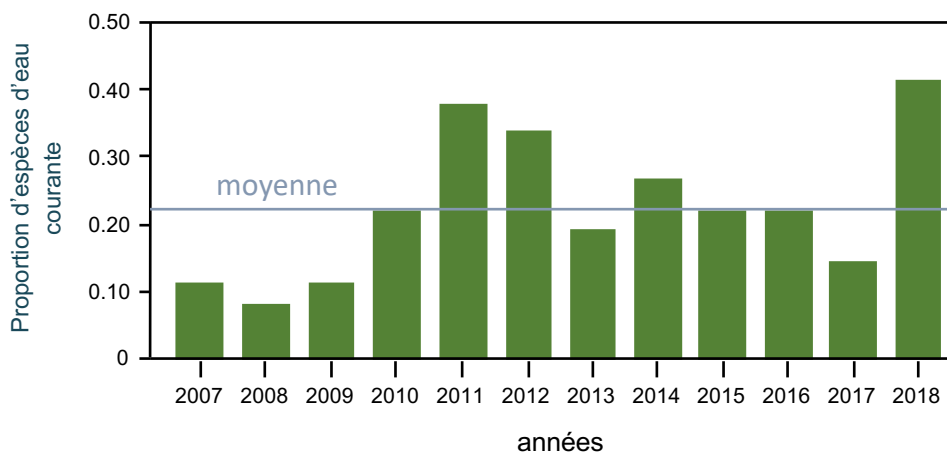


Figure 3 – Proportion d'individus appartenant aux espèces de la guild des espèces d'eau courante dans les pêches réalisées de 2007 à 2018 dans le Canal de Miribel.

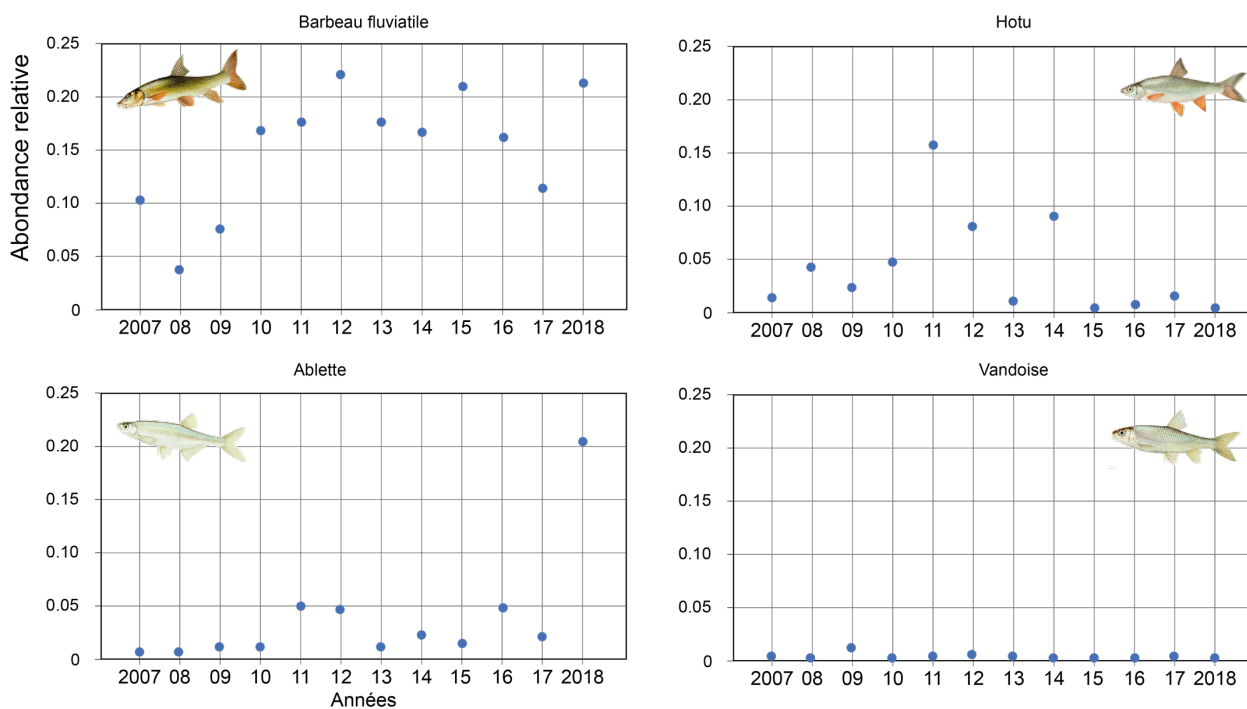


Figure 4 – Proportion d'individus pour chacune des 4 espèces de la guild des espèces d'eau courante dans les pêches réalisées de 2007 à 2018 dans le Canal de Miribel.

Les densités de macroinvertébrés benthiques observées sont relativement stables avec en moyenne 40 609 individus/m², à l'exception d'une valeur plus importante en 2011. Les valeurs de richesse taxonomique observées semblent plutôt stables au cours du temps avec en moyenne respectivement 78 taxons (Figure 5).

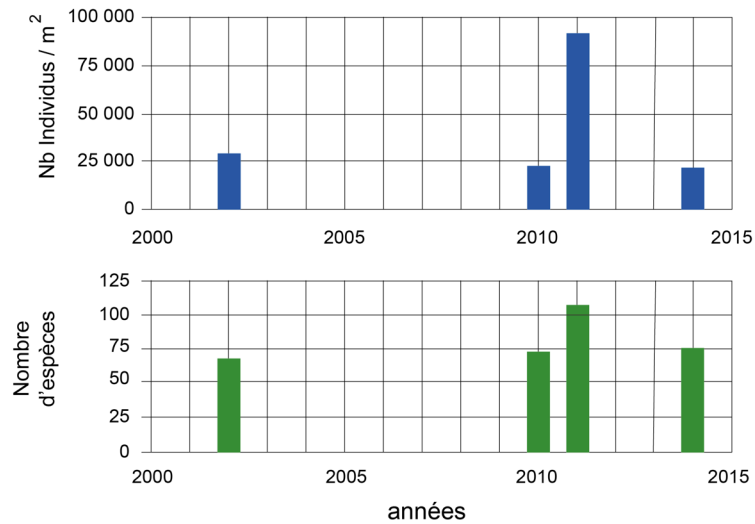


Figure 5 - Evolution interannuelle de la densité totale des invertébrés récoltés (en bleu) et de de la richesse taxonomique (en vert).

La richesse en Epheméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) augmente avec la qualité du milieu et avec l'intensité du courant. C'est un métrique important pour évaluer la qualité des cours d'eau. Les densités et les richesses en E.P.T. observées ont été plutôt stables avec en moyenne 3 887 individus/m² et 30 taxons (Figure 6).

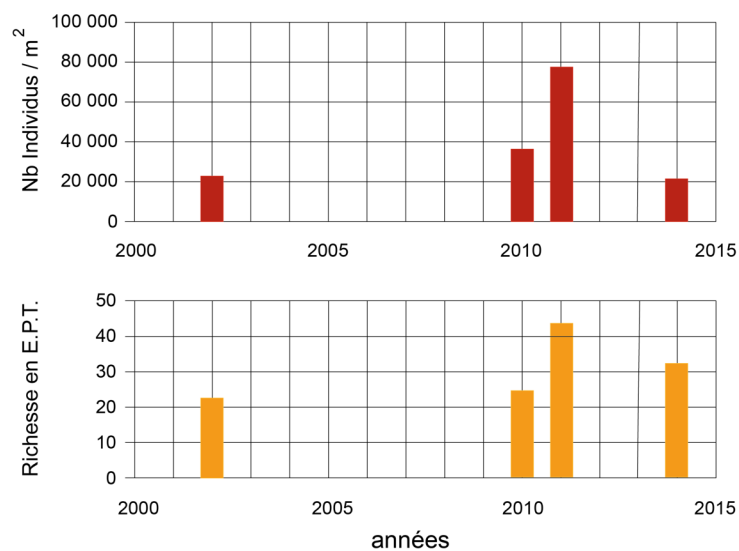


Figure 6 - Evolution interannuelle de la densité (en rouge) et de la richesse taxonomique (en orange) en Ephémères, Plécoptères et Trichoptères.

Parmi les 166 taxons rencontrés sur le secteur de Miribel-Jonage toutes campagnes confondues, un modèle de préférence hydraulique est disponible pour 60 taxons : soit 3 taxons limnophiles, 9

taxons intermédiaires, 26 taxons rhéophiles et 22 taxons ubiquistes. Les préférences hydrauliques (Mérigoux *et al.*, 2009¹) des taxons sont classées en 7 catégories :

- les taxons limnophiles de la **catégorie 1** sont inféodés à des milieux lenticques et sont par exemple les Trichoptères du genre *Agraylea* ou les Coléoptères de la famille des Hydraenidae.
- les taxons de la **catégorie 2** aussi limnophiles, sont retrouvés dans des milieux à contraintes hydrauliques faibles. Ils sont représentés par exemple, par les Diptères Dasyheleinae ou Dolichopodidae.
- les espèces de la famille des Hydroptilidae ou des Asellidae préfèrent les conditions hydrauliques intermédiaires (**catégorie 3**).
- les taxons rhéophiles sont soit inféodés à des contraintes hydrauliques fortes; e.g. *Hydropsyche modesta*, *Potamanthus luteus* ou les Diptères Orthocladiinae (**catégorie 4**) ; soit à des contraintes hydrauliques très fortes (**catégorie 5**) comme par exemple *Theodoxus fluviatilis*, *Ancylus fluviatilis*, *Baetis vardarensis*, *Elmis* spp. ou *Hydropsyche siltalai*.
- les taxons ubiquistes ne présentent pas de préférence hydraulique (**catégorie 6**) comme par exemple *Dendrocoelum lacteum*, *Athripsodes albifrons* et *Gammarus fossarum*.
- enfin la **catégorie 7** (indéterminé) regroupe tous les taxons pour lesquels aucune information n'est disponible.

La proportion de taxons rhéophiles a augmenté au cours du temps aux dépiments des taxons ubiquistes (Figure 7), bien que la valeur du débit réservé n'ait pas été modifiée..

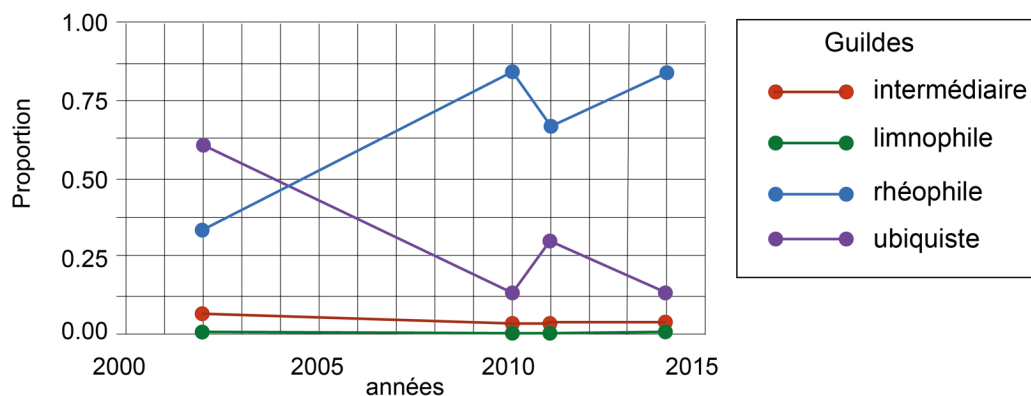


Figure 7 - Evolution interannuelle des densités (nb. individus/m²) en proportion par guildes de préférence de contraintes hydrauliques pour les taxons possédant un modèle de préférence hydraulique (voir Mérigoux *et al.*, 2009).

¹ Mérigoux S., Lamouroux N., Olivier J.-M., & Dolédec S. (2009). Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. *Freshwater Biology*, **54**(6), 1343 – 1356.

Réhabilitation des lônes

Les choix écologiques en lien avec la réhabilitation des lônes du secteur de Miribel a été l'objet de plusieurs travaux et études destinés à définir un programme de réhabilitation dans le contexte particulier du Parc de la présence du champ captant de Crépieux-Charmy (<https://www.grand-parc.fr/pdf/decouvrez/contrat-eau-memoire-programme-restauration.pdf>).

La lône Jonage a été remise en eau en 2019. La stratégie de restauration adoptée diffère totalement de celle classiquement pratiquée sur le fleuve. L'alimentation de la lône est assurée par une prise d'eau qui capte les eaux du canal de Jonage. Le cheminement de la lône a été curé, sans approfondissement systématique jusqu'au toit de galet. La lône se termine dans une « impasse » sous la forme d'un bassin d'infiltration.

Avant travaux, la lône était totalement atterrie (Figure 8). La granulométrie des couches de surface était essentiellement limoneuse, avec une proportion d'argiles importantes (13-17%). La quasi-intégralité du linéaire était recouvert par les sédiments fins (97%). L'épaisseur médiane des dépôts de fines étaient de 31,5 cm (min. = 0 cm ; max. = 215 cm ; Figure 9). Ces sondages se sont avérés difficiles, notamment sur la première moitié du linéaire suivi, en raison de la présence de couches sédimentaires extrêmement cohésives. L'épaisseur médiane des dépôts d'alluvions fines observée après travaux est de 21,5 cm (min. = 0 cm ; max. = 164 cm ; Figure 9), avec un taux de recouvrement des fonds par les fines de 91%. Ces observations soulignent que malgré le curage, les fonds du chenal restauré risquent d'être rapidement colmatés, d'autant plus que le potentiel de décapage des fines semble limité du fait des choix techniques qui ont été opérés. Les prélèvements granulométriques réalisés lors de la campagne de 2019 seront analysés en 2020.

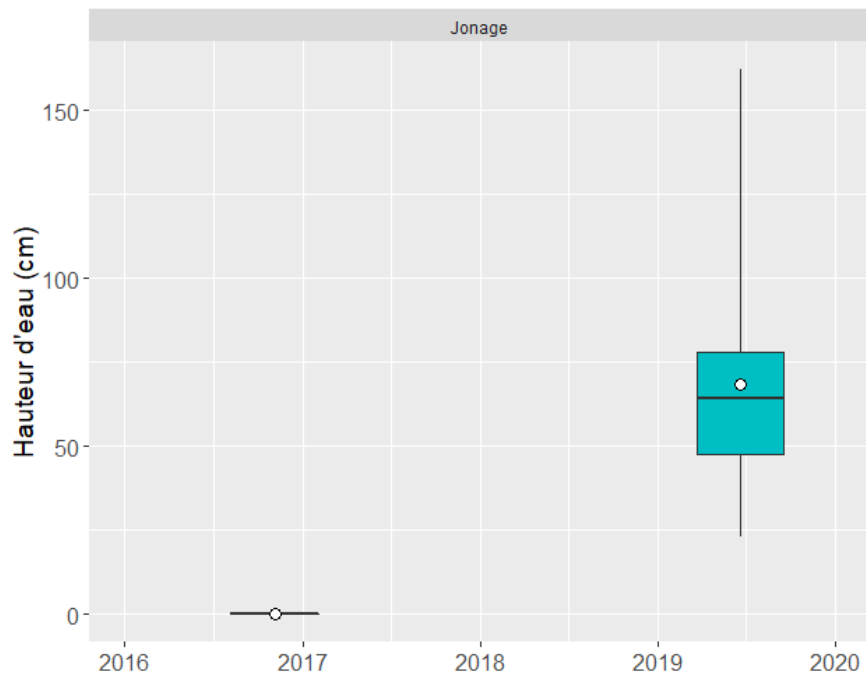


Figure 8 - Evolution des hauteurs d'eau mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans la lône de Jonage. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

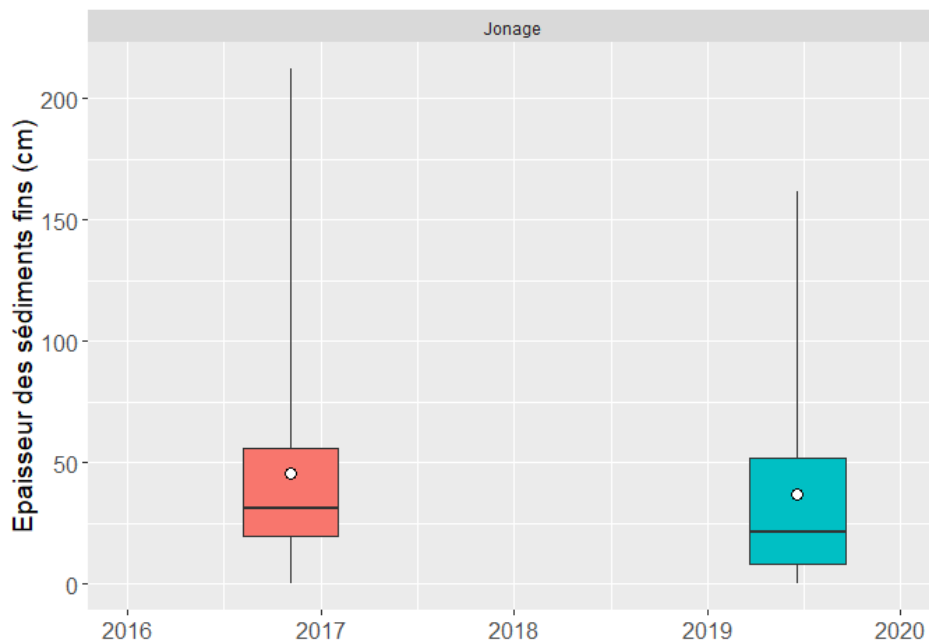


Figure 9 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans la lône de Jonage.

Secteur de Pierre-Bénite

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 9.8 km de long dont ~5 courants, située juste à l'aval de Lyon en zone urbanisée. Seulement deux radiers marqués sont présents dans le chenal, dont un qui a été récemment réactivé à l'aval de la lône de Ciselande (Figure 1).

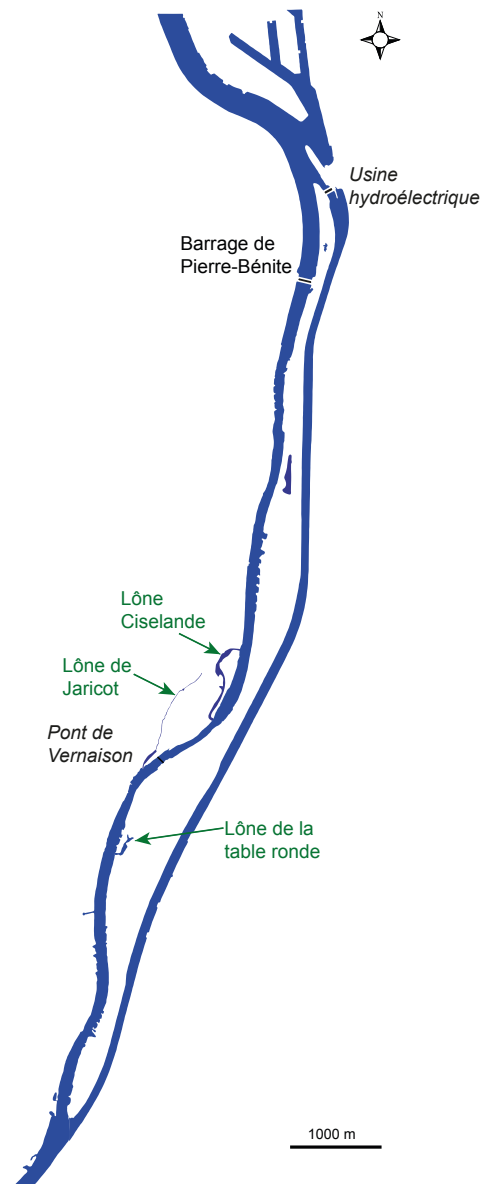


Figure 1 – Secteur de Pierre-Bénite

La restauration

Premier secteur restauré en 2000, le débit minimum dans le vieux-Rhône a été multiplié par 10.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2000 (m ³ .s ⁻¹)	10			20			10					
Vitesse (m.s ⁻¹)	0,08			0,12			0,08					
Débit minimum >2000 (m ³ .s ⁻¹)*	100											
Vitesse (m.s ⁻¹)	0,36											

Trois lônes ont été restaurées en 1999, avec pour principal objectif de favoriser une diversité de fonctionnement inter- et intra-lônes. Une a été reconnectée au fleuve en permanence (Ciselande), une élargie pour le passage des crues et reconnectée à l'aval (Jaricot) et une troisième curée (Table ronde). La lône de Jaricot a la particularité de se jeter dans le bassin de joutes de Vernaison.

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

32 espèces de poissons ont été échantillonnées dans le vieux-Rhône depuis 1995. Le chenal de Pierre-Bénite est le site le plus démonstratif des effets de l'augmentation des débits. Suite au changement notable des vitesses, la proportion des poissons typiques des eaux courantes a augmenté significativement (ex : proportions de barbeau fluviatile, hotu, ablette et vandoise passée de 15% à 42%) (Figure 2).

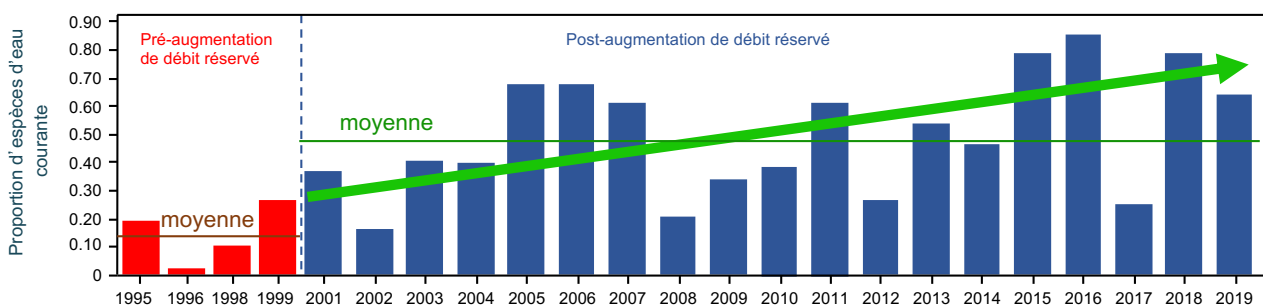


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite sur la période 1995-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). Les deux lignes horizontales représentent les valeurs de la moyenne sur les 2 périodes, pré et post-restauration.

La proportion d'ablettes est passée de ~6% avant modification du débit réservé à ~39% sur la période 2000-2019, avec des valeurs de l'ordre de 70% en 2015, 2016 et 2018, celle du barbeau

Rhône. Inversement, et conformément aux attentes, la proportion des taxons léntophiles a fortement diminué (diptères Chironomini, mollusques Valvatidae, crustacés Asellidae ou encore sangsues Glossiphonidae). Enfin, les plécoptères rhéophiles du genre *Leuctra*, indicateurs d'une bonne qualité physico-chimique de l'eau (n°1 au classement IBGN, AFNOR, 1992, 2004), peu ou pas collectés lors des campagnes pré-restauration, ont été régulièrement retrouvés après l'augmentation du débit réservé.

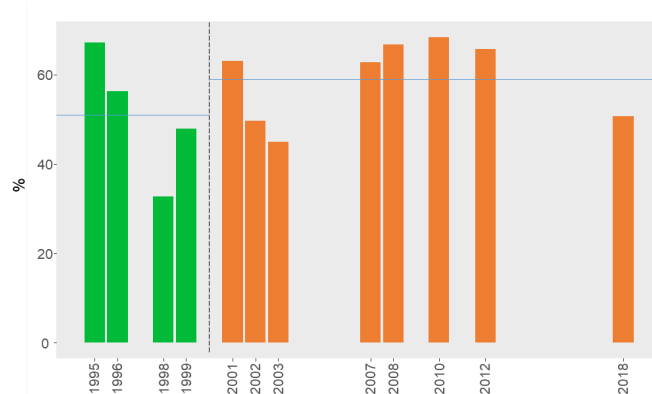


Figure 4 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep).

Contrairement aux attentes, les effectifs de certains taxons ont peu varié (ex : ex : trichoptères *Hydropsyche contubernalis*) ou même décréu (ex : Coléoptères *Limnius* spp. et *Oulimnius* spp.) suite à l'augmentation du débit réservé, suggérant l'influence marquée d'autres paramètres environnementaux (qualité du substrat, thermie, compétition inter/intra spécifique, ...).

Avec 18 espèces exogènes recensées dans le cadre de ce suivi, le nombre d'espèces non-natives dans le secteur de Pierre-Bénite se situe dans la moyenne mesurée sur le Bas-Rhône (18 espèces). La Saône est le principal corridor emprunté par les espèces exogènes d'origine Ponto-Caspienne (Bollache et al., 2004 ; Galil et al., 2008). Le secteur de Pierre-Bénite est situé immédiatement en aval de la confluence avec la Saône et de nombreuses espèces exogènes ont ainsi colonisé ce milieu. Les campagnes d'échantillonnage réalisées en 2018 ont révélé 3 nouvelles espèces exogènes : les Crustacés *Chelicorophium robustum*, *Dikerogammarus haemobaphes* et le mollusque bivalve *Dreissena rostriformis*. La proportion d'espèces exogènes a brutalement augmenté dans ce secteur à partir de 2013 pour atteindre près de 36% des abondances en 2018. Cette augmentation est essentiellement portée par le crustacé *Jaera istri*. L'interaction de cette espèce avec le reste de la communauté est peu documentée mais les très fortes densités observées (~ 6500 indiv.m⁻² à Pierre-Bénite) suggèrent que des impacts négatifs ne sont pas à exclure (Straka et Špaček, 2009).

L'effet marqué et significatif de l'augmentation du débit réservé dans le vieux-Rhône s'inscrit dans la durée. Parmi les espèces de poissons dont la réalisation du cycle de vie et la proportion d'habitats préférentiels ont été favorisées par l'augmentation du débit réservé, l'effet est surtout marqué pour l'ablette, espèce pélagique et planctonophage pour laquelle les grandes portions de cours d'eau peu courantes et relativement profondes constituent des habitats très favorables. L'effet de la modification du débit est moins marqué pour les grands cyprinidés rhéophiles comme le barbeau fluviatile et le hotu pour lesquels la proportion d'habitats plus courants et de radiers est probablement un peu limitante. Pour toutes ces espèces, l'échantillonnage révèle la présence de poissons de tailles variées, signifiant que le recrutement au sein des populations est effectif.

Réhabilitation des lônes

Le fonctionnement hydro-sédimentaire des 3 bras restaurés est diversifié. Les lônes ne sont à présent suivies que du point de vue hydromorphologique. Le suivi de la Table-Ronde a été abandonné après 2015 (mesures non répliquables d'une campagne à une autre).

D'un point de vue sédimentaire, la lône Ciselande fait partie des bras capables de s'auto-entretenir sur le long terme et possède de fait une durée de vie théorique très élevée, si l'on ne considère que la dynamique de comblement par les alluvions fines (< 2mm). La lône est régulièrement décapée par les crues et les patrons longitudinaux sont très stables au cours du temps (Figure 5) : le bras se trouve dans un état d'équilibre depuis 2007. Ces patrons de sédimentations reflètent bien la diversité des faciès d'écoulement intra-bras qui avait été recherchée lors de la mise en œuvre des travaux. Ces différents faciès se retrouvent dans l'alternance de zones de sédimentation préférentielle plutôt localisées, hormis des 200 derniers mètres aval où les dépôts sont plus conséquents. La granulométrie de ces dépôts est largement dominée par les sables (sables fins à moyens), certaines années. Certaines années, on observe très localement des dépôts limoneux (limons grossiers) au niveau de l'extrémité amont. Ces zones de sédimentation sont entrecoupées de zones plus courantes à lit de graviers, qui lorsqu'elles enregistrent des dépôts de fines sont capables de les évacuer très rapidement lorsque le bras est actif. Initialement bras vif permanent, la lône de Ciselande est aujourd'hui atterrie sur l'essentiel de son linéaire en situation de débit réservé :

- les 100 premiers mètres amont sont toujours connectés au vieux-Rhône,
- les 600 mètres suivants sont atterris (présence de très faibles surfaces de milieux temporaires),
- les 400 derniers mètres sont en eaux et déconnectés du vieux-Rhône au niveau de l'extrémité aval.

La figure 6 permet d'apprécier l'ampleur de cet atterrissement sur la période 2007-2016. Ce dernier est lié à la poursuite de l'incision du lit mineur du vieux-Rhône. L'abaissement de la ligne d'eau est

d'autant plus spectaculaire que cette dernière était tenue par un radier localisé entre les PK 9.5 et 10.3.

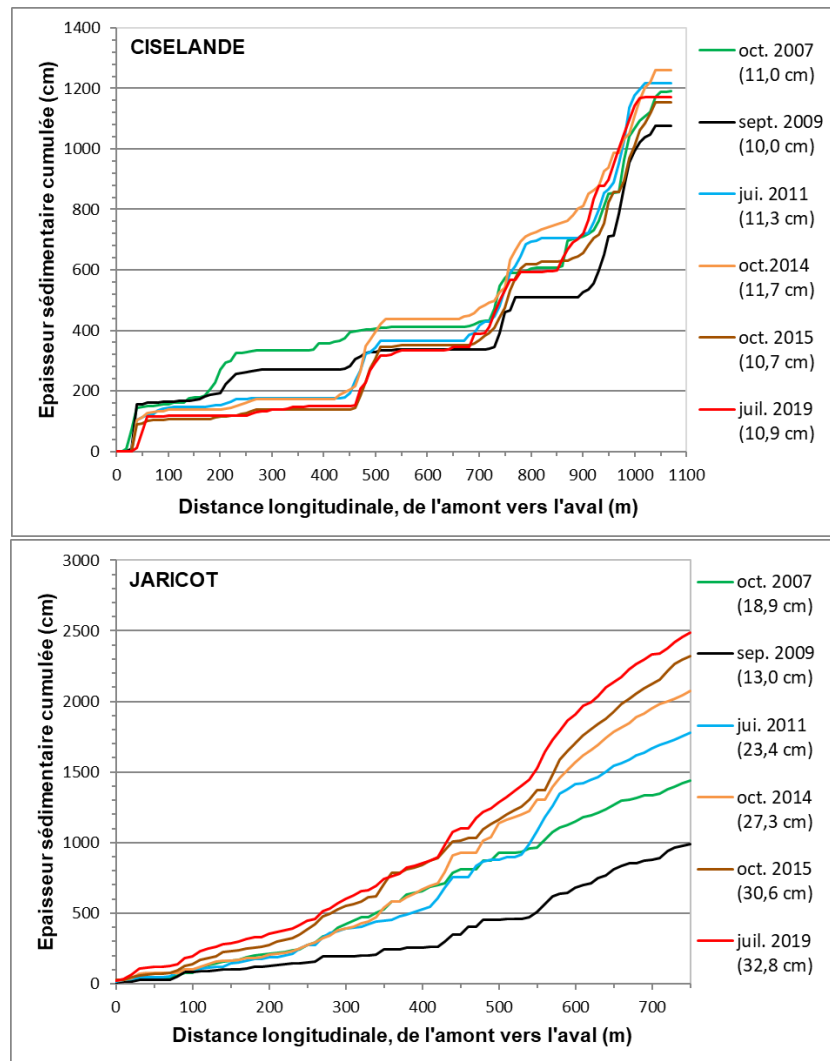


Figure 5 - Evolution des patrons longitudinaux de sédimentation fine dans les bras de Pierre-Bénite : lônes de Ciselande et de Jaricot.

N.B. : les chiffres fournis entre parenthèse dans la légende correspondent à l'épaisseur moyenne des fines mesurées l'année correspondante.

La lône de Jaricot enregistre un fonctionnement courant environ 5 j.an^{-1} en moyenne et possède une sensibilité au retour d'eau relativement importante, dont l'extension spatiale vers l'extrémité amont est limitée par des arrivées d'eau phréatique conséquentes. Ce fonctionnement se retrouve dans les patrons sédimentaires longitudinaux observés depuis le début du suivi (Figure 5). On observe une rupture relativement nette entre les parties amont (400 premiers mètres) et aval (350 mètres suivant). La partie amont de la lône (plus pentue) a enregistré un épisode de décapage significatif entre 2007 et 2009. D'autre part, l'influence du reflux est très marquée sur l'extrémité aval et tend à décroître à mesure que l'on s'approche de l'extrémité amont. La granulométrie des dépôts est localement

sableuse au niveau de l'extrémité amont (sables moyens) et essentiellement limoneuse (limons grossiers à fins) sur le reste du linéaire). Sur la base des vitesses de comblement mesurées, la durée de vie de la lône est actuellement estimée à plus d'un siècle. Toutefois, la poursuite de l'incision du vieux-Rhône au droit de la lône affecte bel et bien les niveaux d'eau observés dans le bras, même si cela reste sans comparaison avec le cas de Ciselande. D'autre part, malgré des campagnes d'arrachage manuel récurrentes menées par le SMIRIL, la jussie (*Ludwigia peploides*) gagne du terrain d'années en années.

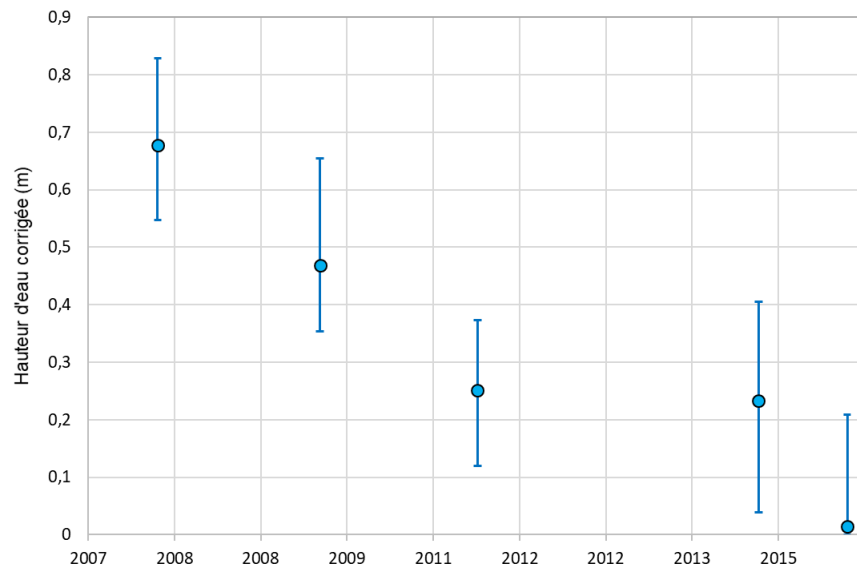


Figure 6 - Evolution des hauteurs d'eau corrigées post-restauration dans la lône de Ciselande. Seules les campagnes directement exploitables sont retenues. Les hauteurs d'eau sont ramenées à un débit de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vieux-Rhône. Les points représentent les valeurs médianes et les barres permettent de visualiser les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles.

Potentiel d'évolution du site : pistes

L'évolution morphologique du lit mineur depuis la restauration, notamment la position du seuil en travers en amont de Vernaison, au droit de la lône de Ciselande a fortement réduit l'effet de la réhabilitation de cette annexe fluviale. La lône est à présent très atterrie et déconnectée du vieux Rhône sur l'essentiel de son linéaire. Les lônes de Jaricot et de la Table-Ronde (déconnexion aval par abaissement de la ligne d'eau) sont également affectés par le phénomène, mais dans une moindre mesure.

Les projets de démantèlement des ouvrages Girardon dans la partie amont du Vieux-Rhône devraient potentiellement modifier le transport sédimentaire et les caractéristiques granulométriques et physiques dans le vieux-Rhône et conduire à la réhabilitation de l'entrée amont de cette lône. La problématique de la gestion de la Jussie sur la lône de Jaricot est également considérée dans le cadre de ces réflexions.

Références :

- AFNOR, 1992, 2004, Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), *Association française de normalisation*, Norme homologuée T 90-350.
- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- 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
- Straka, M., & Špaček, J. (2009) First record of alien crustaceans *Atyaephyra desmarestii* (Millet, 1831) and *Jaera istri* (Veuille, 1979) from the Czech Republic. *Aquatic Invasions*, 4(2): 397-399.

Secteur de Péage-de-Roussillon

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 12 km de long, comportant 1 seuil (Peyraud) et recevant le Limony. L'amont du Vieux-Rhône est courant sur ~2.5 km, une courte zone courante existe immédiatement en aval du seuil de Peyraud (Figure 1).

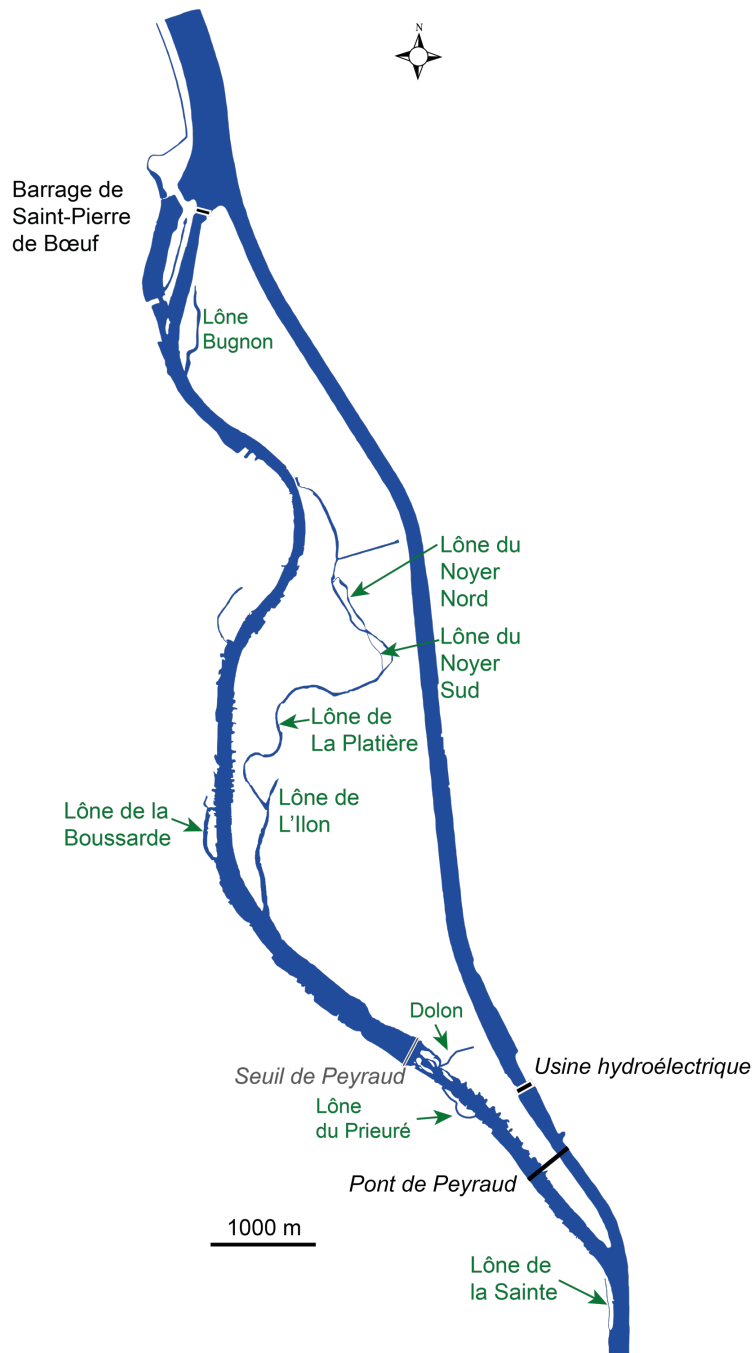


Figure 1 – Secteur de Péage-de-Roussillon

La restauration

Les enjeux liés à la modification du régime de débits réservés dépassent celui de la préservation des milieux aquatiques superficiels : des enjeux sur la forêt alluviale ont été mis en avant ainsi que des enjeux sur les groupements amphibies d'hélophytes et de bas de grève. Le secteur est soumis à plusieurs impacts dont des pompages importants dans la nappe alluviale (entre 130 000 et 170 000 m³/j) et un réchauffement de l'eau induit par le fonctionnement du CNPE de Saint-Alban/Saint-Maurice l'Exil. De plus, la présence du seuil de Peyraud induit un ralentissement des vitesses d'écoulement en amont de sorte que l'impact de l'augmentation du débit réservé sur les vitesses moyennes concerne essentiellement le tronçon en amont du PK 56. Le choix a donc été fait de moduler la valeur du débit réservé en fonction de la saison avec une augmentation dès le mois de février pour atteindre une valeur maximum (125 m³.s⁻¹) au printemps (avril-mai-juin) afin de noyer les grèves et d'alimenter la forêt alluviale au moment du déboufrage de printemps puis une diminution progressive pour un retour à la valeur plancher (50 m³.s⁻¹) en septembre. Cette gestion a en particulier pour objectif de maintenir et de favoriser les associations végétales associées aux habitats amphibies (formations pionnières herbacées constituées principalement par des espèces annuelles, bidenton, nanocyperion) devenues très rares le long du Rhône aménagé.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2014 (m ³ .s ⁻¹)	10			20					10			
Vitesse (m.s ⁻¹)	0,07			0,11					0,07			
Débit minimum >2014 (m ³ .s ⁻¹)*	50	50-75	109	109-125	125	125-109	75	75-50	50			
Vitesse (m.s ⁻¹)												

Le site de Péage-de-Roussillon est dans le périmètre de la Réserve Naturelle de l'île de la Platière. La lône de la Platière (restauration en 1992) et les lônes connexes ont déjà fait l'objet de procédures de réhabilitation (lône du Noyer Nord, aval de la lône de l'Ilon en 2004). En 2012, la lône du Noyer Sud, totalement atterrie et perchée, a été recreusée et reconnectée. La lône de la Sainte a été réhabilitée début 2013. Au printemps 2014, la cote de connexion amont de la lône de la Platière contrôlé par une digue longitudinale submersible a été abaissée afin d'augmenter la fréquence de connexion de la lône (Q~500 m³/s, passage d'une fréquence de connexion d'environ 16 j/an à 30-40 j/an). La lône de l'Ilon, à l'extrémité aval de la Platière, a été restaurée en 2014. Des mares à alimentation phréatique reliées par un chenal d'écoulement ont été créées sur un linéaire de 470 m. En 2015, la lône Bugnon (en rive gauche en amont du secteur), la lône de la Boussarde (en rive droite en amont de Serrières), la lône

du Prieuré (en rive droite en aval du seuil de Peyraud et l'ancien lit du Dolon ont été restaurés. La restauration de la lône de la Boussarde a surtout consisté en un démantèlement des digues Girardon qui cloisonnaient longitudinalement la lône, la transformant en un bras secondaire du vieux-Rhône, ouvert aux deux extrémités. Des travaux importants de démantèlement des endiguements Girardon ont été réalisés sur les Casiers de Serrières et plus en amont sur l'Île des Gravieres (rive gauche). La lône de la Sainte, localisée au niveau de la restitution du Vieux-Rhône, a été restaurée entre 2011 et 2013. La lône a été curée sur environ 200 m et reconnectée au Rhône non court-circuité sur son extrémité aval. Deux mares temporaires ont également été créées sur la partie amont et centrale du bras.

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

L'augmentation très significative du débit réservé n'a pas engendré d'évolution de la proportion d'espèces de poissons d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile, hotu, vandoise) (Figures 2 et 3) ni des taxons de macroinvertébrés rhéophiles (Figure 4). Les aménagements Girardon du 19^{ème} siècle et l'aménagement hydroélectrique récent (1976) ont induit une altération de la morphologie et de la granulométrie des fonds, favorisant l'érosion du lit et l'installation d'un pavage de fond. Cette modification des caractéristiques de l'habitat physique est peu favorable à l'installation d'une faune invertébrée diversifiée et à la reproduction des espèces de poissons nécessitant des fonds de galets et de graviers (espèces lithophiles).

Le peuplement piscicole du vieux-Rhône est majoritairement dominé par des espèces relativement tolérantes aux températures élevées et aux variations de concentration en oxygène dissous associées à ce régime thermique : ablette, gardon, bouvière, chevaine, perche-soleil, pseudorasbora, silure...

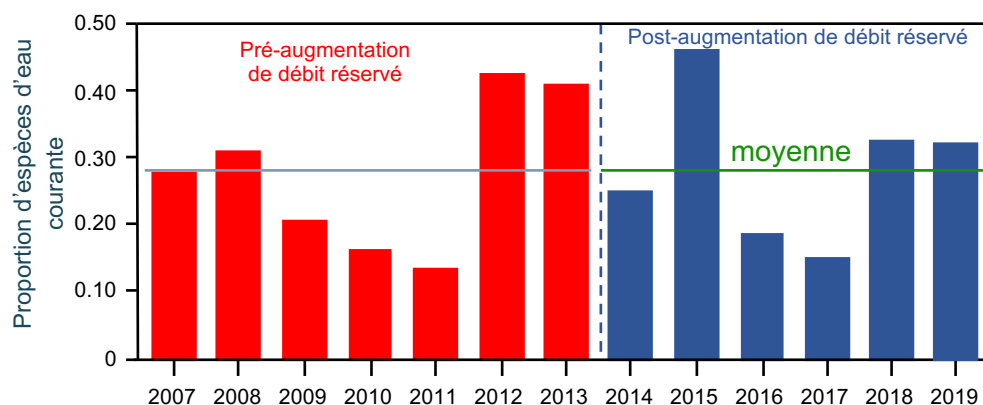


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon sur la période 2007-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). Les deux lignes horizontales représentent les valeurs de la moyenne sur les 2 périodes, pré et post-restauration.

L'abondance moyenne par campagne de pêche est 2 fois plus importante après 2014 qu'entre 2007 et 2013, notamment en 2015, 2017 et 2019, années marquées par un étiage très prolongé et des températures relativement élevées. Entre 2007 et 2013, 8 espèces avaient une abondance relative moyenne supérieure à 5% (ablette, gardon, bouvière, chevaine, goujon, perche-soleil et pseudorasbora). A partir de 2014, seules 6 de ces espèces ont conservé une abondance relative > 5% (Figure 3) mais les espèces dominantes restent les mêmes au cours des 2 périodes. Les abondances relatives de l'ablette, de la bouvière, du gardon, du goujon du pseudorasbora et du silure ont augmenté après 2013 alors que celles du chevaine, de la perche-soleil, de la loche franche, et dans une moindre mesure du hotu, de la perche commune ont diminué. Ces variations sont probablement imputables à l'évolution du régime thermique et à une hydrologie particulière favorable pendant la période croissance estival et post-estivale.

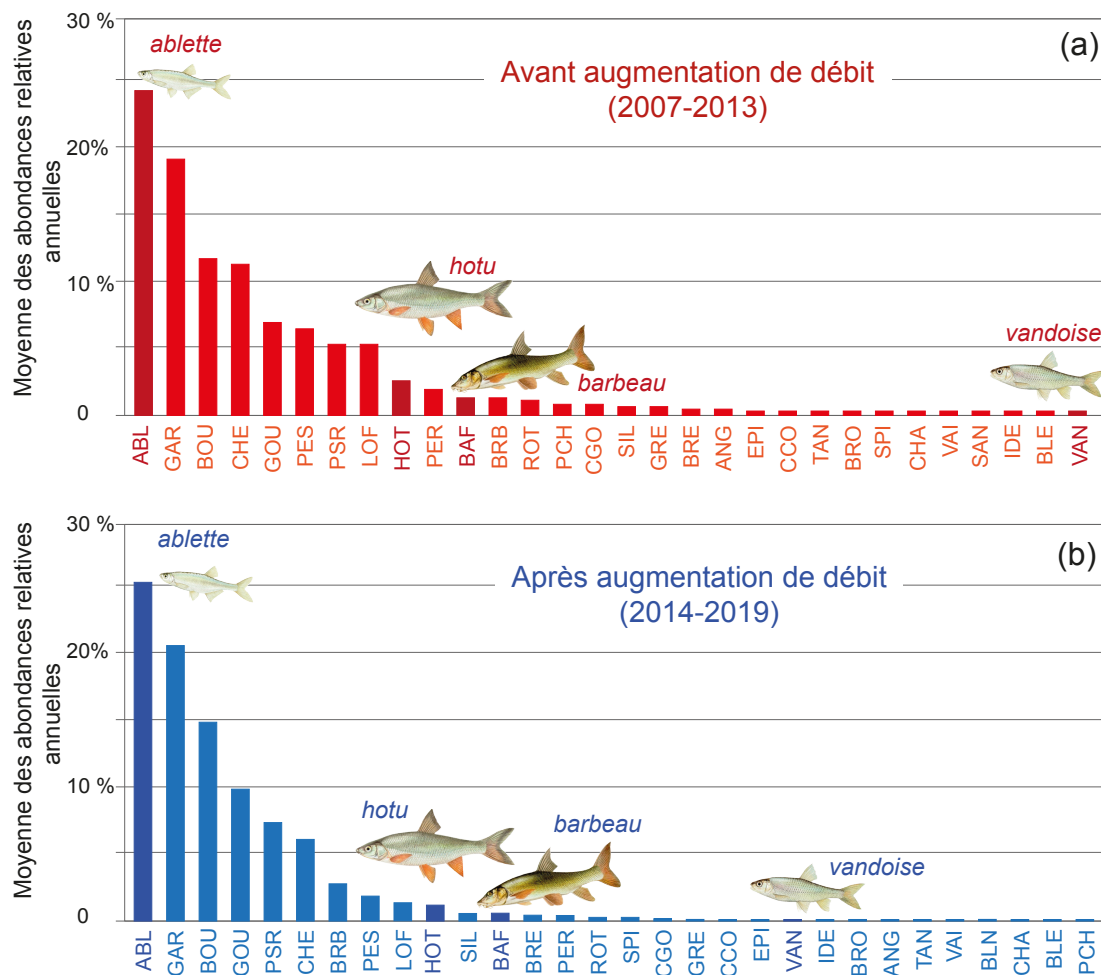


Figure 3 – Moyenne des abondances relatives annuelles des espèces échantillonnées dans le vieux-Rhône avant (a) et après (b) modification du débit réservé. Les couleurs plus foncées identifient les espèces appartenant à la guildes d'eau courante.

L'augmentation du débit réservé semble surtout profitée à l'ablette probablement en raison de l'augmentation du volume des habitats profonds et courants favorables à cette espèce pélagique et planctonophage. En revanche, la rareté des zones de radiers favorables à la reproduction du hotu et du barbeau fluviatile n'a pas été compensée par l'augmentation du débit réservé, ce qui explique certainement le fait que la proportion des individus de ces 2 espèces n'ait pas augmenté après l'augmentation marquée des valeurs de débit réservé. La réinjection récente de sédiments grossiers (galets-graviers) dans la partie amont du vieux-Rhône et le démantèlement des ouvrages Girardon au niveau de l'Île des Graviers devrait permettre d'augmenter la disponibilité de ces frayères (la reproduction du barbeau a été observée sur les petits radiers recréés au droit de l'Île des Graviers). Il est donc possible que la proportion de ces 2 espèces rhéophiles et lithophiles augmente au cours des années futures, conformément aux prédictions des modèles d'évolution de la communauté piscicole après augmentation du débit.

Avant modification des débits réservés, la communauté de macroinvertébrés benthiques était largement dominée par les diptères Chironomidae, quelques mollusques et diptères rhéophiles (*Ancylus fluviatilis*, *Simuliidae*, ...) ainsi que des espèces exogènes (*Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus*, ...). La proportion de taxons rhéophiles (Figure 4) avant rehaussement du débit réservé (~ 60 %) est similaire à celle observée dans les secteurs voisins (Pierre-Bénite et Baix-le-Logis-Neuf). Les modalités de gestion du débit réservé après restauration ont engendré des difficultés dans la mise en œuvre du protocole d'échantillonnage dans le vieux-Rhône. Les campagnes d'échantillonnage de 2014 n'ont pas pu être réalisées dans des conditions similaires à celles effectuées avant restauration (radier d'Arcoules inaccessible au printemps). Les dates des campagnes de 2017 (travail de tri et détermination en cours) ont été adaptées (décalage temporel) afin de pouvoir accéder aux stations d'échantillonnage. Vingt espèces exogènes ont été recensées dans le vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon. La moyenne mesurée sur le Bas-Rhône est de 18 espèces. Comme dans le vieux-Rhône de Pierre-Bénite, la proportion d'espèces exogènes a brutalement augmenté à partir de 2011 pour atteindre près de 40 % de la communauté en 2014. Cette augmentation est essentiellement portée par le mollusque *Potamopyrgus antipodarum*, installé depuis des décennies dans ce secteur et le crustacé *Jaera istri* qui a été collecté localement pour la première fois en 2008. L'interaction de cette espèce avec le reste de la communauté est peu connue mais des impacts négatifs ne sont pas à exclure (Straka et Špaček, 2009) principalement à cause des très fortes densités qu'elle peut atteindre (~ 8 000 indiv.m⁻² à Péage-de-Roussillon).

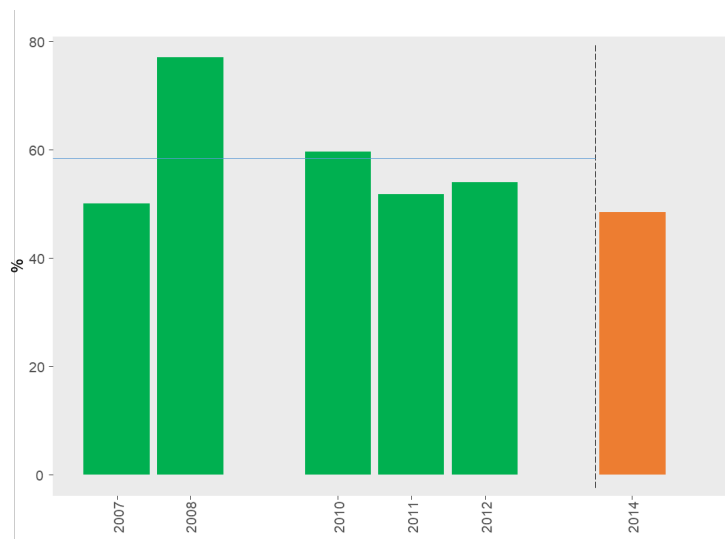


Figure 4 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep).

Réhabilitation des lônes

Le suivi scientifique ne concerne pas la lône Bugnon et la lône du Prieuré.

En ce qui concerne le suivi hydro-sédimentaire des bras, seule l'extrémité amont de la lône de la Platière (950 premiers mètres) est suivie (Figure 5). Avant les travaux de 2014, cette section de la lône a tout d'abord enregistré une phase où le comblement est dominant de 2007 à 2011 (qui reste toutefois très limitée en valeur absolue), avant d'enregistrer une phase de décapage de 2011 à 2013. Depuis et malgré l'augmentation des fréquences de connexion amont avec le vieux-Rhône en 2014, la trajectoire du site est restée très stable. Environ 50% du linéaire suivi est recouvert par les sédiments fins. Ces patches sont relativement stables dans le temps et sont composés de sédiments sableux (sables moyens) et très localement limoneux (limons grossiers).

Les lônes du Noyer nord et du Noyer sud ont été totalement reconnectées à la lône de la Platière, respectivement en 2004 et 2012. Nous ne disposons pas d'état avant travaux pour la lône du Noyer nord. Avant restauration, la lône du Noyer sud était complètement atterrie. Les dépôts étaient sableux sur la partie amont de la lône (sables très fins), puis à dominante limoneuse sur la partie centrale et aval (prédominance des limons grossiers et localement limons moyens). Après travaux, les deux bras présentent un fonctionnement hydro-sédimentaire relativement similaire : ils présentent des fonds constitués essentiellement de graviers et enregistrent localement des dépôts de fines (parfois limoneux, parfois sableux) pouvant être importants, au niveau de leurs extrémités amont et aval pour le Noyer sud et seulement aval pour le Noyer Nord. L'évolution de ces zones de sédimentation préférentielle est à surveiller, notamment pour le Noyer Sud.

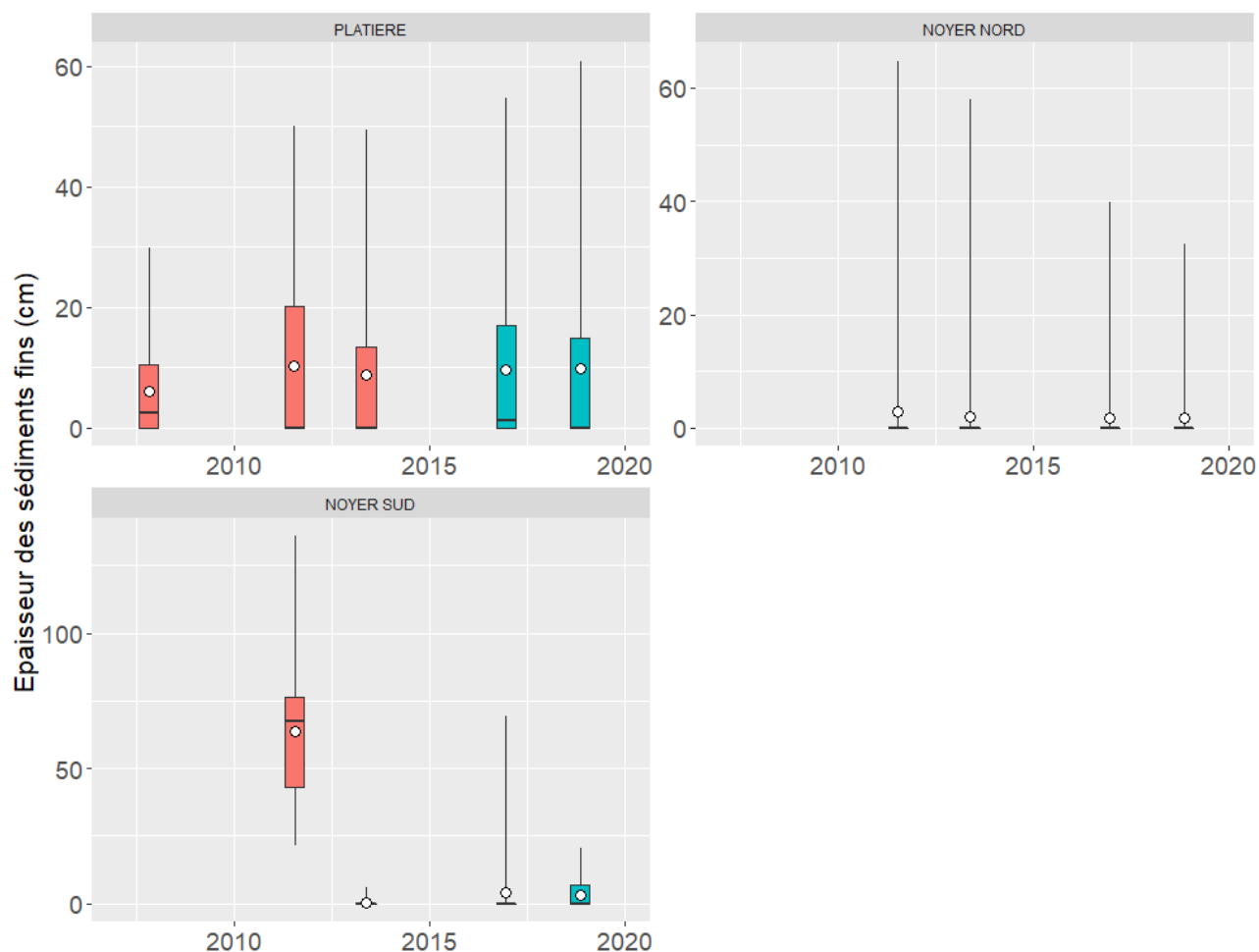


Figure 5 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans les lônes de la Platière*, du Noyer nord (post-restauration seulement) et du Noyer sud (amont du système Platière). Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

*Seuls les 950 premiers mètres de la lône de la Platière sont suivis. Elle est affichée comme non restaurée de 2009 à 2013, bien qu'elle ait déjà fait l'objet d'interventions en 1977 et en 1985.

La lône de l'Ilon a fait l'objet de différentes phases de restauration. En 2004, son extrémité aval a été curée et reconnectée à la lône de la Platière. Puis, en 2014, le reste du linéaire (~750 m en amont de la zone initialement restaurée) a été remis en eau par curage de manière à créer une succession de mares phréatiques.

L'extrémité aval de la lône, pour laquelle nous ne disposons pas d'état pré-restauration, fonctionne clairement comme un piège à sédiment après travaux (« Ilon 2004 », Figure 6). D'importants dépôts de sédiments relativement fins (généralement limons moyens), issus du reflux du vieux-Rhône dans la lône via la lône de la Platière, sont enregistrés depuis les premiers relevés en 2007. Les derniers relevés (2018) confirment que les vitesses de sédimentation tendent progressivement à ralentir.

Avant travaux (« Ilon 2014 », Figure 6), les sections amont et centrale de l'Ilon présentait un état de comblement avancé. Les dépôts étaient limoneux (limons moyens à grossiers) sur la majorité du linéaire, et localement sableux (sables moyens) sur l'extrémité amont du bras. Les relevés successifs montrent que la trajectoire de cette section était globalement stable. Le lit de cette section de la lône a enregistré un léger décapage entre les campagnes de 2012 et de 2013. Après travaux, les épaisseurs de fines restent globalement assez faibles et stables entre les deux campagnes disponibles actuellement. Un décapage subtil est également perceptible (décelable sur la valeur maximale et la moyenne) entre les campagnes de 2017 et 2018.

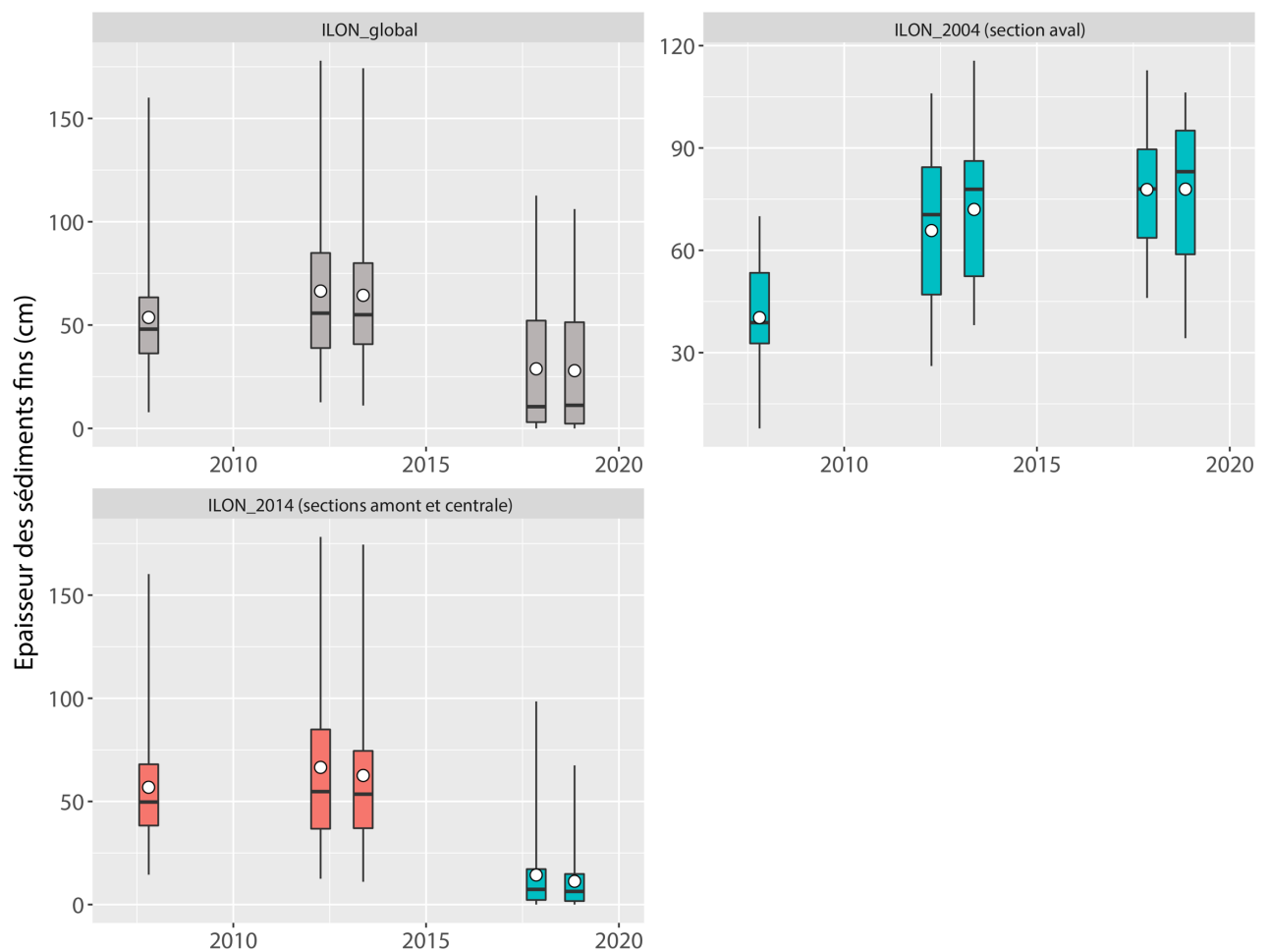


Figure 6 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées dans la lône de l'Ilon (aval du système Platière). Les données observées à l'échelle de l'ensemble du bras, sans distinction des différentes phases de restauration, sont affichées en gris. Les sous-sections ayant fait l'objet de travaux de restauration (en 2004 pour l'extrémité aval et en 2014 pour le reste de la lône) sont également dissociées. Les données avant travaux sont représentées en rouge et les relevés après travaux en bleu. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

Avant travaux, la lône de la Boussarde était très cloisonnée. La lône principale se trouvait alors segmentée en deux parties distinctes : (i) la section amont, connectée en quasi-permanence au vieux-

Rhône par l'amont et déconnectée à l'aval par une traverse, (ii) et la section aval, connectée en permanence à l'aval avec le vieux-Rhône et dont la connectivité amont était contrôlée par l'ouvrage transversal. Avant travaux, de 2009 à 2013, la lône présentait une tendance à se combler progressivement (Figure 7). Les dépôts étaient essentiellement constitués de limons grossiers (section amont) et de sables très fins à fins (section aval). Depuis la restauration, cette trajectoire initiale est inversée : les épaisseurs de fines accumulées en fond de bras tendent à diminuer et la granulométrie des dépôts est devenue beaucoup plus sableuse (sables moyens et grossiers). Ainsi, les travaux (réouverture du bras associé au démantèlement de la digue transversale implantée en partie centrale de la lône) semblent avoir permis d'améliorer la capacité d'auto-entretien de la lône principale. Cette trajectoire sera à confirmer lors des prochains relevés. Une ancienne portion de la lône de la Boussarde (« branche nord ») a également été suivie. Avant travaux, elle se trouvait totalement isolée par des digues et présentait d'importants dépôts de limons grossiers. Lors des travaux de restauration, cette branche a été reconnectée par l'aval à la lône principale. Sans surprise, la réouverture de l'extrémité aval de la branche nord a renforcé les retours d'eau et donc l'importance des dépôts de fines (Figure 7).

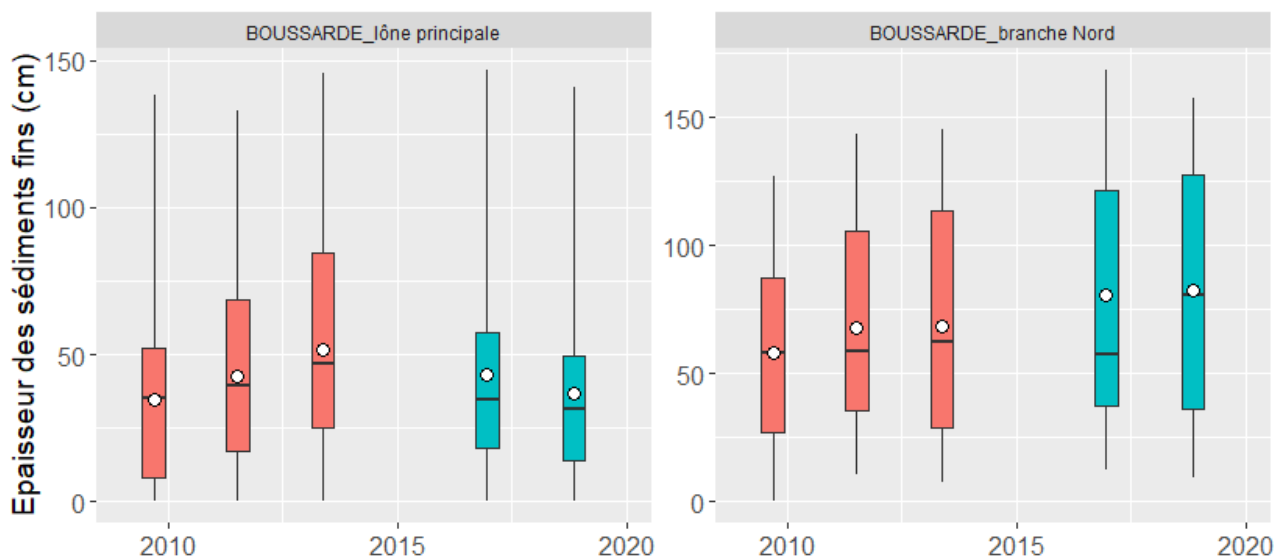


Figure 7 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans la lône de la Boussarde. Nos relevés permettent de dissocier deux sous-ensembles : la lône principale et la branche nord de la lône (cf. texte). Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

Avant restauration, la lône de la Sainte se trouvait complètement atterrie et présentait une tendance à la poursuite de son comblement (Figure 8). Les dépôts étaient essentiellement limoneux avec quelques patchs localisés de sables très fins à fins. Au printemps 2013, lors de la fin des travaux, le bouchon amont de la lône (qui n'avait pas été modifié par la restauration) a été arasé à la suite d'une

crue (comm. CNR). Un décapage de la partie amont et centrale du bras avait été également observé à cette occasion. Après travaux, les observations réalisées à l'échelle de l'ensemble du bras, montre que l'épaisseur des dépôts est globalement stable pour l'instant. L'ensemble de la lône a été décapée entre les relevés de 2016 et de 2017 (Figure 8). La terminaison aval du bras (section curée et reconnectée) fonctionne clairement comme un piège à sédiment : les épaisseurs de fines sont beaucoup plus importantes et la capacité de rajeunissement semble limitée. Un recul plus conséquent est nécessaire pour confirmer ces observations. Enfin, on notera également que la lône se déconnecte du Rhône au niveau de son extrémité aval lors des étiages.

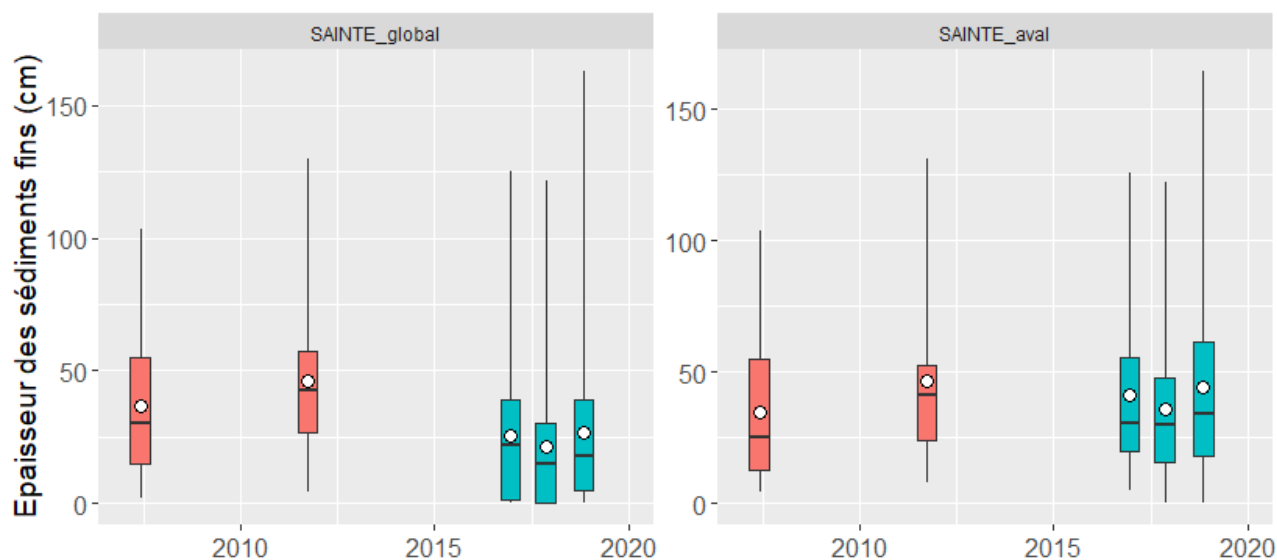


Figure 8 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans la lône de la Sainte. Le graphique de gauche présente les résultats acquis sur l'ensemble du bras. Le graphique de droite focalise sur les 200 derniers mètres à l'aval du bras (plus sensibles à la sédimentation fine). Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

Le Péage-de-Roussillon est le secteur de l'aval de Lyon pour lequel les suivis des assemblages d'invertébrés aquatiques des lônes sont les plus longs (2007 – 2017, Figure 9). Les suivis post-restauration demeurent cependant limités à deux années pour l'ensemble des sites, à l'exception de la lône de la Sainte pour laquelle nous disposons de quatre campagnes de suivi postérieures à 2012.

Les métriques de richesse (insectes EPT et mollusques gastéropodes, Figure 9) indiquent des communautés faiblement à moyennement riches. C'est la lône de la Platière qui montre les richesses maximales, associées à sa grande diversité d'habitats et de végétation aquatique. Les valeurs observées dans ce chenal lotique n'atteignent cependant pas celles observées dans des chenaux de même type sur le Haut-Rhône. Ni pour la Boussarde, ni pour le « système Platière », la restauration n'entraîne de changements notables, que ce soit en termes de composition des communautés, ou du point de vue des métriques de richesse. Le changement le plus important est observé pour la lône de

la Sainte où le curage et la reconnexion aval transforment une communauté de milieu peu profond, à la limite du temporaire en un assemblage d'espèces de milieux semi-lotiques à lotiques (*Valvata piscinalis*, *Ancylus fluviatilis*), largement dominé par des espèces exogènes (Figure 10). D'une manière générale, les lînes du secteur sont remarquables par la prégnance des espèces exogènes (Figure 9) qui représentent fréquemment près des trois quarts des assemblages en nombres d'individus. Les valeurs observées sont plus élevées pour l'ensemble des lînes rhodaniennes suivies. L'augmentation globale de ces espèces est indépendante de la restauration, comme le montre par exemple la tendance observée depuis le début du suivi dans la Platière, le Noyer Nord ou la Boussarde (Figure 9), même si localement la reconnexion de certaines lînes peut entraîner une croissance immédiate de ces espèces dans le milieu restauré (cas le lîne de la Sainte, Figures 9 et 10).

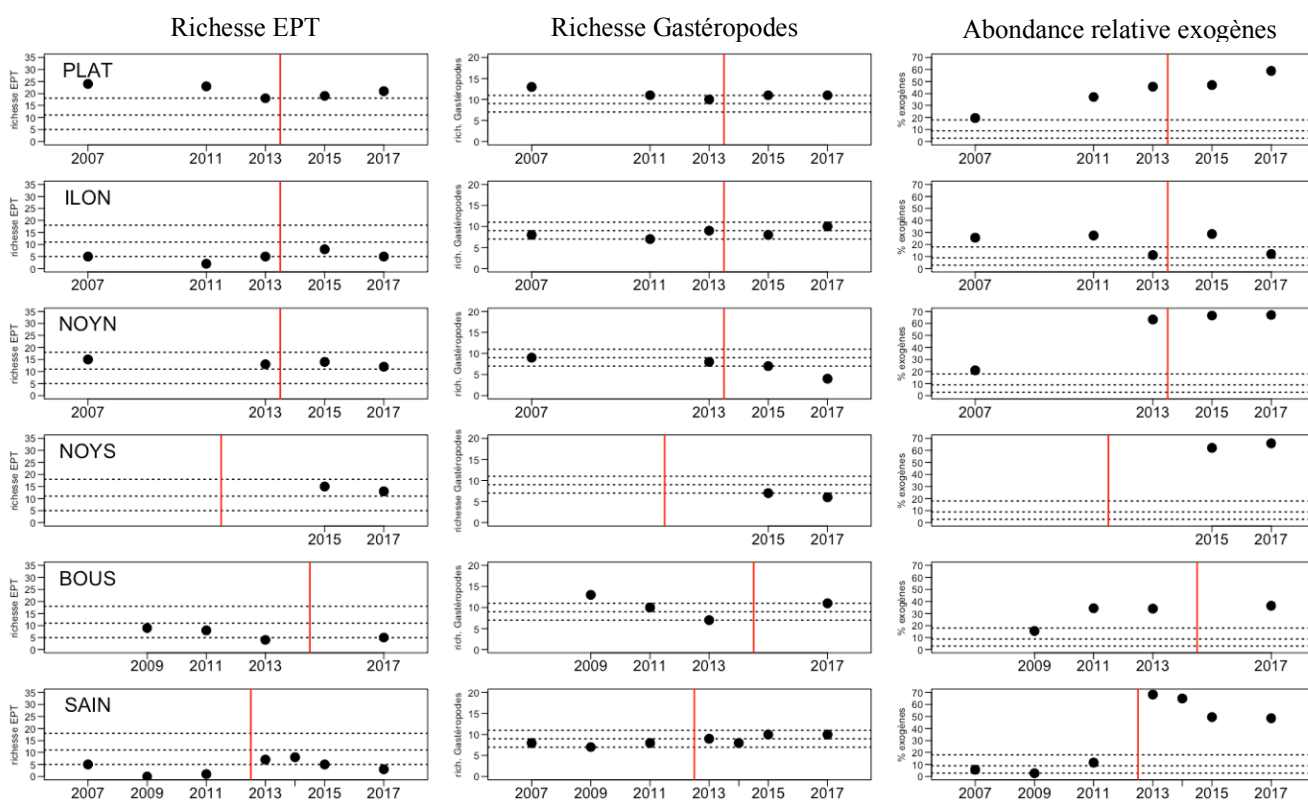


Figure 9 - Variations temporelles de trois métriques faunistiques dans les 6 lînes suivies à Péage-de-Roussillon de 2007 à 2017. La ligne verticale rouge indique la restauration pour la lîne considérée. Les lignes horizontales tiretées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 lînes étudiées de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

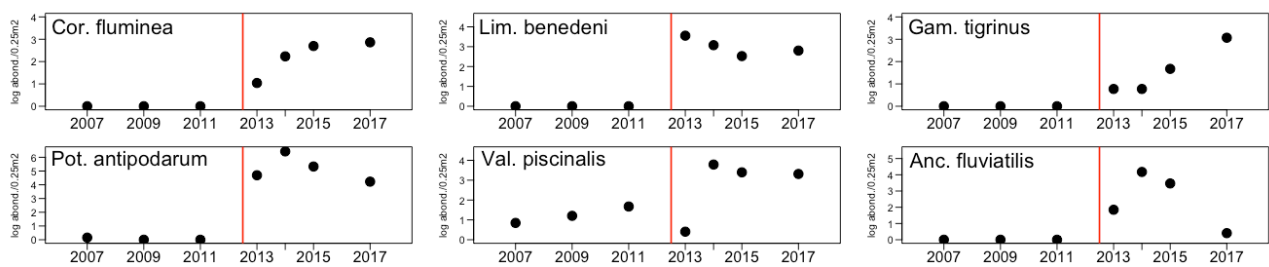


Figure 10 - Variations temporelles de l'abondance de six espèces de crustacés (*L. benedeni*, *G. tigrinus*) et de mollusques (*C. fluminea*, *P. antipodarum*, *V. piscinalis*, *A. fluviatilis*) dans la lône de la Sainte de 2007 à 2017. Les quatre premières espèces mentionnées sont exogènes. La ligne verticale rouge indique la restauration de la lône

La lône de la Platière, la lône du Noyer Nord, la lône du Noyer Sud et la lône de l'Ilon forment un ensemble de bras courants connectés et offrant à la faune piscicole une diversité d'habitats très riche : herbiers courants, rives diversifiées avec de nombreux abris et embâcles, radiers peu profonds, zone d'écoulement sur substrat nu, zone profondes lenticules etc... La lône de l'Ilon, située dans la partie aval de ce système est au contraire fermée à l'amont, très stagnante, colonisée par une végétation très dense établie sur un substrat limoneux. Ce système de lônes de l'Île de la Platière abrite l'ensemble des espèces trouvées dans le vieux-Rhône, excepté le blageon (échantillonné 1 fois dans le vieux-Rhône). Pour un effort d'échantillonnage identique, les effectifs échantillonnés sont parfois identiques à ceux du vieux-Rhône, quelquefois supérieurs, ce qui témoignent de la forte densité de poissons dans ces lônes. Les espèces dominantes sont le gardon, l'ablette, le goujon et le chevaine. Les chenaux étroits et relativement courants de ce système de lônes, en particuliers les deux lônes Noyer Nord et Noyer Sud offrent des habitats particulièrement attractifs pour les classes de tailles intermédiaires (10-35 cm) des deux espèces de grands cyprinidés rhéophiles appartenant à la guildes des poissons d'eau courante, le hotu et le barbeau fluviatile. Ces habitats semblent jouer un rôle complémentaire à ceux du vieux-Rhône où sont échantillonnés préférentiellement les juvéniles de l'année et les adultes de grandes tailles (Figures 11 et 12). Dans la lône de l'Ilon, deux espèces sont très abondantes, la bouvière (en moyenne 32% des effectifs échantillonnés) et le pseudorasbora (25%).

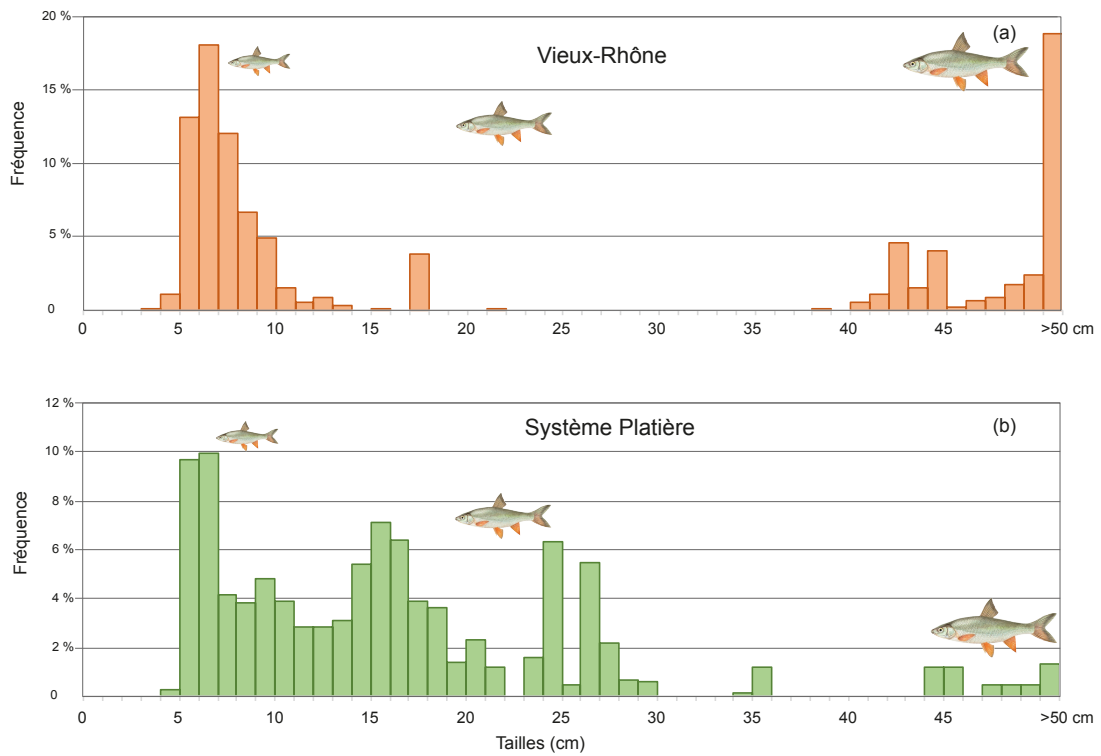


Figure 11 – Distribution en classes de tailles de 1 cm des hotus échantillonnés de 2007 à 2019 (fréquence moyenne calculée pour les poissons échantillonnés annuellement dans le vieux-Rhône et dans le système de lônes de la Platière).

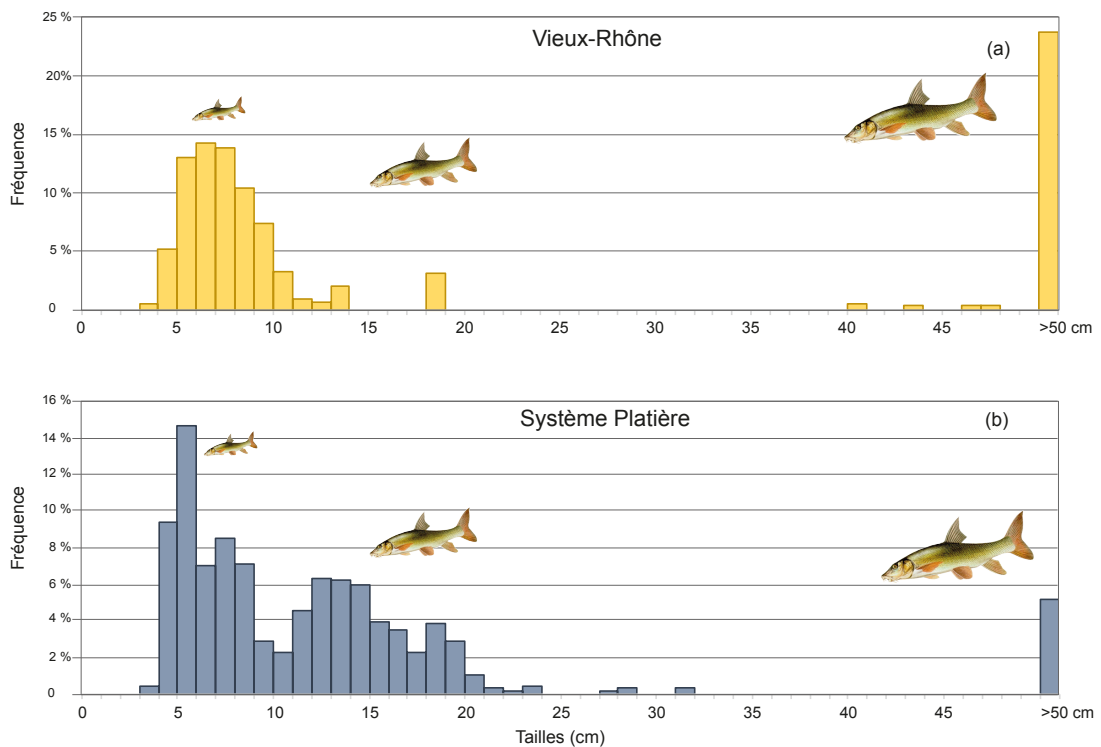


Figure 12 - Distribution en classes de tailles de 1 cm des barbeaux fluviatiles échantillonnés de 2007 à 2019 (fréquence moyenne calculée pour les poissons échantillonnés annuellement dans le vieux-Rhône et dans le système de lônes de la Platière).

Avant restauration, le cloisonnement par les endiguements Girardon de la lône de la Boussarde lui conférait un caractère lentique très marqué, la bouvière (54% des effectifs) et le pseudorasbora (22%) étaient les deux espèces les plus fréquentes dans les échantillons. Après démantèlement des digues, cette lône a été transformée en un chenal secondaire abritant les espèces trouvées dans le vieux-Rhône avec des proportions voisines. La lône de la Sainte, ouverte en aval, communique avec le Rhône lorsque que le débit est suffisamment élevé, elle abrite alors les espèces présentes dans le Rhône en aval de la restitution. L'échantillonnage a été arrêté en 2016 pour cause d'impossibilité d'accès lors des étiages automnaux sévères et prolongés.

Potentiel d'évolution du site : pistes

L'ampleur des travaux de restauration (augmentation du débit réservé, réhabilitation des lônes et démantèlement des marges alluviales) a été très importante. Compte-tenu du contexte local (régime thermique relativement chaud, héritage des aménagements anciens, industrialisation du secteur) le fond faunistique aquatique a été relativement appauvri. Ce tronçon du Rhône est cependant un des secteurs où les abondances de poissons échantillonnés restent parmi les plus élevées. La connexion avec le bassin de la Saône a favorisé l'arrivée de taxons exogènes. Il est très probable que l'ensemble des actions de réhabilitation réalisées auront des effets bénéfiques sur les biocénoses du secteur, mais la mesure de ces effets nécessitera certainement encore quelques années. En particulier, concernant les communautés d'invertébrés, les effets de l'augmentation de la fréquence de connexion au Rhône du complexe de la Platière ou de la Boussarde ne pourront vraisemblablement être mis en évidence que sur une durée plus longue. Cette question est du même ordre que celle qui se pose dans le secteur de Donzère dans le cas du complexe des lônes Surelle – Malaubert – Dion.

Références :

Straka, M., & Špaček, J. (2009) First record of alien crustaceans *Atyaephyra desmarestii* (Millet, 1831) and *Jaera istri* (Veuille, 1979) from the Czech Republic. *Aquatic Invasions*, 4(2): 397-399.

Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 8 km de long dont ~2,5 courants, comportant de nombreux radiers et de nombreuses lônes, la Payre rejoint le Vieux-Rhône en rive droite dans sa partie amont (Figure 1). Le secteur est fortement marqué par les aménagements Girardon.

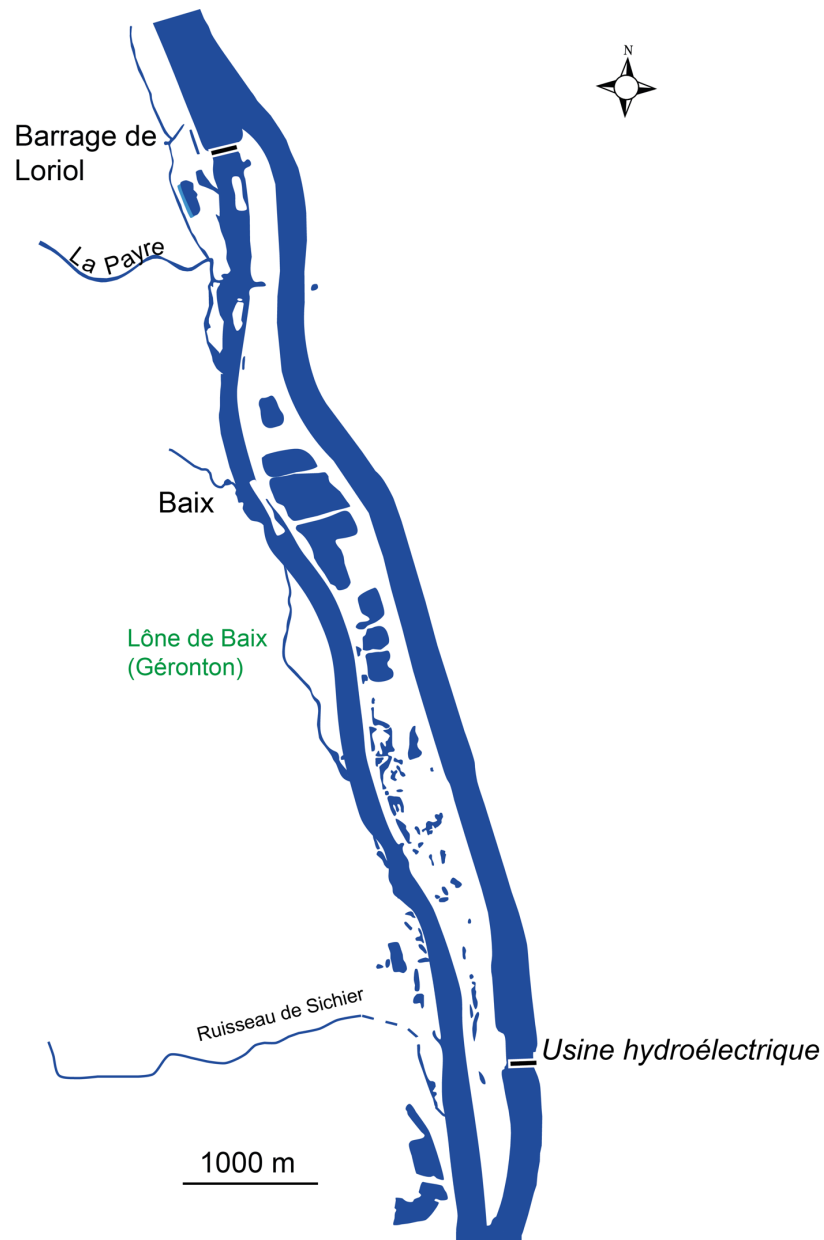


Figure 1 – Secteur de Baix le Logis Neuf

La restauration

La valeur du débit réservé a été modifiée au 1^{er} janvier 2014 et fixée au 1/20^{ème} du module.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2014 ($m^3.s^{-1}$)	10			20			10					
Vitesse ($m.s^{-1}$)	0,12			0,20			0,12					
Débit minimum >2014 ($m^3.s^{-1}$)	73											
Vitesse ($m.s^{-1}$)	0,48											

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

L'augmentation de débit réservé a été conséquente et les modifications hydrauliques associées sont surtout marquées dans la partie amont du Vieux-Rhône (en amont de Baix-Le-Logis-Neuf). Cette partie du chenal est marquée par une forte érosion des sédiments (graviers et galets) et la présence de grandes surfaces où l'écoulement se fait sur la roche-mère. Ce déficit de sédiments grossiers dans le chenal réduit les surfaces d'habitats de qualité pour les macro-invertébrés benthiques et les frayères pour les espèces de poissons lithophiles. Avant 2014, le peuplement de poissons était largement dominé par le vairon (abondance relative moyenne 37%) et le chevaine (11%). Les espèces d'eau courante étaient échantillonnées régulièrement mais dans des proportions relativement faibles (ablette 9%, hotu 5% et barbeau fluviatile 3%). Après augmentation du débit réservé, l'abondance relative des espèces d'eau courante a augmenté à partir de 2015 (Figure 2) et c'est essentiellement l'augmentation des effectifs d'ablettes (abondance relative moyenne sur la période 2014-2019 = 24%) qui est responsable de ce changement (Figure 3).

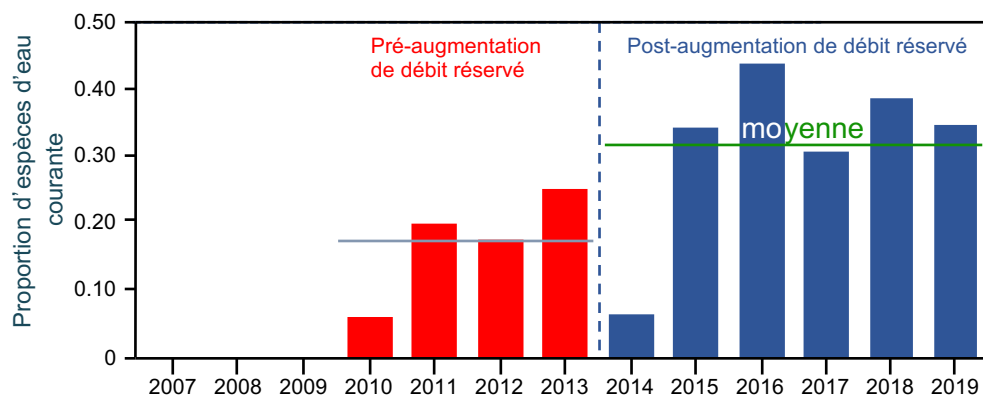


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Baix-Le-Logis-Neuf sur la période 2010-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). Les deux lignes horizontales représentent les valeurs de la moyenne sur les 2 périodes, pré et post-restauration.

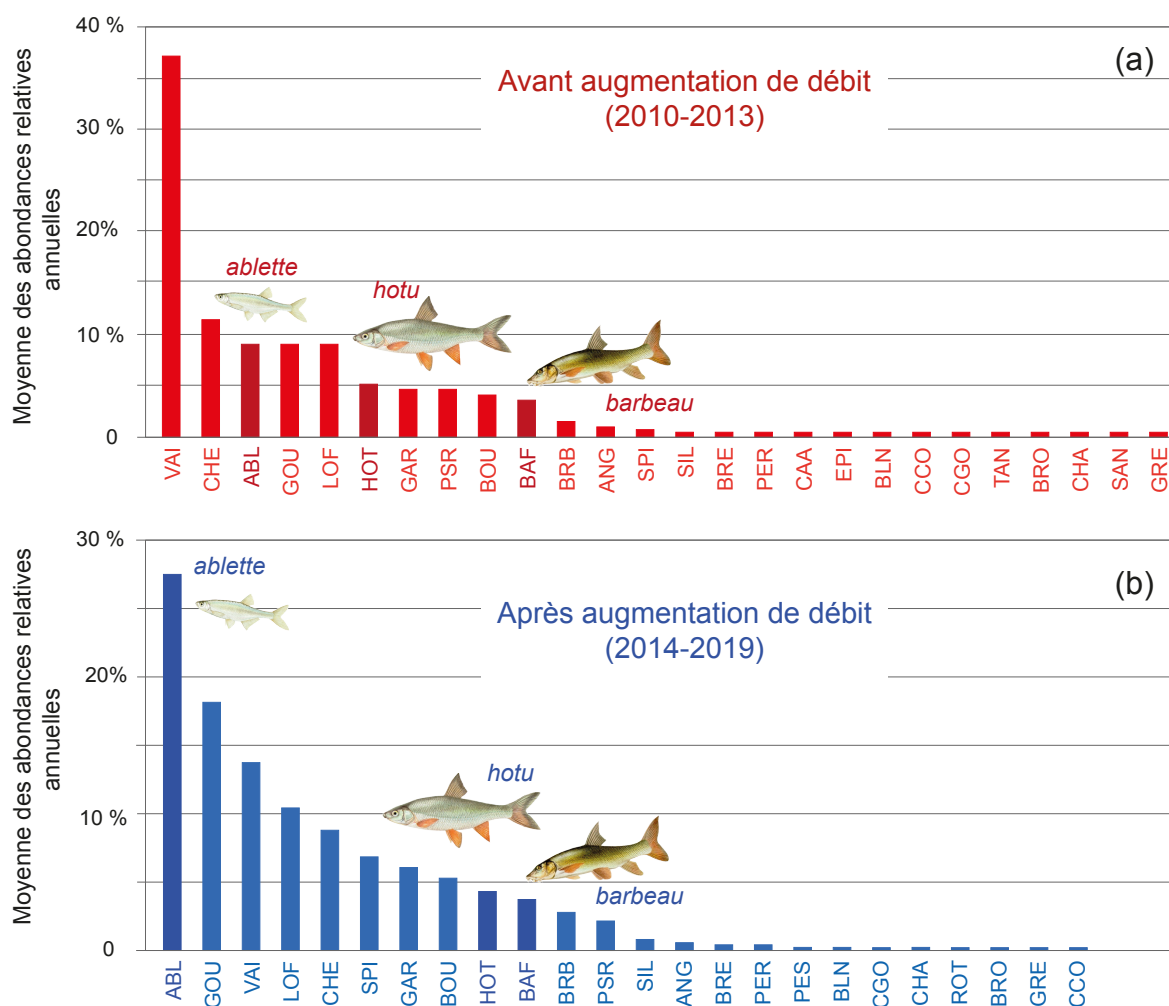


Figure 3 – Moyenne des abondances relatives annuelles des espèces échantillonnées dans le vieux-Rhône avant (a) et après (b) modification du débit réservé. Les couleurs plus foncées identifient les espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante.

Avant 2014, la communauté de macroinvertébrés benthiques était largement dominée par les diptères Chironomidae, le mollusque rhéophile *Ancylus fluviatilis* et des espèces exogènes (*Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus*, ...). Contrairement aux attentes, la proportion de taxons rhéophiles n'a pas augmenté après modification du débit réservé et a même diminué en 2017 (Figure 4). Cette diminution est essentiellement portée par les diptères Orthocladinae (-27 %), dont l'abondance importante masque la forte augmentation de l'abondance de plusieurs autres taxons (*Ancylus fluviatilis*, *Hydropsyche exocellata*, *Cheumatopsyche lepida*, *Esolus spp.*, ...).

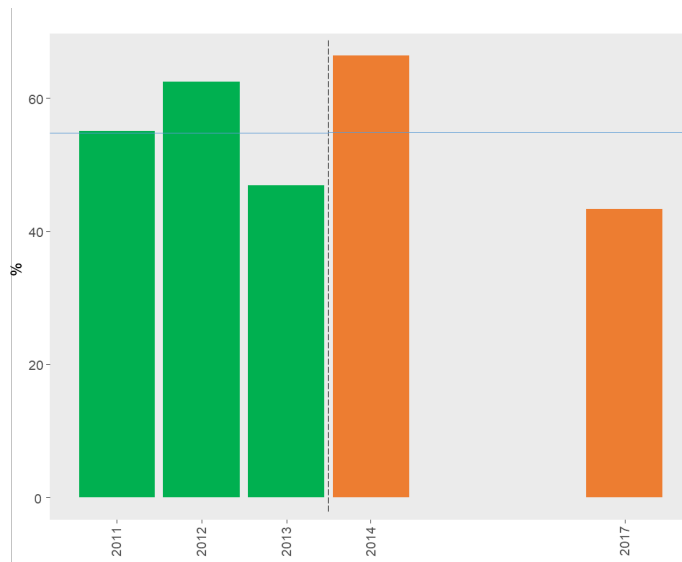


Figure 4 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep).

Dix-sept espèces exogènes ont été recensées dans le Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf représentant une proportion de 36 % de la communauté en 2017. Ce sont les crustacés *Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus* et le mollusque *Potamopyrgus antipodarum* qui représentent la grande majorité des individus exogènes dénombrés dans ce secteur. L'interaction de *Jaera istri* avec le reste de la communauté est peu connue mais des impacts négatifs ne sont pas à exclure (Straka et Špaček, 2009) principalement à cause des très fortes densités qu'elle peut atteindre (~ 8 200 indiv.m⁻² à Baix-le-Logis-Neuf). En revanche, *Dikerogammarus villosus* est une espèce impactant fortement la faune locale par ses capacités compétitrices très fortes (Bollache *et al.*, 2004 ; MacNeil & Platvoet, 2005 ; Dessaix & Fruget, 2014).

Potentiel d'évolution du site : pistes

Des projets de démantèlement des marges alluviales, de réhabilitation de lônes et de réalimentation du secteur amont du Vieux-Rhône en substrat grossier sont en cours d'élaboration. Si ces projets aboutissent, la qualité des habitats benthiques du secteur courant du Vieux-Rhône devrait être fortement améliorée ainsi que la disponibilité d'habitats de reproduction pour les espèces de cyprinidés lithophiles (barbeau, hotu, spirilin etc...). La réhabilitation et la reconnexion de lônes devrait augmenter la diversité des habitats au sein de cette plaine alluviale fortement contrainte par les endiguements du 19^{ème} siècle.

Références :

- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- Dessaix, J., & Fruget, J. F. (2014) Evolution sur le long terme des peuplements de Crustacés du Rhône. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 4(1), 43-49.
- MacNeil, C., & Platvoet, D. (2005) The predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* on native *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda); influences of differential microdistribution and food resources. *Journal of Zoology*, 267(1): 31-38.
- Straka, M., & Špaček, J. (2009) First record of alien crustaceans *Atyaephyra desmarestii* (Millet, 1831) and *Jaera istri* (Veuille, 1979) from the Czech Republic. *Aquatic Invasions*, 4(2): 397-399.

Secteur de Montélimar

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 13 km de long dont ~7 courants, comportant de nombreux radiers et de nombreuses lônes, le Roubion rejoint le Vieux-Rhône en rive gauche (Figure 1). Le secteur est fortement marqué par les aménagements Girardon.

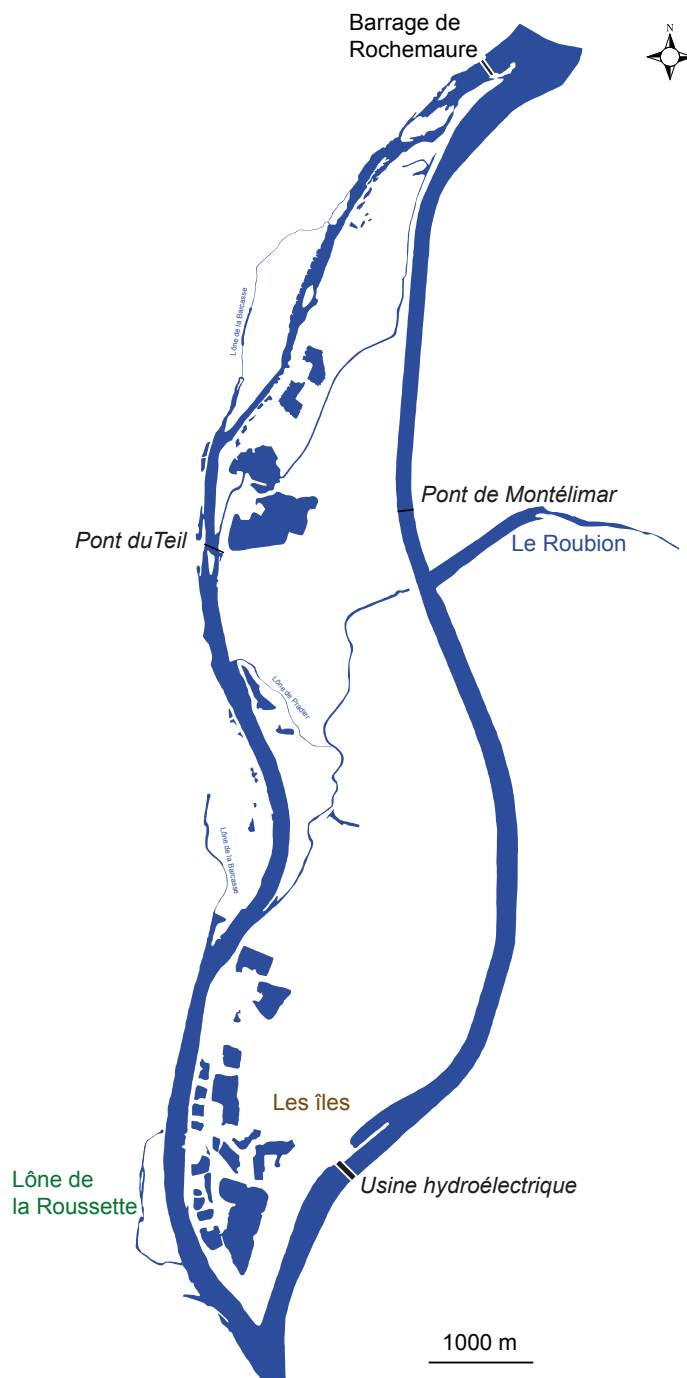


Figure 1 – Secteur de Montélimar

La restauration

La valeur du débit réservé a été modifiée au 1^{er} janvier 2014 et fixée au 1/20^{ème} du module.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2014 ($m^3.s^{-1}$)	15 à 60 suivant le débit du Rhône											
Vitesse ($m.s^{-1}$)	0,14 à 0,35											
Débit minimum >2014 ($m^3.s^{-1}$)	75											
Vitesse ($m.s^{-1}$)	0,40											

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

Le débit réservé n'a été que très peu augmenté début 2014. L'amplitude des changements hydrauliques associés à cette modification de la valeur du débit minimum est donc mineure. En conséquence, les effets potentiels de cette augmentation de débit réservé sur le peuplement de poissons ne sont donc pas perceptibles, même 5 ans après (Figure 2). Les valeurs moyennes des proportions d'espèces d'eau courante sont similaires pour les deux périodes pré et post augmentation de débit réservé (Figure 2), l'ablette est l'espèce qui contribue le plus à ces valeurs élevées bien que les abondances relatives de barbeau fluviatile et de hotu soient relativement élevées (respectivement 8% (2006-2013) et 4% (période 2014-2019) pour le barbeau et 7% et 5% pour le hotu) (Figure 3). Les valeurs plus élevées en 2016 et 2017 sont dues essentiellement, comme dans les autres secteurs, à un très bon succès de reproduction de l'ablette.

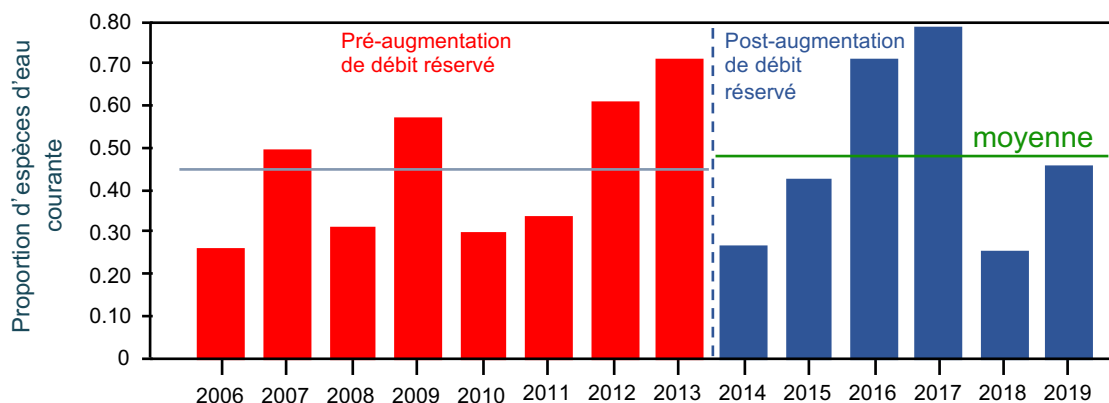


Figure 2 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Montélimar sur la période 2006-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). Les deux lignes horizontales représentent les valeurs de la moyenne sur les 2 périodes, pré et post-restauration.

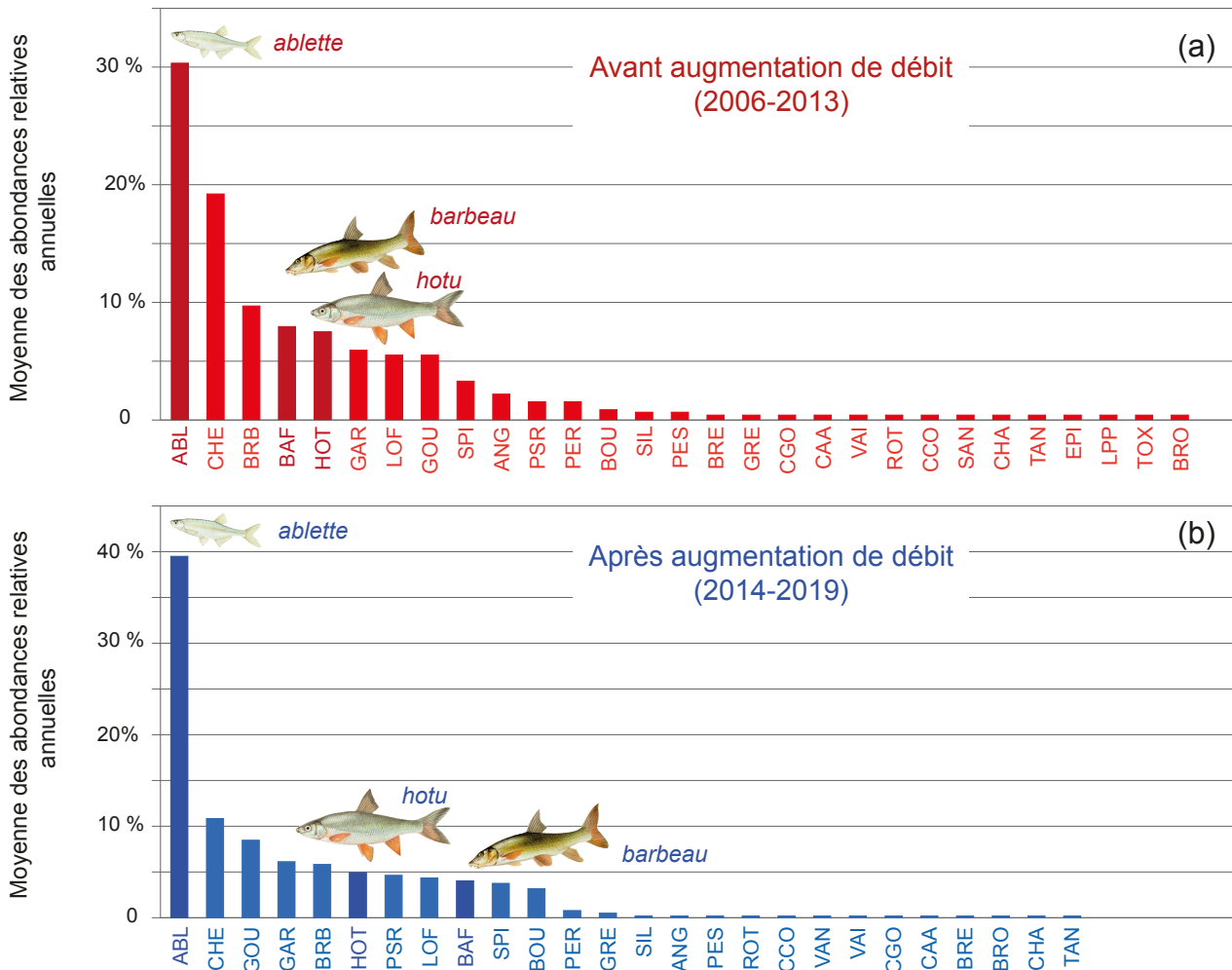


Figure 3 – Moyenne des abondances relatives annuelles des espèces échantillonnées dans le vieux-Rhône avant (a) et après (b) modification du débit réservé. Les couleurs plus foncées identifient les espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante.

Avant 2014, la communauté de macroinvertébrés benthiques était largement dominée par les diptères Chironomidae, certains taxons rhéophiles (*Ancyclus fluviatilis*, *Hydropsyche* juvéniles, Simuliidae) et des espèces exogènes (*Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus*, ...) mais également par le trichoptère potamique *Psychomyia pusilla*. Globalement et contrairement aux attentes, la proportion de taxons rhéophiles n'a pas évolué après restauration. Seules les données issues des campagnes d'échantillonnage réalisées en 2014 sont actuellement disponibles. Néanmoins, ce secteur possède un grand nombre de radiers et la proportion de taxons rhéophiles était initialement très importante (70%). L'abondance de nombreux taxons rhéophiles, dont les abondances relatives restent assez faibles, a augmenté (*Oulimnius*, *Esolus*, *Oligoneuriella rhenana*, *Leuctra*, *Baetis rhodani*, ...). Inversement, la proportion de certains taxons lenitophiles a diminué drastiquement (*Pisciola geometra*, *Erpobdella* spp., *Micronecta* spp., ...).

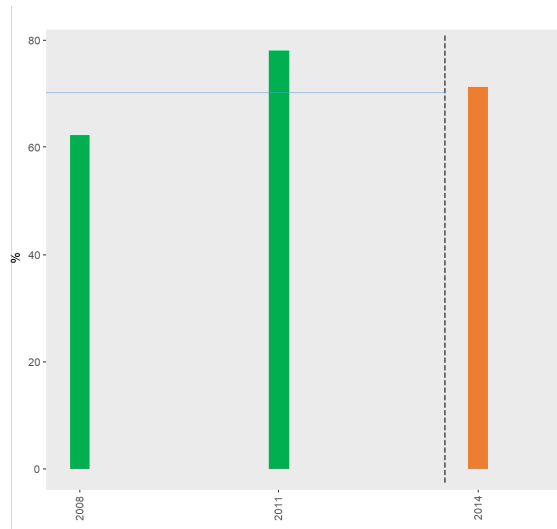


Figure 4 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep).

Avec 16 espèces exogènes recensées représentant une proportion de 33 % de la communauté en 2014, le nombre d'espèces non-natives du secteur de Montélimar se place dans la moyenne mesurée sur le bas Rhône (18 espèces). Ce sont les crustacés *Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus* et le polychaetes *Hypania invalida* qui représentent la grande majorité des espèces exogènes recensées dans ce secteur. L'interaction de *Jaera istri* avec le reste de la communauté est peu connue mais des impacts négatifs ne sont pas à exclure (Straka et Špaček, 2009) principalement à cause des très fortes densités qu'elle peut atteindre ($\sim 9\ 300$ indiv.m⁻²). En revanche, *Dikerogammarus villosus* est une espèce impactant fortement la faune locale par ses capacités compétitrices très fortes (Bollache *et al.*, 2004 ; MacNeil & Platvoet, 2005 ; Dessaix & Fruget, 2014). Enfin, l'impact d'*Hypania invalida* sur la communauté semble négligeable, en effet cette espèce semble avoir un fort pouvoir colonisateur mais un pouvoir compétiteur assez faible (Devin *et al.*, 2006).

Réhabilitation des lônes

La lône de la Rousette a été restaurée entre fin 2011 et début 2013. Le bouchon amont de la lône a été préservé sur un linéaire d'environ 200 mètres (de l'extrémité amont au passage à gué, secteur 1). La section suivante (~ 600 m, secteur 2) a été recreusée lors de l'hiver 2011-2012 et la troisième (~ 440 m, secteur 3) l'a été lors de l'hiver 2012-2013. Le tiers aval de la lône (~ 530 mètres, section 4) a été préservé et n'a pas fait l'objet d'intervention.

D'un point de vue hydromorphologique, la lône de la Rousette fonctionne essentiellement comme un décanteur. Si les dépôts sont sableux sur l'extrémité amont de la lône, les limons moyens à grossiers sont majoritaires sur le reste du linéaire. A l'échelle de l'ensemble du bras, les travaux ont permis de réduire l'épaisseur médiane des fines d'environ 70 cm (Figure 5). Toutefois, étant donné

que la connectivité de la lône avec le vieux-Rhône n'a pas été modifiée, le bras a conservé les caractéristiques hydro-sédimentaires d'avant-travaux. Ainsi, la lône reste sensible au reflux et fonctionne comme un piège à sédiment : de 2013 à 2019 l'épaisseur médiane de fines a quasiment doublé (d'environ 52 cm à 99 cm, soit +47 cm). L'essentiel de la sédimentation observée se réalise dans les sections restaurées. La partie amont du secteur 2 est en voie d'atterrissement. Lors des relevés de juillet 2019, les 530 premiers mètres du bras étaient atterrés. En aval de cette zone exondée, l'eau était présente sur l'ensemble du linéaire avec une hauteur d'eau médiane de 85 cm (min. = 6 cm ; max. = 294 cm).

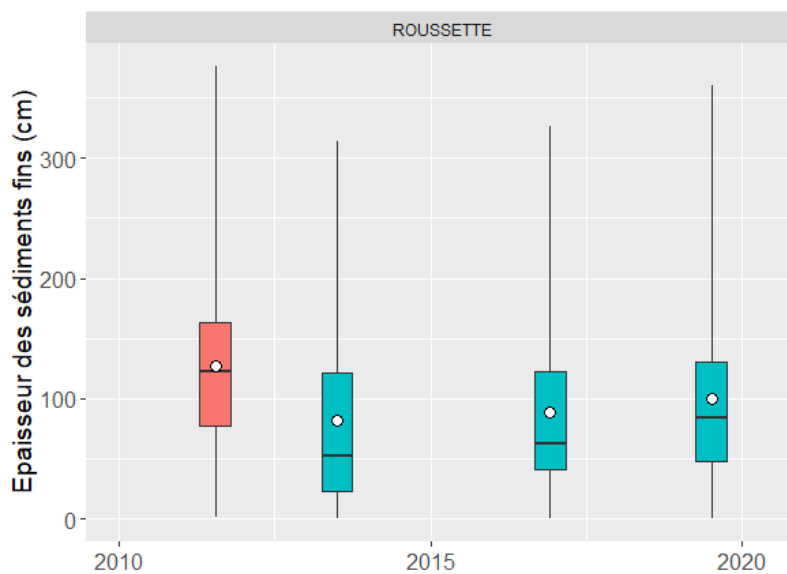


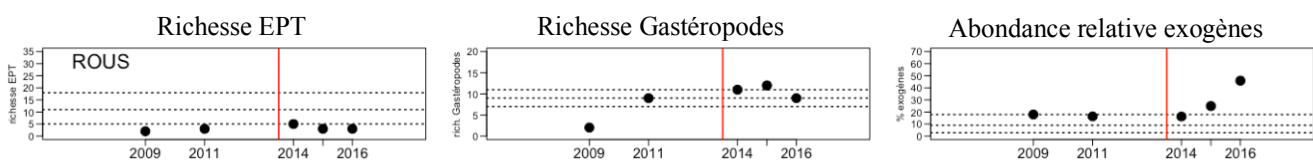
Figure 5 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans la lône de la Roussette. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

La lône de la Roussette est la seule lône du secteur de Montélimar ayant été suivie pour les peuplements d'invertébrés. Nous disposons de deux campagnes pré-restauration (2009 et 2011), puis de trois après la restauration (2014, 2015, 2016). Deux stations très contrastées ont été suivies sur la lône, une station amont, temporaire avant restauration, qui correspond au secteur ayant été recreusé, et une station aval permanente mais peu profonde, qui n'a pas été directement modifiée lors de la restauration.

Avant restauration, le système dans son ensemble montre une communauté assez pauvre, en particulier concernant les insectes EPT (Figure 6), pour lesquels seulement 4 taxons ont été recensés lors de deux campagnes. A l'époque du suivi, les densités des crustacés exogènes *Crangonyx pseudogracilis* (à l'amont) et *Gammarus roeseli* (à l'aval), sont les plus élevées pour ces deux espèces

dans l'ensemble des lônes rhodaniennes suivies. Après restauration, la création à l'amont de la lône d'un plan d'eau permanent localement bien ensoleillé, a entraîné une augmentation de la richesse taxonomique totale de la lône (moins de 43 taxons par campagne avant restauration, contre plus de 52 après). Cette augmentation est en particulier le fait des odonates connus pour être des colonisateurs actifs de plans d'eau ensoleillés (12 taxons après restauration, contre 4 avant) et des gastéropodes (13 taxons après restauration, contre 9 avant). Toutefois, les insectes EPT ne progressent que très peu (Figure 6) avec seulement 6 taxons après restauration pour 4 avant. Il est vraisemblable que la crue du printemps 2015 qui a causé le dépôt à l'amont de la lône d'une épaisse couche de sédiment fin, ainsi que les conditions d'isolement et de surchauffe du plan d'eau en été, puissent entraîner des conditions très défavorables aux insectes exigeants vis-à-vis des conditions d'oxygénation (cas des éphéméroptères *Baetis*, *Caenis horaria* et *C. luctuosa* dont l'installation avait été notée en 2014). Après restauration, la croissance rapide des espèces exogènes est proche de ce qui a été observé dans la lône de la Sainte au Péage-de-Roussillon (Figure 6), avec l'apparition de *Potamopyrgus antipodarum*, *Gyraulus parvus* et *Limnomysis benedeni*).

Figure 6 - Variations temporelles de trois métriques faunistiques dans la lône de la Roussette de 2009 à 2016. La ligne verticale rouge indique la période de restauration. Les lignes horizontales tiretées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 lônes étudiées de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.



médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 lônes étudiées de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

Potentiel d'évolution du site : pistes

Le suivi des communautés d'invertébrés de la lône de la Roussette montre clairement qu'un gain plus important pourrait être atteint par la restauration si les conditions de sédimentation fine et de stagnation estivale du plan d'eau amont étaient réduites. Si elles s'avèrent réalistes du point de vue hydro-morphologique, l'augmentation de la fréquence de connexion amont et la reconnexion aval de la lône semblent recommandables.

Références :

- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- Dessaix, J., & Fruget, J. F. (2014) Evolution sur le long terme des peuplements de Crustacés du Rhône. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 4(1), 43-49.
- Devin, S., Akopian, M., Fruget, J. F., Di Michelle, A., & Beisel, J. N. (2006) Premières observations écologiques dans les hydrosystèmes français du polychète d'eau douce *Hypania invalida* introduit en Europe occidentale. *Vie et milieu*, 56(3) : 6.
- MacNeil, C., & Platvoet, D. (2005) The predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* on native *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda); influences of differential microdistribution and food resources. *Journal of Zoology*, 267(1): 31-38.
- Straka, M., & Špaček, J. (2009) First record of alien crustaceans *Atyaephyra desmarestii* (Millet, 1831) and *Jaera istri* (Veuille, 1979) from the Czech Republic. *Aquatic Invasions*, 4(2): 397-399.

Secteur de Donzère-Mondragon

Le Vieux-Rhône

Section court-circuitée de 29 km de long dont ~19 courants, comportant de nombreux radiers et de nombreuses lônes, l'Ardèche conflue avec le Rhône en amont de Pont-Saint-Espirit (Figure 1). Le secteur est fortement marqué par les aménagements Girardon.

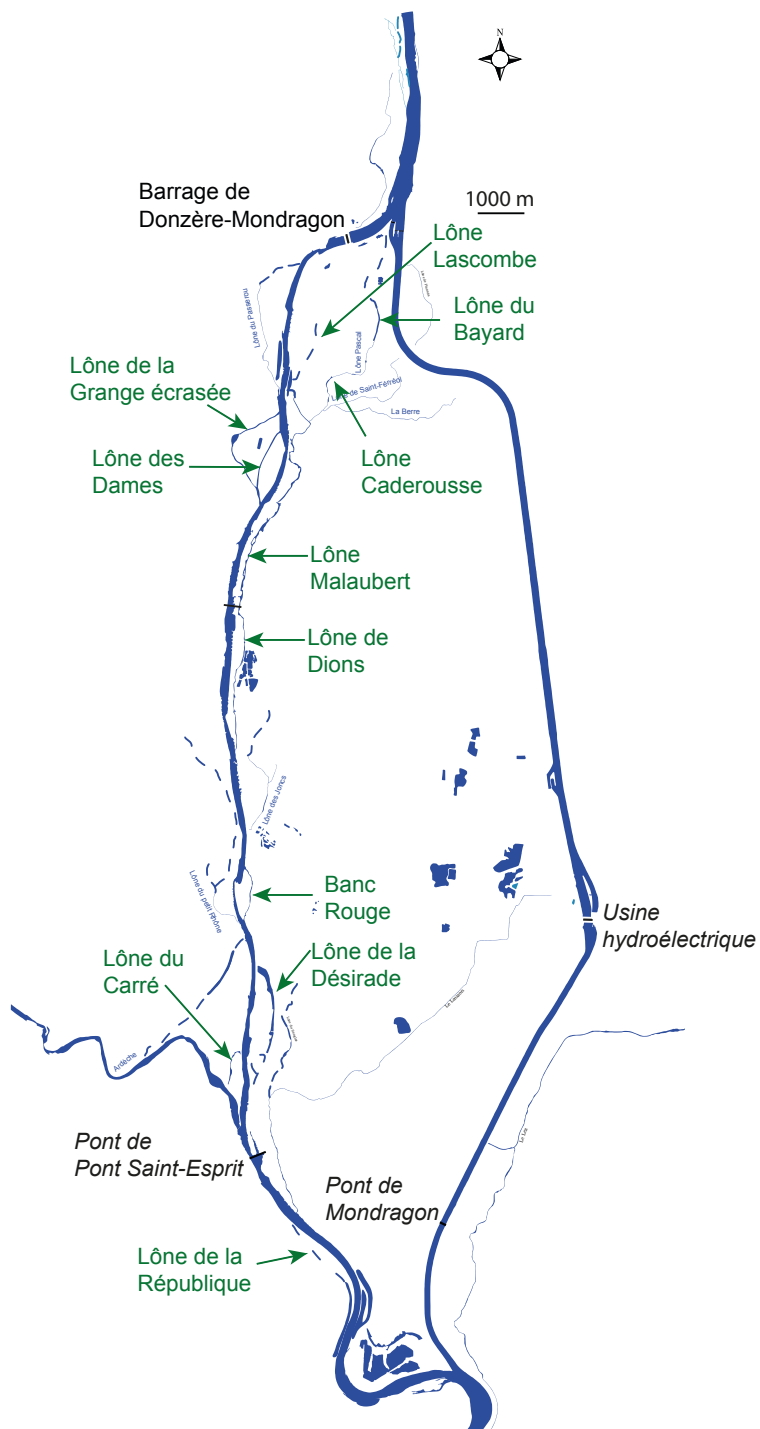


Figure 1 – Secteur de Donzère - Mondragon

La restauration

La valeur du débit réservé a été modifiée au 1^{er} janvier 2014 et fixée au 1/20^{ème} du module.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aôut	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit minimum <2014 ($m^3.s^{-1}$)							60					
Vitesse ($m.s^{-1}$)							0,44					
Débit minimum >2014 ($m^3.s^{-1}$)							75,4					
Vitesse ($m.s^{-1}$)							0,50					

Les priorités de restauration des marges alluviales et des lônes ont été présentées en mars 2015 dans le dossier d'avant-projet de « réhabilitation des lônes et des marges alluviales du Vieux-Rhône de Donzère Mondragon comprises entre les casiers de l'Aure et la lône de Dions » élaboré par la CNR (notice descriptive 15-0034a). Le projet concernait 3 secteurs :

- les casiers de l'Aure, les lônes de Lascombe et de la Surelle, ainsi que les marges alluviales aux abords des lônes de Malaubert et de Dions (29 casiers),
- les lônes de la Grange Ecrasée et des Dames, ainsi que les casiers d'entonnement,
- les lônes du Banc Rouge et de la Désirade.

Les travaux sur les deux premiers secteurs et le Banc Rouge (Figure 2) ont été réalisés entre 2017 et 2019. La lône de la Désirade sera restaurée ultérieurement.



Figure 2 – Le bras du Banc Rouge avant (2017) et après (2019) les travaux de réhabilitation.

Le secteur de Donzère a été très impacté par les travaux d'endiguement « Girardon » de telle sorte que la plupart des îles sont artificiellement séparées du chenal du Vieux-Rhône par les digues des casiers, ce qui leur confère des modalités de fonctionnement hydrologique particulières. Dans ce contexte, les opérations de réhabilitation ont pour objectif de démanteler les anciennes digues afin de promouvoir la remobilisation des sédiments accumulés derrière ces digues au fil du temps et de réhabiliter la connectivité hydrologique au sein de la plaine alluviale. Ces endiguements du 19^{ème} siècle et l'arrêt du transit de la charge de fond suite à la construction des barrages hydroélectriques ont provoqué une incision importante du lit mineur conduisant, sur certaines parties du cours, à un écoulement directement sur la roche mère. Le démantèlement des marges alluviales, associé à des opérations de recharge sédimentaire locales, a pour objectif de réhabiliter les processus d'érosion-transport et dépôt des sédiments grossiers (graviers-galets notamment) afin de recharger les secteurs déficitaires et de promouvoir les habitats nécessaires à l'accueil d'une faune caractéristique des chenaux courants du Rhône (faune macroinvertébrée et piscicole).

Effets de la restauration

Augmentation de débit réservé

Le débit réservé n'a été que très peu augmenté début 2014. L'amplitude des changements hydrauliques associés à cette modification de la valeur du débit minimum est donc mineure. En conséquence, les effets potentiels de cette augmentation de débit réservé sur le peuplement de poissons ne sont donc pas perceptibles, même 5 ans après (Figure 3). Une très grande partie du tronçon court-circuité (au moins jusqu'à Pont Saint-Esprit) est constituée de biefs courants avec des alternances de radiers et de mouilles propices aux espèces rhéophiles et notamment aux populations de la guildes de espèces d'eau courante (ablette, barbeau fluviatile et hotu) mais aussi à la loche franche, au spirilin et au goujon (Figure 4). Les abondances des espèces d'eau courante représentaient déjà une forte proportion des poissons échantillonnés avant janvier 2014 (~50% en moyenne sur la période 2008-2013). Cette abondance relative des poissons d'eau courante est restée élevée après 2014 (en moyenne 44%) malgré une diminution de la proportion de barbeaux fluviatiles et de hotus dans les échantillons, non compensée par l'augmentation importante de la proportion d'ablettes.

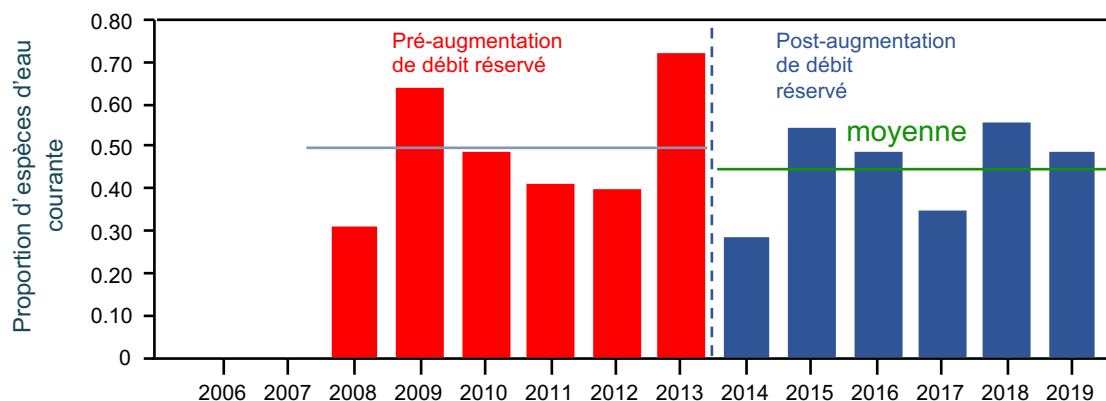


Figure 3 - Evolution de la proportion d'espèces d'eau courante dans le Vieux-Rhône de Donzère sur la période 2008-2019 (la ligne pointillée verticale marque la date de changement de débit réservé). Les deux lignes horizontales représentent les valeurs de la moyenne sur les 2 périodes, pré et post-restauration.

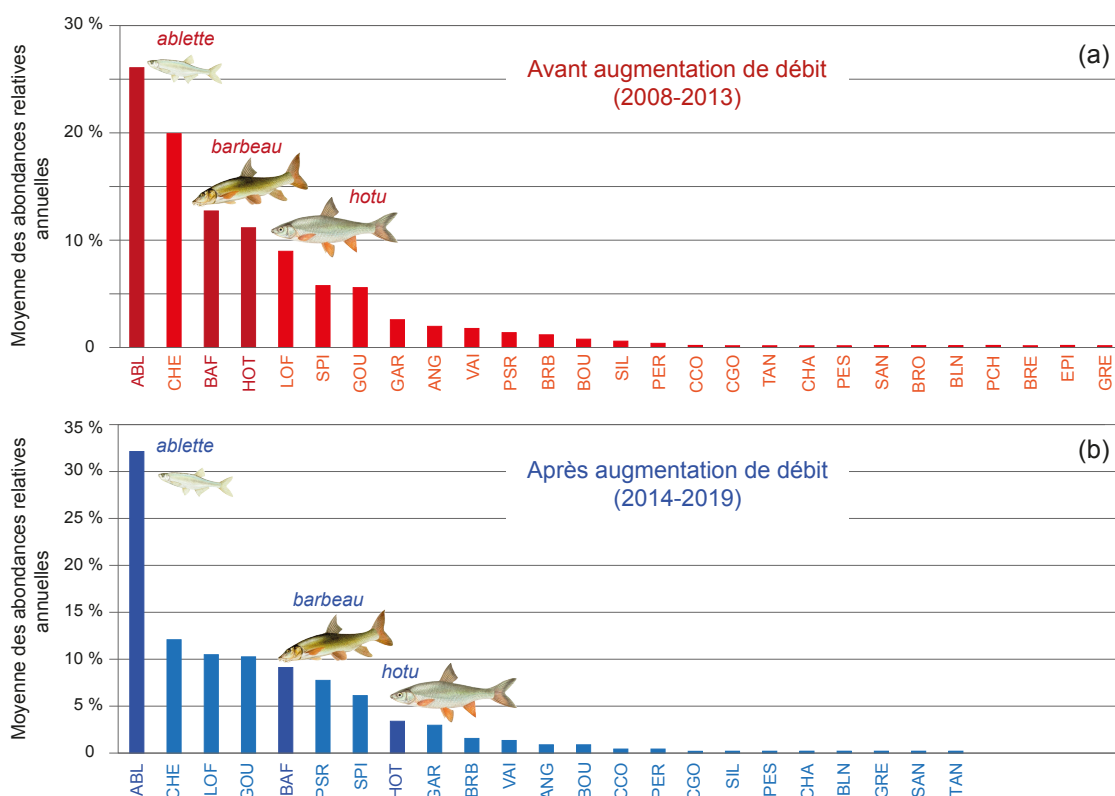


Figure 4 – Moyenne des abondances relatives annuelles des espèces échantillonnées dans le vieux-Rhône avant (a) et après (b) modification du débit réservé. Les couleurs plus foncées identifient les espèces appartenant à la guildes des espèces d'eau courante.

Avant 2014, la communauté était initialement largement dominée par les diptères Chironomidae, certains taxons rhéophiles (*Ancylus fluviatilis*, *Baetis fuscatus*, *Hydropsyche* juvéniles, Simuliidae) et des espèces exogènes (*Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus*, ...) mais également par le trichoptère

potamique *Psychomyia pusilla*. Globalement et contrairement aux attentes, la proportion de taxons rhéophiles n'a pas évolué après restauration (Figure 5). Seules les données issues des campagnes d'échantillonnage réalisées en 2014 sont actuellement disponibles. Néanmoins, ce secteur possède un grand nombre de radiers et, à l'instar du secteur de Montélimar, la proportion de taxons rhéophiles était initialement très importante (74%). De nombreux taxons rhéophiles, avec des abondances relatives assez faibles, sont toutefois en forte augmentation (*Cheumatopsyche lepida*, *Heptagenia* spp., *Leuctra geniculata*, *Heptagenia sulphurea*, ...). Inversement, la proportion de certains taxons lenitophiles a diminué drastiquement (*Helobdella stagnalis*, *Micronecta* spp., *Bithynia tentaculata*, ...).

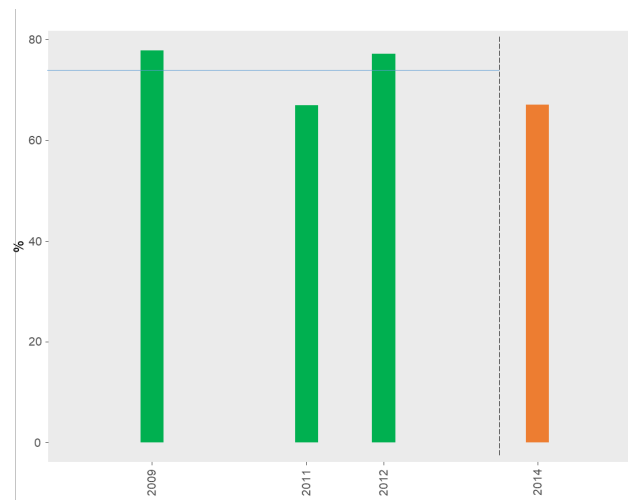


Figure 5 - Evolution de la proportion annuelle des taxons rhéophiles (selon Forcellini et al, in prep).

Avec 18 espèces exogènes recensées représentant une proportion de 16 % de la communauté en 2014, le nombre d'espèces non-natives du vieux-Rhône de Donzère se place dans la moyenne mesurée sur le bas Rhône (18 espèces). Ce sont les crustacés *Jaera istri*, *Dikerogammarus villosus* et le polychaete *Hypania invalida* qui représentent la grande majorité des espèces exogènes recensées dans ce secteur. L'interaction de *Jaera istri* avec le reste de la communauté est peu connue mais des impacts négatifs ne sont pas à exclure (Straka et Špaček, 2009) principalement à cause des très fortes densités qu'elle peut atteindre ($\sim 9\,300$ indiv.m⁻²). En revanche, *Dikerogammarus villosus* est une espèce impactant fortement la faune locale par ses capacités compétitrices très fortes (Bollache et al., 2004 ; MacNeil & Platvoet, 2005 ; Dessaix & Fruget, 2014). Enfin, l'impact d'*Hypania invalida* sur la communauté semble négligeable, en effet cette espèce semble avoir un fort pouvoir colonisateur mais un pouvoir compétiteur assez faible (Devin et al., 2006).

Réhabilitation des lônes

La réhabilitation des lônes du secteur est très récente (2018-2019). Les actions de restauration des lônes Malaubert (et Surelles) et Dions concernent le démantèlement des casiers en bordure du Vieux-Rhône, associé à un abaissement des cotes de débordement du vieux-Rhône dans les lônes pour augmenter la fréquence de débordement des eaux du Rhône dans ces sites. Aucune intervention n'a été réalisée sur les lônes elles-mêmes. La réhabilitation du site du Banc Rouge a consisté en la réouverture d'un bras courant permanent (bras secondaire). Initialement seul un plan d'eau était présent en rive gauche, c'est ce dernier qui a été échantillonné lors des relevés faunistiques. La réhabilitation des lônes de la Grange écrasée et des Dames a été réalisée en 2018-2019 et a consisté à recréer deux bras courants, à partir de la suppression d'ouvrages transversaux et longitudinaux et de curages localisés (Grange écrasée) ou généralisés (Dames, Banc-Rouge). Les ouvrages Girardon qui structurent actuellement le site de la Désirade devraient être démantelés au cours des années à venir. En période de débit réservé, plusieurs plans d'eau peu ou pas connectés sont actuellement en eau.

D'un point de vue hydromorphologique, les travaux réalisés sur les lônes de Surelle, Malaubert et Dions pourraient permettre de favoriser leur capacité de rajeunissement. Ces trois lônes sont situées sur le même linéaire et présentent un fonctionnement hydro-sédimentaire complexe (intégration de la Berre, cheminement des eaux de crue complexe et niveau de connexion multiples avec le vieux-Rhône).

De 2009 à 2013, la lône de la Surelle a eu tendance à accumuler de plus en plus de sédiments fins (Figure 6). Cette trajectoire s'est stabilisée de 2013 à 2016 et semble même être en voie d'inversion depuis 2016 (3 années avant restauration), ce qui semble indiquer que la lône présente une légère capacité de décapage. Ces phénomènes érosifs ne sont pas imputables aux travaux de restauration, mais ils sont plus vraisemblablement liés aux crues qui se sont réalisées entre 2016 et 2019 et notamment celle de janvier 2018 (débit moyen journalier de $2990 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mesuré le 24/01/2018 à Bourg-Saint-Andéol, soit une crue décennale). L'effet de l'augmentation des fréquences de connexion amont de la lône ne pourra être évalué que lors des prochaines campagnes. De 2009 à 2011, Malaubert amont (du confluent Berre/lône au PK 177.650) et Malaubert aval (PK 177.650 au PK 178.550) présentaient toutes deux une certaine stabilité (Figure 6). Les relevés de 2014 et de 2016 mettent en évidence une phase où le comblement du bras par les fines prédominent. Si cet exhaussement est relativement localisé en ce qui concerne la section amont de la lône, il est significatif et généralisé sur Malaubert aval (période 2011-2016). Après travaux, cette tendance

semble se poursuivre sur Malaubert amont (la campagne de suivi de Malaubert aval est prévue courant 2020). Nous ne disposons que d'un état pré-restauration sur la lône de Dions. La comparaison des deux états disponibles met en évidence que cette dernière a enregistré des dépôts de fines non négligeables entre 2016 et 2019. Là encore, il faudra attendre les prochaines campagnes pour évaluer les effets de l'augmentation de la fréquence de connexion amont avec le Rhône (le long du système Surelle, Malaubert, Dions) sur la trajectoire morpho-sédimentaire du bras. Le rôle des apports de la Berre nécessiterait d'être intégré dans cette réflexion.

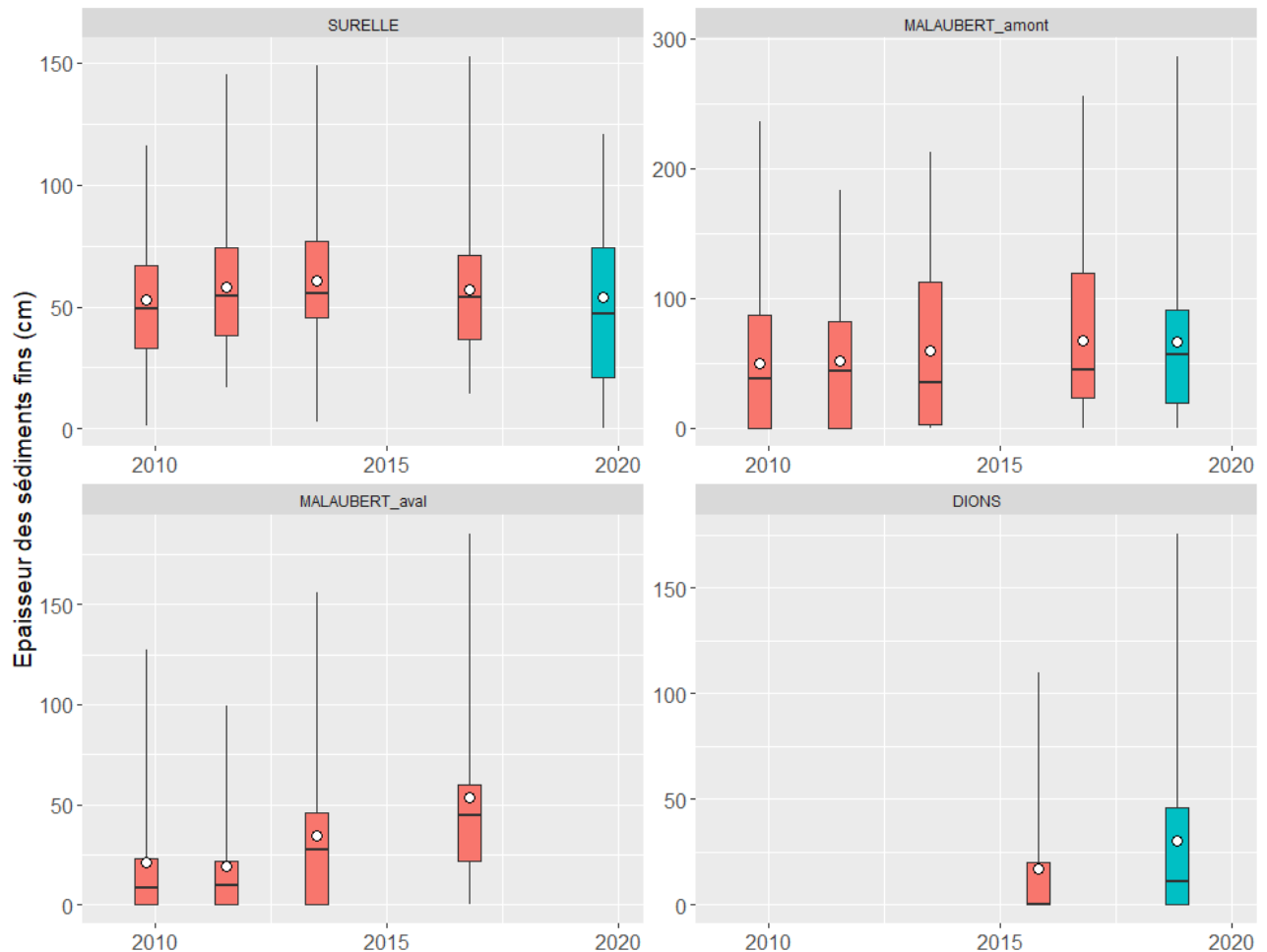


Figure 6 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu) dans les lônes de la Surelle, de Malaubert et de Dions. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

N.B. : En période de crue, la lône de la Malaubert possède différents points de connexion avec le vieux-Rhône. Nous l'avons donc subdivisée en deux parties susceptibles d'avoir des fonctionnements hydro-sédimentaires contrastés. Malaubert aval fera l'objet d'une campagne en 2020.

Avant restauration, les épaisseurs de sédiments fins observées sur la lône de la Grange écrasée restaient globalement faibles et stables dans le temps (Figure 7), à l'exception d'une zone très

localisée (à la suite du dernier passage à gué, situé au 2/3 du linéaire total de la lône) qui, quelle que soit la campagne considérée, contribue pour plus de la moitié de l'ensemble de la sédimentation observée. La première campagne post-restauration réalisée en juillet 2019 ne permet pas de mettre en évidence de changements particuliers du point de vue de la sédimentation fine, hormis une amorce de décapage au sein de la zone de sédimentation préférentielle (diminution de la valeur maximale d'épaisseur en 2019). Les estimations de puissance potentielle des crues transitant dans la lône (contraintes de cisaillement) laissent penser que les événements à venir devraient permettre à la lône d'évacuer l'essentiel des dépôts hérités de la période pré-restauration.



Figure 7 - Evolution des épaisseurs sédimentaires mesurées avant (en rouge) et après travaux (en bleu, 2019) dans les lônes de la Grange écrasée, des Dames et du Banc-Rouge. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

La remise en eau des lônes des Dames et du Banc-Rouge a nécessité d'importants travaux de curage associés à une reconnexion amont-aval au Vieux-Rhône (Figure 8). Les hauteurs d'eau sont globalement plus importantes dans la lône des Dames, mais la variabilité intra-bras des lames d'eau

est plus conséquente dans Banc-Rouge. Après restauration, ces bras ne présentent que très peu d'accumulation de fines (Figure 7). Les gammes de contraintes de cisaillement (i.e. intensité des crues) en fonctionnement courant estimées dans ces 3 bras pour leur état restauré devraient leur permettre de s'auto-entretenir sur le long terme.

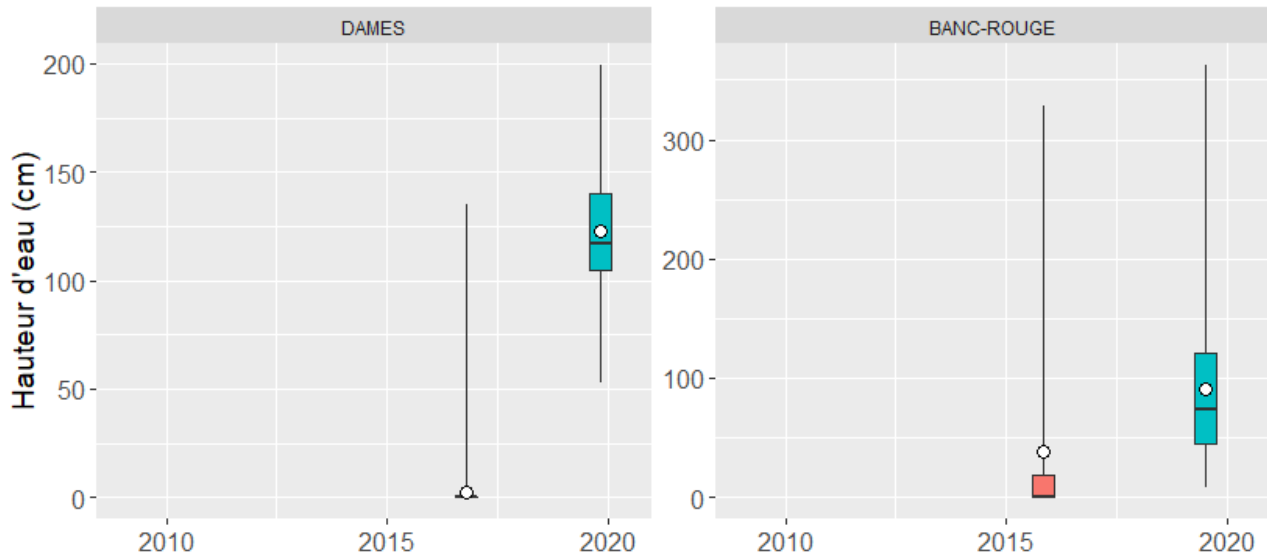


Figure 8 - Evolution des hauteurs d'eau mesurées avant (en rouge, 2016) et après travaux (en bleu, 2019) dans les lômes des Dames et du Banc-Rouge. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs mesurées lors des différentes campagnes. Les extrémités de chaque « boîte » représentent les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles. Les traits noirs horizontaux représentent les valeurs médianes et les points blancs la moyenne. Les « moustaches » (lignes verticales) représentent les valeurs minimales et maximales observées.

Le suivi de l'état initial des assemblages d'invertébrés des lômes du secteur de Donzère a comporté deux phases. De 2009 à 2013, une sélection de huit lômes a été suivie (Grange Ecrasée, Malaubert (incluant la Surelle), Malatras, le Carré, la République, le Bayard, Caderousse, Les Joncs). Après désignation des lômes allant effectivement être restaurées, celles qui n'avaient pas été couvertes dans la phase précédente ont été suivies de 2014 à 2016 (Dames, Dion, Banc Rouge, Désirade, Lascombe). Au total, nous disposons donc d'informations sur l'état initial de 13 lômes du secteur avec généralement trois années de suivi pour chacune. Comme dans le secteur de Brégnier-Cordon, nous disposons donc ici de données pour des sites de référence non restaurés pouvant servir de témoins pour évaluer des changements qui ne seraient pas liés directement aux effets de la restauration.

L'analyse globale des communautés d'invertébrés des lômes du secteur montre la forte singularité du système lotique Malaubert – Dion, qui constitue un affluent d'origine non fluviale caractérisé par des taxons rhéophiles (*Baetis*, *Caenis luctuosa*, *Hydroptila*, Simuliidae, *Onichogomphus forcipatus*) et une très forte composante d'espèces exogènes rhéophiles (*Dikerogammarus villosus* (dans 89% des échantillons), *Jaera istri* (dans 65% des échantillons), *Gammarus tigrinus*). Le reste des sites,

très peu ou pas connectés au Rhône, constitue un ensemble assez homogène du point de vue faunistique, sans singularité à l'échelle de l'ensemble des lônes suivies sur le Rhône.

Les métriques de richesse (Figure 9) pour les lônes allant être restaurées montrent des communautés faiblement à moyennement riches dans le référentiel rhodanien utilisé. La lône des Dames, temporaire, montre logiquement les valeurs les plus faibles. L'importance relative des espèces exogènes dans les communautés est plus faible qu'au Péage-de-Roussillon, mais la tendance à l'augmentation observée dans la lône Dion est très voisine de celle décrite dans la lône de la Platière.

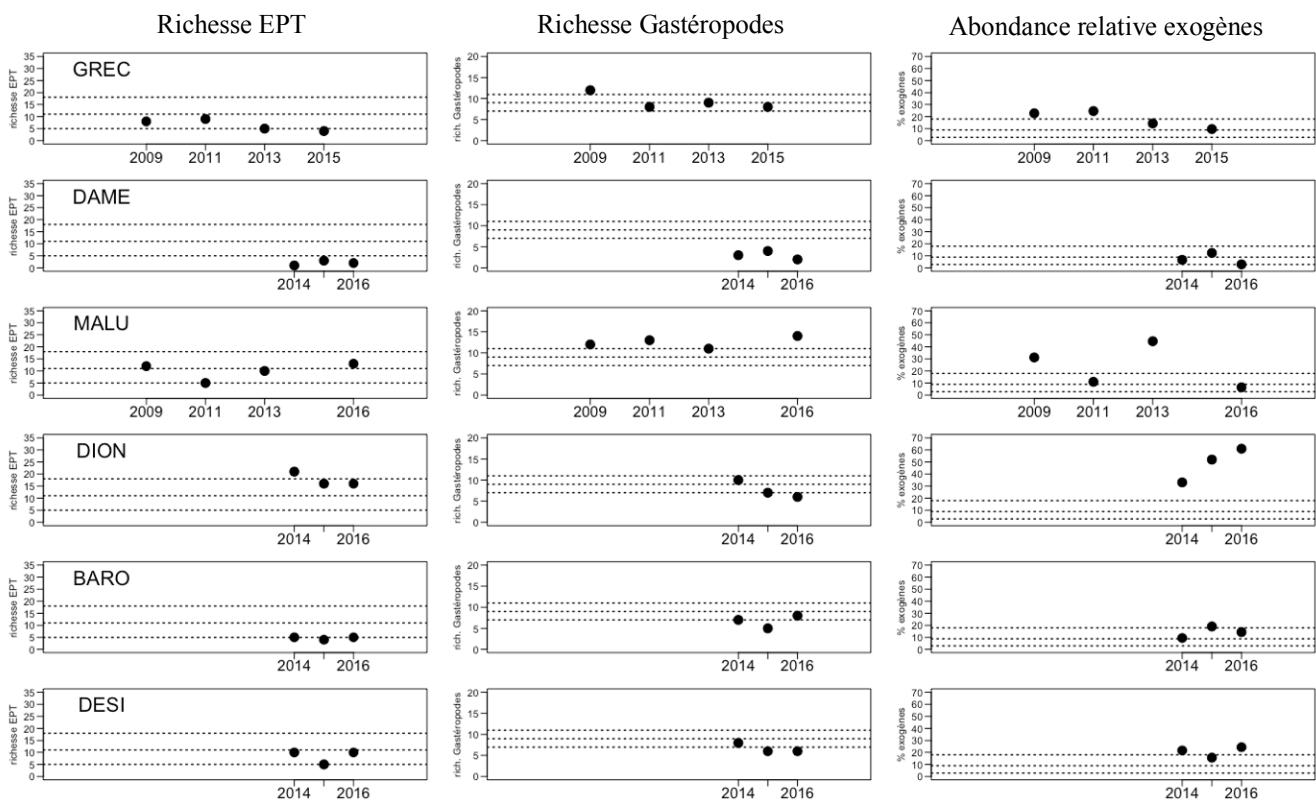


Figure 9 – Etat initial de trois métriques faunistiques dans 6 lônes du secteur de Donzère, suivies de 2009 à 2016 avant leur restauration. Les lignes horizontales tiretées fournissent comme référence la médiane et l'intervalle interquartile des valeurs de la métrique considérée pour les 39 lônes étudiées de 2003 à 2017 sur l'ensemble du Rhône.

Les données piscicoles collectées décrivent l'état des assemblages de poissons avant restauration pour la Grange écrasée, le Banc Rouge et la Désirade. Pour les lônes de Malaubert et Dions, les travaux de restauration n'ayant pas concerné le cours de ces 2 lônes, les données pré et post-restauration ont été agrégées. Ces deux lônes sont des bras courants et les espèces de poissons rencontrées sont majoritairement rhéophiles (chevaine, goujon, spiralin, vairon, loche franche, hotu, barbeau fluviatile) ou eurytopes (gardon, brèmes) ou encore lénitophiles (bouvière, pseudorasbora, perche-soleil) (Figure 10).

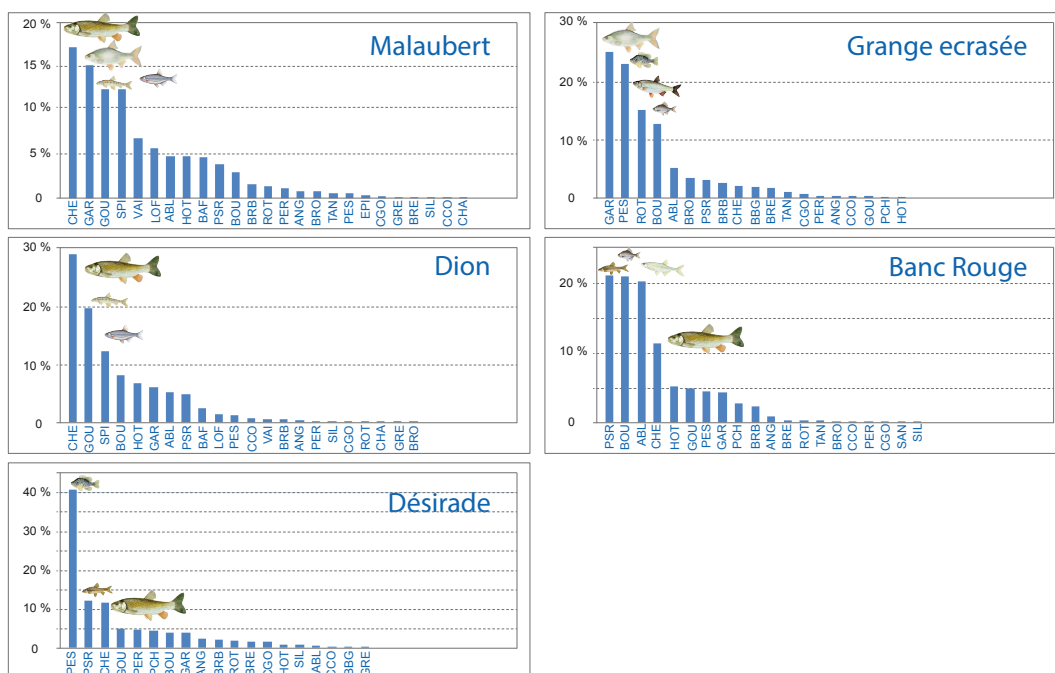


Figure 10 – Abondance relative des différentes espèces dans les 5 lônes suivies du secteur de Donzère (moyenne sur les années échantillonnées, Malaubert 2010-2017, Dion 2015-2017, Grange écrasée 2010-2017, Banc Rouge 2015-2016, Désirade 2016-2017).

Potentiel d'évolution du site : pistes

En ce qui concerne les communautés d'invertébrés des lônes, l'état initial des sites suivis à Donzère de 2009 à 2016 montre des systèmes relativement pauvres, déconnectés du fleuve et sans grande singularité à l'échelle rhodanienne. La diversité des communautés du secteur est due aux apports des affluents traversant la zone alluviale. Il sera donc particulièrement intéressant de suivre la réponse de la diversité faunistique entre lônes (à l'échelle du secteur) aux effets conjoints i) de la recréation de chenaux latéraux lotiques (Grange Ecrasée, Banc Rouge, Désirade) et semi-lotiques (Dames) et ii) de l'augmentation de l'influence fluviale via les arasements de berges sur le système Surelle – Malaubert – Dion. Ce dernier enjeu est par ailleurs commun avec celui du suivi du complexe de la lône de la Platière au Péage-de-Roussillon.

Références :

- Bollache, L., Devin, S., Wattier, R., Chovet, M., Beisel, J. N., Moreteau, J. C., & Rigaud, T. (2004) Rapid range extension of the Ponto-Caspian amphipod *Dikerogammarus villosus* in France: potential consequences. *Archiv für Hydrobiologie*, 160(1): 57-66.
- Dessaix, J., & Fruget, J. F. (2014) Evolution sur le long terme des peuplements de Crustacés du Rhône. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 4(1), 43-49.
- Devin, S., Akopian, M., Fruget, J. F., Di Michelle, A., & Beisel, J. N. (2006) Premières observations écologiques dans les hydrosystèmes français du polychète d'eau douce *Hypania invalida* introduit en Europe occidentale. *Vie et milieu*, 56(3) : 6.
- MacNeil, C., & Platvoet, D. (2005) The predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* on native *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda); influences of differential microdistribution and food resources. *Journal of Zoology*, 267(1): 31-38.
- Straka, M., & Špaček, J. (2009) First record of alien crustaceans *Atyaephyra desmarestii* (Millet, 1831) and *Jaera istri* (Veuille, 1979) from the Czech Republic. *Aquatic Invasions*, 4(2): 397-399.