

ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DEBITS DU RHONE EN PERIODE DE « BASSES EAUX »



**PHASE 4 - DETERMINATION DES CONDITIONS LIMITES DE DEBITS
POUR LES ESPECES**


Document A – Rapport principal



Edition finale - Octobre 2014

L'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux comporte les documents listés ci-dessous. Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Phase 1 - Caractérisation du territoire du fleuve Rhône et Bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles	
A	Rapport principal de phase 1
B	Rapport thématique sur l'irrigation dans le bassin du Rhône
C	Rapport thématique sur les nappes en interaction avec le Rhône
D	Fiche de synthèse sur les ouvrages hydroélectriques situés sur la partie française du bassin du Rhône
E	Fiche de synthèse sur l'hydrologie du Rhône alpestre et l'influence des ouvrages hydrauliques suisses
F	Résumé de la phase 1
Phase 2 - Etude des étiages historiques ; Reconstitution des débits désinfluencés et Evaluation de l'empreinte des influences anthropiques sur les débits du Rhône	
A	Rapport principal de mission 1 : Etude des étiages historiques
B	Rapport principal de mission 2 : Reconstitution des débits désinfluencés et évaluation des empreintes des influences anthropiques sur les débits
C	Rapport thématique Hydrogéologie : Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône
D	Rapport thématique Hydrométrie : Etude critique des débits mesurés aux stations d'étude
E	Résumé de la phase 2
Phase 3 - Détermination des conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité	
A	Rapport principal de phase 3
B	Résumé de la phase 3
C	Impact d'une baisse des débits d'étiage sur la salinisation des hydrosystèmes souterrains en Camargue
D	Impact d'une baisse de débit du fleuve sur les usages préleveurs en nappe alluviale
Phase 4 - Détermination des conditions limites de débits pour les espèces	
A	Rapport principal de phase 4
B	Résumé de la phase 4
Phase 5 - Synthèse des débits limites pouvant être définis dans le Rhône et Approche des volumes prélevables	
A	Rapport principal de phase 5
B	Résumé de la phase 5
Phase 6 - Etude de la sensibilité des étiages du Rhône à des scénarios prospectifs	
A	Rapport principal de phase 6
B	Résumé de la phase 6

	BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5
Sous-traitant	HEPIA (analyses statistiques hydrobiologiques)

Date de création du document	Février 2014
Contact	Sébastien Chazot <u>sebastien.chazot@brl.fr</u>

Titre du document	Phase 4 – Document A : Détermination des conditions limites de débits pour les espèces
Référence du document :	800420_ Ph4_A_Principal
Indice :	VFb

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
12 février 2014	V1		Frédéric Bergé, Manon Jezequel, Franck Cattaneo (HEPIA)	Sébastien Chazot
12 mai 2014	V2		Frédéric Bergé, Manon Jezequel, Franck Cattaneo (HEPIA)	Sébastien Chazot
22 octobre 2014	V3		Frédéric Bergé, Manon Jezequel, Franck Cattaneo (HEPIA)	Sébastien Chazot
Octobre 2014	VFb		Frédéric Bergé, Manon Jezequel, Franck Cattaneo (HEPIA)	Sébastien Chazot

ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DÉBITS DU RHÔNE EN PÉRIODE DE BASSES EAUX

Phase 4 – Document A : Détermination des conditions limites de débits pour les espèces

PRÉAMBULE.....	1
1. DÉMARCHE DE LA PHASE 4.....	3
2. DÉFINITION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	5
3. DESCRIPTION DES ESPÈCES DU RHÔNE.....	7
3.1 Peuplement piscicole au début du XX ^e siècle	7
3.2 Evolution du peuplement jusqu'à aujourd'hui	9
3.3 Enjeux environnementaux liés aux espèces	11
4. FACTEUR HYDROLOGIQUE.....	13
4.1 Hydrologie des basses eaux	13
4.1.1 Rappels des principaux indicateurs	13
4.1.2 Les étiages historiques du Rhône	14
4.1.3 Caractérisation des bas-débits aux six points nodaux	17
4.2 Rappels sur les ouvrages hydrauliques et leur gestion	18
4.3 Variations hydrologiques infra-journalières	21
4.4 Sectorisation et définition des zones sensibles aux variations de débits	29
4.4.1 Eléments de morphologie	29
4.4.2 Impacts des aménagements : définition des zones sensibles aux variations de débits	34
4.5 Incidence de l'hydrologie à l'échelle infra-journalière sur les habitats	40
4.5.1 Pougny	40
4.5.2 Lagnieu	41
4.6 Débits de connexion avec les milieux rivulaires et annexes	42
4.6.1 Secteur de Bugey	42
4.6.2 Secteur d'Arles	44

4.7 Impacts des bas débits pour les grands migrateurs	46
5. FACTEUR THERMIQUE	47
5.1 Comment se fabrique la température du Rhône ?	47
5.2 Comment la température du Rhône évolue-t-elle ?	48
5.2.1 Dans le temps ?	48
5.2.2 Dans l'espace ?	49
5.3 Quelle est l'influence de la température sur les milieux ?	50
6. CORRÉLATION ENTRE BIOLOGIE, HYDROLOGIE ET THERMIE	53
6.1 Synthèse des connaissances sur le Rhône	53
6.2 Méthodologie générale des approches conduites dans le cadre de la présente étude	54
6.3 Bugey	55
6.4 Le Rhône à Péage de Roussillon	56
6.5 Le Rhône à Cruas-Meysse	57
6.6 Le Rhône à Tricastin	58
7. APPROCHE DES BESOINS DES MILIEUX AUX SIX POINTS NODAUX	59
7.1 Principales conclusions	59
7.2 Débits biologiques de survie	59
7.3 Eléments de discussion concernant les débits biologiques	61
ANNEXES	63
Annexe 1 : Analyse des variations infra-journalières sur l'ensemble des débits	65
Annexe 2 : Synthèse des principales études sur le Rhône portant sur les liens poissons-hydrologie-thermie	71
Annexe 3 : Détail de la méthodologie d'analyse	75
Annexe 4 : Croisement Biologie/hydrologie/thermie	81

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Changement du profil transversal du Rhône à la suite des différents travaux de rectification de son cours depuis 1850. A- profil avant les endiguements Girardon ; B- profil un siècle après les premiers aménagements Girardon ; C- profil après aménagements CNR. (in Persat et al., 1995).....	6
Figure 2 : Répartition des aménagements sur le Rhône français (source : le Rhône en 100 questions)	18
Figure 3 : Schéma d'un aménagement "type" sur le Rhône (source : le Rhône en 100 questions)	18
Figure 4 : Courbes de consigne d'exploitation (CNR)	20
Figure 5 : Carte de localisation des barrages sur le Rhône et des six points nodaux	22
Figure 6 : Courbe des débits classés sur le Haut-Rhône à Lagnieu (gauche) et sur le Bas-Rhône à Viviers (droite) pour la période 1920-2011, 2011 et 2012.	23
Figure 7 : Comparaison des variations de débits journalières selon la période de semaine analysée, entre une année sèche et une année humide et entre les différentes stations de l'amont vers l'aval.	24
Figure 8 : Statistiques descriptives des variations infra-journalières (delta_Qj) en fonction des classes de débits journaliers (m ³ /s) en basses eaux en 2011 au droit des six points nodaux	28
Figure 9 : Représentation du profil en long du Rhône français associé aux variables de contrôle : Géologie ; Report des aménagements du Rhône avec identification des retenues, canaux d'amenées et de fuite et biefs assimilés ; Localisation des principaux affluents (ordination associées)	32
Figure 10 : Représentation du profil en long du Rhône associé aux variables susceptibles d'influencer les conditions d'habitabilité : aménagements ; annexes fluviales et la nature des berges	33
Figure 11 : Différence entre Bief et Bief « assimilé »	34
Figure 12 : Exemple de profils en travers dans le canal d'amenée de Montélimar (gauche) et Belley (droite) d'après les données bathymétriques (source : CNR)	35
Figure 13 : Profil en long de la retenue d'Avignon d'après les données bathymétriques et les consignes gestion de l'aménagement (source : CNR)	35
Figure 14 : Profil en long de la retenue d'Avignon d'après les données bathymétriques et la gestion de l'aménagement (source : CNR)	36
Figure 15 : Profil en long de la retenue de Péage-de-Roussillon d'après les données bathymétriques et la gestion de l'aménagement (source : CNR)	37
Figure 16 : Carte des secteurs de Rhône « libre »	39
Figure 17 : Estimation des variations infra-journalières de hauteur d'eau (cm) en fonction du débit journalier (m ³ /s) à partir de la courbe de tarage (hauteur/débit) sur la station de Pougny en 2011.	40
Figure 18 : Estimation des variations infra-journalières de hauteur d'eau (cm) en fonction du débit journalier (m ³ /s) à partir de la courbe de tarage (hauteur/débit) sur la station de Pougny en 2011.	41
Figure 19 : Représentation cartographique des simulations de la profondeur d'eau à 250 m ³ /s et 500 m ³ /s dans le méandre de Marcilleux (amont CNPE Bugey). Une photo d'un banc de galet en rive droite. (source : Capra H. et al., 2010).....	43
Figure 20 : Exemple d'évolution de l'accès aux abris en fonction du débit entre 220 m ³ /s (gauche) et 320 m ³ /s (droite). (source : Capra H. et al., 2010)	43

Figure 21 : Localisation des 14 sites d'étude sur le Bas-Rhône (amont de la confluence avec le Petit Rhône) et tableau de leurs caractéristiques hydrologiques (source : Nicolas Y. & Pont D., 1997)	45
Figure 22 : Évolution de la température moyenne annuelle entre 1977 et 2004 sur les quatre stations du Rhône situées en amont des CNPE, et les trois principaux affluents : Ain, Saône et Isère (source : Etude thermique Rhône).....	48
Figure 23 : Chroniques thermique et hydrologique du Rhône en amont de Bugey et localisation des « gouttes froides ». Période 1977-2004 (Daufresne & Boët, 2005).....	49
Figure 24 : Évolution longitudinale de la température du mois le plus chaud de période de retour 5 ans (TMNA5). Période 1977 à 1999 (Poirel et al., 2001)	49
Figure 25 : Structure taxonomique du peuplement du Rhône à Bugey pour deux périodes distinctes, correspondant au début (1979-1984) et à la fin (2007-2011) de la chronique de suivi piscicole. Les valeurs présentées sont des abondances relatives (%) moyennes sur 5 années.	82
Figure 26 : Classification ascendante hiérarchique sur les espèces (sur les taux de croissance des CPUE, distance 1 – r, agrégation selon la méthode de Ward).	82
Figure 27 : Exemples de relations entre descripteurs du peuplements piscicoles et variables hydrologiques et thermiques indépendamment de la tendance d'évolution à long-terme (les données présentées sont des résidus par rapport au modèle de tendance). Lissage par méthode Lowess, tension 0.5.	83
Figure 28 : Matrice de corrélation de Pearson (n = 25 ou 26) entre variables biologiques (en jaune), et hydrologiques (en bleu) et thermiques (en orange) par saison (HIV = hiver ; REP = reproduction ; CRO = croissance).	84
Figure 29 : Structure moyenne du peuplement de 0+ (16 espèces principales) en fin d'année.	87
Figure 30 : Définition de guildes d'espèces synchrones sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Les deux guildes G1 et G2 se subdivisent elles-mêmes en deux sous-guildes : G1a et G1b, et G2a et G2b. Voir Tableau 9 pour les codes des espèces.....	87
Figure 31 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques ou thermiques saisonnières.	88
Figure 32 : Structure moyenne du peuplement (25 espèces principales) en fin d'année sur l'ensemble du suivi, ainsi qu'au début (période 1983-1987) et à la fin de la chronique (2008-2012).....	92
Figure 33 : Définition de guildes d'espèces synchrones (taux de croissance des populations : $\ln(x_{t+1})-\ln(x_t)$) sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Tableau 12 pour les codes des espèces.	92
Figure 34 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques et thermiques saisonnières.	93
Figure 35 : Structure moyenne du peuplement (18 espèces principales, occurrence > 15%) en fin d'année sur la durée du suivi (1982-2012) pour l'ensemble des sites (Viviers, Canal de Donzère-Mondragon amont et aval CNPE, et Caderousse).....	97
Figure 36 : Définition de guildes d'espèces synchrones (taux de croissance des populations : $\ln(x_{t+1})-\ln(x_t)$) sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Voir Tableau 15 pour les codes des espèces.	97
Figure 37 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques et thermiques saisonnières (lissage par Lowess)	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des espèces de poisson (incluant les espèces estuariennes) présentes dans le bassin du Rhône au début du XX ^e siècle. La présence par grand secteur est détaillée. Nat = native ; Int = introduite ; D = espèce disparue du secteur ; E = espèce endémique (extrait de Bravard et Clémens 2008, chap. 7).....	8
Tableau 2 : Définition des principaux indicateurs hydrologiques de basses eaux (BRLi)	13
Tableau 3 : Identification des mois de l'année impactés par de très bas débits du Rhône, pour les 14 années sèches étudiées dans le cadre de la présente étude (BRLi)	14
Tableau 4 : Identification des principaux affluents déficitaires, contribuant aux épisodes d'étiages du Rhône, pour les 14 années étudiées (BRLi)	15
Tableau 5 : Identifications des facteurs météorologiques prépondérants aux 14 épisodes de basses eaux du Rhône étudiés. On renseigne les points dont les surfaces contributives sont en déficit (de précipitations, neige, etc.) par rapport aux statistiques interannuelles (BRLi)	16
Tableau 6 : Débits caractéristiques d'étiage (influencés) en m ³ /s au droit des six points SDAGE sur le Rhône (calculés sur la période 1980-2011)	17
Tableau 7 : Caractéristiques des 21 aménagements hydroélectriques du Rhône	19
Tableau 8 : Gamme des températures optimales et limite supérieures de la gamme de résistance pour 19 espèces de grands fleuves (source : Tissot & Souchon, 2011)	50
Tableau 9 : Liste des 18 espèces incluses dans l'analyse, avec leurs CPUE (effectif capturé pour 60 minutes de pêche) moyenne, minimum et maximum observées sur les 26 années. Les espèces sont triées par occurrence décroissante.	81
Tableau 10 : Modèles linéaires généralisés sur les résidus (tendance temporelle supprimée) des variables biologiques et environnementales.	85
Tableau 11 : Liste des 16 espèces retenues pour les analyses (pêche postérieure au 15.10 de l'année en cours, individus 0+, occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) moyenne, minimum et maximum.....	86
Tableau 12 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole et variables hydrologiques et thermiques (axes synthétiques d'ACP) par saison.....	89
Tableau 13 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales.....	90
Tableau 14 : Liste des 25 espèces retenues pour les analyses (stations amont + aval CNPE, pêche postérieure au 15.10 de l'année en cours, occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) minimum, moyenne, et maximum.	91
Tableau 15 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole et variables hydrologiques (Q) et thermiques (T ; axes synthétiques d'ACP) par saison.....	94
Tableau 16 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales.....	95
Tableau 17 : Liste des 18 espèces retenues pour les analyses (Viviers, Donzère-Mondragon amont + aval CNPE, Caderousse ; pêche postérieure au 01.09 de l'année en cours ; occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence sur les 31 années de suivi, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) minimum, moyenne, et maximum.....	96
Tableau 18 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole (axes synthétiques d'ACP, abondances des guildes, abondance globale et richesse spécifique) et variables hydrologiques (H) et thermiques (T ; axes synthétiques d'ACP) par saison.....	99
Tableau 19 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales.....	100

PRÉAMBULE

L'Agence de l'Eau RMC a confié à BRLingénierie, associé à Hydrofis et Hepia (sous-traitants), la réalisation de l'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux.

Le Rhône est souvent considéré comme une ressource pléthorique et susceptible de satisfaire de nombreux usages (prélèvements pour l'eau potable, l'industrie ou l'irrigation, production hydroélectrique, refroidissement de centrales nucléaires, navigation, etc.). **On peut cependant s'interroger sur l'évolution de sa capacité à satisfaire, à terme, en périodes d'étiage, tous ces usages, conjointement avec une garantie du bon état des milieux aquatiques associés**, compte tenu de plusieurs paramètres, en particulier :

- ▶ des perspectives d'évolution des usages prélevant dans le fleuve ou sa nappe ;
- ▶ des perspectives de modification de son régime hydrologique et de la température de ses eaux sous l'influence du changement climatique ;
- ▶ une émergence de divers projets de substitution ou de développement de ressource pour amener de l'eau du fleuve (eau superficielle ou nappe) vers des bassins voisins ne disposant pas des ressources suffisantes pour satisfaire leurs besoins (alimentation en eau potable, usage agricole, usage industriel) ;
- ▶ l'apparition de périodes de tensions, en particulier lors d'épisodes caniculaires et/ou d'étiage prononcé. Certaines années récentes se sont illustrées par des températures d'eau élevées (en particulier 2003 et 2006), qui ont conduit EDF à diminuer la production des CNPE.

Ces différents points soulignent l'importance de la question clé posée par le cahier des charges de l'étude : **« Quelle est la capacité du fleuve Rhône à répondre à l'ensemble des usages actuels et à venir tout en assurant le fonctionnement des milieux aquatiques ? »**. Plus précisément, l'étude doit apporter des réponses aux questions suivantes :

- ▶ Est-il pertinent de considérer le Rhône comme une ressource pléthorique ?
- ▶ Quelles sont les composantes du débit du Rhône (contributions des glaciers, du manteau neigeux, du Lac Léman, des affluents, de la pluviométrie...) et les différents leviers influençant les débits d'étiage ?
- ▶ Quels sont les impacts des variations de débits et de température sur les différents usages ?
- ▶ Quels seuils de débit ne faut-il pas dépasser sur le fleuve pour ne compromettre ni la vie biologique, ni les usages prioritaires (eau potable/sécurité civile) ?

L'étude est découpée en six phases chronologiques.

- ▶ La phase 1 caractérise le territoire de l'étude et dresse un bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles, à l'échelle du bassin versant, sur les eaux superficielles et les eaux souterraines : gestion du lac Léman, barrages, transferts hydroélectriques, prélèvements pour l'irrigation, l'eau potable, l'industrie et le refroidissement des centrales nucléaires.
- ▶ La phase 2 reconstitue, au droit des six stations hydrométriques de référence, les débits non influencés par les prélèvements et évalue l'empreinte des influences anthropiques sur ces débits.
- ▶ La phase 3 examine les conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité.
- ▶ La phase 4 s'interroge sur les conditions limites de débit à maintenir pour les poissons.
- ▶ Les phases 5 et 6 font la synthèse des débits limites pouvant être définis à ce stade dans le Rhône et évaluent les effets possibles d'une augmentation des prélèvements sur les étiages du Rhône.

Le présent document expose les résultats de la phase 4 de l'étude.

La finalité de cette phase est d'aboutir à la définition des valeurs seuils de débits visant au bon état des milieux sur les linéaires du Rhône non court-circuité au droit des six points nodaux (aussi stations hydrographiques) définis dans le SDAGE, à savoir : Pougny, Lagnieu, Ternay, Valence, Viviers et Beaucaire.

Il discute en premier lieu des espèces du Rhône et de leurs évolutions dans le temps associées aux modifications anthropiques du système.

Un rappel sur l'hydrologie du Rhône et la gestion des ouvrages, issu des phases précédentes, permet un rappel du contexte avant d'évoquer les variations infra-journalières de débits. La sectorisation permet de définir les zones sensibles au paramètre hydrologique avant de caractériser l'influence de l'hydrologie sur les habitats. La thermie du fleuve fait l'objet d'un chapitre spécifique afin de savoir si ce critère peut être pris en compte dans la définition des besoins des milieux.

Une synthèse des études existantes des liens entre biologie, hydrologie et thermie du fleuve ainsi que des analyses spécifiques permettent de mettre en lumière le rôle de chaque composante sur les espèces présentes.

On présente enfin les propositions de débits biologiques de survie et débits biologiques à la lumière des réflexions menées précédemment.

1. DÉMARCHE DE LA PHASE 4

Pour rappel, les conditions hydrologiques rencontrées en 2013 n'ont pas permis le développement de la méthodologie initiale qui consistait, entre autre, à reconnaître *in situ* les zones à enjeux et le degré de connexion des habitats en berges et annexes selon le débit.

Des réunions avec les experts de l'IRSTEA les 28 et 29 Octobre 2013 et le séminaire d'experts (IRSTEA, EDF, CNRS-Lyon 1, ARALEP, CNR, EDF, ONEMA, Université de Liège), tenues les 2 et 3 décembre 2013 à Lyon, ont permis d'échanger sur de nouvelles approches méthodologiques visant à définir les « conditions limites de débits pour les espèces » sur le Rhône non court-circuité.

La méthodologie finalement suivie est :

- ▶ La caractérisation des cortèges d'espèces et évolution temporelle ;
- ▶ La caractérisation de l'hydrologie naturelle en « basses eaux » du Rhône et l'analyse des débits infra-journaliers en cohérence avec la gestion des aménagements ;
- ▶ La caractérisation physique du fleuve par recherche et analyse des paramètres structurants de la biologie : identification des zones sensibles aux variations de débit par compréhension de gestion des aménagements ;
- ▶ L'impact potentiel de l'hydrologie sur les zones sensibles aux variations de débits ;
- ▶ La caractérisation de la thermie du Rhône par rapport au débit ;
- ▶ Le croisement des données poissons/thermie/hydrologie ;
- ▶ L'approches des besoins des milieux aux six points nodaux.

2. DÉFINITION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Sources :

- ▶ Le Rhône en 100 questions ;
- ▶ Changements environnementaux, dérives écologiques et perspectives de restauration du Rhône français: bilan de 200 ans d'influences anthropiques.

La présente étude porte sur la partie française du fleuve Rhône. On définit ainsi le « système objet » de l'étude par la partie canalisée du linéaire du Rhône de l'aval du Léman à la mer, aussi appelé « Rhône non court-circuité ». Les « vieux Rhône » ne sont pas étudiés dans la présente étude, considérant que les débits dans le Rhône court-circuité à l'étiage sont fixés par les débits réservés auxquels sont soumis les barrages par la réglementation (art L214.18 du Code de l'Environnement).

ENDIGUEMENT DU FLEUVE

Historiquement, le Rhône était un cours d'eau tressé avec une tendance au méandrage. La plaine alluviale formait une mosaïque de chenaux (chenaux secondaires ou "lônes", en langage local) avec une multitude de milieux aquatiques, semi-aquatiques et terrestres.

Des digues ont été édifiées sur plusieurs centaines de kilomètres dans le but de lutter contre les inondations.

CONSTRUCTION DE LA VOIE FLUVIALE

La seconde moitié du XIX^e siècle a été marquée par un changement fondamental du milieu, causé par une succession d'aménagements destinés à améliorer les conditions de navigation. Plusieurs types d'aménagements se sont succédés en fonction de l'amélioration des techniques : après des digues longitudinales insubmersibles, des digues submersibles ont été réalisées, portant le nom du fameux ingénieur Girardon et créant un système de compartiments ("casiers" ou "carrés" en langage rhodanien).

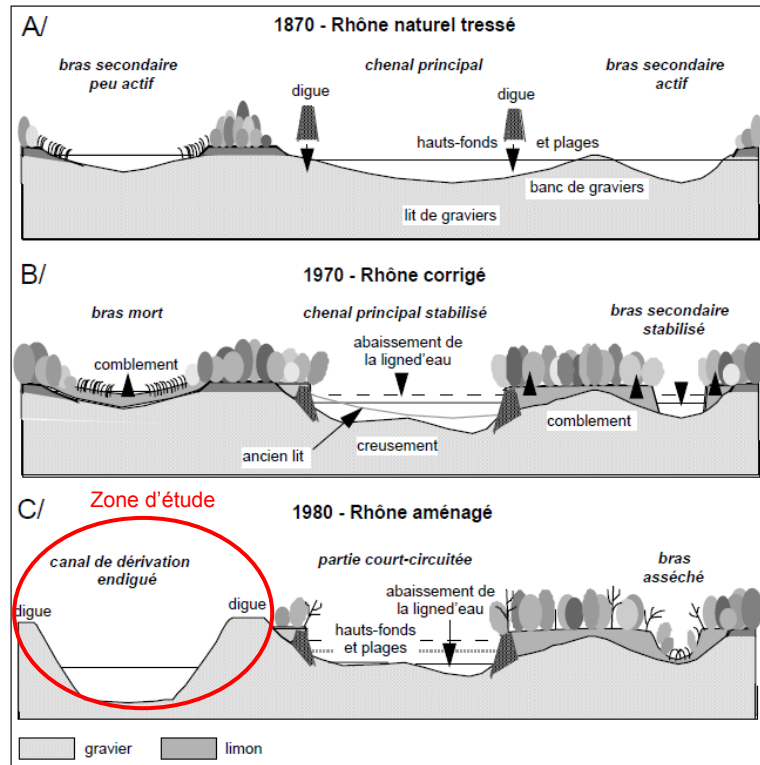
Il en a résulté une concentration des eaux dans un chenal unique aux berges stabilisées. Le fleuve a été profondément modifié par l'enfoncement de son lit mineur (profondeur régulière de plus de 1,60 m) et l'alluvionnement des zones protégées par les digues.

AMÉNAGEMENTS À BUTS ÉNERGÉTIQUES

Ces aménagements ont été conçus selon un « projet général d'aménagement du Rhône » au XX^e siècle. La structure des aménagements « au fil de l'eau » a été imposée par la géographie afin de noyer au minimum les vallées et d'occuper le moins de place possible sur les terres agricoles.

L'élévation des digues est décrite plus bas dans le rapport.

Figure 1 : Changement du profil transversal du Rhône à la suite des différents travaux de rectification de son cours depuis 1850. A- profil avant les endiguements Girardon ; B- profil un siècle après les premiers aménagements Girardon ; C- profil après aménagements CNR. (in Persat et al., 1995)



Le Rhône, autrefois vif et courant, ressemble aujourd'hui à une succession de biefs similaires à des marches d'escalier (cf. description typologique plus bas). Le linéaire du Rhône non court-circuité correspondant à la zone d'étude est de 406 km (cf. détails plus bas).

3. DESCRIPTION DES ESPÈCES DU RHÔNE

3.1 PEUPEMENT PISCICOLE AU DÉBUT DU XX^E SIÈCLE

Le début du XX^e siècle est synonyme de Rhône encore relativement peu aménagé. Comme indiqué plus haut, des digues avaient déjà été érigées depuis les années 1800 dans un objectif de protection contre les crues, puis plus tard, vers la fin du XIX^e siècle, afin d'améliorer les conditions de navigation (aménagements Girardon) (Bravard 1987). Néanmoins, le peuplement piscicole était encore 'relativement' préservé suite à ces aménagements, et peut être vu aujourd'hui comme un référentiel de l'ichtyofaune rhodanienne avant que celle-ci ne connaisse les grands bouleversements du XX^e siècle.

Sur le plan taxonomique, le cortège faunistique actuel est semblable à ce qu'il était il y a un siècle environ, à une extinction près (l'esturgeon). C'est davantage la **distribution** (entre les grands secteurs du Rhône) et plus encore l'**abondance relative** des espèces qui ont fortement varié.

Le peuplement piscicole du Rhône au début du XX^e siècle peut être qualifié de diversifié (Tableau 1) : il totalise **51 espèces** (réparties en 19 familles) dulçaquicoles, et 60 espèces en considérant les estuariennes (Bravard and Clémens, 2008). Cette diversité résulte de la position biogéographique du bassin, de son histoire, et de ses multiples influences climatiques, notamment méditerranéenne.

Parmi ces 51 espèces, **36 sont natives** au bassin et 15 ont été introduites. Les cyprinidés constituent la famille dominante, avec 22 espèces. Une extinction s'est produite au cours du XX^e siècle, il s'agit de l'esturgeon (*Acipenser sturio*), qui aurait disparu au début des années 1970. La surpêche et la construction des premiers barrages sur le Bas-Rhône (Donzère, Beaucaire) en seraient les principales causes.

L'ichtyofaune rhodanienne compte une seule espèce endémique : l'apron (*Zingel asper*). Néanmoins, ses populations sont localisées sur de rares affluents et sont très fragmentées. Sa présence dans le cours principal du fleuve est à confirmer mais il n'a plus été observé depuis 1985 à Vernaison (Olivier et al. 2009). L'espèce est considérée « en danger critique d'extinction » (UICN-France et al. 2010).

Cette ichthyofaune présente une grande diversité de stratégies de vie et de traits écologiques. Parmi les espèces les plus emblématiques, citons :

- ▶ **Les migrateurs amphihalins**, qui ont besoin du milieu d'eau douce et du milieu marin pour effectuer leur cycle de vie. Les potamotoques naissent en rivière et grandissent en mer (alose feinte du Rhône, lamproie marine, lamproie fluviatile), alors que c'est l'inverse pour les thalassotoques (ex. : l'anguille). La connectivité entre leurs lieux de reproduction et de croissance est essentielle à leur pérennité ;
- ▶ **L'ombre commun** (*Thymallus thymallus*), abondant au début du XX^e siècle sur le Haut-Rhône, très exigeant sur les conditions d'habitat (vitesse du courant, substrat), la température et l'oxygénation de l'eau ;
- ▶ **L'apron**, seule espèce endémique au bassin.

Tableau 1 : Liste des espèces de poisson (incluant les espèces estuariennes) présentes dans le bassin du Rhône au début du XX^e siècle. La présence par grand secteur est détaillée. Nat = native ; Int = introduite ; D = espèce disparue du secteur ; E = espèce endémique (extrait de Bravard et Clémens 2008, chap. 7).

Nom commun	Nom latin	Famille	Haut-Rhône	Bas-Rhône	Delta	Rhône sans delta	Rhône total
Esturgeon	<i>Acipenser sturio</i>	Acipenseridae	-	Nat/D	Nat/D	Nat/D	Nat/D
Anguille	<i>Anguilla anguilla</i>	Anguillidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Joel	<i>Atherina boyeri</i>	Atherinidae	-	-	Nat	-	Nat
Loche franche	<i>Barbatula barbatula</i>	Balitoridae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Blennie fluviatile	<i>Salaria fluviatilis</i>	Blenniidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Perche-soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>	Centrarchidae	Int	Int	Int	Int	Int
Achigan à grande bouche	<i>Micropterus salmoides</i>	Centrarchidae	Int	Int	Int	Int	Int
Alose	<i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Clupeidae	Nat/D	Nat	Nat	Nat	Nat
Loche d'étang	<i>Misgurnus fossilis</i>	Cobitidae	Nat	-	-	Nat	Nat
Chabot	<i>Cottus gobio</i>	Cottidae	Nat	Nat	-	Nat	Nat
Brème bordelière	<i>Abramis bjoerkna</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Brème commune	<i>Abramis brama</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Spirilin	<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Ablette	<i>Alburnus alburnus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Carassin doré	<i>Carassius auratus</i>	Cyprinidae	Int	-	-	Int	Int
Carassin	<i>Carassius carassius</i>	Cyprinidae	Int	Int	-	Int	Int
Carassin argenté	<i>Carassius gibelio</i>	Cyprinidae	Int	Int	Int	Int	Int
Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>	Cyprinidae	Int	Int	Int	Int	Int
Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	Cyprinidae	Int	Int	Int	Int	Int
Goujon	<i>Gobio gobio</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Able de Heckel	<i>Leucaspis delineatus</i>	Cyprinidae	Int	Int	-	Int	Int
Chevaine	<i>Leuciscus cephalus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	-	Nat	Nat
Blageon	<i>Leuciscus souffia</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Toxostome	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	-	Nat	Nat
Vairon	<i>Phoxinus phoxinus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i>	Cyprinidae	Int	Int	Int	Int	Int
Bouvière	<i>Rhodeus amarus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Rotengle	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Tanche	<i>Tinca tinca</i>	Cyprinidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Brochet	<i>Esox lucius</i>	Esocidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Lote	<i>Lota lota</i>	Gadidae	Nat	Nat	-	Nat	Nat
Epinoche	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Gasterosteidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Gobie noir	<i>Gobius niger</i>	Gobiidae	-	-	Nat	-	Nat
Gobie tacheté	<i>Pomatoschistus microps</i>	Gobiidae	-	-	Nat	-	Nat
Poisson-chat	<i>Ameiurus melas</i>	Ictaluridae	Int	Int	Int	Int	Int
Loup	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Moronidae	-	-	Nat	-	Nat
Mulet lippu	<i>Chelon labrosus</i>	Mugilidae	-	-	Nat	-	Nat
Mulet doré	<i>Liza aurata</i>	Mugilidae	-	-	Nat	-	Nat
Mulet-porc	<i>Liza ramada</i>	Mugilidae	-	Nat	Nat	Nat	Nat
Mulet sauteur	<i>Liza saliens</i>	Mugilidae	-	-	Nat	-	Nat
Mulet à grosse tête	<i>Mugil cephalus</i>	Mugilidae	-	Nat	Nat	Nat	Nat
Grémille	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Percidae	Int	Int	Int	Int	Int
Perche commune	<i>Perca fluviatilis</i>	Percidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Sandre	<i>Sander lucioperca</i>	Percidae	Int	Int	Int	Int	Int
Apron	<i>Zingel asper</i>	Percidae	Nat/E	Nat/E	-	Nat/E	Nat/E
Lamproie fluviatile	<i>Lampetra fluviatilis</i>	Petromyzontidae	-	Nat	Nat	Nat	Nat
Lamproie de Planer	<i>Lampetra planeri</i>	Petromyzontidae	Nat	Nat	-	Nat	Nat
Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	Petromyzontidae	-	Nat	Nat	Nat	Nat
Flet	<i>Platichthys flesus</i>	Pleuronectidae	-	-	Nat	-	Nat
Gambusie	<i>Gambusia affinis</i>	Poeciliidae	-	Int	Int	Int	Int
Lavaret	<i>Coregonus lavaretus</i>	Salmonidae	Nat	-	-	Nat	Nat
Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Salmonidae	Int	Int	-	Int	Int
Truite fario	<i>Salmo trutta</i>	Salmonidae	Nat	Nat	Nat	Nat	Nat
Ombre chevalier	<i>Salvelinus alpinus</i>	Salmonidae	Int	-	-	Int	Int
Ombre commun	<i>Thymallus thymallus</i>	Salmonidae	Nat	-	-	Nat	Nat
Silure glane	<i>Silurus glanis</i>	Siluridae	Int	Int	Int	Int	Int
Syngnathe de lagune	<i>Syngnathus abaster</i>	Syngnathidae	-	-	Nat	-	Nat

La distribution des espèces et la structure des peuplements le long du Rhône répondaient à des variations naturelles de température de l'eau, de pente et de forme du lit de la rivière, et de diversité d'habitats annexes. Du fait de l'absence de grands seuils naturels ou d'autres obstacles infranchissables, la continuité piscicole était assurée depuis le delta jusqu'à Bellegarde, où les pertes du Rhône (aujourd'hui noyées dans la retenue de Génissiat) formaient alors une barrière naturelle aux déplacements :

- ▶ Le Haut-Rhône, où la pente du fleuve est forte et la température fraîche, était propice aux **Salmonidés** (ombre, truite) et aux espèces les plus **sténothermes** (vandoise, chabot). Des **cyprinidés rhéophiles** y trouvaient également des conditions favorables (blageon, barbeau, spirilin, hotu, vairon), ainsi que la lote ;
- ▶ Le Rhône moyen, entre Lyon et la confluence de l'Isère, est un secteur où la pente du fleuve diminue (sillon rhodanien, pente de 0.5 ‰ ; (IRS 2001) et où la température de l'eau s'échauffe sensiblement du fait de l'arrivée de la Saône. Les **cyprinidés rhéophiles** étaient toujours présents (barbeau, hotu, blageon, toxostome, vandoise), mais le milieu était également favorable à d'autres espèces plus **thermophiles et lénitophiles** telles que les brèmes (commune et bordelière), la tanche, le gardon, l'ablette, le chevaine, ou des espèces introduites comme la perche-soleil et le poisson-chat ;
- ▶ Sur le Bas-Rhône, une pente qui redevient légèrement plus importante ainsi que l'arrivée de l'Isère et de ses eaux froides permettent à des **espèces rhéophiles et d'eaux plutôt fraîches** de se maintenir (hotu, barbeau, blageon), en complément **d'espèces lénitophiles et thermophiles** (brèmes, gardon, ablette, rotengle, tanche). L'anguille était abondante dans ce secteur du Rhône, de même que l'aloise. En absence d'obstacles infranchissables, ces espèces pouvaient remonter sur le Haut-Rhône (jusqu'aux pertes du Rhône pour l'anguille et jusqu'au canal de Savière pour l'aloise) ainsi que dans la Saône.

3.2 ÉVOLUTION DU PEUPEMENT JUSQU'À AUJOURD'HUI

UN PEUPEMENT D'AVANTAGE « HOMOGENE ET BANAL » SUR L'ENSEMBLE DU RHÔNE

La résultante des modifications de l'habitat physique du fleuve, des dégradations chimique et hydrologique et des changements globaux a entraîné une transformation des peuplements. Cette évolution se traduit par deux phénomènes écologiques, que sont :

- ▶ **La banalisation des peuplements**, qui correspond à une augmentation de l'abondance d'espèces écologiquement peu exigeantes, au détriment d'espèces exigeantes ;
- ▶ **L'homogénéisation des peuplements**, qui correspond à une convergence (ou à une moindre différenciation) des peuplements entre différents secteurs du Rhône, signifiant que les mêmes espèces se trouvent sur des secteurs qui autrefois abritaient une ichtyofaune bien distincte.

Ces deux phénomènes ont été bien mis en évidence dans un travail d'Olivier et Carrel (données non publiées) et dans (Fruget and Dessaix 2003), qui ont comparé les peuplements du moyen et du Haut-Rhône avant et après les aménagements. Si la terminologie emploie ici le terme d'aménagements, qui sont perçus comme la principale cause d'évolution, gardons à l'esprit que les autres facteurs cités ci-dessus (qualité de l'eau, changement climatique) interagissent probablement avec l'effet des aménagements *stricto sensu*.

Avant les aménagements, le peuplement du Haut-Rhône était caractérisé par des espèces d'eaux froide, rhéophiles et oxyphiles, notamment des Salmonidés (ombre commun et truite) auxquels étaient associées des espèces telles que la lote, la vandoise ou le blageon. Le canal de Savière marquait la limite amont de migrateurs comme l'aloise feinte ou la lamproie marine.

Vers l'aval, le Rhône moyen abritait encore des espèces rhéophiles comme le hotu, le toxostome, le chabot ou l'apron, mais également des espèces plus limnophiles comme le brochet ou la brème commune. Surtout, les migrateurs amphihalins (lamproie marine et l'aloise feinte du Rhône) étaient bien représentés dans ce secteur du fleuve.

Les peuplements des deux grands secteurs du Rhône (haut et moyen) étaient très distincts. Bien qu'à tendance générale rhéophile (le Rhône était considéré comme une zone à barbeau) (Bravard and Clémens 2008), le peuplement du Haut-Rhône était plutôt composé d'espèces sténothermes froides, alors que l'accroissement du régime thermique (arrivée de la Saône) et l'abaissement de la pente à l'aval de Lyon étaient favorables à des espèces plus thermophiles, limnophiles et phytophiles.

Les aménagements ont contribué à réduire cette différence (« homogénéisation »). Les **espèces amphihalines ont disparu** (hormis quelques anguilles) **du Haut-Rhône et très fortement régressé** (lamproie marine, alose feinte du Rhône) **sur la partie aval** de par les obstacles aux migrations que constituent les barrages. **En amont**, ce sont **les populations de Salmonidés qui ont été très réduites**. Les cyprinidés rhéophiles sont encore bien présents sur le Haut-Rhône, notamment le barbeau et le spirilin, mais ce dernier est aussi abondant dans le moyen Rhône.

Les espèces les plus exigeantes ont fortement régressé, alors que les espèces tolérantes ont proliféré (« banalisation »). Les peuplements sont aujourd'hui caractérisés par une importante proportion de cyprinidés eurytopes (Carrel et al. 1995, Carrel and Rivier 1996) tels que le gardon, le chevaine, l'ablette, le rotengle, ou des **espèces exotiques peu exigeantes** comme la perche soleil ou le poisson-chat. Même si ces espèces restent davantage présentes à l'aval de Lyon, elles se retrouvent également sur le Haut-Rhône en abondances moindres.

Sur le plan typologique, (Fruget 1992) rapportait que le Rhône en aval de Lyon était passé d'un type épipotamon (cours d'eau à courant rapide, granulométrie grossière dans les secteurs de radiers) à un type métapotamon (cours d'eau plus lent, granulométrie fine), et que la limite de cette transition typologique était remontée de 210 km (de Donzère à l'amont de Lyon) en une trentaine d'années tout au plus.

UNE TENDANCE À L'ACCROISSEMENT DE L'ABONDANCE DE PETITS INDIVIDUS

Sur le Haut-Rhône, les alevins et juvéniles étaient peu représentés dans les tronçons à courant libre, notamment du fait des endiguements qui créent des conditions rivulaires défavorables à ces stades de vie. Les vidanges des retenues suisses ainsi que le marnage expliquent également ces faibles abondances. (Persat et al. 1995 dans Fruget and Dessaix 2003) mentionnent que suite aux aménagements de la Compagnie nationale du Rhône (CNR) dans les années 1980, l'abondance d'alevins et de juvéniles s'est fortement accrue. Néanmoins, dans les sections aménagées, ces jeunes stades appartiennent essentiellement à un petit nombre d'espèces eurytopes (gardon, chevaine, goujon), alors que des individus d'espèces rhéophiles et sténoèces sont présents dans les vieux-Rhône.

Une analyse des chroniques de données piscicoles « long terme » (1985-2010) (Daufresne et al. in prep) met en évidence **une nette augmentation des juvéniles au cours du temps**, notamment **sur les sites de Bugey (Haut-Rhône) et de Péage de Roussillon (Rhône moyen)**. Cette tendance **n'est pas généralisable** sur les quatre autres sites inclus dans l'analyse (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Pierre-Bénite), ce qui suggère **des réponses locales**, site-spécifiques des peuplements. La température moyenne entre avril et août explique partiellement cette augmentation d'abondance, qui pourrait par conséquent refléter un effet du changement climatique global. Des réponses similaires ont été observées sur d'autres grands cours d'eau français, hors secteurs court-circuités, et attribuées au changement climatique (Daufresne and Boët 2007).

3.3 ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX ESPÈCES

LE HAUT-RHÔNE

L'enjeu prioritaire sur le Haut-Rhône est la **préservation des Salmonidés**. La **truite de rivière** et l'**ombre commun** sont deux espèces très exigeantes vis-à-vis de la qualité de l'eau, de l'habitat, de la thermie, et de la concentration en oxygène dissous.

A l'échelle nationale, l'ombre (classée comme 'Vulnérable') est davantage en déclin que la truite (classée 'Préoccupation mineure') (UICN-France et al. 2010). Cette espèce, autrefois abondante en amont de la confluence avec les Usses, ne présente plus que quelques **populations relictuelles** dans certains tronçons court-circuités (Chautagne, Belley, Brégner-Cordon) et affluents (Ain, Furans, Séran, etc.). Sa distribution est très fragmentée (Persat 1996, Persat and Eppe 1997). Une étude génétique a récemment montré une forte diversité allélique des populations rhodaniennes françaises (aval Génissiat) et une divergence marquée avec celles du Rhône franco-suisse à l'amont de Génissiat (Cattanéo et al. 2011).

LE BAS-RHÔNE

L'enjeu principal concerne les **migrateurs amphihalins** que sont l'**anguille**, l'**alose feinte du Rhône**, et les **lamproies marine et fluviatile**. Leur déclin est principalement lié à la fragmentation et au cloisonnement du continuum fluvial par les barrages. La population actuelle d'anguille ne représenterait plus que 10 à 30 % de ce qu'elle fût avant les grands aménagements¹.

La dernière reproduction de lamproie marine a été observée en 2001 sur le Gardon, alors que l'espèce était autrefois abondante dans le bassin. Quant à l'alose, elle ne colonise aujourd'hui plus que 180 km de cours d'eau, alors qu'elle remontait jusqu'à l'exutoire du lac du Bourget avant les grands aménagements, soit 450 km. La restauration de la migration piscicole par amélioration du passage aux écluses et mise en place de dispositifs de franchissement (montaison et/ou dévalaison) est en cours depuis les années 1990 sur le Bas-Rhône.

L'objectif pour 2015 est d'assurer cette continuité écologique jusqu'à la confluence de la Drôme et de l'Eyrieux ('Stratégie Poissons Migrateurs' établie dans le cadre du Plan Rhône).

La recolonisation de certains tronçons court-circuités par l'**apron**, seule espèce endémique, aux populations petites et très fragmentées, peut également être vue comme un enjeu de restauration (P. Roche, Ingénieur ONEMA, DR Lyon, communication personnelle). Ce pourrait être le cas, par exemple, pour le vieux-Rhône de Donzère-Mondragon, dans lequel se jette l'Ardèche qui abrite elle-même des populations d'apron.

¹ cf. site www.planrhone.fr

4. FACTEUR HYDROLOGIQUE

Sources :

- ▶ Rapport Phase 2 : Mission 1 – Genèse des étiages (BRLi) ;
- ▶ Débits infra-journaliers aux 6 points nodaux pour deux années : 2011 et 2012 (CNR) ;
- ▶ Consignes d'exploitation des aménagements (CNR).

4.1 HYDROLOGIE DES BASSES EAUX

4.1.1 Rappels des principaux indicateurs

Le tableau suivant rappelle la définition des débits statistiques permettant de caractériser les basses eaux.

Tableau 2 : Définition des principaux indicateurs hydrologiques de basses eaux (BRLi)

Débits annuels		
Module	Moyenne des débits sur toute la période	
Débits mensuels		
Indicateur Basses eaux	Débits mensuels quinquennaux secs	Pour chaque mois est calculé le débit mensuel de fréquence de non-dépassement de 0,2 (Période 5 ans). 4 années sur 5, le débit mensuel du mois est supérieur au débit quinquennal sec de ce mois.
Indicateur Basses eaux	Débits mensuels décennaux secs	Pour chaque mois, est calculé le débit mensuel de fréquence de non-dépassement de 0,1 (Période 10 ans). 9 années sur 10, le débit mensuel du mois est supérieur au débit quinquennal sec de ce mois.
Indicateur Basses eaux	QMNA	Plus petit débit mensuel de chaque année
Indicateur Basses eaux	QMNA5	QMNA de période de retour 5 ans. 4 années sur 5, le plus petit débit mensuel dépasse le QMNA5 ; 1 année sur 5, le plus petit débit mensuel sous-passe le QMNA5.
Indicateur Basses eaux	QMNA2	QMNA de période de retour 2 ans
Débits journaliers		
	Débits journaliers interannuels	Pour chaque jour de l'année (de 1 à 365), est calculée la moyenne des débits de ce jour, sur toute la période
Indicateur Basses eaux	VCN10	Plus petit débit moyen sur 10 jours de chaque année
Indicateur Basses eaux	VCN10_2ans	VCN10 de période de retour 2 ans. Une année sur deux, le VCN10_2ans est dépassé.
Indicateur Basses eaux	VCN10_5ans	VCN10 de période de retour 5 ans. 4 années sur 5, le VCN10 est supérieur au VCN10_5 ; 1 année sur 5, le VCN10 est inférieur au VCN10_5.
Indicateur Basses eaux	VCN10_10ans	VCN10 de période de retour 10 ans.
Indicateur Basses eaux	VCN3	Plus petit débit moyen sur 3 jours de chaque année
Indicateur Basses eaux	VCN3_T	VCN3 de période de retour T ans

Remarque : les indicateurs statistiques de basses eaux (VCNX_T, QMNA_T,...) ont été calculés sur des années hydrologiques adaptées aux régimes hydrologiques de chaque cours d'eau (année encadrant l'étiage), et ont été calculés par ajustement sur une loi log-normale. Ces indicateurs ont été calculés sur la période 1980-2011, période pour laquelle les stations de référence présentent moins de 3 % de lacune en débits journaliers.

4.1.2 Les étiages historiques du Rhône

La caractérisation de l'étiage sur le bassin du Rhône est rendue en Phase 2-Mission 1 à partir d'une analyse sur les 14 années les plus sèches de 1920 à 2011.

PÉRIODES D'ÉTIAGES

Il n'apparaît pas de saisonnalité marquée des étiages du Rhône : des épisodes de basses eaux peuvent avoir lieu toute l'année. Il est cependant possible de distinguer deux périodes plus impactées par les bas débits : des étiages estivaux (juillet-septembre) et des étiages en automne-hiver (septembre-décembre), ces derniers étant plus fréquents.

Tableau 3 : Identification des mois de l'année impactés par de très bas débits du Rhône, pour les 14 années sèches étudiées dans le cadre de la présente étude (BRLi)

Année de basses eaux	Période de l'année											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1921		1	1	1		1			1	1	1	1
1947									1	1	1	
1949		1					1	1	1	1	1	
1962									1	1	1	1
1964	1	1					1	1	1		1	1
1972								1	1	1	1	1
1976				1	1	1	1	1	1			
1978										1	1	1
1985									1	1	1	1
1989		1						1	1	1	1	1
2003				1	1	1	1	1	1			
2005								1		1	1	1
2009									1	1		
2011				1	1	1				1	1	
Total (nombre d'épisodes)	1	4	1	4	3	4	4	7	11	11	11	8

ÉTIAGES COURT ET INTENSES OU DÉFICITS DE LONGUE DURÉE

Des analyses de longueur et de magnitude ont montré que les étiages du Rhône ne présentent pas de tendance généralisée. Ainsi des étiages de courtes durées peuvent être plus intenses que des étiages longs et inversement.

PLACE DES AFFLUENTS EN PÉRIODE D'ÉTIAGE

La Saône, affluent principal du Rhône, est souvent l'un des facteurs clés d'apparition ou d'accentuation de l'étiage du Rhône. Les déficits de l'Isère contribuent souvent à propager la situation d'étiage vers l'aval, mais sont plus rarement la cause d'une aggravation nette de l'étiage du Rhône.

Le Rhône alpestre (sous-bassin à l'amont de Pougny) l'Ain et la Saône présentent des déficits importants pour quasiment toutes les années sèches et jouent donc un rôle majeur.

La plupart des étiages sont la résultante d'une combinaison de déficits importants intervenant simultanément sur les principaux affluents.

Tableau 4 : Identification des principaux affluents déficitaires, contribuant aux épisodes d'étiages du Rhône, pour les 14 années étudiées (BRLi)

Année de basses eaux	Principaux affluents déficitaires			
	Rhône Alpestre (Suisse)	Saône - Ain	Isère	Aval - Durance
1921	Oui	Oui	partiel	Oui
1947	partiel	Oui	partiel	
1949	partiel	Oui	partiel	
1962	partiel	Oui	Oui	partiel
1964	Oui	Oui	partiel	
1972	Oui	Oui	partiel	
1976	Oui	Oui	Oui	
1978	Oui	Oui	Oui	Oui
1985	partiel	Oui	Oui	Oui
1989	Oui	Oui	Oui	Oui
2003		Oui		
2005	Oui	Oui	partiel	
2009	Oui	Oui	Oui	
2011	Oui	Oui	Oui	

NB : Ce tableau doit être lu avec prudence, il s'agit d'une analyse qualitative de l'impact des différents affluents sur les épisodes d'étiages du Rhône à partir des données hydrométriques, il est soumis à une part de subjectivité dans l'appréciation des causes hydrologiques

FACTEURS CLIMATIQUES

On retrouve deux facteurs climatiques prépondérants :

- ▶ Le climat du bassin du Rhône alpestre (précipitations et neige en Suisse) ;
- ▶ Les précipitations liquides des bassins de la Saône et de l'Ain (Ternay) en particulier, et de l'ensemble du bassin du Rhône dans de nombreux cas.

Ces deux facteurs sont identifiés comme impactant pour quasiment toutes les années sèches, et sont souvent combinés. Cela corrobore la synchronisation de déficits de plusieurs affluents lors des épisodes d'étiages sévères du Rhône.

L'évapotranspiration a également pu jouer un rôle pour certains épisodes de basses-eaux, notamment en 2003 et en 2011.

La part contributive de chaque facteur climatique aux étiages reste cependant variable d'une année sur l'autre.

Tableau 5 : Identifications des facteurs météorologiques prépondérants aux 14 épisodes de basses eaux du Rhône étudiés. On renseigne les points dont les surfaces contributives sont en déficit (de précipitations, neige, etc.) par rapport aux statistiques interannuelles (BRLi)

Année de basses eaux	Facteur climatique prépondérant (sur les surfaces contributives des tronçons SDAGE)			
	Composante Suisse	Précipitations (France)	Neige (France)	ETP (France)
1921				
1947				
1949				
1962	Suisse	Lagnieu - Ternay		
1964	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Ternay)
1972	Suisse	Lagnieu - Ternay		
1976	Suisse	Lagnieu - Viviers		Lagnieu - Valence
1978	Suisse	Ensemble	Valence	
1985	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Lagnieu Ternay)
1989	Suisse	Ensemble	Ensemble	
2003		Ternay - Valence		Ternay - Valence
2005	Suisse	Ensemble	Températures Valence	(Ternay)
2009	Suisse	Lagnieu - Viviers		
2011	Suisse	Ternay -	Valence	Ensemble

NB : Ce tableau doit être lu avec prudence, il s'agit d'une analyse qualitative de l'impact des différents facteurs climatiques sur les épisodes d'étiages du Rhône à partir des données hydrométriques et météorologiques, il est soumis à une part de subjectivité dans l'appréciation des causes météorologiques.

Il existe une grande variabilité des étiages du Rhône :

- ▶ Variabilité de la période de l'année impactée : quasiment toutes les périodes de l'année ont pu être impactées par un épisode de très bas débit du Rhône ;
- ▶ Variabilité des durées, intensités et magnitudes des épisodes de basses eaux ;
- ▶ Variabilité de la contribution de chaque affluent ;
- ▶ Variabilité des facteurs climatiques.

On retrouve cependant les caractéristiques communes suivantes :

- ▶ De très bas débits sont atteints entre août et décembre ;
- ▶ Les conditions climatiques du bassin du Rhône alpestre et la pluviométrie des bassins de la Saône et l'Ain sont deux facteurs importants des basses eaux ;
- ▶ Le Rhône alpestre et la Saône sont en net déficit lors de ces épisodes de basses-eaux dans la quasi-totalité des cas ;
- ▶ Pour la plupart des épisodes d'étiages importants, tous les grands affluents ont connu des bas débits et tous les tronçons du Rhône ont été impactés, de manière plus ou moins intense.

Il est notable que le Rhône alpestre, dont la surface contributive représente seulement 8 % de la surface du bassin total, constitue un apport majeur des débits du Rhône à l'étiage : en moyenne, il apporte 40 % des débits du Rhône au mois d'août à Beaucaire.

4.1.3 Caractérisation des bas-débits aux six points nodaux

Tableau 6 : Débits caractéristiques d'étiage (influencés) en m³/s au droit des six points SDAGE sur le Rhône (calculés sur la période 1980-2011)

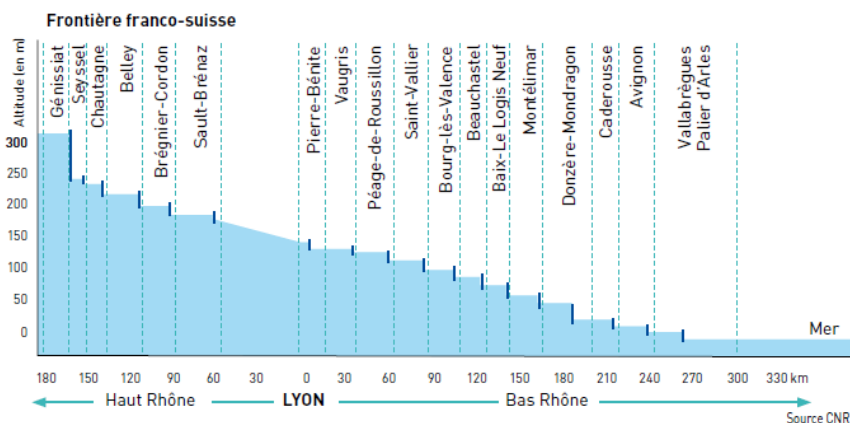
	Pougny	Lagnieu	Ternay	Valence	Viviers	Beaucaire
Débit annuel						
<i>Module</i>	343	472	1041	1398	1486	1678
Débits mensuels						
<i>QMNA moyen</i>	204	282	509	729	764	843
<i>QMNA5</i>	167	216	392	577	605	680
<i>QMNA2</i>	200	272	492	709	743	823
<i>QM_min(1980-2011)</i>	137	164	263	406	424	443
<i>QM_min(2011)</i>	149	164	263	437	461	547
<i>Janvier</i>	<i>quinquennal sec</i>	236	341	942	1184	1371
	<i>décennal sec</i>	211	297	795	1006	1144
<i>Février</i>	<i>quinquennal sec</i>	241	331	866	1125	1381
	<i>décennal sec</i>	217	286	727	958	1185
<i>Mars</i>	<i>quinquennal sec</i>	251	368	861	1128	1385
	<i>décennal sec</i>	224	321	722	957	1193
<i>Avril</i>	<i>quinquennal sec</i>	234	345	684	1016	1252
	<i>décennal sec</i>	203	291	540	831	1034
<i>Mai</i>	<i>quinquennal sec</i>	265	351	619	972	1197
	<i>décennal sec</i>	228	298	503	804	998
<i>Juin</i>	<i>quinquennal sec</i>	398	462	676	1049	1197
	<i>décennal sec</i>	362	414	581	909	1036
<i>Juillet</i>	<i>quinquennal sec</i>	397	438	580	855	942
	<i>décennal sec</i>	363	395	504	745	825
<i>Aout</i>	<i>quinquennal sec</i>	349	378	507	716	783
	<i>décennal sec</i>	325	350	459	651	714
<i>Septembre</i>	<i>quinquennal sec</i>	257	290	479	662	778
	<i>décennal sec</i>	232	254	416	574	672
<i>Octobre</i>	<i>quinquennal sec</i>	204	258	484	694	871
	<i>décennal sec</i>	176	214	384	558	698
<i>Novembre</i>	<i>quinquennal sec</i>	179	246	573	824	1118
	<i>décennal sec</i>	155	204	455	671	912
<i>Décembre</i>	<i>quinquennal sec</i>	210	315	857	1089	1327
	<i>décennal sec</i>	187	272	718	916	1110
Débits journaliers						
<i>VCN10 moyen</i>	153	217	398	578	619	686
<i>VCN 10_2ans</i>	148	210	387	564	604	670
<i>VCN 10_5ans</i>	119	170	313	465	498	553
<i>VCN3 moyen</i>	126	194	361	531	567	622
<i>VCN3_2ans</i>	121	189	351	516	553	606
<i>VCN3_5ans</i>	96	158	287	424	457	499
<i>Qj_min(1980-2011)</i>	11	121	193	320	334	322
<i>Qj_min(2011)</i>	64	147	203	361	359	390
Débit horaire						
<i>Qh_min(2011)</i>	49	135	153	250	328	250

4.2 RAPPELS SUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES ET LEUR GESTION

On reprend ici les éléments exposés dans le rapport de phase 1.

La stratégie d'aménagement choisie pour l'aménagement du Rhône a été motivée par la volonté de satisfaire à la fois les besoins de la production d'hydroélectricité, de la navigation à grand gabarit à l'aval de Lyon et de l'irrigation. On compte au total **22 aménagements le long du Rhône dont 20 le long du Rhône français**. Ils sont localisés sur la carte présentée plus bas. A ces aménagements s'ajoute le **barrage du Seujet**, en sortie du lac Léman

Figure 2 : Répartition des aménagements sur le Rhône français (source : Le Rhône en 100 questions)



Sur la partie française, ces aménagements sont gérés par la CNR, à l'exception de l'aménagement de Cusset (EDF).

Un aménagement type est composé des différents éléments listés ci-dessous :

- ▶ Un **barrage** construit sur le cours naturel du fleuve, dont le rôle est de relever le niveau du Rhône et de créer une chute sur laquelle est installée la centrale. **Tous les aménagements ont un volume utile très faible comparé aux débits du Rhône**. L'ouvrage le plus important, Génissiat, présente une forte hauteur de chute, mais pour un débit semi-permanent du Rhône d'environ 315 m³/s, le volume de stockage utile (14 Mm³) est rempli en une douzaine d'heures. **A l'exception de l'aménagement de Génissiat, dont la gestion est hebdomadaire, les différents ouvrages ont une gestion journalière des niveaux ;**
- ▶ Un **canal de dérivation**, qui conduit les eaux jusqu'à la centrale;
- ▶ Une **centrale** fonctionnant au **fil de l'eau** qui convertit la puissance motrice du fleuve en électricité.

Figure 3 : Schéma d'un aménagement "type" sur le Rhône (source : Le Rhône en 100 questions)



Aménagement type du Rhône (© Photothèque CNR).

Tableau 7 : Caractéristiques des 21 aménagements hydroélectriques du Rhône

	Aménagement	Composition	Gestion	Année de mise en service	Production annuelle moyenne (GWh)	Débit max turbinable (m3/s)	Hauteur de chute max	Puissance installée (MW)	Volume utile (Mm3)	Débit réservé (m3/s)	Petite centrale associée (<10MW)	Mini centrale associée (0.5<P<2 MW)
1	Verbois	Barrage et usine avec dérivation	SIGe	1943	466	620	21	100	13 (à confirmer)			
2	Chancy-Pougny	Barrage-usine	SIGe - CNR	1924	210	490 m3/s doit être rehaussé à 620 m3/s	10			Le débit turbiné est restitué à l'aval de l'ouvrage	Non	Non
3	Genissiat	Barrage-usine	CNR	1948	1700	750	67	420	15.4	5	Oui	Non
4	Seyssel	Barrage et usine accolés	CNR	1951	165	600	8.25	45	3.6	Le débit turbiné est restitué à l'aval de l'ouvrage	Non	Non
5	Chautagne	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1981	454	700	17	90	1.2	70 (mai-août) 50 (autres)	5.8 MW (inauguré en	1.6 MW
6	Belley	2 Barrages et usine avec dérivation	CNR	1981	449	700	17	90	1.4	60 (sept-fév) 80 (juin-août) 90 (mars et mai) 100 (avril)	En projet (2014)	0.675 MW
7	Brégnier-Cordon	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1984	324	700	13.7	70	2	80 (Nov-mars) 150 (juin-Août) 100 (autres)	Oui	Non
8	Sault-Brénaz	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1986	245	700	9.7	75	1.8	60 (15 juin-15 sept) 20 (autres)	Non	1.23 MW
9	Cusset	2 Barrages et usine avec dérivation	EDF	1899	415	600	12	63	?	30 à 60 m3/s (fonction du niveau dans la retenue de Jons)		
10	Pierre Bénite	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1966	535	1400	9	80	2.2	100	7.4 MW	oui
11	Vaugris	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1980	335	1400	6.7	72	2.7	Le débit turbiné est restitué à l'aval de l'ouvrage	Non	Non
12	Péage de Roussillon	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1977	850	1600	15.1	160	3.1	20 (Avr-Août) 10 (autres)	à l'étude	
13	Saint-Vallier	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1971	700	1650	11.5	120	3.2	10 (Avr-Août) 5 (autres)	Non	Oui
14	Bourg-lès-Valence	2 Barrages et usine avec dérivation	CNR	1968	1100	2200	11.7	186	2.9	20 (Avr-Août) 10 (autres)	Non	Non
15	Beauchastel	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1963	1200	2100	11.8	192	1.4	20 (Avr-Août) 10 (autres)	à l'étude	0.75 MW
16	Baix - Le Logis Neuf	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1960	1220	2230	14.75	210	1.2	20 (Avr-Août) 10 (autres)	En projet (lancement travaux en 2012)	Oui
17	Montélimar	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1957	1600	1850	16.5	270	2.7	15 si QRhône <560 15+4(Q-560)/100 entre 560 et 1660 60 si QRhône > 1660	En projet (2013)	Non
18	Donzère-Mondragon	2 Barrages et usine avec dérivation	CNR	1952	2140	1840	22.5	354	1.4	60	Non	Non
19	Caderousse	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1975	860	2280	9.5	156	4.7	5	Non	Non
20	Avignon	2 Barrages et 2 usines avec dérivation	CNR	1973	835	2400	10	180	3.6	400 à l'aval du barrage-usine de Sauverre, 5 à l'aval du barrage de Villeneuve	Non	Non
21	Vallabrègues	Barrage et usine avec dérivation	CNR	1970-1974	1300	2200	13.5	210	7.2	10	à l'étude	Non

La répartition des ouvrages, les débits d'équipement² et dans une moindre mesure le type d'ouvrage permettent de faire une distinction entre le Rhône en amont de Lyon (Haut-Rhône) et en aval (Bas-Rhône), le secteur intermédiaire (entre le barrage de Sault-Brenaz et de Pierre Bénite), correspondant en grande partie à la traversée de l'agglomération lyonnaise.

OUVRAGES DU HAUT-RHÔNE

Génissiat, le premier barrage du territoire français mais aussi le plus important de l'aménagement rhodanien est le seul qui fonctionne par écluses avec une **variation journalière maximale de 5,7 m**. L'aménagement de **Seysssel** (volume de retenue de 6 Mm³) n'assure qu'une démodulation partielle de la tranche utile de Génissiat (18 Mm³) et **les niveaux varient de 3,5 m**. Une démodulation complémentaire doit donc être assurée par les aménagements plus en aval, localisés entre Seysssel et Sault-Brenaz.

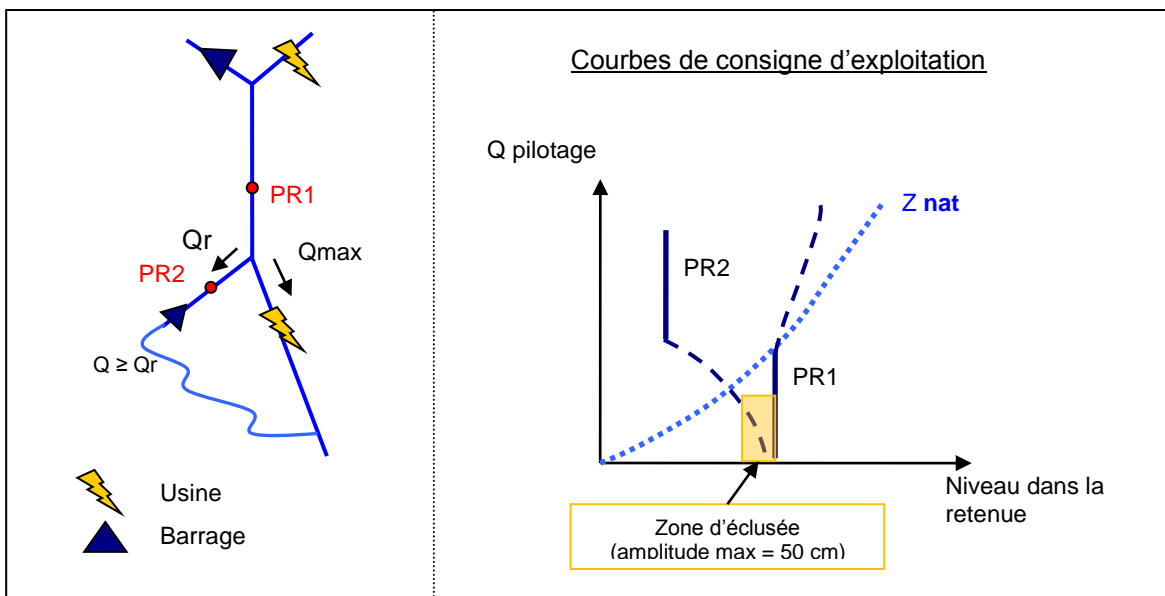
Cusset marque la fin des aménagements du Haut-Rhône. Au-delà et jusqu'à Pierre-Bénite, **le fleuve est libre de tout ouvrage dans la traversée Lyonnaise**.

OUVRAGES DU BAS-RHÔNE

Les aménagements du Bas-Rhône incluent tous ceux compris entre Pierre-Bénite et Vallabrègues, soit 12 ouvrages, tous basés sur le schéma d'aménagement type en dehors de Vaugris.

Les courbes de conduite des consignes d'exploitation des aménagements CNR du Bas-Rhône sont principalement basées sur le respect de cotes altimétriques en deux points de réglage. Le premier (PR1) situé en amont de la retenue et le second (PR2) juste en amont du barrage (voir schéma ci-dessous).

Figure 4 : Courbes de consigne d'exploitation (CNR)



² 700 m³/s pour les usines du Haut-Rhône et entre 1400 et 2400 m³/s pour le Bas-Rhône. « Le Rhône en 100 questions » Ouvrage collectif sous la direction de JP. Bravard et Anne Clémens. ZABR Zone Atelier Bassin du Rhône.

De façon générale, tant que le débit de pilotage (débit entrant dans la retenue propagé au point de réglage) est faible et reste inférieur à la somme du débit réservé et du débit maximum turbinable, le débit est principalement orienté vers la centrale et le barrage restitue le débit réservé. Lorsque le débit devient supérieur (à saturation de l'usine), le barrage est ouvert progressivement de façon à maintenir les niveaux suivant la consigne d'exploitation.

Lorsque le débit de pilotage augmente, le suivi des niveaux se fait ensuite au PR2 afin d'être plus près du barrage (l'organe réglant). En crue, le niveau à l'aval remonte, la hauteur de chute au niveau de l'usine diminue et la capacité de production diminue en conséquence (*source : réunion CNR-BRLi-AERMC-DREAL, septembre 2012*).

L'eau arrivant au niveau des aménagements est turbinée au fil de l'eau. Lors des pointes de demande en énergie, **des éclusées énergétiques sont réalisées** : le niveau du plan d'eau est abaissé de façon à exploiter un débit le plus proche possible du débit maximum turbinable. En période de plus faible demande (la nuit), une partie de l'eau arrivant au niveau de l'aménagement permet de rehausser le niveau de la retenue : cette zone est également appelée « **zone de programme de débit** ».

Ces aménagements au fil de l'eau n'induisent pas de variation importante de niveau d'eau : **l'écart maximum réglementaire est de 0,50 m**. En dehors du « programme de débit », le plan d'eau amont n'est plus soumis aux variations journalières associées au fonctionnement des usines hydroélectriques.

En deçà d'un débit spécifique pour chaque ouvrage, les éclusées énergétiques ne peuvent plus être réalisées.

Chaque aménagement est associé à une consigne d'exploitation spécifique et fait l'objet d'un cahier des charges.

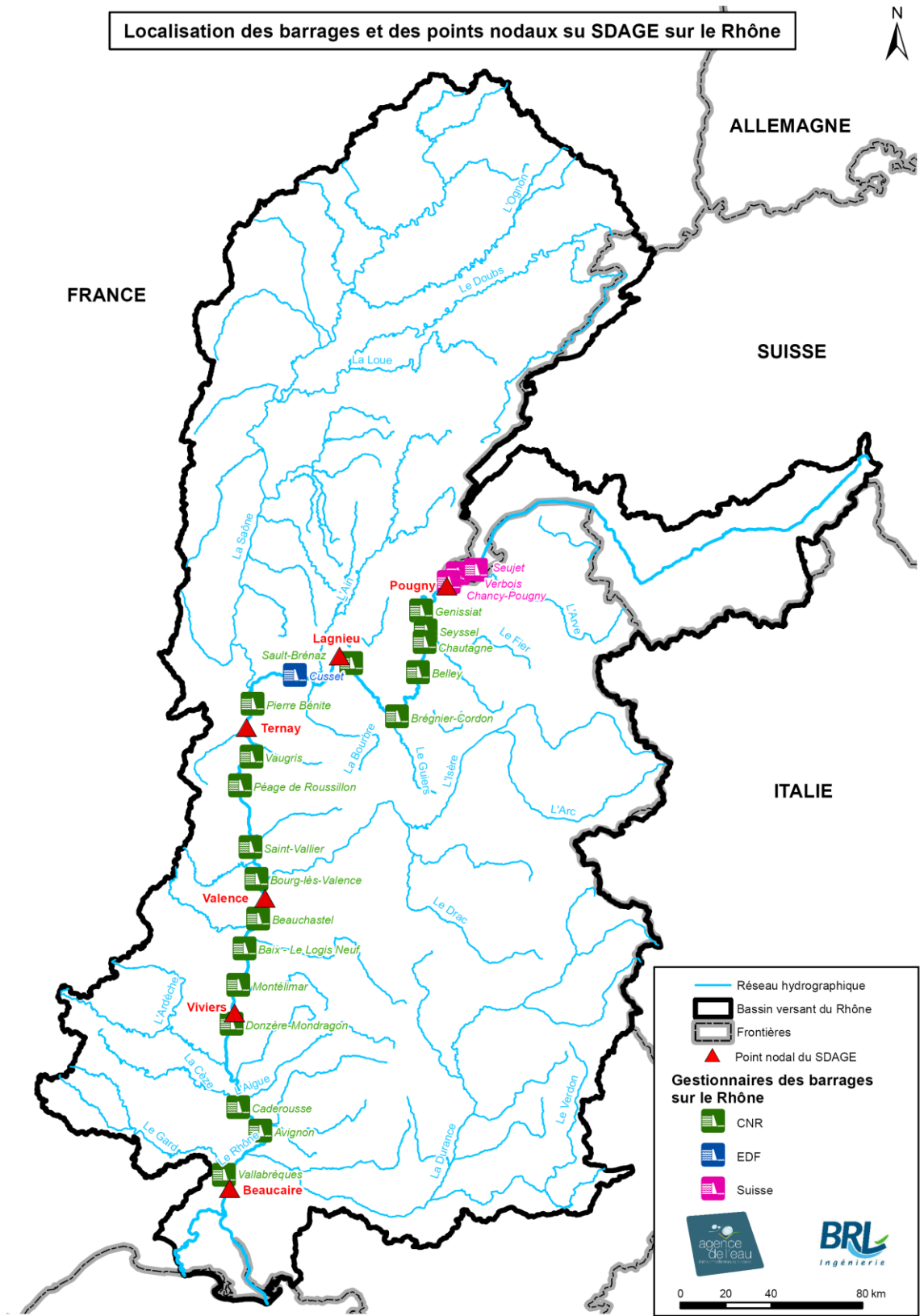
On distingue les ouvrages du Haut-Rhône (amplification des variations hydrologiques suisses à partir du barrage de Génissiat et démodulation jusqu'à Cusset) des ouvrages du Bas-Rhône fonctionnant « au fil de l'eau », avec la possibilité de réaliser des éclusées énergétiques induisant une variation de plan d'eau de 50 cm au maximum.

4.3 VARIATIONS HYDROLOGIQUES INFRA-JOURNALIÈRES

Source : débit horaires aux 6 points nodaux des années 2011 et 2012 (CNR)

L'analyse s'est basée sur les données transmises par la CNR. Seules les données horaires des années 2011 (année « sèche ») et 2012 (année « humide ») ont été fournies. La CNR n'a pas souhaité fournir de chroniques plus longues pour des raisons de confidentialité liées à la production d'énergie. Les cotes altimétriques des plans d'eau n'ont pas été transmises.

Figure 5 : Carte de localisation des barrages sur le Rhône et des six points nodaux

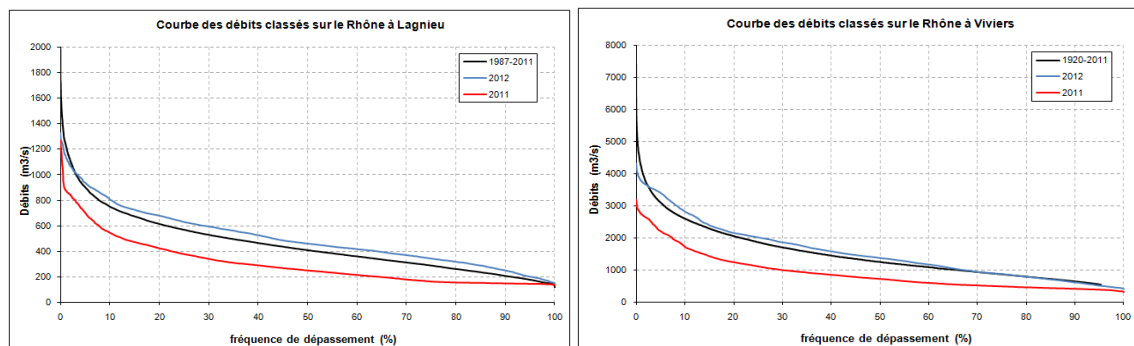


CARACTÉRISATION DES ANNÉES 2011 ET 2012

D'après ces courbes des débits classés, 2011 a été une année sèche aussi bien sur le Haut-Rhône (Lagnieu) que sur le Bas-Rhône (Viviers).

Alors que 2012 peut être qualifiée comme une année plutôt humide sur le Haut-Rhône, la différence est moins marquée sur le Bas-Rhône comparativement à la courbe des débits classés 1925-2011.

Figure 6 : Courbe des débits classés sur le Haut-Rhône à Lagnieu (gauche) et sur le Bas-Rhône à Viviers (droite) pour la période 1920-2011, 2011 et 2012.

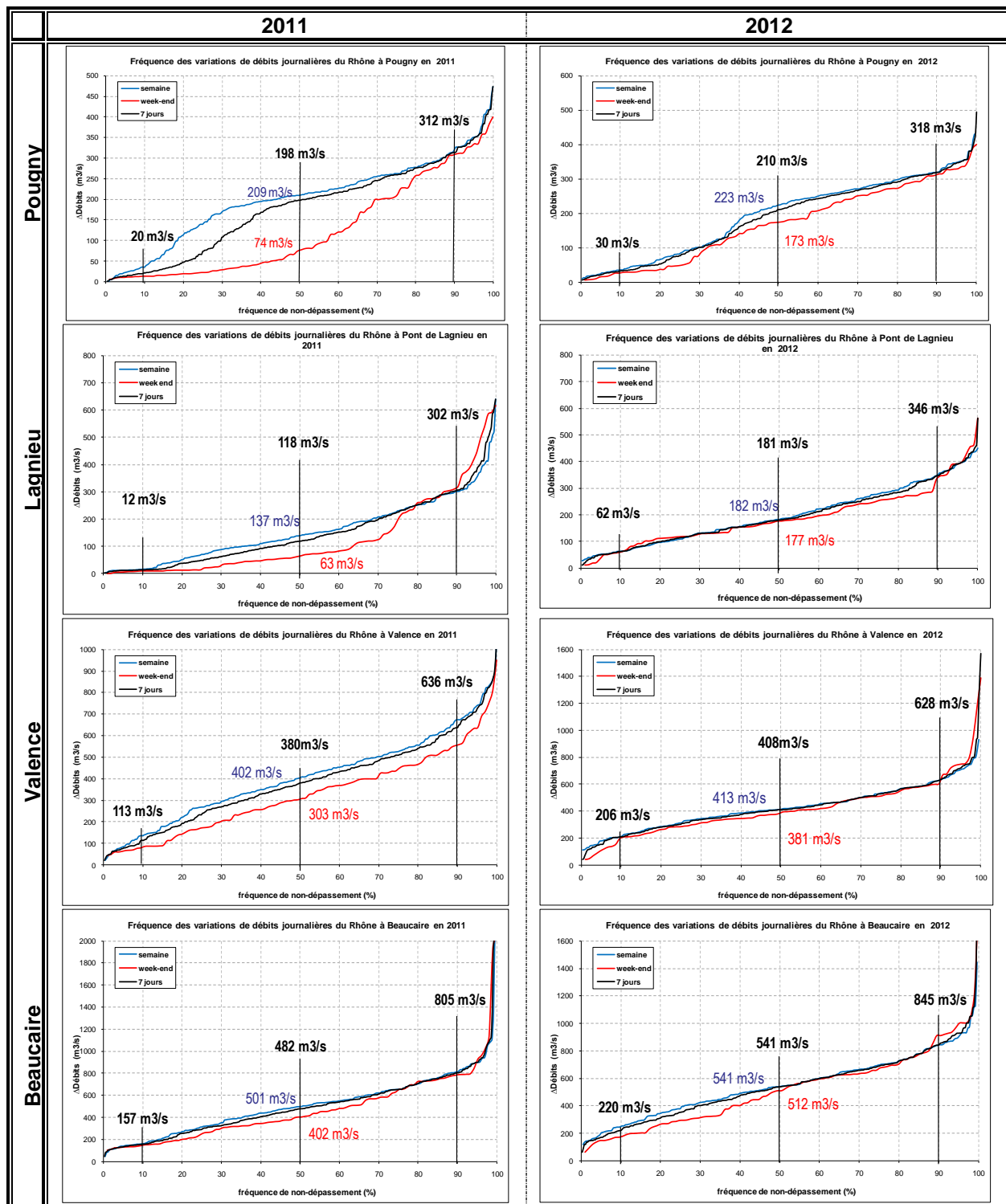


ÉCARTS ENTRE SEMAINE ET WEEK-END

La Figure 7 ci-dessous illustre les écarts entre semaine et week-end. Les variations infra-journalières ont été plus marquées en 2011 (année sèche) qu'en 2012 (année humide). On peut conclure que **plus l'hydrologie est soutenue, moins les différences de régime d'éclusées semaine et week-end sont marquées.**

L'année 2011 met en lumière une évolution longitudinale avec des écarts très importants à Pougny qui s'atténuent progressivement pour être quasi nuls à Beaucaire. Cela peut s'expliquer par les modes de gestion des ouvrages (modulation de Génissiat amplifiant le signal hydrologique suisse) et démodulation par les ouvrages aval. Cette évolution amont/aval est peu marquée en 2012.

Figure 7 : Comparaison des variations de débits journalières selon la période de semaine analysée, entre une année sèche et une année humide et entre les différentes stations de l'amont vers l'aval.



Que les différences en terme de **variations infra-journalières** entre semaine et week-end soient très marquées (périodes sèches et/ou Haut-Rhône) ou quasi nulles, **il ressort globalement qu'elles sont plus importantes en semaine que lors des week-ends en raison de la demande énergétique plus forte pendant la semaine.**

VARIATIONS AU DROIT DES SIX STATIONS

Pour l'analyse des variations infra-journalières (ΔQ_j), des graphiques en « boîtes à moustaches » (boxplots) ont été réalisés dans le but de quantifier ces variations selon le débit journalier enregistré. L'étude portant sur les débits de basses eaux, **seuls les jours pour lesquels le débit horaire est passé au moins une fois en dessous du débit proche du QMNA5 ont été retenus** dans les analyses présentées en [Figure 8](#). La même analyse a été menée sans filtre préalable : elle est présentée en annexe 1.

Les variations infra-journalières sont plus importantes lorsque les débits journaliers augmentent. Cette tendance est observée sur **toutes les stations et pour toutes les gammes de débits journaliers.**

A **Pougny**, les variations deviennent importantes à partir des débits journaliers de **90-100 m³/s**. Entre 100 et 150 m³/s, elles sont de l'ordre de 100 m³/s, mais peuvent atteindre jusqu'à 240 m³/s et 380 m³/s au maximum.

Sur la station de **Lagnieu**, on distingue assez clairement le débit seuil nécessaire à Bugey (débit de sureté pour la CNPE). Quand les débits journaliers sont inférieurs à **160-170 m³/s aucune variation n'est observée** (les usines hydroélectriques ne font alors plus d'éclusées) afin de ne pas abaisser le débit en dessous du débit de sureté. **Entre 160 et 200 m³/s, les variations sont comprises entre 50 et 90 m³/s en médiane avec des maximums à 225 et 290 m³/s.** L'influence de Génissiat est atténuée à Lagnieu par les ouvrages hydroélectriques intermédiaires qui fonctionnent au fil de l'eau et permettent de démoduler les éclusées de Génissiat. Les variations infra-journalières sont alors moins marquées qu'à Pougny.

Pour **Ternay**, dès **220 m³/s** de débit journalier, **les variations infra-journalières atteignent environ 100 m³/s en médiane.** A 300 m³/s, les variations ne dépassent pas 200 m³/s. Pour un débit journalier entre 300 et 350 m³/s les grandeurs de variations sont plus dispersées et peuvent atteindre 362 m³/s comme ne pas dépasser 35 m³/s.

Des observations similaires sont établies à Valence et à Viviers, à savoir que les variations commencent à être importantes à partir de **370-400 m³/s pour Valence et 400-440 m³/s pour Viviers.** En dessous de ces débits, les variations sont de l'ordre de 50 m³/s et au-dessus elles débutent à 100 m³/s environ et évoluent ensuite progressivement. Alors qu'à Valence, les maximums atteignent entre 300 et 350 m³/s, à Viviers, des maximums ont été enregistrés entre 450 et 650 m³/s en 2011.

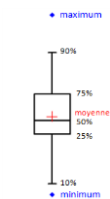
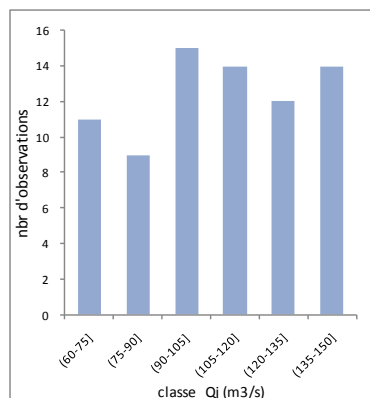
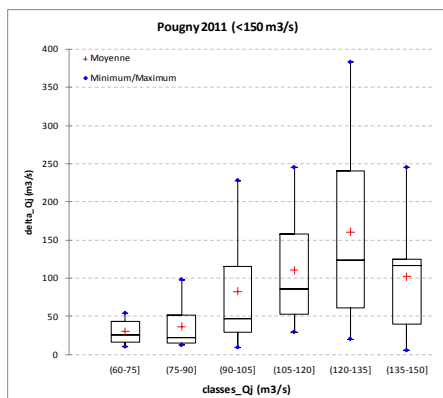
Beaucaire, en aval de Vallabrègues, subit les éclusées des ouvrages amont mais peut être aussi soumis aux influences de la mer. Dès les plus bas débits journaliers, **400-440 m³/s**, les variations sont de l'ordre de 100-150 m³/s en médiane et atteignent ensuite 190 à 230 m³/s pour des débits journaliers compris entre 520 et 640 m³/s.

Il est important d'indiquer à ce stade que ces variations de débits ne se traduisent pas à tout endroit du fleuve par des variations de hauteur d'eau, compte tenu du fonctionnement des aménagements hydroélectriques (voir chapitre 4.2). Ainsi les impacts potentiels sur les berges et/ou connexion des annexes ne sont pas automatiquement associés à ces variations de débits. Les zones sensibles à ces variations sont détaillées dans les chapitres suivants.

L'hydrologie du fleuve conditionne les variations de débits induites par chaque aménagement dans le cadre de sa consigne d'exploitation spécifique. La demande énergétique étant plus forte la semaine, les éclusées énergétiques y sont plus importantes que le week-end. Plus l'hydrologie est soutenue (2011 vs 2012) et moins il est possible d'observer de différences entre la semaine et le week-end.

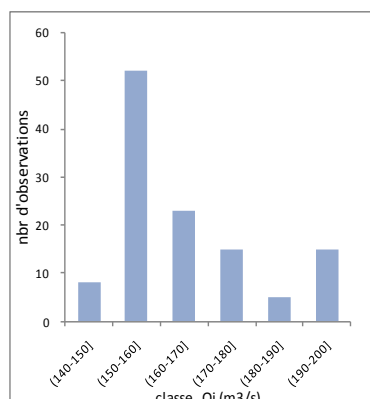
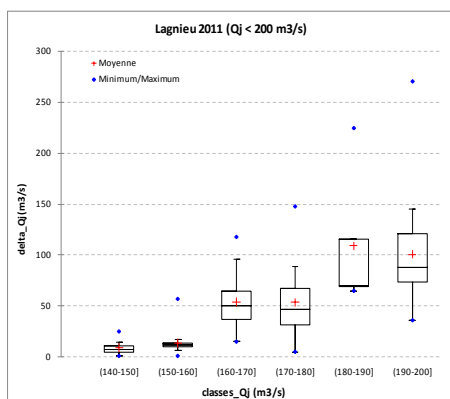
En dessous de 150 m³/s (pour mémoire 158 m³/s correspond au VCN 3 5ans sec) sur le secteur de Lagnieu, il n'est plus observé de variations infra-journalières afin d'assurer à tout moment le débit de 130 m³/s au droit de la CNPE de Bugey.

Il est constaté que l'ensemble des stations que le débit journalier correspondant à l'arrêt des éclusés est inférieur au VCN 3 5ans sec.



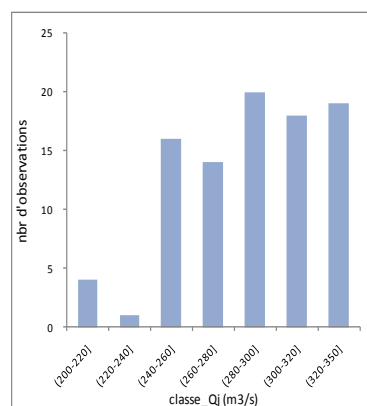
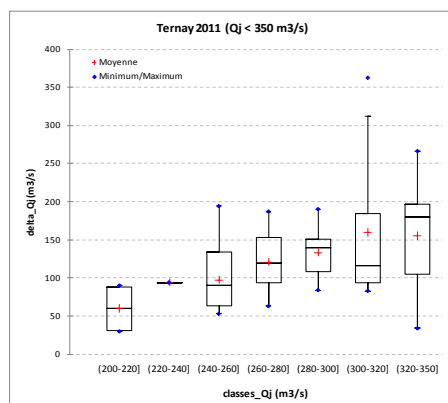
POUGNY

Statistique	(60-75]	(75-90]	(90-105]	(105-120]	(120-135]	(135-150]
Nb. d'observations	11	9	15	14	12	14
Minimum	10	12	9	29	20	5
Maximum	54	98	228	245	383	245
1er Quartile	17	15	30	53	61	39
Médiane	26	22	47	86	124	117
3ème Quartile	44	51	116	158	241	125
Moyenne	30	37	83	110	161	102



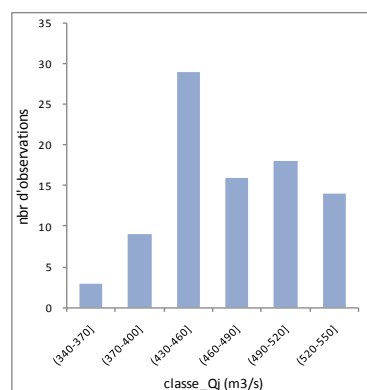
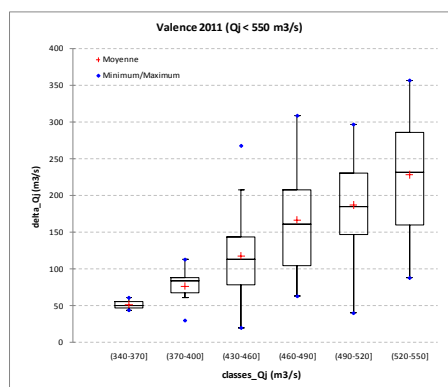
LAGNIEU

Statistique	(140-150]	(150-160]	(160-170]	(170-180]	(180-190]	(190-200]
Nb. d'observations	8	52	23	15	5	15
Minimum	1	1	15	5	65	36
Maximum	25	57	118	148	225	271
1er Quartile	5	10	37	32	69	74
Médiane	7	12	50	47	70	88
3ème Quartile	11	13	65	68	116	122
Moyenne	9	14	54	53	109	101



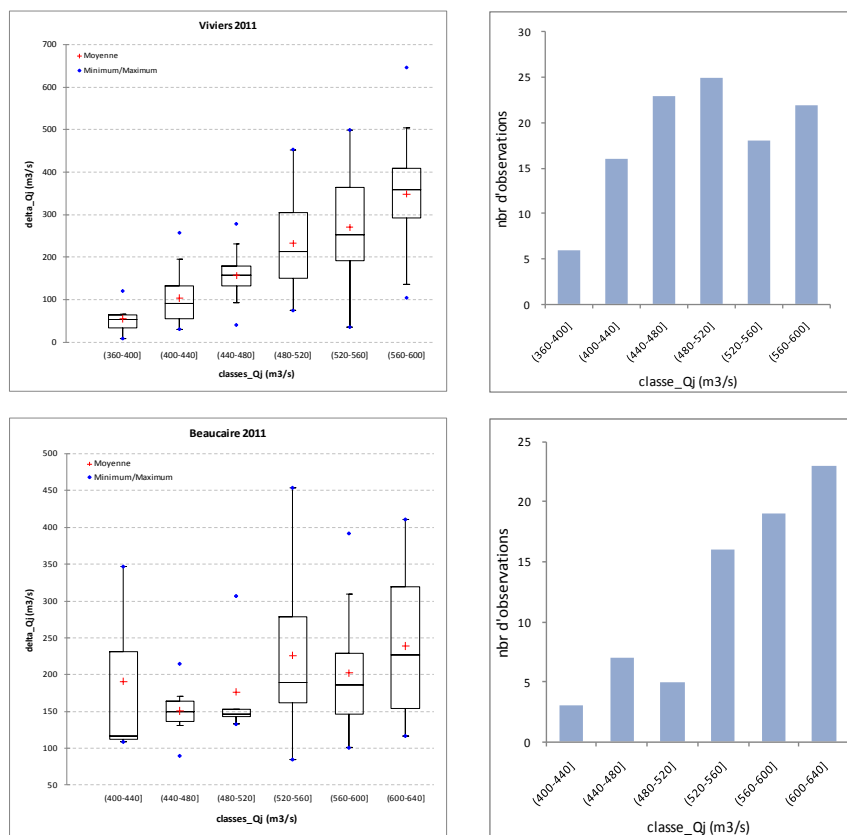
TERNAY

Statistique	(200-220]	(220-240]	(240-260]	(260-280]	(280-300]	(300-320]	(320-350]
Nb. d'observations	4	1	16	14	20	18	19
Minimum	30	94	53	63	84	83	34
Maximum	90	94	194	187	190	362	266
1er Quartile	32	94	63	94	109	94	105
Médiane	60	94	90	120	140	117	180
3ème Quartile	89	94	134	153	151	184	197
Moyenne	60	94	97	121	133	160	155



VALENCE

Statistique	(340-370]	(370-400]	(430-460]	(460-490]	(490-520]	(520-550]
Nb. d'observations	3	9	29	16	18	14
Minimum	44	30	20	63	40	88
Maximum	61	113	268	309	297	357
1er Quartile	47	68	78	104	147	160
Médiane	50	84	113	162	186	232
3ème Quartile	56	88	144	208	231	286
Moyenne	52	77	118	167	187	229



VIVIERS

Statistique	(360-400]	(400-440]	(440-480]	(480-520]	(520-560]	(560-600]
Nb. d'observations	6	16	23	25	18	22
Minimum	8	30	40	74	35	104
Maximum	120	257	278	453	499	646
1er Quartile	34	55	133	150	192	292
Médiane	54	90	157	213	252	360
3ème Quartile	64	133	180	304	365	409
Moyenne	55	104	157	232	270	348

BEUCAIRE

Statistique	(400-440]	(440-480]	(480-520]	(520-560]	(560-600]	(600-640]
Nb. d'observations	3	7	5	16	19	23
Minimum	109	90	133	85	101	117
Maximum	347	215	307	454	392	411
1er Quartile	113	137	143	162	147	154
Médiane	116	150	146	189	186	227
3ème Quartile	232	164	153	279	229	320
Moyenne	191	151	176	226	202	239

Figure 8 : Statistiques descriptives des variations infra-journalières (ΔQ_j) en fonction des classes de débits journaliers (m³/s) en basses eaux en 2011 au droit des six points nodaux

4.4 SECTORISATION ET DÉFINITION DES ZONES SENSIBLES AUX VARIATIONS DE DÉBITS

Sources :

- ▶ Consignes d'exploitation des aménagements (CNR),
- ▶ Fiches aménagements de l'étude globale Rhône,
- ▶ Profils CNR (données bathymétriques).

4.4.1 Eléments de morphologie

L'analyse s'est basée sur une description physique du Rhône à travers différentes variables afin d'identifier les différents contextes sur le Rhône non court-circuité entre la confluence de l'Arve et la mer.

Cette approche typologique est basée sur la prise en compte de variables descriptives du fonctionnement de l'hydrosystème susceptibles d'influencer les conditions d'habitabilité pour les différences espèces piscicoles, mais aussi la vie biologique. « *De façon générale les rivières tendent vers une combinaison - dynamiquement stable - entre deux types de variables :*

- ▶ Des variables de contrôles, qui s'imposent directement à la rivière et contrôlent son évolution physique ;
- ▶ Les variables de « réponse » qui permettent à la rivière de s'ajuster aux mutations des variables de contrôle. »³

Le Rhône aménagé présente une configuration particulière par rapport à un hydrosystème fluvial classique naturel. Cette particularité conduit à retenir les variables suivantes en intégrant les aménagements en tant que variable structurante.

VARIABLES DE CONTRÔLE

VARIABLES DE CONTRÔLE	Intérêt
Variables prises en compte	
Aménagements structurants	Le Rhône aménagé est totalement contraint par les aménagements transversaux qui conditionnent l'allure du profil en long et, en grande partie, les débits et le transport solide. On peut ajouter aussi les berges artificialisées qui restreignent la mobilité latérale du fleuve.
Géologie	Dans le cas du Rhône aménagé, la structure géologique est moins importante que la présence d'affleurements rocheux qui peuvent localement limiter l'incision du lit. De façon générale la géologie conditionne en grande partie la pente ou partiellement le type d'écoulement.
Ordination morphologique (suivant la méthode de Strahler)	Cette variable conditionne les apports liquides et solides. Un changement d'ordination s'accompagne généralement d'une réponse plus ou moins sensible de l'hydrosystème sur les apports solides et le profil en long ou encore la largeur du lit et la température de l'eau.

³ D'après « Eléments d'hydromorphologie fluviale » J.R. Malavoit et J.P. Bravard, ONEMA, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.2010, 224 pages.

VARIABLES DE RÉPONSE

Le Rhône aménagé propose des situations dites intermédiaires pour lesquelles certaines variables sont en partie imposées par les aménagements ou alors régies par un fonctionnement plus classique de l'hydrosystème. C'est le cas de la largeur du lit mineur ou encore des variations de pente du fond du lit dont les ajustements sur les parties plus naturelles sont le produit des apports liquides et solides. Dans les zones sous l'influence des aménagements, ces variables sont imposées par les ouvrages.

C'est aussi le cas des apports solides grossiers qui peuvent conditionner localement la pente, notamment pour les tronçons sous l'influence des apports solides des principaux affluents. Au niveau des tronçons aménagés, **le transport solide est plutôt contraint par les conditions d'écoulement imposées par les ouvrages.**

Variable prise en compte	Intérêt
Largeur du lit mineur	Influence possible sur des paramètres spécifiques tels que le caractère de l'écoulement, la diversité des habitats ou encore la température de l'eau.
Pente du fond du lit mineur	
Apports solides grossiers	
Annexes fluviales	Incidence directe sur la diversité des habitats.

La présence d'annexes fluviales est le résultat du fonctionnement passé du cours d'eau (avant aménagements). Si les véritables annexes fluviales (lônes, bras connectés) peuvent encore être alimentées par le Rhône, sa capacité à créer ou même à « entretenir » de tels milieux est très faible (ou plus possible) sur sa partie aménagée.

Les annexes fluviales sont des nurseries pour les jeunes stades, rejointes par une migration active ou passive. Les lônes (terme utilisé pour le Rhône qui traduit un ancien bras du fleuve alimenté en eau par infiltration ou en période de crue) jouent un rôle essentiel dans la productivité et la diversité piscicole de la plaine alluviale. Les lônes et affluents ont également des fonctionnalités saisonnières non associées à la reproduction. Ils peuvent être utilisés pendant la saison froide lorsque les poissons, inactifs du fait des basses températures, se protègent des aléas hivernaux. Pendant les grandes crues ou lors de pollutions massives, ils deviennent des refuges dont la taille et l'éloignement du bras principal sont des gages de protection efficace.

NATURE DES BERGES

La rive est un milieu indispensable pour la majorité des espèces (interface mobile entre les eaux et la plaine alluviale). Le nombre d'espèces et les abondances augmentent avec l'hétérogénéité et le développement de la berge. Cette transition entre milieux aquatique et terrestre ou écotone offre une large gamme de profondeurs, de vitesses du courant et de granulométrie ; plus diversifiée encore en présence de végétation et d'embâcles.

Il est difficile d'évaluer l'état des berges par photographies aériennes car certaines berges complètement **artificialisées par des enrochements ou autres techniques peuvent présenter une ripisylve cachant le renforcement, on parlera donc de berges « végétalisées »** et non « naturelles ». Mis à part tout à l'amont et tout à l'aval du linéaire étudié, très peu de berges sont restées « naturelles ».

Les profils en long du Rhône, de l'aval du Léman jusqu'à l'embouchure, associés aux variables décrites ci-dessus, sont représentés sur les figures ci-après.

Ces illustrations exposent l'importance de l'anthropisation qui a eu lieu sur le Rhône. Le Rhône vif est totalement artificialisé ce qui lui confère un physique de chenal/canal avec des berges artificielles.

Ils soulignent de la même façon l'importance des aménagements en tant qu'éléments structurants, même si les variables de contrôle telles que la géologie et les affluents conditionnent à la fois les types d'aménagements et certainement la pente du fond du lit, le transport solide et les largeurs du plan d'eau.

Le Rhône vif (hors tronçons court-circuités) totalise un linéaire artificialisé de 406 km de long (somme de la longueur des retenues et des canaux de dérivation), ce qui représente environ 80 % du linéaire total du Rhône français.

La présence des ouvrages transversaux et le gabarit artificialisé du fleuve sont les paramètres les plus influant sur les caractéristiques de l'habitat physique des espèces.

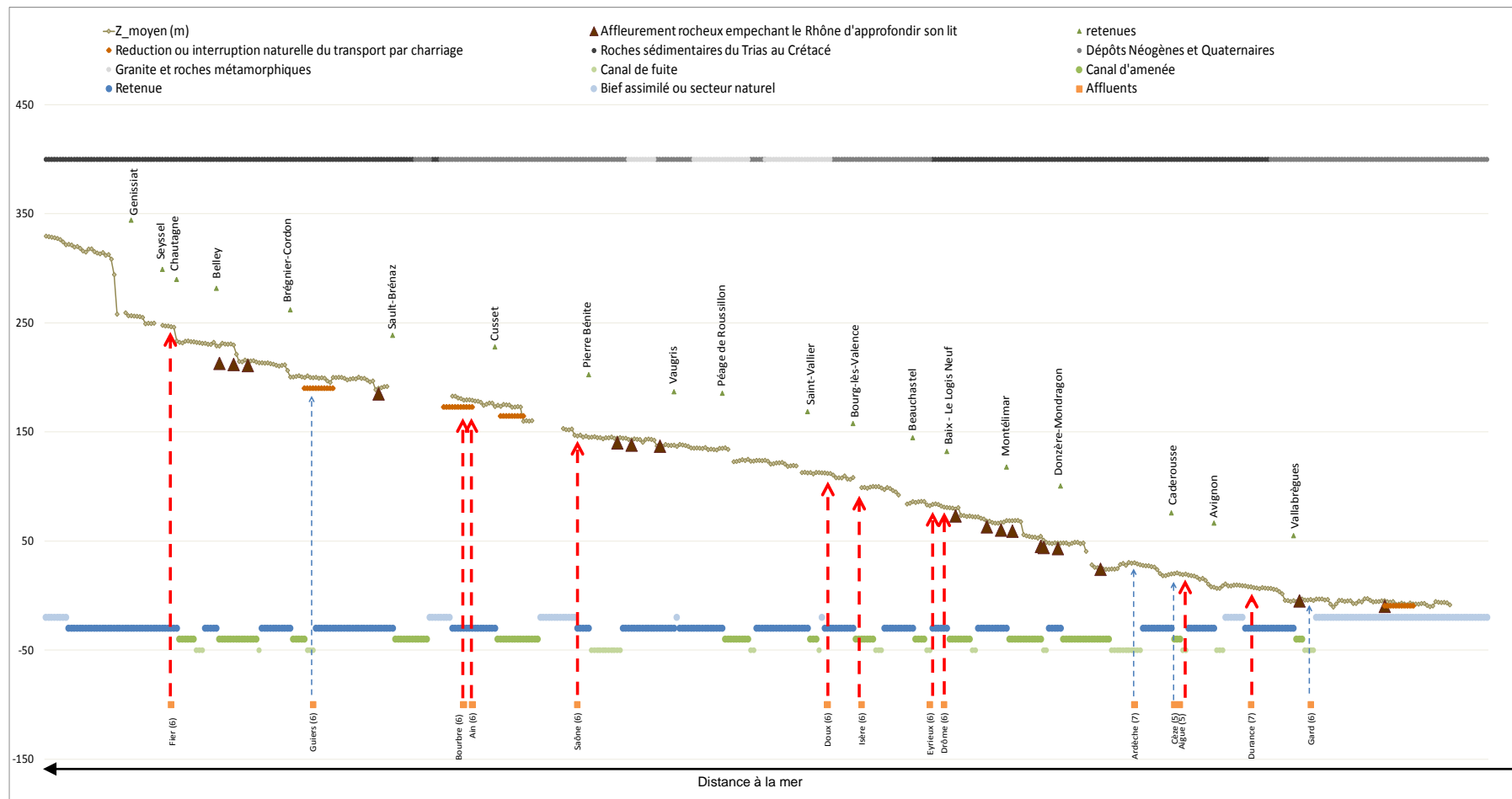


Figure 9 : Représentation du profil en long du Rhône français associé aux variables de contrôle : Géologie ; Report des aménagements du Rhône avec identification des retenues, canaux d'aménées et de fuite et biefs assimilés ; Localisation des principaux affluents (ordination associées)

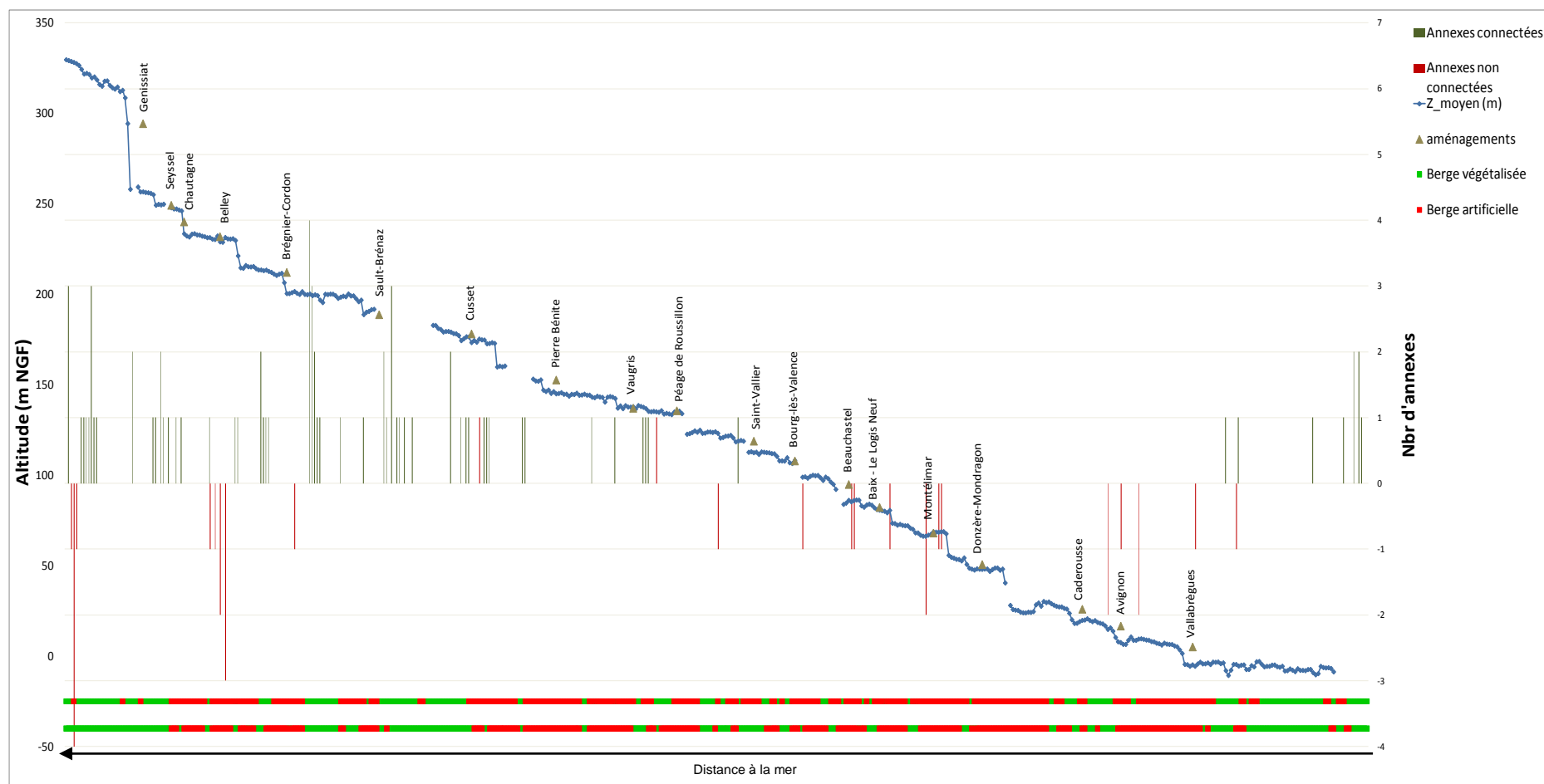


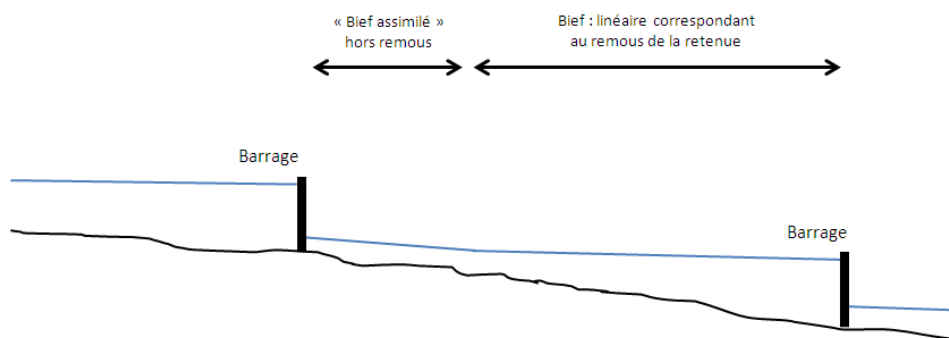
Figure 10 : Représentation du profil en long du Rhône associé aux variables susceptibles d'influencer les conditions d'habitabilité : aménagements ; annexes fluviales et la nature des berges

4.4.2 Impacts des aménagements : définition des zones sensibles aux variations de débits

La compartimentation imposée par les ouvrages permet de distinguer :

- ▶ Les linéaires aménagés et sous l'influence directe de ces aménagements ;
- ▶ Les linéaires « à courant libre », (dénommés « biefs assimilés ») soumis à l'action indirecte, ou moins directe, des aménagements.

Figure 11 : Différence entre Bief et Bief « assimilé »



Sur le Rhône Français, les linéaires artificiels représentent 406 km pour environ 100 km de secteurs plus naturels, dont 40 km de « biefs assimilés » et 60 km non aménagés entre Vallabrègues et la mer.

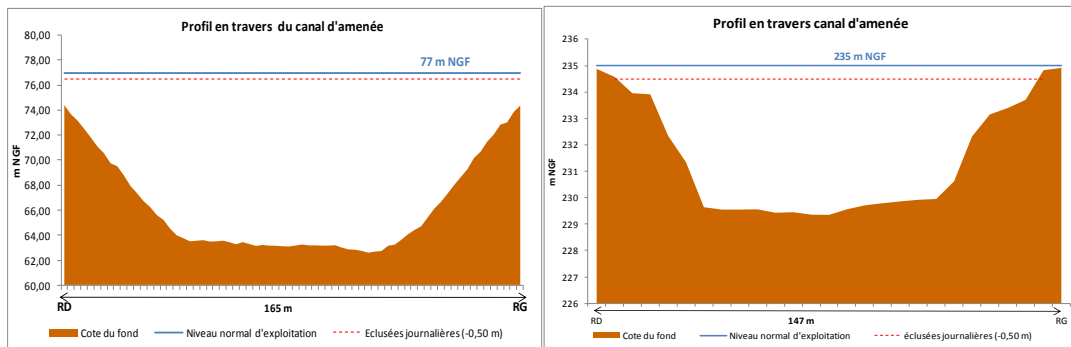
LINÉAIRES ARTIFICIELS

Depuis la frontière France/Suisse jusqu'à l'embouchure du fleuve, environ 160 km de linéaire sont canalisés pour le fonctionnement des aménagements hydroélectriques (canal de dérivation).

Ces **canaux de dérivation**, soit environ **20 % de linéaire total**, **ne présentent pas d'enjeux pour les communautés vis-à-vis de la définition de conditions limites de débit**. Les berges sont entièrement artificielles et aucune annexe fluviale n'est recensée sur ces canaux de dérivation.

En raison du maintien de la ligne d'eau imposé par chaque ouvrage, de la forme trapézoïdale du lit et de la forte artificialisation des berges, **le débit n'apparaît pas comme une variable importante pour le maintien des espèces sur ces linéaires**.

Figure 12 : Exemple de profils en travers dans le canal d'aménée de Montélimar (gauche) et Belley (droite) d'après les données bathymétriques (source : CNR)

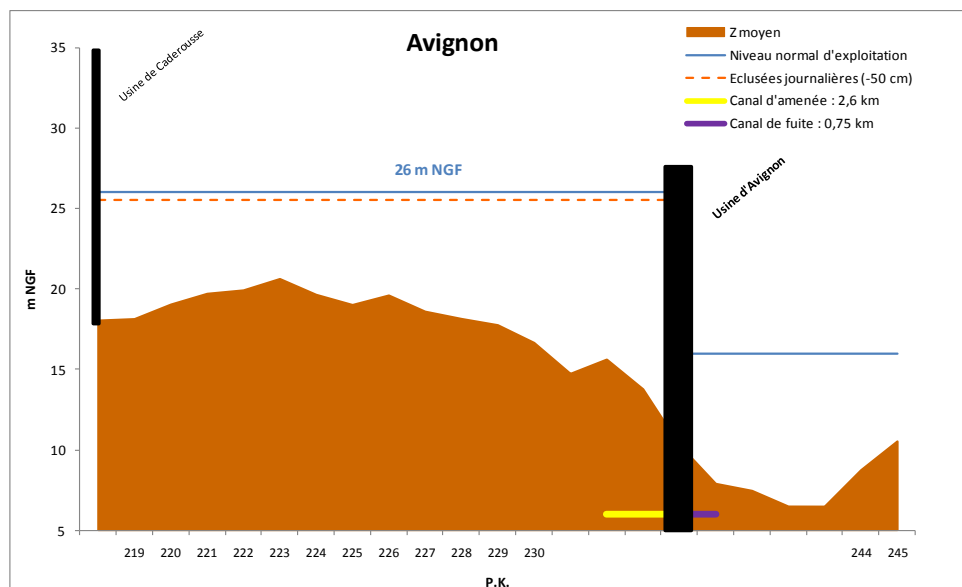


Les retenues des barrages totalisent 245 km du linéaire, soit environ **50 % du linéaire total** du Rhône vif. Ces retenues sont contrôlées par les ouvrages et des cotes fixes du plan d'eau amont sont maintenues pour l'exploitation des centrales hydroélectriques.

Les consignes d'exploitation indiquent qu'en dessous de débits d'étiage sévères, hors « programme de débits », aucune variation du niveau d'eau n'est possible. Pour une grande partie des aménagements, la retenue du barrage s'étend jusqu'à l'ouvrage précédent (en amont) : ainsi aucun linéaire à « courant libre » ou qualifié de « bief assimilé » n'est présent.

Le débit n'apparaît pas comme une variable importante pour le maintien des espèces sur ces linéaires.

Figure 13 : Profil en long de la retenue d'Avignon d'après les données bathymétriques et les consignes gestion de l'aménagement (source : CNR)



SECTEURS SENSIBLES AUX VARIATIONS DE DÉBITS

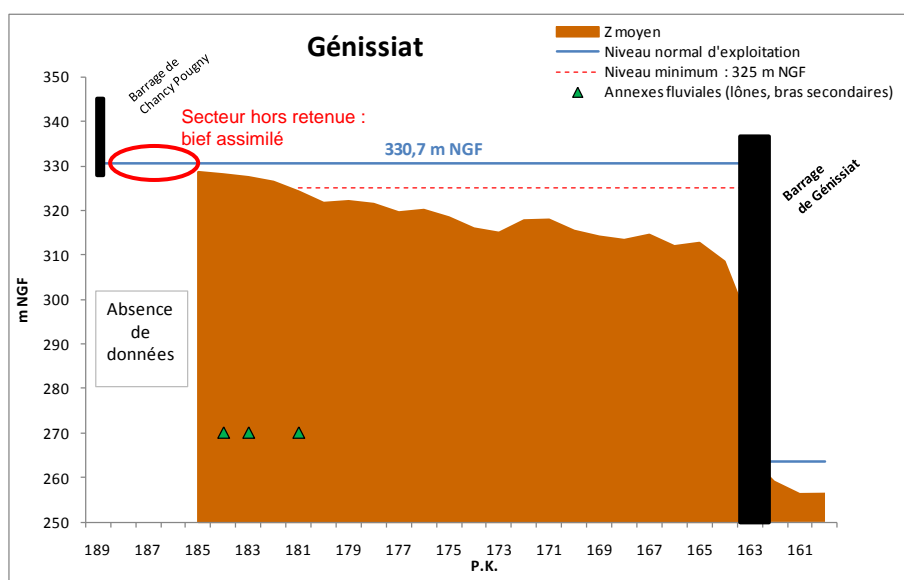
Les secteurs dit « à courant libre » constituent les linéaires qui ne sont pas soumis à l'influence des ouvrages mais soumis aux « variations naturelles » des hauteurs d'eau du Rhône avec le débit (relation univoque). Ils représentent seulement **20 % du linéaire du Rhône français, dont 12 % en aval de Vallabrègues.**

Haut-Rhône

Le fonctionnement général des aménagements produit des variations de débits importantes compensées par les différents ouvrages en aval de Génissiat.

- ▶ 1. Aval de Chancy Pougny – amont retenue Génissiat (\approx 4 km)

Figure 14 : Profil en long de la retenue d'Avignon d'après les données bathymétriques et la gestion de l'aménagement (source : CNR)



- ▶ 2. Aval de Sault-Brénaz – amont retenue de Cusset (\approx 22 km) ;

Ce tronçon correspond au secteur dit « de Bugéy » sur lequel une modélisation des écoulements en deux dimensions a été réalisée par l'Irstea dans le cadre du programme de recherche BUGEY 2D.

C'est principalement sur ce linéaire que les variations de débit peuvent avoir des incidences significatives sur la biologie en modifiant les caractéristiques d'habitats du système : hauteur d'eau, surface mouillée et vitesse.

Bas-Rhône

Pour la grande majorité des ouvrages du Bas-Rhône, le fonctionnement au fil de l'eau et les capacités d'accumulation limitées n'induisent que de faibles variations de niveaux au sein du plan d'eau et en aval de l'usine.

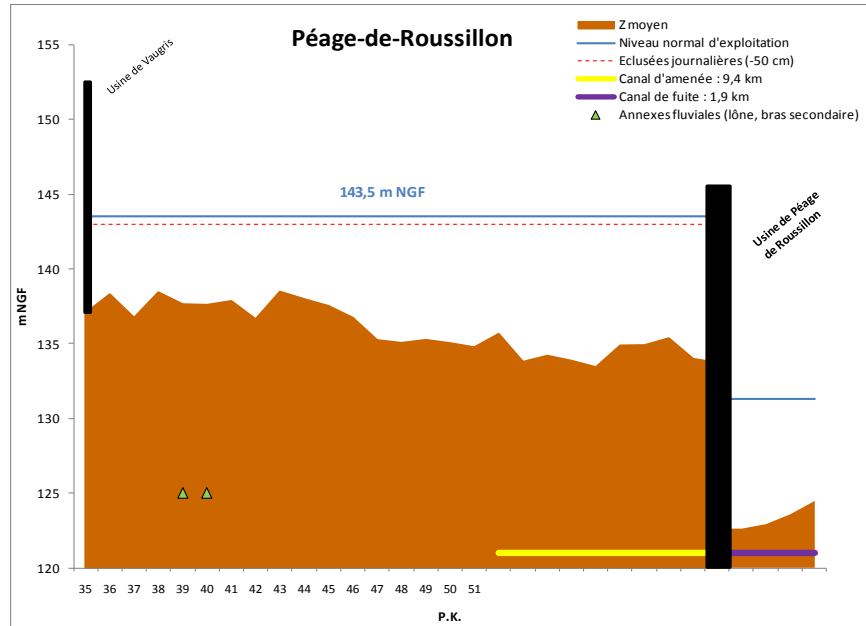
Les incidences potentiellement les plus importantes (d'après G. Carrel) peuvent concerner le maintien d'un plan d'eau avec l'ennoiment de faciès lotiques peu favorable aux espèces plus typiques du Rhône naturel. Cela concerne vraisemblablement les secteurs dont la pente relative du fond du lit mineur est la plus importante.

Les différences entre les niveaux normaux d'exploitation et les niveaux « bas » font état d'un potentiel de variation qui concerne essentiellement la gestion des crues, car en situation normale (statistiquement 9 à 10 mois par an), la hauteur de chute est maximale et le plan d'eau est quasi horizontal, hors variations journalières admissibles (0,50 m deux fois par jour).

Les linéaires à enjeux sur le Bas-Rhône ne représentent alors qu'une partie très faible du fleuve (hormis les 60 km en aval de Vallabrègues) :

- ▶ 3. Aval canal de fuite de Cusset – amont retenue Pierre Bénite correspondant à la traversée de Lyon (≈8 km) ;
Les profils bathymétriques de la CNR n'étant pas disponible pour toute la traversée de Lyon, aucun profil en long n'a pu être généré.
- ▶ 4. Aval canal de fuite Vaugris – amont retenue Péage de Roussillon (≈1 km) ;

Figure 15 : Profil en long de la retenue de Péage-de-Roussillon d'après les données bathymétriques et la gestion de l'aménagement (source : CNR)



La présence du secteur à courant libre en aval de l'usine de Vaugris n'est pas identifiable avec les données disponibles. Deux annexes sont identifiées en amont de la retenue de Péage-de-Roussillon mais elles sont vraisemblablement sous l'influence de l'aménagement donc non soumises aux variations naturelles débit/hauteur d'eau.

- ▶ 5. Aval canal de fuite Saint-Vallier – amont retenue Bourg-lès-Valence (≈ 1 km) ;
- ▶ 6. Aval canal de fuite d'Avignon – amont retenue Vallabrègues (≈ 4 km) ;
- ▶ 7. Aval Vallabrègues jusqu'à la mer (62 km) ;

Ce secteur est sous influence du vent, de la pression atmosphérique et du niveau de la Méditerranée.

Seul 20 % du Rhône présente une sensibilité au débit par la relation univoque entre débit et hauteur d'eau (secteur dit « à courant libre »). Cette sensibilité se traduit sur le terrain par la disponibilité d'habitats selon le débit, notamment en berges ou par la connexion d'annexes fluviales.

Ces secteurs sont soumis aux variations de débits issues des éclusées et des apports des bassins versants intermédiaires.

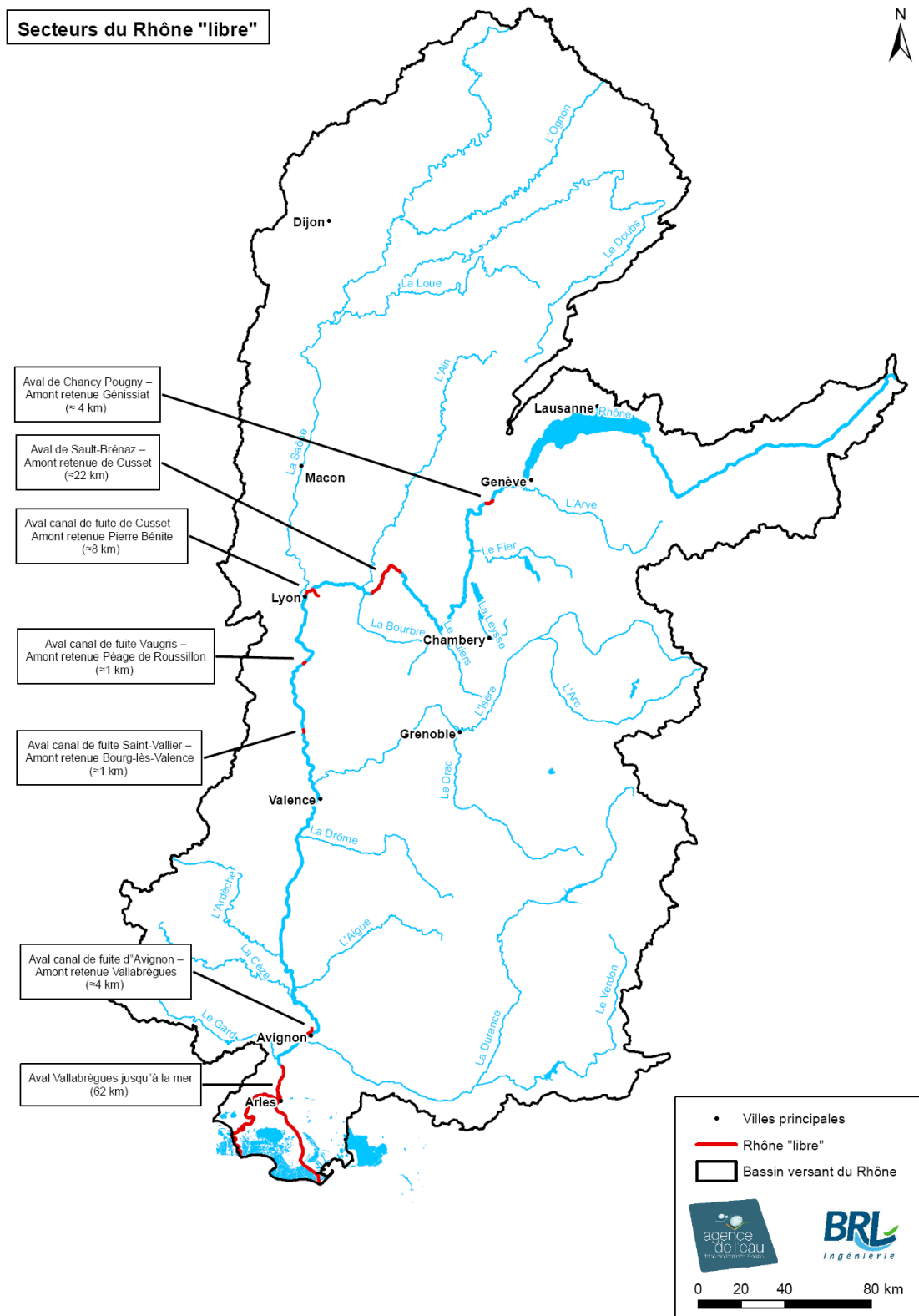


Figure 16 : Carte des secteurs de Rhône « libre »

4.5 INCIDENCE DE L'HYDROLOGIE À L'ÉCHELLE INFRA-JOURNALIERE SUR LES HABITATS

Source : débits horaires aux 6 points nodaux des années 2011 et 2012 et courbes de tarage des stations de Pouigny et Lagnieu (CNR)

Seules les stations de Pouigny et Lagnieu présentent des courbes de tarage avec une relation univoque entre hauteur et débit (voir ci-avant). **Ces relations permettent de traduire sur ces secteurs les variations de débit en variation de hauteur d'eau à l'échelle horaire.**

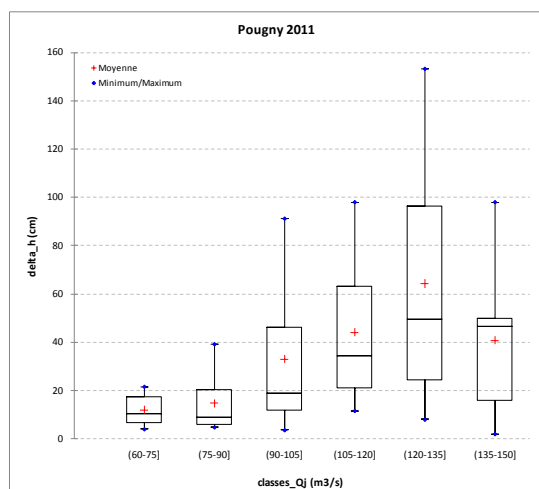
4.5.1 Pouigny

Les courbes de tarages fournies par la CNR indiquent qu'une variation de débit de 25 m³/s correspond à une variation en hauteur d'eau de 10 cm pour les faibles débits.

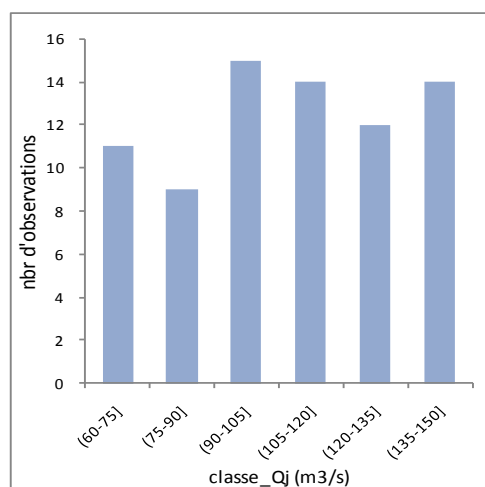
Les graphiques en boxplots (Figure 17-a) sur les débits de basses-eaux illustrent les variations de hauteur d'eau journalières par gamme de débit journalier.

Sur les débits de basses-eaux inférieurs à 150 m³/s, la variation des débits sur une journée entraîne une variation de hauteur d'eau comprise entre 10 et 50 cm en médiane (Figure 17-c). Sur cette même gamme de débit journalier, les variations maximum observées sont de 1 m à 1,5 m.

Figure 17 : Estimation des variations infra-journalières de hauteur d'eau (cm) en fonction du débit journalier (m³/s) à partir de la courbe de tarage (hauteur/débit) sur la station de Pouigny en 2011.



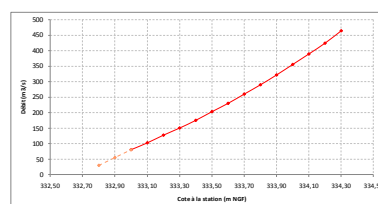
a) Variations de hauteur d'eau en fonction des classes de débits journaliers (bas débits)



b) Nombre d'observations par classe de débits journaliers

Statistique	(60-75]	(75-90]	(90-105]	(105-120]	(120-135]	(135-150]
Nb. d'observations	11	9	15	14	12	14
Minimum	4	5	4	12	8	2
Maximum	22	39	91	98	153	98
1er Quartile	7	6	12	21	24	16
Médiane	10	9	19	34	49	47
3ème Quartile	17	20	46	63	96	50
Moyenne	12	15	33	44	64	41

c) Tableau des statistiques



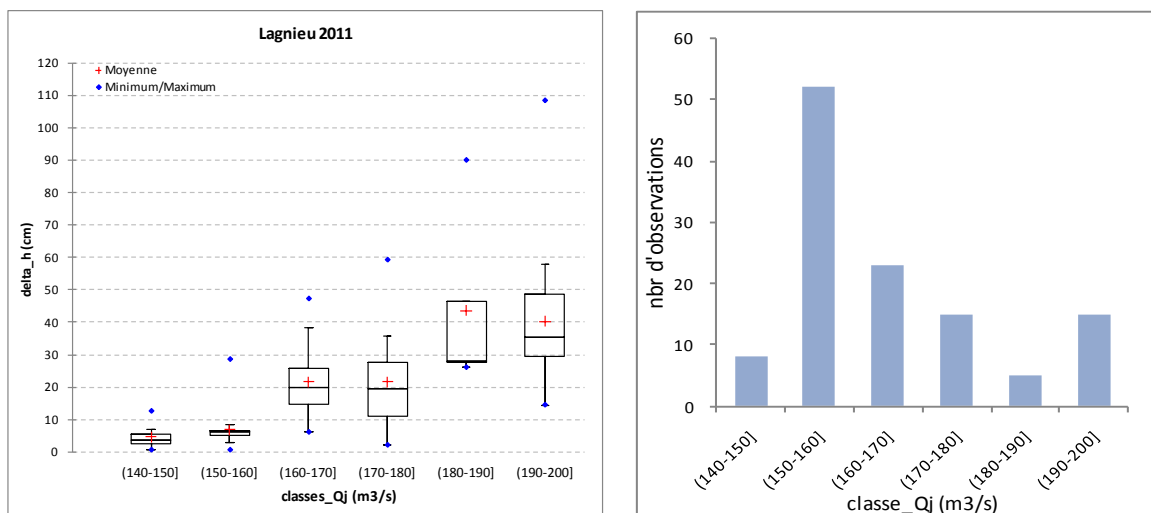
d) Courbe de tarage

4.5.2 Lagnieu

D'après la courbe de tarage fournie par la CNR, pour un débit journalier inférieur à 160 m³/s, une variation de débit de 42 m²/s correspond à une variation en hauteur d'eau de 20 cm. Quand le débit journalier est supérieur à 160 m³/s, une variation de débit de 47 m²/s correspond à une variation en hauteur d'eau de 20 cm (Figure 18-d).

En dessous de 160 m³/s, de faibles variations de débit et donc de variation de hauteur d'eau sont enregistrées (Figure 18-a). Pour les débits compris entre 160 et 200 m³/s, les éclusées provoquent des variations de hauteur d'eau comprises principalement entre 10 et 50 cm (avec des maximums d'environ 1 m). Ces variations peuvent se traduire par une déconnexion d'annexe fluviales ou des berges et/ou bancs de sables exondés à certains moments de la journée (com. pers Irstea). Le chapitre suivant consacré à l'étude du secteur de Bugey confirme ces propos.

Figure 18 : Estimation des variations infra-journalières de hauteur d'eau (cm) en fonction du débit journalier (m³/s) à partir de la courbe de tarage (hauteur/débit) sur la station de Pougny en 2011.

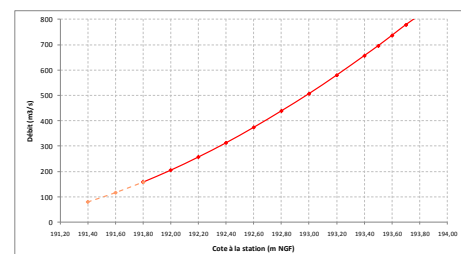


a) Variations de hauteur d'eau en fonction des classes de débits journaliers (bas débits)

b) Nombre d'observations par classe de débits journaliers

Statistique	(140-150]	(150-160]	(160-170]	(170-180]	(180-190]	(190-200]
Nb. d'observations	8	52	23	14	5	15
Minimum	1	1	6	2	26	14
Maximum	13	29	47	59	90	108
1er Quartile	3	5	15	11	28	30
Médiane	4	6	20	20	28	35
3ème Quartile	6	7	26	28	46	49
Moyenne	5	7	22	22	44	40

c) Tableau des statistiques



d) Courbe de tarage

4.6 DÉBITS DE CONNEXION AVEC LES MILIEUX RIVULAIRES ET ANNEXES

Les fluctuations de débit se traduisent par des variations importantes de la disponibilité en habitat favorable du fait de l'exondation de ces milieux. L'accès aux abris / refuges étant un paramètre clef pour la biologie, la connectivité transversale intermittente peut être limitante. Des travaux ont ainsi été menés afin de connaître le débit qui permet de garder cette connectivité entre le chenal principal et les annexes fluviales et/ou berges.

4.6.1 Secteur de Bugey

Source : Capra H., Pella H., Morin J., Le Pichon C., Perraud C., Datry T., Secretan Y., Jouve P., Matte P. 2010. *Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés d'invertébrés et de poissons. Rapport Final. Rapport Cemagref – Agence de l'Eau RM&C. 104 pp.*

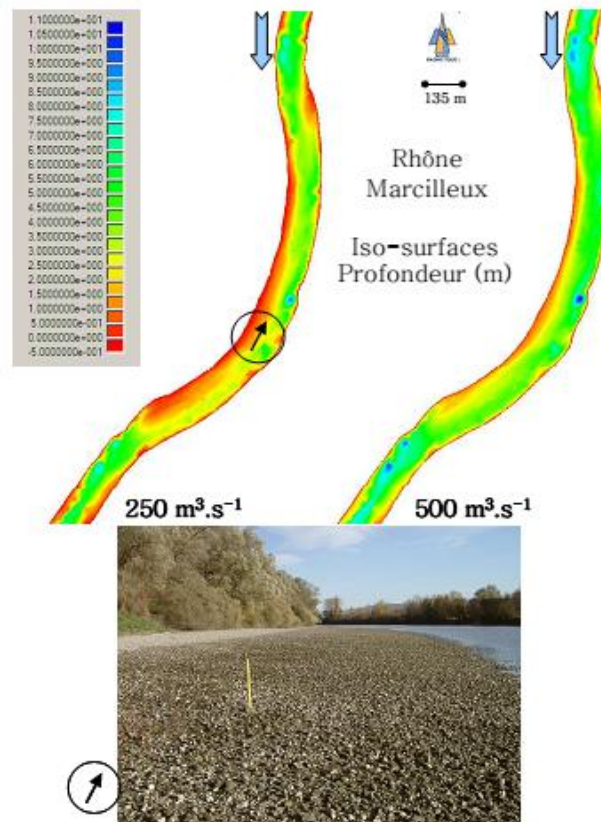
Afin d'analyser les interrelations de divers facteurs environnementaux sur le comportement du poisson dans des milieux complexes tels que le Rhône, un modèle en deux dimensions (BUGEY 2D) a été développé. **Il permet d'associer à la fois les conditions d'écoulement, d'habitat et la température de l'eau.** Les résultats de ces travaux ont permis **d'apprécier les débits à partir desquels certains sites sont exondés et ceux pour lesquels les milieux rivulaires et annexes sont disponibles pour les communautés.**

Comme présenté dans le chapitre ci-avant, les variations hydrologiques à l'échelle horaire pour des débits journaliers inférieurs à 160 m³/s sont faibles. A partir de 160/170 m³/s journaliers, le marnage engendré par les variations hydrologiques infra-journalières est supérieur à 20 cm.

Dans le cadre de BUGEY 2D, des simulations sur l'évolution des conditions abiotiques ont été réalisées lorsque le débit augmente de 250 m³/s à 500 m³/s (exemple représentatif des écarts de débit horaire au cours d'une journée, un écart de 250 m³/s s'observe 20 % du temps, la médiane étant à 150 m³/s).

Il en ressort que la profondeur moyenne augmente de 2,4 m à 3,1 m lorsque le débit augmente de 250 m³/s et 500 m³/s, et diminue d'autant lors du retour au débit de base. **Une estimation montre que 25 km² de surface mouillée disparaissent lors d'une baisse de débit de 500 m³/s à 250 m³/s** sur l'ensemble du tronçon étudié. La *Figure 19* illustre la **diminution de surface mouillée sur les berges et les contours des îles perturbant l'accès aux abris tels que les embâcles**, majoritairement disposés en berge. Ces variations de débit conduisent à une disponibilité intermittente des habitats de berge, colonisés par l'essentiel de la communauté piscicole (notamment les jeunes stades) et par les invertébrés.

Figure 19 : Représentation cartographique des simulations de la profondeur d'eau à 250 m³/s et 500 m³/s dans le méandre de Marcilleux (amont CNPE Bugey). Une photo d'un banc de galet en rive droite. (source : Capra H. et al., 2010)



Entre 650 et 700 embâcles (ensemble de bois mort, de taille importante, détaché de la rive et posé sur le fond du cours d'eau) ont été recensés en 2009 sur l'ensemble du secteur entre Sault-Brénaz et Jons (lônes et bras secondaires compris). Il apparaît assez clairement (observations de terrain) que **tous ces embâcles sont déconnectés de l'écoulement si le débit est inférieur à 300 m³/s**. En revanche, il est raisonnable de penser qu'à 500 m³/s ils soient en eau, et donc fonctionnels.

Figure 20 : Exemple d'évolution de l'accès aux abris en fonction du débit entre 220 m³/s (gauche) et 320 m³/s (droite). (source : Capra H. et al., 2010)



Comparativement aux zones submergées en permanence, **les cycles d'assèchement conduisent à une forte réduction de la diversité biologique aquatique** et les taxons sensibles aux assecs ne sont pas présents sur cette zone. **Ces zones, composées principalement de bancs de galet et graviers, sont asséchées et mises en eau de façon répétitive en lien avec les variations infra-journalières présentées dans le chapitre 4.5.2. A 200 m³/s, de nombreux bancs de graviers deviennent exondés.** La quasi-absence de colonisation biologique, invertébrés notamment, en fait des « déserts biologiques » fortement préjudiciables pour la qualité biologique du fleuve.

L'étude « *Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés* » (2011, Accord Cadre Cemagref – Agence de l'Eau RM&C – Action N°15, 104p) montre que les assèchements répétés et les mises en vitesse lors des montées de débit sont très défavorables aux jeunes stades de poissons et invertébrés benthiques.

La modélisation de Bugey 2D évalue la quantité d'habitats présents pour les espèces aquatiques selon le débit sur un secteur important du Rhône « libre » sensible aux variations de débits.

Les variations infra-journalières de débits entraînent une exondation régulière du lit (pied de berges, embâcles, plage de graviers, etc.) : ces secteurs deviennent progressivement « abiotiques » car difficilement colonisables par les espèces. Cela est confirmé par les inventaires faunistiques (poissons et macro benthos) réalisés sur le secteur d'étude.

En étiage, les variations infra-journalières sont très faibles et la connexion aux habitats en berges est très réduite (en deçà de 200 m³/s, de nombreux bancs de graviers sont exondés).

4.6.2 Secteur d'Arles

Source : Nicolas Y., Pont D. 1997. *Hydrosedimentary classification of natural and engineered backwaters of a large river, the lower Rhône: possible applications for the maintenance of high fish biodiversity. Regulated Rivers : Research & Management, Vol. 13 : 417-431.*

Les plaines d'inondation naturelles des fleuves présentent une grande variété de plans d'eau qui peuvent être classés selon un gradient de connectivité avec le chenal principal : bras secondaire, bras morts, etc. Ces annexes sont connectées pendant les épisodes de crues et certaines retrouvent leur individualité après les inondations.

Comme déjà indiqué, durant le dernier siècle, **les berges du Rhône ont été endiguées** par des **enrochements** afin de lutter contre les érosions. Des digues submersibles longitudinales ont aussi été édifiées dans le but de concentrer les écoulements dans le chenal principal et d'accélérer la vitesse du courant afin de maintenir la voie navigable durant les périodes de basses eaux. **Les digues transversales**, quant à elles, permettent de réduire la vitesse du courant et **d'augmenter la sédimentation dans les compartiments latéraux pendant les épisodes de crues**. Elles séparent différents compartiments appelés **casiers Girardon** qui peuvent être **connectés avec le chenal principal selon le niveau d'eau**. Les casiers peuvent jouer un rôle important pour les espèces piscicoles qui utilisent généralement des plaines d'inondations naturelles pour se reproduire, se nourrir ou encore se réfugier.

Des travaux de recherche ont été menés sur **14 casiers/annexes alluviales** choisis sur les **sept kilomètres de l'aire d'étude** (en **amont immédiat de la confluence entre le Petit-Rhône et le Grand-Rhône**). Ils présentent des degrés de connexion variables avec le chenal principal.

L'analyse de l'hydrologie a été réalisée à partir des moyennes de débits journaliers (1965–1994). La connexion, et ainsi l'accès aux espèces piscicoles dans ces systèmes, dépend directement du niveau d'eau dans le chenal principal et donc du débit du Rhône, le secteur étant considéré comme « à courant libre ».

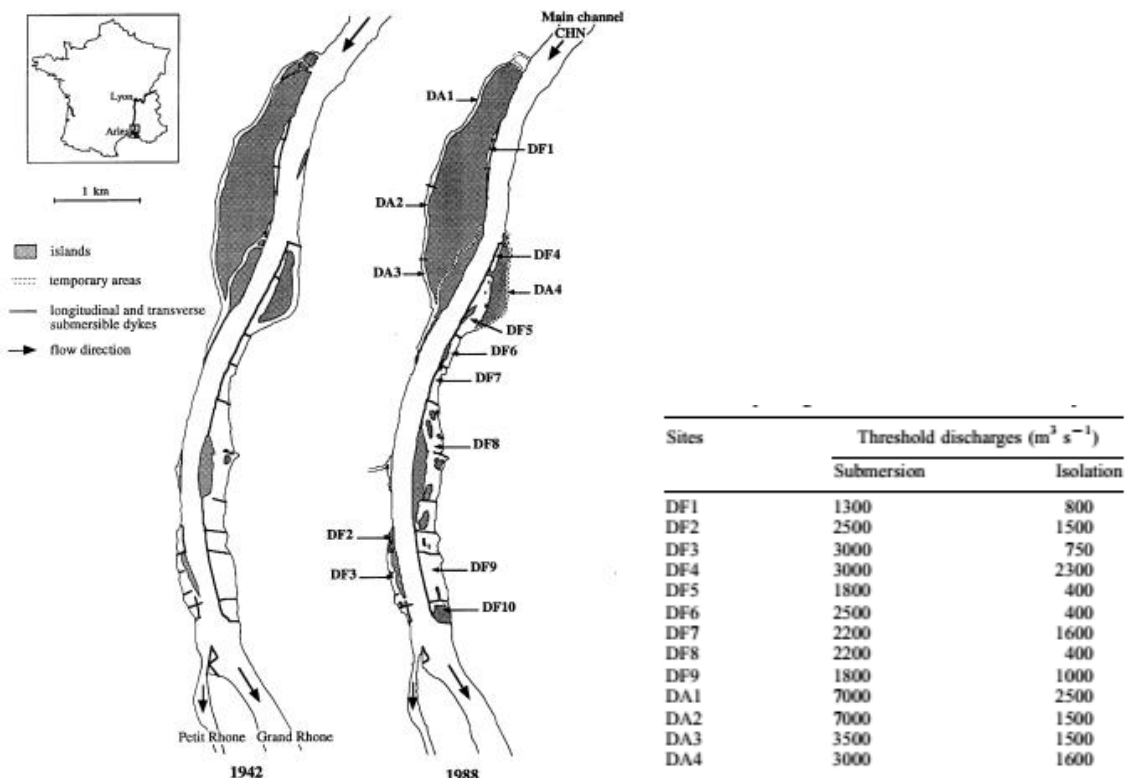
Pour autant, le site d'étude étant sous l'influence directe de la mer et du vent, la relation entre le débit et le niveau d'eau n'est pas en permanence univoque. L'étude ne donne pas les conditions associées à la valeur de débit.

Les termes immersion et isolation sont utilisés pour décrire le degré de connexion des casiers et annexes :

- ▶ Les casiers (DF : dike fiels) sont qualifiés d'« immergés » (« submersion » en anglais) quand le niveau d'eau du chenal arrive à hauteur des digues longitudinales et déborde.
- ▶ Les bras morts (DA : dead arms), pour lesquels le débit d'immersion est défini quand l'eau circule librement de l'amont vers l'aval.

Les débits seuils d'immersion et d'isolation ont été déterminés pour chaque casier et bras mort à partir de campagnes de terrains pour différentes conditions de débits.

Figure 21 : Localisation des 14 sites d'étude sur le Bas-Rhône (amont de la confluence avec le Petit Rhône) et tableau de leurs caractéristiques hydrologiques (source : Nicolas Y. & Pont D., 1997)



L'isolation complète de l'ensemble des casiers et bras morts est mesurée lorsque le débit du Rhône est inférieur ou égal à $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour un débit du Rhône supérieur de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 casiers sur 9 sont connectés avec le chenal principal. A partir de $2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$, l'ensemble des casiers et bras mort sont submergés ou présentent un écoulement amont-aval.

A ce stade de l'étude, il n'a pas été identifié de données biologiques ou études complémentaires permettant d'évaluer l'impact des débits sur les communautés aquatiques sur ce site (liens entre connexion des annexes fluviales et biologie).

4.7 IMPACTS DES BAS DÉBITS POUR LES GRANDS MIGRATEURS

Source : com. personnel MRM

L'appel d'eau douce, soit le débit du Rhône, joue un rôle majeur dans l'attractivité du fleuve vis-à-vis des espèces migratrices comme l'Alose feinte du Rhône. L'importance du fleuve en constitue un des foyers majeurs des différentes espèces amphihalines de la méditerranée occidentale.

C'est lors de l'approche hivernale vers les zones d'embouchures que l'appel d'eau douce en mer est déterminant et conditionne en partie les quantités de géniteurs qui emprunteront l'axe migratoire.

Les observations réalisées au printemps 2011, alors que l'hydrologie du fleuve était faible, ont montré de très faibles remontées d'aloses feintes du Rhône comparativement aux années précédentes (com. Pers MRM).

Une fois la migration enclenchée dans l'axe migratoire (passage dans le milieu « eau douce »), l'hydrologie joue un rôle différent :

- ▶ Lorsque l'hydrologie du Rhône est faible (2003 à 2008) : les surverses aux barrages de dérivation sont réduites ou inexistantes (débit réservé strict). Le canal usinier est alors attractif et permet le passage des migrateurs par les écluses de navigation. Certaines années, on peut ainsi observer des aloses feintes à Montélimar dès la fin du mois d'avril ;
- ▶ Lorsque l'hydrologie du Rhône est forte (2012, 2013) : les vieux Rhône ont une forte attractivité (surverses aux barrages de dérivation), pouvant même dépasser celle des canaux usiniers. Dans la mesure où, à ce jour, les barrages de dérivation du Rhône aval ne sont pas équipés de passes à poissons efficaces pour l'Alose (réalisation et projet en cours par la CNR), la colonisation du bassin reste cantonnée à l'aval (forte colonisation du Vieux Rhône de Beaucaire et du Gardon mais accès réduit aux frayères de la Cèze et de l'Ardèche).

Ces éléments sont valables dans le contexte migratoire et dans le niveau d'équipements à la montaison des barrages actuels.

Il n'a pas été observé d'arrêt de migration suite à une baisse de débit du Rhône dans la mesure où cette baisse intervient de façon progressive. A priori, les arrêts de migration chez l'Alose feinte sont surtout liés à des variations brusques de débit qui sont essentiellement liées aux crues.

L'hydrologie joue un rôle important sur l'attractivité du fleuve. Lorsque les débits hivernaux et du début du printemps sont faibles, le fleuve est moins attractif vis-à-vis des espèces amphihalines et inversement.

Une fois la migration enclenchée dans le fleuve, l'hydrologie joue un rôle sur l'attractivité des voies de passages (écluse pour le canal usinier et équipement de passes à poissons en cours ou en projet sur les barrages des vieux Rhône).

Dans le cas où une baisse de débit intervient de façon progressive, il n'est pas enregistré d'arrêt de migrations.

5. FACTEUR THERMIQUE

Source :

- ▶ Etude thermique globale du Rhône – Phases 2, 3 et 4 ;
- ▶ Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen (L. Tissot, Y. Souchon), 2011.

5.1 COMMENT SE FABRIQUE LA TEMPÉRATURE DU RHÔNE ?

TRANSFERTS AMONT-AVAL

L'étude thermique Rhône a mis en évidence **le rôle prédominant du transfert amont-aval de la température en sortie du lac Léman**, d'autant plus fort que le débit est élevé. Une modification de la température en un point du fleuve se propage loin à l'aval.

Les temps de transfert de la température diffèrent en outre significativement de ceux du débit et varient fortement avec lui : Il faut dix jours entre la sortie du Léman et Tricastin pour un débit du Rhône amont de 400 m³/s, alors que le temps de transfert du débit ne dépasse pas trois jours.

TEMPÉRATURE DE L'AIR

La température de l'eau s'équilibre avec l'air et ce phénomène est d'autant plus rapide que la profondeur est faible. Le lac Léman est influencé uniquement par la météorologie locale et très peu par les transferts amont-aval.

La température de l'air constitue le deuxième facteur de contrôle de la température de l'eau. Plus l'écart entre la température de l'eau et celle de l'air est important, plus l'influence de la température de l'air sur le régime thermique du Rhône sera significative.

ECHAUFFEMENT DES CNPE

Les échauffements de CNPE sont caractérisés par une grande variabilité journalière liée aux débits (dilution) et à la puissance produite (50 % des échauffements à Bugey sont inférieurs à 1,5°C et 90 % à 3,1°C). **Les apports thermiques induisent des échauffements résiduels médians qui atteignent 0,5°C à 1,0 °C de l'amont de Saint Alban à l'amont d'Aramon.** A l'aval immédiat des rejets thermiques, avant mélange du rejet d'eau de refroidissement, l'échauffement est beaucoup plus élevé : il atteint par exemple parfois 9°C en rive droite en aval du CNPE de Bugey, la rive gauche n'étant pas échauffée.

Quand la température de l'eau du Rhône est élevée (supérieure à 20°C à l'amont de Bugey), les échauffements conservés des CNPE sont plus faibles qu'en moyenne.

Lorsque les échauffements induits par les rejets des CNPE sont forts (>6°C pour les trois CNPE), ils se conservent moins bien mais les échauffements résiduels à l'aval demeurent plus élevés qu'en moyenne ; ces situations correspondent à des températures de l'eau peu élevées en général.

Plus qu'ils ne se cumulent, ces différents facteurs se conjuguent donc pour former la température de l'eau en un point du Rhône.

La température de l'eau en sortie du Léman (fortement influencée par la météorologie locale) est fondamentale dans le régime thermique du Rhône, et ce d'autant plus que le débit est élevé.

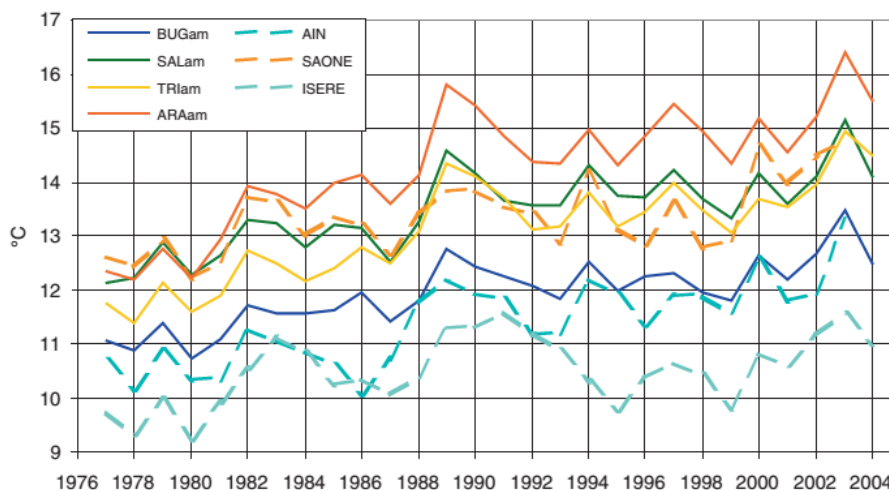
5.2 COMMENT LA TEMPÉRATURE DU RHÔNE ÉVOLUE-T-ELLE ?

5.2.1 Dans le temps ?

CHANGEMENTS À LONG TERME

Au cours des 25 dernières années, le changement le plus remarquable est une augmentation très significative de la température moyenne annuelle. Cette augmentation est plus marquée dans le Bas-Rhône qu'en amont de Lyon. A l'amont immédiat des sites de production, l'écart sur la température moyenne annuelle varie entre +1,6°C à Bugey et +3°C à Aramon. La dérive de la température de l'eau sous l'effet du changement climatique en cours conduit au même échauffement moyen.

Figure 22 : Évolution de la température moyenne annuelle entre 1977 et 2004 sur les quatre stations du Rhône situées en amont des CNPE, et les trois principaux affluents : Ain, Saône et Isère (source : Etude thermique Rhône)



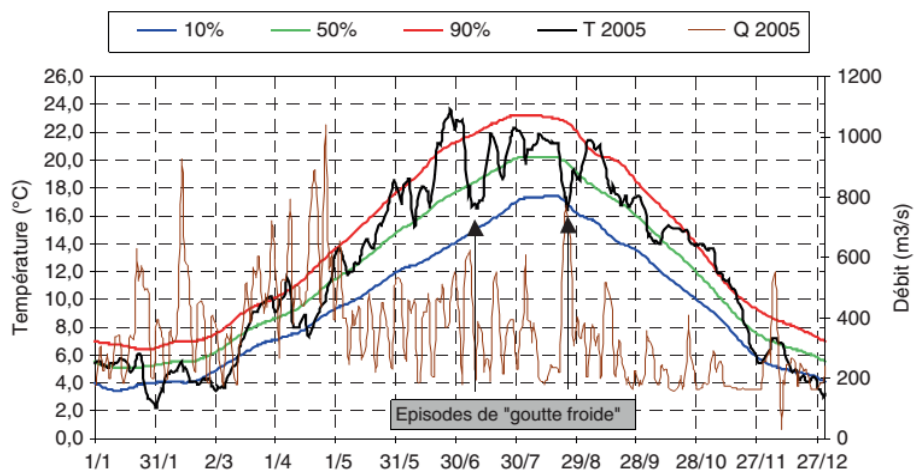
Sur la période 1977-2004, il est constaté un réchauffement global des températures du fleuve de l'ordre de +1,5°C sur le Haut Rhône et +3,0°C sur le Bas-Rhône. À l'échelle pluriannuelle, le Rhône et ses affluents présentent un échauffement moyen de +0.5 à +1.6°C selon les stations de mesure entre les périodes [1977-87] et [1988-2003].

CHANGEMENT À MOYEN TERME

Les fluctuations conjuguées des débits respectifs du Rhône et de ses affluents ainsi que des facteurs météorologiques induisent des variations de température sensibles à l'échelle de la semaine et du mois.

Une des caractéristiques remarquables du régime thermique du Rhône réside dans les épisodes de chute brutale de la température, provoqués par la remontée d'eau profonde et froide qualifiée de « gouttes froides ».

Figure 23 : Chroniques thermique et hydrologique du Rhône en amont de Bugey et localisation des « gouttes froides ». Période 1977-2004 (Daufresne & Boët, 2005).

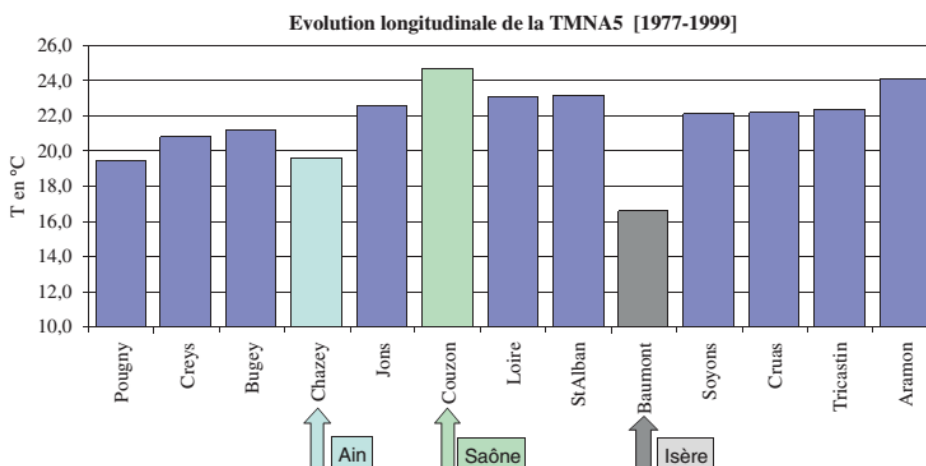


5.2.2 Dans l'espace ?

Sur l'axe principal du fleuve, le régime thermique est principalement déterminé par la température de l'eau sortant du lac Léman qui constitue une forte discontinuité. Il y a ensuite une progression du lac Léman jusqu'à la Méditerranée avec des effets marqués par les principaux affluents, soit du fait de la modification du régime des débits (aval confluence Saône notamment), soit du fait de la modification de la température d'eau par mélange.

Le refroidissement se fait par l'Arve qui est influencé par la glace (d'autant plus froid que les étés sont chauds du fait de la fonte des glaces), l'Ain et l'Isère. La Saône et la Durance présentent des cycles plus élevés de température et réchauffent ainsi les eaux du Rhône.

Figure 24 : Évolution longitudinale de la température du mois le plus chaud de période de retour 5 ans (TMNA5). Période 1977 à 1999 (Poirel et al., 2001)



5.3 QUELLE EST L'INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES MILIEUX ?

Il ressort des analyses statistiques discriminantes complexes de l'étude thermique Rhône que les rejets thermiques interviennent en second ordre par rapport à l'évolution climatique dans les changements biologiques, et ils sont observés surtout dans le chenal.

Les effets biologiques des rejets thermiques sont bien identifiés localement, à l'aval immédiat des CNPE, aux stations où l'échauffement est plus élevé (rive exposée au rejet). Un effet thermique fort en aval immédiat du rejet peut avoir des conséquences importantes :

- ▶ A Bugey, la richesse du peuplement des invertébrés chute dans la zone soumise à des échauffements atteignant 8 à 9°C ;
- ▶ Sur les poissons, il y a un effet « station échauffée » à Bugey mais qui est moins fort que l'effet interannuel ;
- ▶ A St Alban, les végétaux supérieurs montrent une baisse de diversité avec un échauffement de 5°C.

Il n'y a cependant pas de différence significative entre les peuplements amont et aval des sites à une échelle plus large.

Il faut noter que les périodes de bas débits sont caractérisées par une moindre dilution des rejets thermiques, une plus forte amplitude journalière en température de l'eau (les échanges avec l'air étant facilités) et une plus forte amplitude des cycles liés à la photosynthèse sur l'oxygène dissous et le pH. A contrario, les périodes de hauts débits se traduisent par un lissage des cycles et une dilution plus importante des rejets thermiques.

Tableau 8 : Gamme des températures optimales et limite supérieures de la gamme de résistance pour 19 espèces de grands fleuves (source : Tissot & Souchon, 2011)

	Juvéniles			Adultes			Reproduction	
	OPT min	OPT max	MAX	OPT min	OPT max	MAX	OPT min	MAX
Ablette (ABL)				20	30	35	15	28
Barbeau fluvial (BAF)	13	24	32	10	24	32	13	20
Blageon (BLN)	13	15		10	18	27	12	15
Brème commune (BRE)	14	28	34	10	26	35	12	20
Brème bordelière (BRB)				16	25		15	25
Chevaine (CHE)	14	25	30	14	24	30	15	20
Goujon (GOU)	7	27		7	30	36	12	17
Hotu (HOT)	15	25	15	15	24		8	14
Perche soleil (PES)	13	28	30	12	30	35	13	25
Silure (SIL)				12	28	32	20	25
Spirin (SPI)	12	24		12	24	27	14	21

A noter que ces tolérances thermiques pour ces espèces ont été sélectionnées à partir de sources de donnée présentant une grande disparité géographique et temporelle et des conditions de relevés mixtes, provenant soit d'observations de terrain, soit d'expériences contrôlées en laboratoire.

Si l'on compare ces valeurs aux températures du Rhône, en moyenne 20°C sur le Haut-Rhône et 22°C sur le Bas-Rhône, les espèces énumérées ici sont dans leurs optimums vitaux. Le Blageon et le Spirlin peuvent cependant rencontrer des périodes de stress quand la température atteint 27°C.

Aucun épisode de mortalité lié à la température du Rhône n'a été recensé à ce jour. Les modifications du cortège biologique sont essentiellement liées aux modifications d'habitats et de physico-chimie de l'eau ainsi qu'aux changements globaux : on constate une diminution des espèces exigeantes.

Les effets des rejets thermiques sur la biologie sont très localisés en aval immédiat des CNPE. En période de basses-eaux, ces effets sont d'autant plus marqués car le milieu est moins dilué et la profondeur plus faible

Les températures enregistrées aujourd'hui sur le fleuve peuvent être une source de stress pour la vie aquatique (en dehors des optimums) mais jamais des températures létales.

En cas d'élévations importantes de la température, les individus recherchent les micro-habitats pouvant apporter de la fraîcheur (échanges nappe) et fuient les secteurs trop échauffés (aval immédiat de rejets thermiques).

6. CORRÉLATION ENTRE BIOLOGIE, HYDROLOGIE ET THERMIE

6.1 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR LE RHÔNE

Une synthèse des principales études réalisées sur le Rhône, et traitant des relations entre les peuplements piscicoles, l'hydrologie et la thermie est présentée en annexe 2.

De ces analyses, on peut retenir :

- ▶ Que la plupart des liens entre poissons et hydrologie et/ou thermie mis en évidence concernent les **jeunes stades de vie (la classe d'âge 0+ ou recrutement)**. Cela peut s'expliquer par deux raisons :
 - D'une part, les jeunes stades (0+) sont réputés plus **sensibles aux variations physiques de leur environnement** que les stades juvéniles et adultes (Schiemer et al. 1991, Schiemer et al. 2003). Les faibles capacités natatoires des jeunes alevins les rendent vulnérables aux vitesses de courant trop élevées. La température agit comme un déterminant essentiel de la croissance des jeunes poissons, et une croissance importante est associée à une meilleure survie des individus ;
 - D'autre part, l'échantillonnage réalisé donne une **image partielle** du peuplement piscicole, et **biaisée vers les jeunes stades**. En effet, les pêches de berge focalisent sur une strate d'habitat où les jeunes stades sont fortement représentés (il s'agit de leur habitat préférentiel), alors que le chenal lotique où se concentrent les adultes n'est pas prospecté. Par conséquent, **les échantillons reflètent correctement le peuplement de 0+, mais ne sont pas représentatifs du peuplement d'individus plus âgés**.
- ▶ Que la **saisonnalité est une composante essentielle à considérer** pour comprendre les effets des régimes hydrologiques et thermiques. La plupart des relations mises en évidence le sont pour les saisons de reproduction (correspondant approximativement au printemps) et/ou de croissance (période estivale). Par conséquent, les variables hydrologiques et thermiques ont un effet soit **sur les adultes au moment de la reproduction, soit sur les produits de la reproduction à différents stades ontogénétiques** (œuf, larve, alevin).
 - Pendant la période de reproduction, l'hydrologie et la thermie peuvent agir en modulant les conditions de l'habitat physique, et en les rendant plus ou moins favorables. Par exemple, l'accès à certains types d'habitats de reproduction importants (lônes, prairies inondées, « caissons » artificiels,...) peut dépendre du débit : le succès de la reproduction est tributaire de la mise en eau et des temps de connexion de ces habitats (Nicolas and Pont 1995). La qualité du substrat de reproduction, fondamentale pour les espèces lithophiles, dépend en partie de la variabilité des débits qui vont soit favoriser un dépôt de particules fines, soit au contraire nettoyer le substrat et le décolmater (Cattanéo et al. 2001).
 - Pendant la période de croissance, l'hydrologie peut agir mécaniquement sur les œufs ou les alevins, par exemple en entraînant une destruction de la fraie des espèces lithophiles si le substrat est mobilisé, ou en entraînant dans la dérive les jeunes individus incapables de résister aux fortes vitesses de courant. La thermie va régir la vitesse de développement et la croissance des jeunes stades et peut, en fonction des préférences thermiques des espèces, entraîner des mortalités si les conditions sont trop froides ou trop chaudes.

- ▶ Que le rôle des variabilités hydrologique et thermique interannuelles dépend du site considéré, notamment de facteurs locaux (composition spécifique du peuplement, diversité et caractéristiques de l'habitat local, distance aux barrages, etc.) et de l'histoire du site en termes d'aménagement (Gido et al. 2013, Daufresne et al. in prep).
- ▶ Qu'il est relativement difficile de séparer la part respective de variabilité liée à une tendance d'évolution du peuplement à long terme, de celle liée à des variations interannuelles. En effet, dans les suivis présentant une tendance temporelle, ces deux sources de variabilité à deux « échelles de temps » différentes se superposent (on parle également de variabilités à basse et haute fréquences (Pyper and Peterman 1998). Parmi les études citées en annexe 2, les travaux de Daufresne et al. (2003) et Daufresne et Boët (2007) montrent une corrélation significative entre l'accroissement de la température moyenne en période de reproduction et l'abondance moyenne du recrutement sur une vingtaine d'années, qu'ils attribuent au changement climatique. Néanmoins, les variations annuelles autour de cette tendance « moyenne » peuvent être liées à d'autres composantes environnementales et/ou biotiques.

6.2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DES APPROCHES CONDUITES DANS LE CADRE DE LA PRÉSENTE ÉTUDE

Nous avons utilisé les données de **suivis piscicoles** des quatre CNPE EDF de **Bugey, Saint-Alban/Saint-Maurice l'Exil, Cruas-Meysse et Tricastin**. Selon le site, ces données démarrent **entre 1979 et 1985, et vont jusqu'en 2011. Des captures par unité d'effort (qui représentent une abondance) ont été calculées pour chaque espèce**. Seules les pêches de fin d'année ont été utilisées afin d'avoir une bonne représentativité de la classe d'âge 0+, correspondant aux jeunes de l'année. Les analyses ont porté uniquement sur cette classe d'âge.

Les données biologiques ont été couplées à des données de débits journaliers représentatives des quatre sites, ainsi qu'à des données de températures journalières modélisées par EDF. Les chroniques de débit et température ont été décrites par 14 variables, calculées pour trois saisons (hiver, reproduction, croissance) correspondant à trois phases du cycle biologique des espèces.

Des analyses multivariées (ACP) ont été utilisées pour décrire l'évolution de la structure du peuplement, de l'hydrologie et de la température interannuelle. La présence de tendances temporelles dans les données biologiques et environnementales a été vérifiée (tests de Mann-Kendall modifié). Une matrice de corrélation a permis d'identifier les associations significatives (corrigées pour la présence d'autocorrélations) entre variables biologiques (axes synthétiques et variables représentatives de ces axes) et variables hydrologiques et thermiques saisonnalisées (axes synthétiques par saison). Afin de différencier la tendance à long terme de la variabilité interannuelle, toutes les variables ont été « détendancées » (« detrended »), et des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été utilisés sur les résidus afin de détecter les variables hydrologiques et thermiques expliquant la variabilité biologique d'une année sur l'autre.

Le détail de la méthodologie est présenté en annexe 3.

Un extrait des analyses et figures produites est présenté en annexe 4.

6.3 BUGEY

Entre 1979 et 2011, le peuplement piscicole à Bugey a fortement évolué. L'abondance globale de jeunes de l'année et leur proportion au sein du peuplement ont significativement augmenté. La structure du peuplement a également beaucoup changé, avec une augmentation d'espèces eurytherme et/ou méridionales, à ponte tardive et fractionnée, et plutôt de grande taille (gardon, spirin, chevaine, barbeau) au détriment d'espèces plus septentrionales et sténothermes (vandoise, goujon, ablette).

Cette évolution à long terme est liée à l'augmentation des températures printanières et estivales ainsi qu'à la diminution des débits printaniers, qui résulteraient du changement climatique. La température moyenne sur le Haut-Rhône a augmenté de 1,5°C sur la période considérée, et permet d'expliquer les changements observés.

A cette évolution à long terme se superpose une variabilité interannuelle du peuplement, qui est en partie contrôlée par l'hydrologie et la température en périodes printanière et estivale.

Des débits estivaux faibles et stables favorisent le recrutement global et l'abondance des espèces comme le gardon, le spirin, l'ablette ou le chevesne : des espèces eurythermes profitant des bas débits estivaux, qui sont associées à des niveaux de température élevés.

Les espèces comme le hotu, la truite, le chabot, blageon et vandoise, présentant les enjeux écologiques les plus importants (espèces très rhéophiles et sténothermes froides) voient leur abondance augmenter les années à faible hydraulité printanière, mais ne présentent pas de tendance à long terme.

Il n'y a pas d'emprise à court ou moyen terme sur l'évolution globale du peuplement, celle-ci dépendant de facteurs climatiques globaux, notamment thermiques.

Néanmoins, la variation interannuelle des débits printaniers et estivaux module l'abondance de certaines espèces autour de cette tendance.

Une diminution des débits printaniers favoriserait légèrement les espèces présentant les plus forts enjeux écologiques, alors que les débits estivaux devraient être *a minima* maintenus en l'état, voire augmentés, afin de ne pas favoriser davantage les espèces eurythermes ainsi que le recrutement global, qui ne sont pas nécessairement des signaux positifs.

6.4 LE RHÔNE À PÉAGE DE ROUSSILLON

Le peuplement piscicole à Péage de Roussillon (0+ en fin d'année) est constitué de **16 espèces principales** (présentes dans >15% des échantillons), mais avec une **très forte dominance de trois espèces : l'ablette, le gardon et le chevine**. Ce peuplement est typiquement **thermophile (et eurytherme)**, à **tendance limnophile marquée**. Il abrite de **nombreuses espèces non autochtones** comme par exemple la perche soleil, le poisson-chat, le sandre, le carassin argenté ou la grémille.

Entre 1984 et 2011, la structure du peuplement a peu évolué. Si les abondances globales sont restées stables (malgré une forte variabilité interannuelle), **l'abondance des espèces de type tanche, perche soleil ou poisson chat, a significativement diminué. Ce signal peut être perçu positivement, perche-soleil et poisson-chat étant des espèces indésirables. Les autres groupes d'espèces ne présentent pas d'évolution temporelle.**

Sur la période considérée, **les températures médianes et hautes en saison de reproduction (printemps) ont significativement augmenté (+2.5°C sur la température médiane entre 1984 et 2010 en moyenne)**, ainsi que l'écart entre les basses et les hautes températures estivales. **Cette évolution à long terme n'est cependant pas associée à une évolution du peuplement piscicole.**

En revanche, le peuplement piscicole présente une variabilité interannuelle qui s'explique en partie par les composantes hydrologiques et thermiques saisonnières, notamment estivales.

Une température élevée en période de croissance favorise une forte abondance du recrutement pour l'ensemble des espèces, ainsi que l'abondance des espèces eurythermes, qui présentent pour la plupart des *preferenda* thermiques élevés. **Une faible hydraulité estivale favorise l'abondance des taxons limnophiles (espèces se développant dans les parties calmes des cours d'eau), mais s'avère également positive pour les espèces se reproduisant dans des habitats lotiques (courants).**

La concordance entre bas débits et températures élevées rend difficile de dissocier l'effet de chaque composante isolément. Au cours de cette chronique, l'année 2003 avec sa canicule exceptionnelle ressort nettement comme atypique en terme de peuplement, avec des abondances globales particulièrement élevées.

La concordance entre bas débits et températures élevées rend difficile de dissocier l'effet de chaque composante isolément.

La faible hydraulité estivale et les températures élevées favorisent l'abondance du recrutement pour l'ensemble des espèces.

La variabilité hydrologique semble peu influencer le peuplement, probablement en raison de l'effet « tampon » de la retenue (relation débit-hauteur d'eau non univoque) et de la consigne de gestion de l'ouvrage. Une analyse détaillée par type d'habitat (RCC, canal de fuite, retenue) pourrait être plus informative.

6.5 LE RHÔNE À CRUAS-MEYSSE

39 espèces ont été inventoriées dans la retenue de Montélimar depuis 1983, dont 25 sont présentes dans plus de 15 % des échantillons. Le peuplement est **dominé par un trio d'espèces (le gardon, l'ablette et le chevine)**, qui totalise près de 80 % des effectifs.

Sur le plan écologique, **le peuplement est surtout composé d'individus** appartenant à des espèces de grande taille (> 30 cm), eurythermes, limnophiles, phyto-lithophiles, et **peu exigeantes quant à la qualité de l'eau et de l'habitat**. Les années 1997 à 2004 (à l'exception de 1999) sont caractérisées par de fortes abondances globales, avec notamment des effectifs élevés d'ablette, de bouvière, de goujon, de gardon et de hotu.

Sur la période considérée (1983-2012), **la richesse spécifique s'est accrue** au cours du temps, notamment par **addition d'espèces non autochtones (carassin argenté, grémille, sandre, silure, pseudorasbora)**, ainsi que l'abondance d'espèces de petite taille (< 10 cm), eurythermes, à ponte fractionnée (par ex., bouvière, pseudorasbora).

L'abondance de cyprinidés rhéophiles (barbeau, hotu, spirin, blageon), de la brème commune, du chabot, du chevine et du goujon, présente une tendance significative à l'augmentation.

Depuis 1983, les températures médianes (+2.8°C en moyenne) et hautes, ainsi que la quantité de chaleur cumulée au-delà de 12°C (+14.5°C/année en moyenne) **ont significativement augmenté en période de reproduction**. En période de croissance, les températures hautes sont plus élevées (+2°C sur Tmax), ainsi que la quantité de chaleur cumulée au-delà de 18°C (+13.7°C/an).

L'accroissement des températures estivales permet d'expliquer les **augmentations graduelles de la richesse spécifique**, des abondances des espèces eurythermes et de petite taille, ainsi que des cyprinidés rhéophiles.

L'abondance croissante de ces derniers ou d'une espèce cryophile comme le chabot indique que **le Rhône procure encore des conditions thermiques et hydrauliques favorables à ces espèces « exigeantes »** et peut être perçue positivement. **La confluence de l'Isère, affluent froid**, à l'aval de Valence, pourrait permettre **le maintien d'un régime thermique favorable à ces espèces**.

Néanmoins, **la colonisation par des espèces non autochtones, eurythermes et de petite taille** est une conséquence « **attendue mais non souhaitée** » du réchauffement des eaux, et montre clairement que **ce système est en évolution**.

D'une année sur l'autre, **le peuplement piscicole à Cruas répond aux variations hydrologiques et thermiques saisonnières**. En particulier, **la stabilité hydrologique** et l'absence de crue en période estivale favorisent l'ensemble des espèces et donc l'abondance globale. Les étés chauds, quant à eux, sont favorables aux abondances des cyprinidés rhéophiles, des espèces eurythermes, et des espèces de petite taille.

Les conditions hydrologiques estivales ont un rôle prépondérant sur le peuplement du Rhône à Cruas.

Une diminution de l'hydraulicité et de la variabilité des débits, aura globalement **un effet positif** sur les **abondances de toutes espèces**.

Le Rhône procure sur ce site **des conditions thermiques et hydrauliques favorables à ces espèces « exigeantes »** que l'on peut associer **aux apports de l'Isère, affluent froid**.

Le maintien d'un régime thermique favorable à ces espèces « exigeantes », dans un contexte de réchauffement des températures du fleuve, démontre l'importance de la connectivité et de l'hétérogénéité environnementale au sein du réseau hydrographique.

6.6 LE RHÔNE À TRICASTIN

34 espèces ont été inventoriées dans le secteur de **l'aménagement de Donzère-Mondragon** (canal hors RCC, ainsi que chenal du Rhône à Viviers en amont, et Caderousse en aval) depuis 1982, parmi lesquelles 18 sont présentes dans plus de 15 % des échantillons.

Similairement à Cruas, **le peuplement est dominé par un trio d'espèces (l'ablette, le chevaine et le gardon)**, qui totalise près de **80 % des effectifs**. Sur le plan écologique, le peuplement est surtout composé d'individus appartenant à des espèces de grande taille (> 30 cm), eurythermes, limnophiles, phyto-lithophiles, et **peu exigeantes quant à la qualité de l'eau et de l'habitat**.

En trois décennies, la richesse spécifique ainsi que l'abondance globale du peuplement ont significativement augmenté. Même si l'apport d'espèces non autochtones (par ex., carassin argenté en 1992, pseudorasbora en 1997, silure depuis 2001) explique en partie l'accroissement de richesse spécifique, **ce dernier est surtout lié à l'addition d'espèces natives qui colonisent le milieu (par ex. bouvière, spirilin, tanche)**.

Entre 1982 et 2010, les températures médianes (+2.9°C en moyenne) et hautes, ainsi que la **quantité de chaleur cumulée au-delà de 12°C** (+14.9°C/année en moyenne) ont **significativement augmenté en période de reproduction**. En période de **croissance**, les **températures hautes sont plus élevées** (+1.7°C sur T_{max}), tout comme la quantité de chaleur cumulée au-delà de 18°C (+10.8°C/an). Parallèlement, **l'hydraulicité a significativement diminué en période estivale** (-200 m³/s sur le débit médian Q_{50} en moyenne), ainsi qu'en période printanière dans une moindre mesure.

Sur ce secteur du Rhône, l'évolution du peuplement sur les trois dernières décennies peut être expliquée par deux phénomènes principaux : le changement climatique et la crue majeure d'octobre 1993 (T = 100 ans).

La baisse de l'hydraulicité et les augmentations des températures printanières et estivales, qui reflètent les effets du changement climatique, sont associées à **l'augmentation des abondances du groupe d'espèces composé du gardon, brème, goujon, barbeau, hotu, carpe, carassin et bouvière**.

La crue de 1993, quant à elle, a complètement **changé l'état du système**, et a permis une **forte augmentation de la richesse spécifique et des abondances globales** (totalité des espèces hormis le spirilin et l'ablette). Les modifications drastiques de l'habitat physique et l'apport de nouvelles espèces depuis l'amont en sont probablement à l'origine.

Après la crue de 1993, la **variabilité interannuelle hivernale et printanière de l'hydrologie modulent l'abondance totale du peuplement**, et notamment les abondances des espèces qui répondent positivement à une hydraulicité élevée (spirilin et ablette).

Comme sur la plupart des autres secteurs du Rhône, le peuplement piscicole du secteur de Tricastin est **sensible au changement climatique**, et montre une réponse similaire (notamment augmentation des abondances de la quasi-totalité des espèces).

Néanmoins, ce peuplement a été **fortement remanié** par une **perturbation hydrologique majeure (crue d'octobre 1993)**. Dans ce « nouvel état », des **débites élevés en hiver et au printemps favorisent la plupart des espèces**, potentiellement par un **effet bénéfiques sur les substrats de reproduction**.

7. APPROCHE DES BESOINS DES MILIEUX AUX SIX POINTS NODAUX

7.1 PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les éléments présentés dans le présent rapport ainsi que les échanges issus du séminaire d'experts mettent en lumière les principaux points suivant :

- ▶ 80 % du linéaire du Rhône non court-circuité présentent des lignes d'eaux contrôlées par des ouvrages : la hauteur d'eau et le lit mouillé ne dépendent pas du débit.
Le débit ne présente pas, sur ces tronçons, un critère pertinent pour définir les besoins des milieux aquatiques.
- ▶ Seuls 20 % du linéaire du Rhône non court-circuité est dit "libre" : pour une morphologie du fleuve donnée, le débit contrôle la quantité et la qualité des habitats disponibles. Les études scientifiques réalisées sur les deux principaux secteurs concernés (secteur de Bugey et secteur à l'aval d'Arles – ces deux secteurs représentent environ 84 % du linéaire « libre ») ont défini des relations entre débits et niveaux de connexions aux berges, annexes et embâcles.

Ces éléments peuvent être utilisés dans les réflexions sur les débits mensuels pouvant participer au bon déroulement des cycles biologiques.

Pour autant, la gestion de la problématique des basses eaux pour la biologie sur le Rhône libre ne sera pas contenue dans la seule valeur absolue du débit à l'échelle journalière ou mensuelle. En effet, les variations infra-journalières de débits constituent à priori un facteur également déterminant, voire plus important (cf. chapitres 4 et 5).

La réflexion portée à ce jour sur les valeurs de DOE et DCR dans le cadre du SDAGE ne permet donc pas de prendre en compte cette spécificité.

Les valeurs de débits présentés ci-après (sous-chapitres 7.2 et 7.3) ne sauraient être utilisées *stricto sensu* dans le calcul des DOE, DCR et volumes prélevables.

7.2 DÉBITS BIOLOGIQUES DE SURVIE

Par définition, le débit biologique de survie (DBS) doit satisfaire, en étiage sévère, les fonctionnalités biologiques du milieu en situation de survie à tout moment. Il est estimé sur la base d'un débit journalier.

Sur le Rhône, aucun épisode de mortalité ayant pour cause une baisse significative des débits n'a été encore enregistré à ce jour. Les débits nécessaires pour la production d'électricité en toute sûreté des CNPE semblent donc être suffisants pour la survie des espèces si la température du Rhône n'atteint pas les limites létales des espèces les plus exigeantes (non observé à ce jour).

- ▶ Lagnieu : 130 m³/s imposés au droit de la CNPE de Bugey. Il n'a pas été observé de mortalité piscicole à ce débit même lorsqu'il a été enregistré sur plusieurs semaines consécutives ;
- ▶ **Ternay, Valence et Viviers** : Ces stations sont **fortement soumises aux aménagements**. Le maintien des plans d'eau par les ouvrages suffit pour le maintien à l'état de survie des espèces ;
- ▶ **Beaucaire** : L'étude de 1994 sur la connexion des casiers/annexes sur le secteur d'Arles indique que **tous les casiers/annexes sont déconnectés à partir de 400 m³/s**. En dessous de cette valeur, la disponibilité des habitats est réduite et le débit se concentre dans le lit principal du Rhône **mais la survie des espèces n'est cependant pas menacée**.

Au regard des informations disponibles sur le Rhône non court-circuité et des avis des experts scientifiques exprimés lors de l'atelier du 2 et 3 décembre 2013 à Lyon, il est proposé :

- ▶ **De définir un DBS à Lagnieu de 130 m³/s** (VCN3_5ans influencé : 158 m³/s) en raison des inconnues sur le fonctionnement du milieu à un débit inférieur et par mesure de précaution pour ne pas « hypothéquer l'avenir » ;
- ▶ De définir un DBS
 - **à Pougny de 80 m³/s** (VCN3_5ans influencé : 98 m³/s) ;
 - **à Beaucaire de 420 m³/s** (VCN3_5ans influencé : 499 m³/s).

Ces deux valeurs sont fixées ici en cohérence de fréquence avec celle proposée à Lagnieu. Nous avons toutefois noté qu'une valeur plus faible ne conduirait pas à une situation de survie. **La discussion reste ouverte pour proposer une valeur inférieure sur ces tronçons.**

Sur les stations intermédiaires, la même logique "hydrologique" (en fréquence) conduirait à proposer les valeurs suivantes.

- ▶ Ternay : 240 m³/s (VCN3_5ans influencé : 287 m³/s) ;
- ▶ Valence : 350 m³/s (VCN3_5ans influencé : 424 m³/s) ;
- ▶ Viviers : 370 m³/s (VCN3_5ans influencé : 457 m³/s).

Nous estimons cependant que des propositions de DBS sur ces tronçons ont peu ou pas de signification dans la mesure où les ouvrages existants maintiennent à leur amont un plan d'eau permanent quel que soit le débit, y compris pour des débits très faibles (voire nuls, même si cette situation reste théorique).

A ces niveaux de débits, les variations infra-journalières sont quasiment inexistantes hormis à Pougny (signal hydrologique de la Suisse).

7.3 ÉLÉMENTS DE DISCUSSION CONCERNANT LES DÉBITS BIOLOGIQUES

A la lumière des éléments présentés sur la caractérisation hydrodynamique du Rhône et des variations infra-journalières de l'hydrologie, la détermination de plage de **débits « confort » pour les espèces à l'échelle mensuelle correspondant aux « débits biologiques » n'apparaît pas pertinente pour le système Rhône.**

L'ensemble des variations infra-journalières de débits constituent en basses eaux un facteur déterminant pour le fonctionnement des milieux en raison des incidences sur les habitats (connexion/déconnexion) enregistrées sur les secteurs dits « à courant libre ». La valeur mensuelle de débit n'a que peu de sens d'un point de vue biologique pour caractériser les besoins des milieux sur ce système.

Les secteurs de Lagnieu et d'Arles, dits « à courant libre », ont fait l'objet d'études spécifiques apportant des éléments de réflexion sur le degré de connexion avec les milieux annexes et/ou les berges :

- ▶ **Lagnieu** : 200 minimum à 250 – 300 m³/s d'après les travaux de modélisations BUGEY 2D et des observations de terrain permettant d'apporter une connexion des berges et annexes minimale pour apporter des abris nécessaires à la faune aquatique. L'étude met en lumière la contrainte majeure des variations infra-journalières de débits. Elles induisent des assèchements répétés des bancs de galets/graviers et des mises en vitesse lors des augmentations de débit très défavorables aux stades de poissons les plus jeunes ;
Pour mémoire sur ce tronçon, le QMNA 5 est estimé à 216 m³/s et le QMNA moyen à 282 m³/s.
- ▶ **Beaucaire** : pour un débit de **700-800 m³/s, 5 casiers sur 9 sont connectées dans le secteur d'Arles** permettant d'offrir une quantité significative d'abris, de zone de reproduction et de croissance pour les espèces.

Pour mémoire sur ce tronçon, le QMNA 5 est estimé à 680 m³/s et le QMNA moyen à 843 m³/s.

Sur les secteurs influencés par les ouvrages (80 % du linéaire du Rhône), les experts indiquent que les débits faibles maintenus pendant de longues périodes pourraient renforcer le caractère lentique du fleuve, avec pour conséquence une dérive et une banalisation des peuplements. Le débit proposé doit permettre de maintenir *a minima* les espèces exigeantes (sténothermes et rhéophiles).

A la lumière des éléments présentés ci-avant, ces valeurs de débits ne sauraient être considérées comme des « débits biologiques » utilisables *stricto sensu* dans le calcul des DOE et volumes prélevables.

Ces valeurs sont à considérer comme des points de repères qui pourront être réutilisés pour replacer les débits dans le cadre d'analyses fréquentielles.

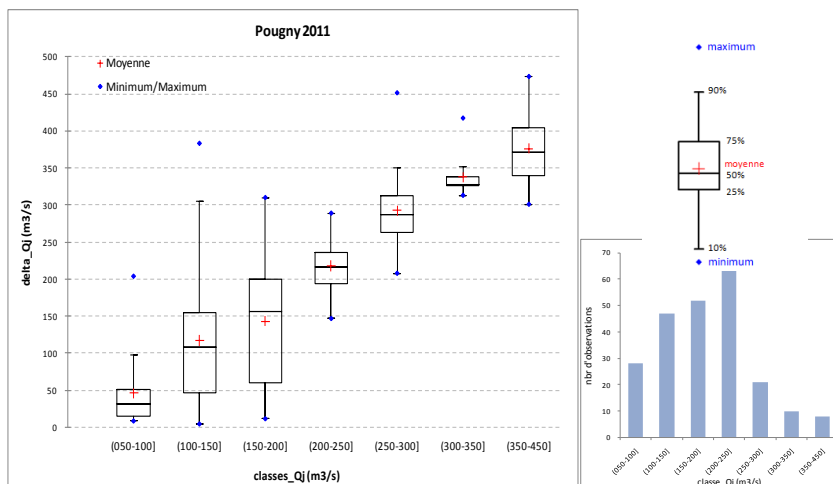
Une analyse hydrologique croisée avec les scénarios de gestion qui seront étudiés dans les phases ultérieures apparaît comme une approche plus pertinente pour permettre au gestionnaire de choisir une gestion hydrologique soutenable.

La prise en compte des variations infra-journalières de débit et la compréhension du rôle des annexes sur la biologie semblent être les pistes d'investigations préalables pour proposer une gestion hydrologique visant le bon état et bon potentiel du fleuve Rhône.

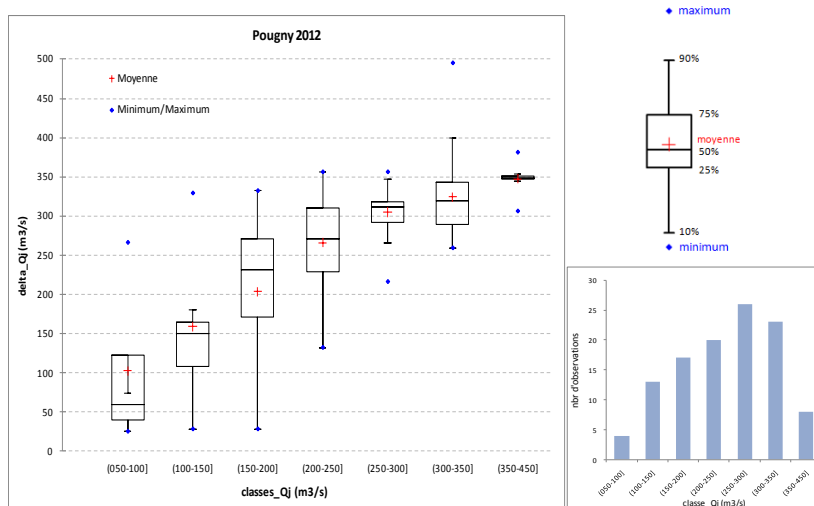
ANNEXES

Annexe 1 : Analyse des variations infra-journalières sur l'ensemble des débits

POUGNY

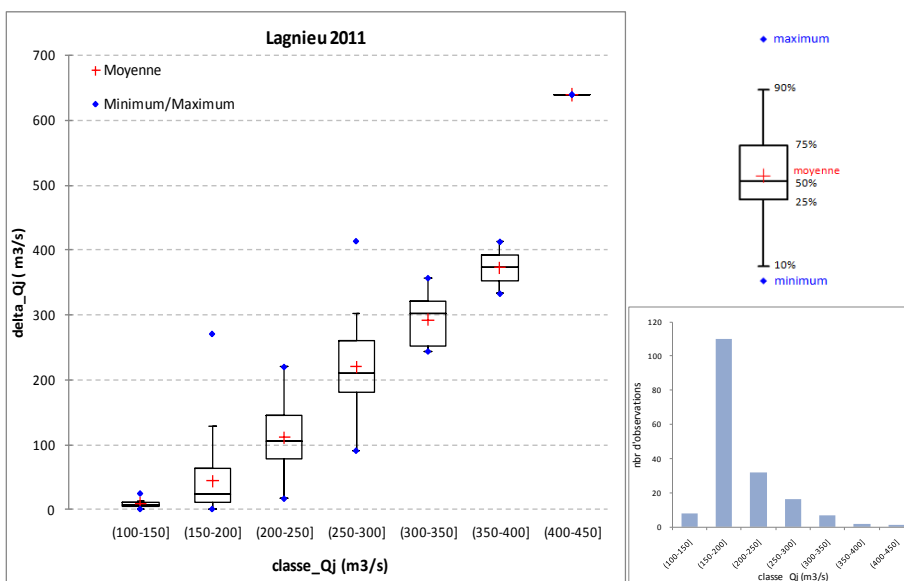


Statistique	(050-100)	(100-150)	(150-200)	(200-250)	(250-300)	(300-350)	(350-450)
Nb. d'observations	28	47	52	66	21	10	8
Minimum	9	5	12	147	208	313	301
Maximum	204	383	310	289	451	417	473
1er Quartile	16	47	60	193	263	326	340
Médiane	32	108	157	216	287	328	372
3ème Quartile	52	155	200	236	313	339	405
Moyenne	46	117	143	218	292	338	376

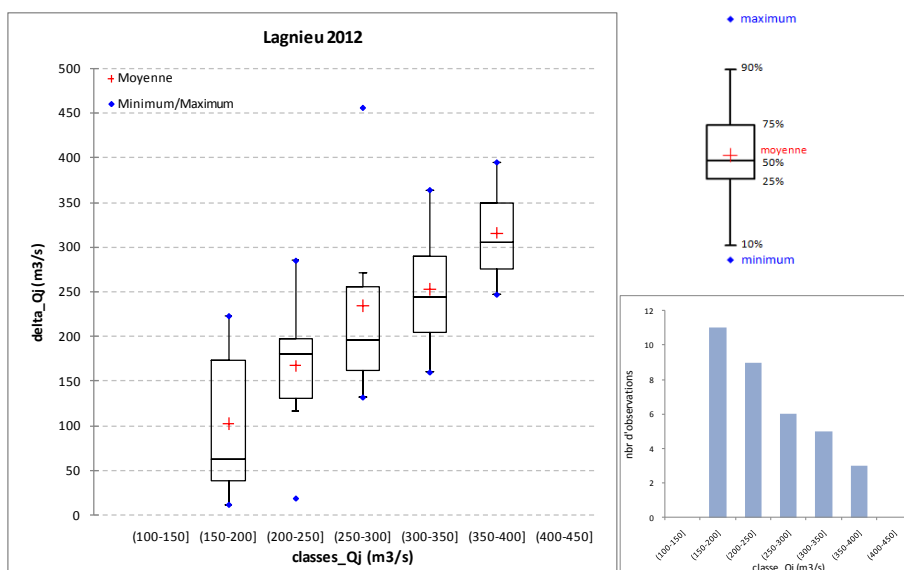


Statistique	(050-100)	(100-150)	(150-200)	(200-250)	(250-300)	(300-350)	(350-450)
Nb. d'observations	4	13	17	20	26	23	8
Minimum	25	28	28	132	216	259	306
Maximum	266	329	332	356	356	495	381
1er Quartile	40	108	171	229	293	290	347
Médiane	60	150	232	271	312	319	349
3ème Quartile	122	164	271	311	318	343	352
Moyenne	103	159	204	266	305	324	348

LAGNIEU

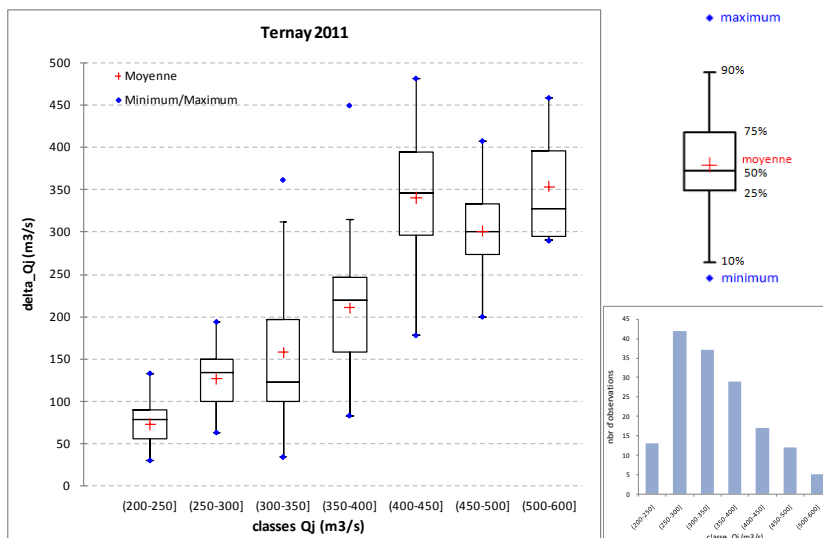


Statistique	(100-150]	(150-200]	(200-250]	(250-300]	(300-350]	(350-400]	(400-450]
Nb. d'observations	8	110	32	16	7	2	1
Minimum	1	1	17	91	244	333	640
Maximum	25	271	220	414	357	413	640
1er Quartile	5	12	77	180	252	353	640
Médiane	7	25	106	210	302	373	640
3ème Quartile	11	64	144	260	322	393	640
Moyenne	9	44	111	220	293	373	640

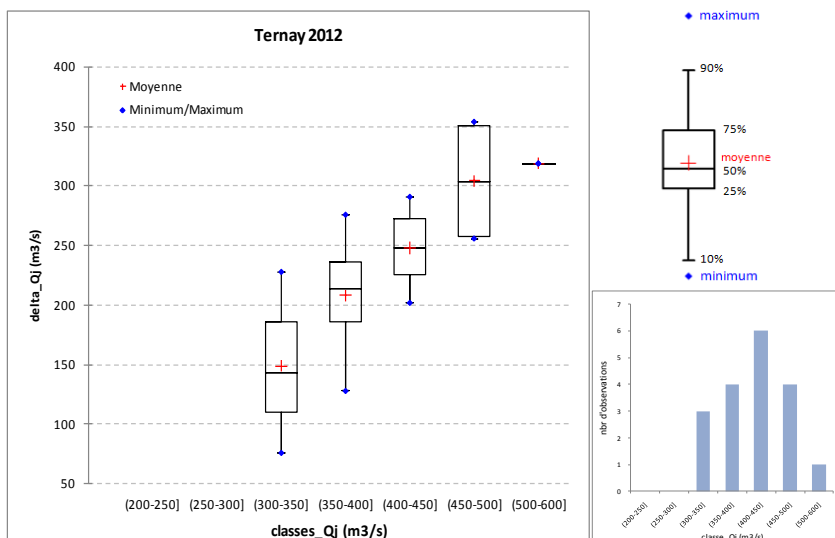


Statistique	(100-150]	(150-200]	(200-250]	(250-300]	(300-350]	(350-400]	(400-450]
Nb. d'observations	0	11	9	6	5	3	0
Minimum		12	19	132	160	247	
Maximum		223	285	456	364	395	
1er Quartile		38	131	162	205	276	
Médiane		63	180	196	245	305	
3ème Quartile		174	197	256	290	350	
Moyenne		102	167	234	253	316	

TERNAY

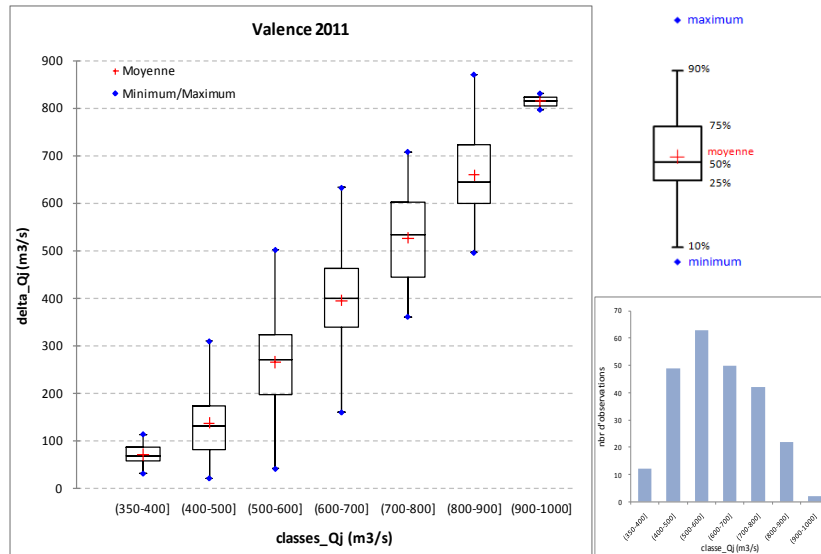


Statistique	(200-250]	(250-300]	(300-350]	(350-400]	(400-450]	(450-500]	(500-600]
Nb. d'observations	13	42	37	29	17	12	5
Minimum	30	63	34	83	178	200	290
Maximum	133	194	362	450	482	408	459
1er Quartile	55	100	100	158	297	274	295
Médiane	79	134	123	220	346	301	328
3ème Quartile	90	150	196	246	394	334	396
Moyenne	73	126	157	211	341	301	354

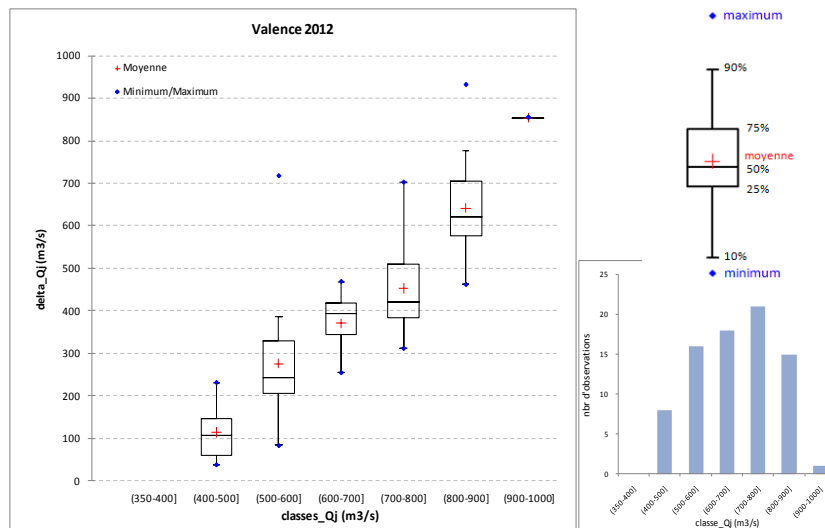


Statistique	(200-250]	(250-300]	(300-350]	(350-400]	(400-450]	(450-500]	(500-600]
Nb. d'observations	0	0	3	4	6	4	1
Minimum			76	128	202	256	319
Maximum			228	276	291	354	319
1er Quartile			110	186	225	258	319
Médiane			143	214	248	304	319
3ème Quartile			186	236	273	351	319
Moyenne			149	208	248	305	319

VALENCE

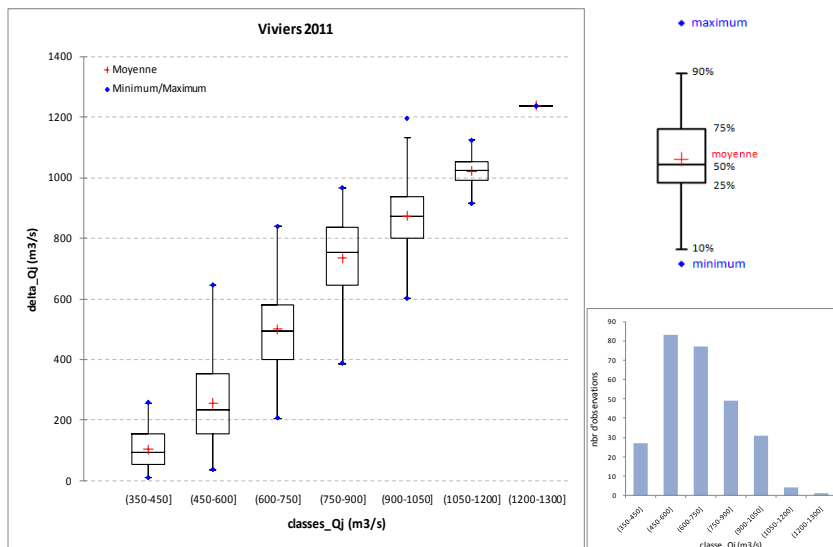


Statistique	(350-400]	(400-500]	(500-600]	(600-700]	(700-800]	(800-900]	(900-1000]
Nb. d'observations	12	49	63	50	42	22	2
Minimum	30	20	40	159	361	496	798
Maximum	113	309	502	633	709	872	832
1er Quartile	58	80	196	340	446	601	807
Médiane	68	130	270	400	533	645	815
3ème Quartile	87	174	324	462	604	724	824
Moyenne	70	137	265	395	526	659	815

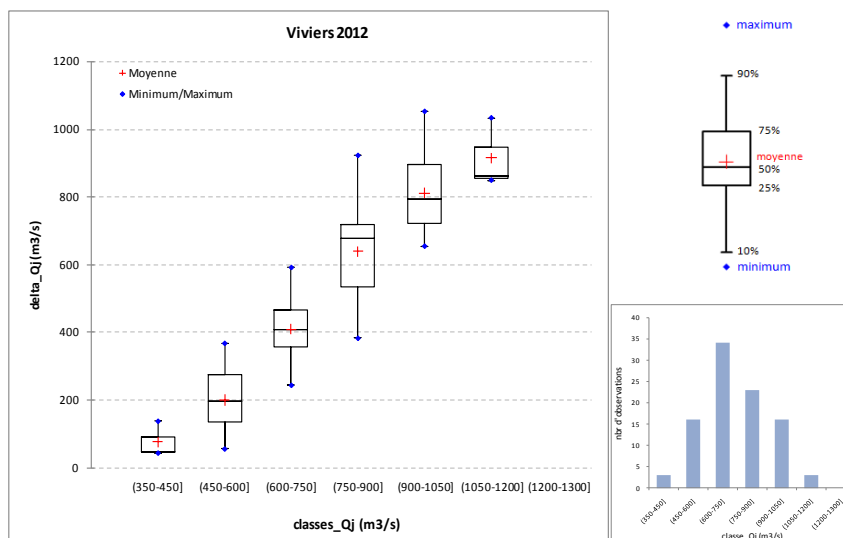


Statistique	(350-400]	(400-500]	(500-600]	(600-700]	(700-800]	(800-900]	(900-1000]
Nb. d'observations	0	8	16	18	21	15	1
Minimum		39	84	255	312	462	854
Maximum		232	717	469	702	931	854
1er Quartile		60	207	343	383	578	854
Médiane		108	244	393	420	621	854
3ème Quartile		146	330	419	511	704	854
Moyenne		115	276	371	453	641	854

VIVIERS

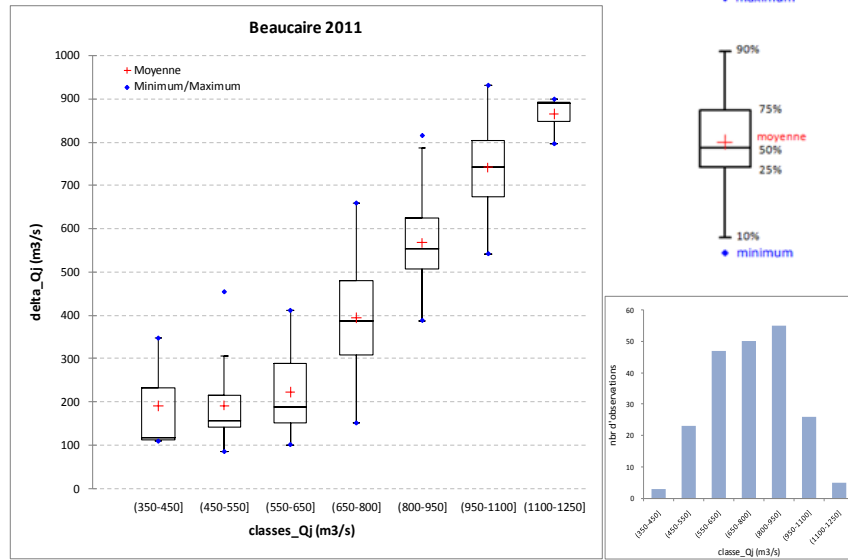


Statistique	(350-450]	(450-600]	(600-750]	(750-900]	(900-1050]	(1050-1200]	(1200-1300]
Nb. d'observations	27	83	77	49	31	4	1
Minimum	8	35	206	387	602	916	1239
Maximum	257	646	840	968	1198	1125	1239
1er Quartile	53	154	399	647	802	991	1239
Médiane	92	232	495	752	874	1023	1239
3ème Quartile	153	352	579	835	939	1054	1239
Moyenne	102	255	500	735	874	1022	1239

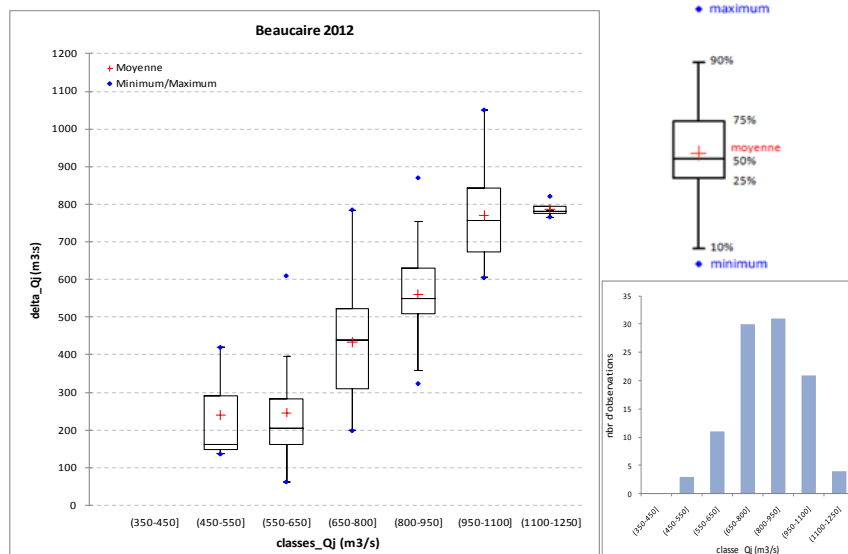


Statistique	(350-450]	(450-600]	(600-750]	(750-900]	(900-1050]	(1050-1200]	(1200-1300]
Nb. d'observations	3	16	34	23	16	3	0
Minimum	44	56	244	383	655	850	
Maximum	138	368	592	923	1053	1034	
1er Quartile	46	134	359	534	721	857	
Médiane	47	198	409	678	795	863	
3ème Quartile	93	277	466	718	897	949	
Moyenne	76	200	410	640	812	916	

BEUCAIRE



Statistique	(350-450]	(450-550]	(550-650]	(650-800]	(800-950]	(950-1100]	(1100-1250]
Nb. d'observations	3	23	47	50	55	26	5
Minimum	109	85	101	151	388	542	796
Maximum	347	454	411	659	815	931	899
1er Quartile	113	143	151	310	507	675	848
Médiane	116	157	189	387	555	742	890
3ème Quartile	232	216	290	481	625	804	893
Moyenne	191	192	223	395	568	742	865



Statistique	(350-450]	(450-550]	(550-650]	(650-800]	(800-950]	(950-1100]	(1100-1250]
Nb. d'observations	0	3	11	30	31	21	4
Minimum		137	63	199	324	605	766
Maximum		420	610	785	870	1050	821
1er Quartile		149	162	310	509	674	775
Médiane		161	205	439	550	756	781
3ème Quartile		291	282	523	629	844	793
Moyenne		239	246	433	561	771	787

Annexe 2 : Synthèse des principales études sur le Rhône portant sur les liens poissons-hydrologie-thermie

Publication	Site(s)	Echantillon	Type(s) de milieu	Résultats principaux
(Carrel et al. 1995)	<ul style="list-style-type: none"> • 2 sites : <ul style="list-style-type: none"> - Cruas-Meysses (amont aval) - Tricastin (amont) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pêches de printemps • Toutes classes d'âge • 1983-1994 	<ul style="list-style-type: none"> • CL, RE • CA 	<ul style="list-style-type: none"> • Les débits faibles toute l'année et une température estivale élevée favorisent le recrutement des espèces lémitophiles et thermophiles ; • Les crues majeures (1993, 1994) restructurent le peuplement (dominance du chevaine, augmentation de la diversité spécifique).
(Cattanéo et al. 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 site : <ul style="list-style-type: none"> - Cruas-Meysses (amont aval) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pêches d'automne ; uniquement les 0+ ; • 1983-1998 	<ul style="list-style-type: none"> • CL, RE 	<ul style="list-style-type: none"> • Les crues majeures (1993, 1994) restructurent le peuplement : augmentation de la diversité spécifique (passage de 5.4 à 11 espèces en moyenne), réapparition d'espèces lithophiles / rhéophiles (blageon, hotu) ; • Alors qu'aucun lien poissons-hydrologie n'a été montré avant les crues, une relation forte est observée après : les espèces rhéophiles, lithophiles, à pontes tardives et multiples augmentent avec l'augmentation du débit médian et de la variabilité en période de reproduction.
(Fruget et al. 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 site : <ul style="list-style-type: none"> - CNPE Saint-Alban/Saint-Maurice l'Exil 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 pêches annuelles H, P, E, A • Toutes classes d'âge • 1985-1994 	<ul style="list-style-type: none"> • RE, CF, RCC 	<ul style="list-style-type: none"> • L'abondance du recrutement annuel est dépendante des facteurs hydro-climatiques : les années à faible recrutement correspondent à des débits moyens annuels élevés et des températures moyennes annuelles basses.

Publication	Site(s)	Echantillon	Type(s) de milieu	Résultats principaux
(Grenouillet et al. 2001)	<ul style="list-style-type: none"> 4 sites du bas-Rhône : - CNPE de Saint-Alban/Saint-Maurice l'Exil, Cruas-Meysse, Tricastin - 1 autre site non décrit 	<ul style="list-style-type: none"> 4 pêches annuelles (H, P, E, A) ; Uniquement les 0+ et 1+ ; 1 espèce : le gardon 1987-1997 	<ul style="list-style-type: none"> CL 	<ul style="list-style-type: none"> Forte synchronie entre sites pour la classe d'âge 0+, mais pas pour les 1+ ; L'abondance des 0+ de gardon est fortement corrélée à la température moyenne du mois de juin.
(Daufresne et al. 2004)	<ul style="list-style-type: none"> 1 site : - CNPE de Bugey 	<ul style="list-style-type: none"> Pêches d'automne et hiver ; Uniquement les 0+ ; 1979-1999 	<ul style="list-style-type: none"> CL 	<ul style="list-style-type: none"> L'abondance globale du recrutement augmente sur les 20 ans de suivi, et est corrélé positivement à la température moyenne en période de reproduction, et négativement au débit moyen en période de reproduction ; L'augmentation des températures en période de reproduction favorise le barbeau et le chevaine (sp. thermophiles), au détriment de la vandoise et de l'ablette. Le changement climatique favorise les espèces méridionales et thermophiles.
(Daufresne and Boët 2007)	<ul style="list-style-type: none"> 4 sites sur le Rhône : - CNPE de Bugey, Saint-Alban/Saint-Maurice l'Exil, Cruas-Meysse, et Tricastin. 	<ul style="list-style-type: none"> 4 pêches annuelles H, P, E, A ; Toutes classes d'âge ; 1979, ou 1982, ou 1983-2003 	<ul style="list-style-type: none"> CL, RE, CF, CA, RCC 	<ul style="list-style-type: none"> La température moyenne en période de reproduction a significativement augmenté depuis 25 ans ; L'abondance totale, la richesse spécifique, et la proportion d'espèces méridionales sont positivement liées à l'augmentation des températures en période de reproduction, alors que l'équitabilité du peuplement est liée négativement ; La proportion d'espèces thermophiles augmente avec la température de reproduction s'il n'y a pas d'ouvrage hydroélectrique, alors qu'elle diminue avec la température de reproduction au niveau des aménagements hydroélectriques ; A Bugey, l'augmentation globale de l'abondance est surtout due à une augmentation des individus de petite taille.

Publication	Site(s)	Echantillon	Type(s) de milieu	Résultats principaux
(Piffady et al. 2010) & (Piffady et al. 2013)	<ul style="list-style-type: none"> 1 site : - CNPE de Bugey 	<ul style="list-style-type: none"> Pêches d'été et d'automne ; uniquement les 0+ ; 1980-2005 	<ul style="list-style-type: none"> CL 	<ul style="list-style-type: none"> Les auteurs définissent 3 guildes d'espèces synchrones et relient le recrutement de ces guildes à l'hydrologie et la thermie : <ul style="list-style-type: none"> - Guilde [vandoise + ablette] liée négativement au débit moyen lorsque la température est entre 12 et 18°C, et liée négativement à la somme des degrés-jours entre 12 et 18°C ; - Guilde [goujon + hotu + barbeau] liée positivement au débit journalier maximum et négativement au débit moyen pendant la période où la température est > 18°C ; - Guilde [chevaine + gardon + spirilin] liée positivement à l'occurrence (jour julien) du pic de température, et négativement au débit moyen pendant la période où la température est comprise entre 12 et 18°C.
(Daufresne et al. in prep)	<ul style="list-style-type: none"> 4 sites sur le Rhône : - RCC de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Pierre-Bénite, Péage de Roussillon - CNPE de Bugey 	<ul style="list-style-type: none"> Pêches d'été, automne et hiver ; 0+ et >0+ ; 1985-2010 	<ul style="list-style-type: none"> RCC, CL 	<ul style="list-style-type: none"> La densité de recrutement augmente avec la température moyenne entre avril et août et diminue avec le débit spécifique (R_{80} = débit dépassé 80% du temps Q_{80} divisé par la largeur du chenal à Q_{80}) ; La densité d'individus typiques du chenal lotique augmente avec le débit spécifique

Seuls les résultats principaux (relations poissons-environnement) sont mentionnés. Pour la colonne 'Echantillon' : H, P, E, A signifient hiver, printemps, été, automne. La colonne 'Type(s) de milieu' fait référence aux principaux habitats rencontrés au niveau des aménagements : RE = retenue ; CA = canal d'amenée ; CF = canal de fuite ; CL = chenal lotique ; RCC = Rhône court-circuité.

Annexe 3 : Détail de la méthodologie d'analyse

ECHANTILLONNAGES ET DONNÉES PISCICOLES

Les échantillonnages piscicoles proviennent des suivis de centrales nucléaires (CNPE), et sont propriétés d'EDF. Ce sont les seules données 'long terme' hors RCC actuellement disponibles sur le Rhône. Ces suivis sont disponibles sur 4 sites :

- ▶ Bugey (hors aménagement, haut-Rhône ; suivi de 1979 à 2011) ;
- ▶ Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil (aménagement de Péage de Roussillon sur le Rhône moyen ; suivi de 1985 à 2011) ;
- ▶ Cruas-Meysses (aménagement de Montélimar sur le bas-Rhône ; suivi de 1983 à 2011) ;
- ▶ Tricastin (aménagement de Donzère-Mondragon sur le bas-Rhône ; suivi de 1982 à 2011).

Ces données ont été collectées dans le but d'évaluer les éventuels effets du réchauffement de l'eau résultant de l'utilisation de celle-ci dans les circuits de refroidissement des CNPE (Khalanski et al. 2008). Par conséquent, le plan d'échantillonnage inclut des stations non réchauffées à l'amont de la centrale, et des stations plus ou moins réchauffées à l'aval de celle-ci ou directement dans le rejet. Dans les analyses suivantes, l'objectif n'étant pas de mettre en évidence l'effet du rejet, nous avons considéré l'ensemble des données piscicoles disponibles sur chaque site (CNPE), en excluant les TCC. Les données de chaque station ont été regroupées par site afin d'avoir une image globale du peuplement sur le secteur.

Les échantillonnages piscicoles ont été réalisés par pêche électrique selon deux protocoles :

- ▶ Des pêches de berge en continu depuis un bateau (Carrel and Rivier 1996), à l'aide d'une anode fixe (Bugey) ou maniée par un opérateur (Cruas, Tricastin). Le bateau se déplace perpendiculairement à la berge sur le linéaire de la station. Le temps de pêche est noté. Les données collectées sont exprimées en CPUE (captures par unité d'effort). Les captures sont standardisées pour un effort de pêche de 60 minutes ;
- ▶ Des pêches par points ou EPA (échantillonnage ponctuel d'abondance ; (Nelva et al. 1979, Persat and Copp 1990) réalisées depuis un bateau. Sur chaque station, 20 points-EPA sont réalisés aléatoirement. Le point-EPA étant standardisé (même surface échantillonnée à chaque point), il peut être considéré comme représentant une unité d'effort. Les données sont exprimées en captures pour 100 points-EPA.

Ces échantillonnages ont généralement été réalisés 4 fois par an, à chaque saison. Cela étant, pour nos analyses, nous souhaitons étudier les effets des variabilités hydrologiques et thermiques sur le recrutement (la classe d'âge 0+ est celle qui répond le plus à ces facteurs ; cf. § 6.1), et si possible discerner 3 saisons biologiques (cf. ci-dessous). Par conséquent, nous n'avons conservé dans le jeu de données final que les échantillonnages réalisés en fin d'année (après le 15.10).

Les individus capturés ont été mesurés (longueur totale ± 1 mm pour les petits individus, ± 5 mm pour les gros) et pesés (masse ± 0.1 g pour les petits individus, ± 1 g pour les moyens, ± 10 g pour les gros). Sur chaque site, la classe d'âge 0+ a été individualisée pour chaque espèce en examinant les histogrammes longueurs-fréquences. Des comparaisons avec la bibliographie ainsi que des discussions avec des experts ont permis de valider les limites de taille.

Seules les espèces présentant au moins 4 occurrences sur le suivi (présence dans >15% des échantillons) ont été conservées pour les analyses. Les données ont été arrangées dans une matrice [année x CPUE par espèce], et transformées en $\ln(x+1)$ pour normaliser les distributions.

SAISONNALISATION

La phénologie des événements hydrologiques et thermiques est un facteur essentiel dont dépend l'effet sur le peuplement piscicole (Poff et al. 1997, Olden and Naiman 2010). Un même événement peut avoir des effets différents selon le stade ontogénique (alevin, juvénile, adulte) concerné ou encore selon l'activité physiologique (période de reproduction, de croissance, d'hivernage).

Trois saisons, basées sur le cycle biologique des espèces, ont été définies pour décrire les variabilités hydrologiques et thermiques (Cattanéo et al. 2001, Cattanéo 2005) :

- ▶ Saison hivernale, du 15.10 de l'année n-1 au 28.02 de l'année n ;
- ▶ Saison de reproduction, du 01.03 au 30.06 ;
- ▶ Saison de croissance, du 01.07 au 15.10.

DONNÉES HYDROLOGIQUES

Les stations de jaugeage représentatives du débit sur les sites d'échantillonnages piscicoles sont les suivantes :

- ▶ Station de Lagnieu (Code Hydro V1630020) pour le site de Bugey ;
- ▶ Station de Ternay (Code Hydro V3130020) pour le site de Saint-Alban – Saint-Maurice ;
- ▶ Station de Valence ((Code Hydro V4010010) pour le site de Cruas-Meysse ;
- ▶ Station de Vivier (Code Hydro V4530010) pour le site de Tricastin.

Les données hydrologiques utilisées sont des débits moyens journaliers (Q_j). Les chroniques disponibles couvrent la période 01.01.1920 – 31.12.2011, et peuvent donc être associées aux échantillonnages piscicoles.

Afin de caractériser la variabilité hydrologique interannuelle, chaque chronique a été décrite par un ensemble de 14 variables représentatives des conditions médianes, de hautes-eaux, de basses-eaux, de crue, d'étiage, et de variabilité du débit. Les 5 grandes composantes du régime hydrologique telles que définies par (Poff et al. 1997) (magnitude, durée, fréquence, timing, et variabilité du débit) sont prises en compte dans cette caractérisation. Ces variables ont été calculées pour chacune des 3 saisons précédemment définies.

Les conditions fréquentes de débits ont été caractérisées par le débit médian journalier, Q_{50} . Ces conditions sont rencontrées, en moyenne, 1 jour sur 2 par les poissons.

Les valeurs extrêmes saisonnières ont été décrites par les Q_j minimum (*Min*) et maximum (*Max*) observés. Les niveaux de basses (Q_{90}) et hautes eaux (Q_{10}) ont été définis, respectivement, par les quantiles 90% et 10% : il s'agit des valeurs de Q_j dépassées en moyenne 90% et 10% du temps durant la saison considérée.

Les durées pendant lesquelles le débit est supérieur à Q_{90} et Q_{10} ne sont pas nécessairement continues, et peuvent représenter plusieurs événements distincts. Afin de caractériser des épisodes uniques de basses et hautes eaux, nous avons définis les valeurs de débits continument non dépassées (D_{cn}) et dépassées (D_{cx}) durant 7 (D_{cn7} , D_{cx7}) et 30 (D_{cn30} , D_{cx30}) jours consécutifs.

Le nombre d'événements de faible ('Low pulse') et de forte ('High pulse') amplitude a été calculé par rapport au seuil $Q_{jm} \pm 2$ s.d (Q_j moyen ± 2 écart-types ; (Resh et al. 1988) : *nlop* est le nombre de fois où le débit descend sous le seuil $Q_{jm} - 2$ s.d. ; *nhip* est le nombre de fois où le débit dépasse le seuil $Q_{jm} + 2$ s.d.

La variabilité du débit a été décrite par 3 variables : le coefficient de variation (Cv) des Q_j est le rapport de l'écart-type sur la moyenne. La variable Bs ('baseflow') est le ratio du débit minimum sur le débit moyen, et reflète le creux de l'étiage. Une valeur faible indique un minimum (creux d'étiage) prononcé, alors qu'une valeur proche de 1 indique une absence de creux. Enfin, l'amplitude des variations journalières a été décrite par Acc , qui représente la valeur moyenne des accroissements ($\Delta Q_j = Q_j - Q_{j-1} > 0$) de débits journaliers sur la saison.

DONNÉES THERMIQUES

Les données de température de l'eau journalières (T_j) ont été fournies par EDF, et sont représentatives de la température du fleuve à l'amont immédiat des stations d'échantillonnage piscicole.

Les données disponibles couvrent la période du 01.01.1977 au 31.12.2010.

La variabilité thermique a été décrite de manière très similaire à l'hydrologie. Quatorze variables ont été utilisées, afin de décrire les conditions médianes, de hautes et de basses températures, et de variabilité.

Les conditions 'moyennes' de température ont été caractérisées par la température médiane journalière, $T50$. Un jour sur deux, la température est au-dessus de cette valeur.

Les valeurs 'extrêmes' saisonnières ont été décrites par les températures journalières minimum (Min) et maximum (Max) observées. Les niveaux de basses ($T90$) et hautes ($T10$) températures ont été définis, respectivement, par les quantiles 90% et 10% : il s'agit des valeurs de température dépassées en moyenne 90% et 10% du temps durant la saison considérée.

Les durées pendant lesquelles la température est supérieure à $T90$ et $T10$ ne sont pas nécessairement continues, et peuvent représenter plusieurs événements distincts. Afin de caractériser des épisodes uniques de basses et hautes températures, nous avons définis les valeurs continument non dépassées (Dcn) et dépassées (Dcx) durant 7 ($Dcn7$, $Dcx7$) et 30 ($Dcn30$, $Dcx30$) jours consécutifs.

Chez les organismes poïkilothermes, le développement (croissance) et l'initiation de certaines fonctions physiologiques (dont l'activité de reproduction) sont reliés à la 'quantité de chaleur' subie. Des seuils thermiques ont été déterminés par saison, et la quantité de chaleur cumulée au-delà de ce seuil a été calculée (somme des degrés-jours au-dessus du seuil). Les seuils thermiques définis sont : 8°C pour la saison hivernale, 12°C pour la saison de reproduction, et 18° pour la croissance (Piffady et al. 2010, Tissot and Souchon 2010, Souchon and Tissot 2012).

La variabilité du débit a été décrite par 4 variables : le coefficient de variation (Cv) des T_j est le rapport de l'écart-type sur la moyenne. Un indice de variabilité non-paramétrique (Var), calculé comme la différence entre les quantiles 10% et 90% divisée par la température médiane a également été défini. La variable Bs est le ratio de la température minimum sur la température moyenne. Une valeur faible indique une forte différence entre le jour le plus froid et la température moyenne, alors qu'une valeur proche de 1 indique un très faible écart. Enfin, l'amplitude des variations journalières a été décrite par Acc , qui représente la valeur moyenne des accroissements ($\Delta T_j = T_j - T_{j-1} > 0$) de température journalière sur la saison.

ANALYSE DU PEUPEMENT PISCICOLE

La caractérisation annuelle du peuplement piscicole, ainsi que son évolution interannuelle entre 1979 et 2011 ont été explorées par Analyses en Composantes Principales centrées (ACPC, sur matrice de covariance).

Les espèces ont également été décrites par un ensemble de 16 traits biologiques, écologiques ou fonctionnels. Chaque trait est défini par une ou plusieurs modalités. Un codage booléen (0 ou 1) a été utilisé pour associer chacune des 46 modalités à chaque espèce. La matrice [espèce x modalités] a été multipliée par la matrice [espèce x CPUE] afin d'obtenir l'abondance de chaque modalité de traits au sein du peuplement (matrice [CPUE x modalités]). Cette matrice a été projetée en individus supplémentaires sur l'ACP du peuplement. Ceci permet d'interpréter l'ACP du peuplement à la lumière des caractéristiques biologiques, écologiques, et fonctionnelles des différentes espèces, sans que ces traits participent à la construction des axes synthétiques.

La trajectoire du peuplement (évolution au cours des années) a été représentée graphiquement et la tendance a été testée par corrélation de Spearman (corrélation des rangs ρ entre coordonnées factorielles et années).

Des guildes d'espèces présentant des évolutions synchrones ont été définies. Une matrice de corrélation de Pearson (r) basée sur les taux de croissance $(\ln(x+1)_t - \ln(x+1)_{t-1})$ des populations de chaque espèce a été créée, puis exprimée sous forme d'une distance par la transformation $(1-r)$ (Ranta et al. 1998, Cattaneo et al. 2003). Les espèces synchrones ont été regroupées à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) utilisant la distance de Ward.

ANALYSE DES VARIABILITÉS HYDROLOGIQUE ET THERMIQUE

La caractérisation des régimes hydrologique et thermique annuels par saison, ainsi que leur évolution sur la période 1979-2011, ont été explorées par ACP normées (ACPn, sur matrice de corrélation).

TENDANCES TEMPORELLES

Le test de Mann-Kendall modifié (package 'fume', R-software) a été utilisé pour tester si les variables biologiques, hydrologiques et thermiques présentaient des tendances temporelles.

COUPLAGE BIOLOGIE-HYDROLOGIE-THERMIE

L'approche statistique utilisée pour réaliser le couplage entre données biologiques et environnementales repose sur 2 étapes :

- La première étape vise à identifier les facteurs environnementaux les plus influents, par une approche exploratoire des covariations entre indices synthétiques de structure du peuplement, et des variabilités hydrologiques et thermiques. Pour cela, une matrice de corrélations (r de Pearson) entre axes factoriels (ACP des CPUE, de l'hydrologie et de la thermie par saison) a été établie afin de repérer les principales relations.

Cependant, certaines séries présentent des autocorrélations (corrélation de la série avec elle-même décalée d'un pas de temps j), qui biaisent les estimateurs statistiques utilisés (augmentation de l'erreur de type I, c.à.d. rejeter l'hypothèse H_0 – absence de relation – alors qu'elle est vraie ; (Pyper and Peterman 1998). Afin de prendre en compte la présence d'autocorrélations, nous avons ajusté le degré de liberté du test du coefficient de corrélation selon la procédure recommandée par (prise en compte des $N/5$ premières autocorrélations, pondération de l'autocorrélation au retard j par $N/(N-j)$; (Pyper and Peterman 1998).

- La seconde étape vise à modéliser les relations poissons-environnement en utilisant les variables hydrologiques et thermiques identifiées à l'étape précédente, mais en prenant en compte les tendances temporelles sous-jacentes. Ces tendances, qui représentent des variabilités à basse fréquence, peuvent masquer des variabilités à haute fréquence (interannuelles). Par conséquent, il paraît important de pouvoir distinguer ce qui relève d'une tendance d'évolution à long terme, et qui peut être liée par exemple au changement climatique, de ce qui relève d'une variation d'une année sur l'autre d'un facteur environnemental.

Par conséquent, nous nous sommes attachés en premier lieu à 'détendancer' (supprimer la tendance à long terme sous-jacente) les séries de données biologiques et environnementales, et à supprimer, ou tout du moins à réduire autant que possible, les autocorrélations présentes dans ces séries (notons que la suppression de la tendance peut suffire à supprimer les autocorrélations).

Différentes méthodes ont été utilisées dans cette optique (modèles autorégressifs de type AR1, différenciation aux pas de temps $j(-1)$ et $j(-2)$, modèle linéaire de tendance, ...). Après les avoir testées, nous avons retenu le modèle linéaire de tendance, et avons travaillé sur les séries de résidus de ces modèles. Ce modèle ajuste une droite de régression au sein du nuage de points représentés en fonction de l'ordre chronologique (modèle TREND, SYSTAT 12 software). L'interdépendance des résidus a été vérifiée à l'aide des graphes d'autocorrélations et d'autocorrélations partielles.

Pour chaque variable biologique analysée, un modèle linéaire généralisé (GLM) a permis de sélectionner les variables hydrologiques et thermiques les plus explicatives, et de tester leur interaction de premier ordre. Les variables ont été intégrées par une procédure 'stepwise' (pas à pas), avec des probabilités d'entrée et de sortie fixées à 0.1. Ce choix a été fait afin de 'compenser' partiellement la perte de puissance statistique (probabilité de détecter une relation significative) qui peut résulter des méthodes visant à supprimer les tendances temporelles (Pyper and Peterman 1998). Compte-tenu des tailles d'échantillons ($n < 30$), nous avons contraint le modèle à deux variables explicatives au maximum. L'interdépendance sérielle des résidus a été évaluée à l'aide de la statistique de Durbin-Watson (D , varie entre 0 et 4 ; absence d'autocorrélation pour des valeurs proches de 2) et du coefficient d'autocorrélation de 1^{er} ordre.

Annexe 4 : Croisement Biologie/hydrologie/thermie

RHÔNE À BUGEY – ANALYSES STATISTIQUES

La sélection des données piscicoles sur le site de Bugey couvre la période de 1979 à 2011, mais les années 1983, 1988, 1992, 1995, 1996, 2002 et 2004 sont manquantes. Vingt-six années peuvent donc être analysées.

Un total de 37 espèces a été capturé sur ce site, mais seules 18 espèces sont présentes dans >15% des échantillons (occurrence \geq 4).

Tableau 9 : Liste des 18 espèces incluses dans l'analyse, avec leurs CPUE (effectif capturé pour 60 minutes de pêche) moyenne, minimum et maximum observées sur les 26 années. Les espèces sont triées par occurrence décroissante.

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Abréviation	Occurrence	CPUE		
				Moyenne	Min	Max
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirilin	SPI	26	106.9	1.0	660.8
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	25	12.7	0.0	51.9
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	24	6.3	0.0	35.8
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	VAN	24	11.2	0.0	42.8
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	23	12.9	0.0	96.4
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	23	18.2	0.0	162.7
<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	CHE	23	18.8	0.0	102.9
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	20	4.0	0.0	24.4
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	PER	15	0.9	0.0	5.7
<i>Salmo trutta fario</i>	Truite fario	TRF	15	0.6	0.0	3.0
<i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	14	0.8	0.0	6.9
<i>Silurus glanis</i>	Silure glane	SIL	10	0.4	0.0	2.0
<i>Blicca bjoerkna</i>	Breme bordelière	BRB	9	0.9	0.0	12.7
<i>Telestes souffia</i>	Blageon	BLN	8	0.8	0.0	13.3
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	EPI	6	0.3	0.0	2.8
<i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	5	0.1	0.0	0.4
<i>Rhodeus sericeus</i>	Bouvière	BOU	5	0.1	0.0	0.9
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	4	0.1	0.0	1.2
Total			26	195.9	6.0	926.3

Figure 25 : Structure taxonomique du peuplement du Rhône à Bugey pour deux périodes distinctes, correspondant au début (1979-1984) et à la fin (2007-2011) de la chronique de suivi piscicole. Les valeurs présentées sont des abondances relatives (%) moyennes sur 5 années.

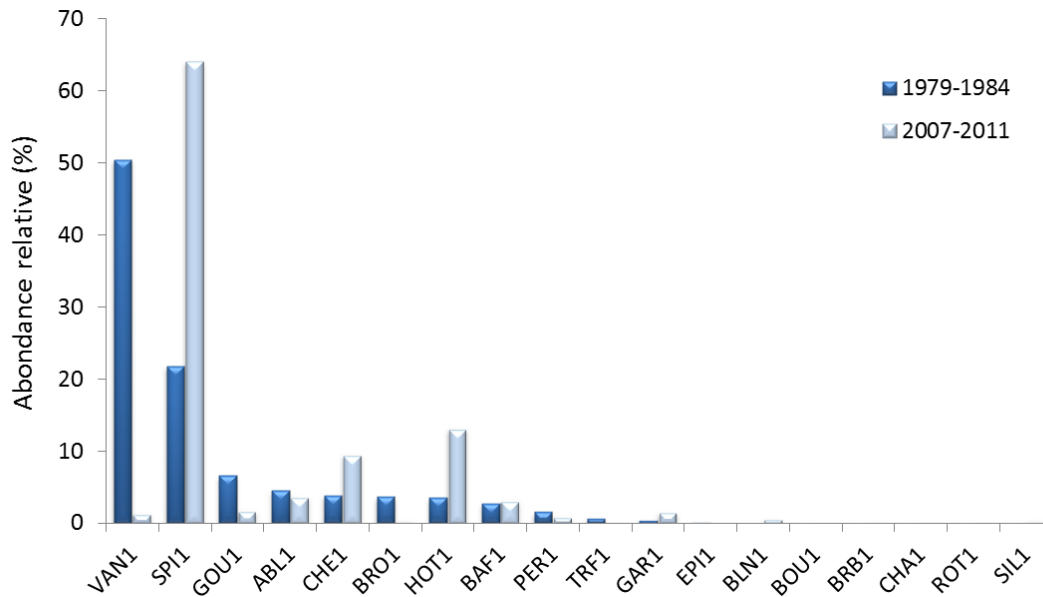
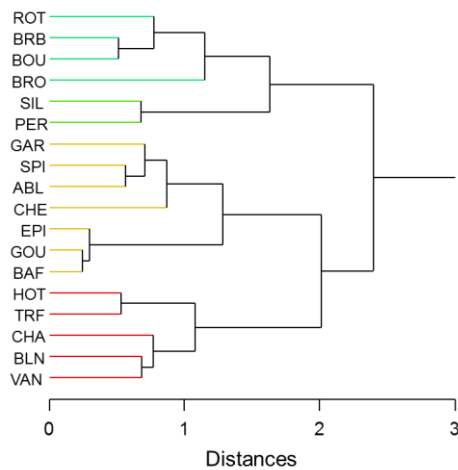


Figure 26 : Classification ascendante hiérarchique sur les espèces (sur les taux de croissance des CPUE, distance 1 - r, agrégation selon la méthode de Ward).



- ▶ La guilde 1 (G1) regroupe le rotengle, la brème bordelière, la bouvière, le brochet, le silure, et la perche ;
- ▶ La guilde 2 (G2) regroupe le gardon, le spiralin, l'ablette, le chevaine, l'épinoche, le goujon et le barbeau ;
- ▶ La guilde 3 (G3) regroupe le hotu, la truite, le chabot, le blageon et la vandoise.

Couplage Biologie-Hydrologie-Thermie

Figure 27 : Exemples de relations entre descripteurs du peuplements piscicoles et variables hydrologiques et thermiques indépendamment de la tendance d'évolution à long-terme (les données présentées sont des résidus par rapport au modèle de tendance). Lissage par méthode Lowess, tension 0.5.

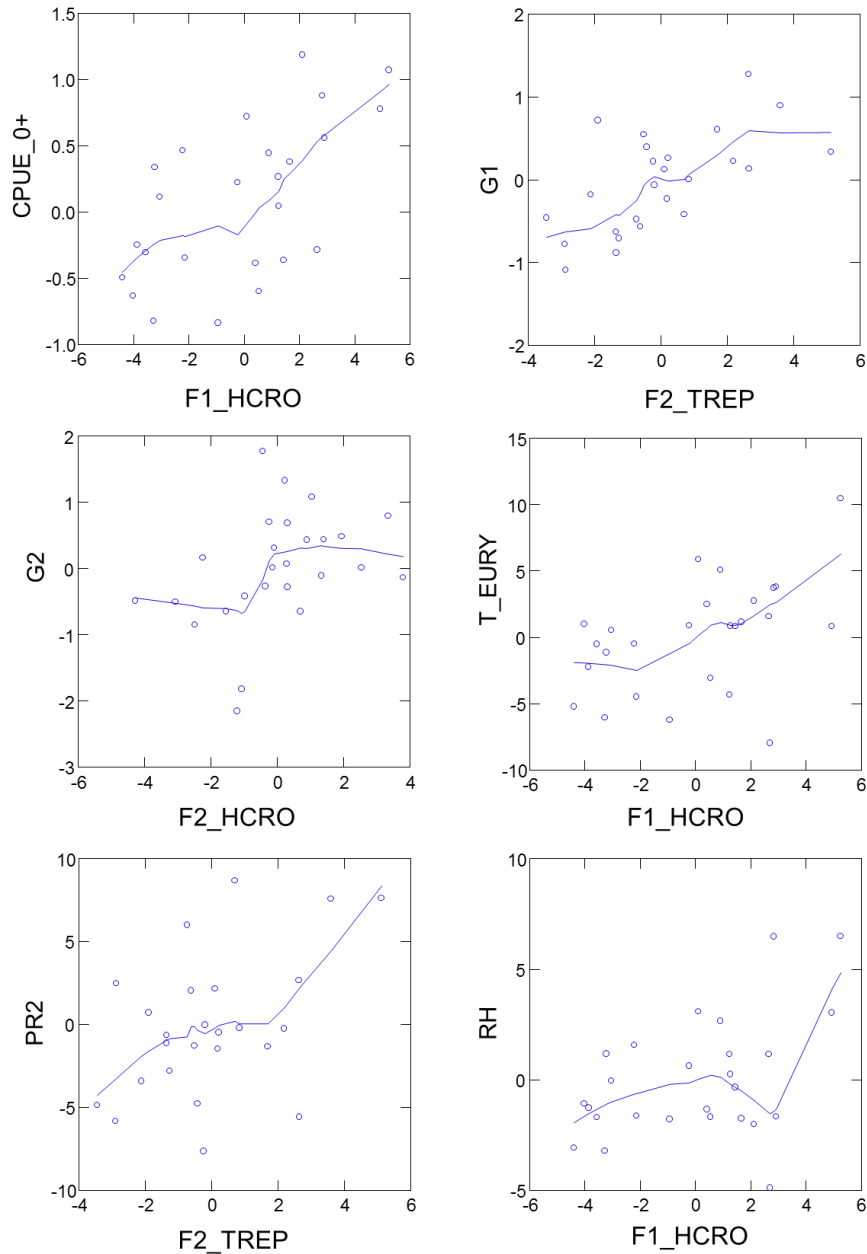


Figure 28 : Matrice de corrélation de Pearson (n = 25 ou 26) entre variables biologiques (en jaune), et hydrologiques (en bleu) et thermiques (en orange) par saison (HIV = hiver ; REP = reproduction ; CRO = croissance).

Variables	F1	F2	F3	CPUE_0+	G1	G2	G3	F1_HHIV	F2_HHIV	F1_HREP	F2_HREP	F1_HCRO	F2_HCRO	F1_THIV	F2_THIV	F1_TREP	F2_TREP	F1_TCRO	F2_TCRO
CPUE_0+	0.936***	0.199	0.017	1.000															
G1	0.330	-0.411	0.121	0.223	1.000														
G2	0.957***	0.040	0.024	0.961	0.247	1.000													
G3	0.276	0.901***	0.150	0.395	-0.197	0.227	1.000												
F1_HHIV	-0.154	0.127	0.136	-0.140	-0.231	-0.134	0.023	1.000											
F2_HHIV	0.157	0.088	-0.216	0.192	0.146	0.203	0.087	0.008	1.000										
F1_HREP	-0.296	-0.380*	0.020	-0.231	0.046	-0.199	-0.377*	-0.060	-0.428	1.000									
F2_HREP	-0.222	-0.010	0.386	-0.151	-0.245	-0.181	-0.088	0.396	-0.154	0.093	1.000								
F1_HCRO	0.457*	0.281	-0.145	0.430*	0.136	0.389	0.264	-0.272	0.237	-0.337	-0.089	1.000							
F2_HCRO	0.036	0.067	-0.048	0.115	-0.379	0.077	0.084	0.107	-0.249	0.286	0.560**	0.019	1.000						
F1_THIV	0.335	-0.042	-0.297	0.315	0.272	0.353	0.037	-0.321	0.114	0.009	-0.451	0.169	-0.056	1.000					
F2_THIV	-0.085	0.102	-0.124	0.041	-0.015	-0.038	0.045	0.215	0.065	0.043	0.277	-0.121	0.310	-0.001	1.000				
F1_TREP	0.647*	0.187	0.024	0.610*	-0.088	0.666*	0.227	0.052	0.048	-0.457*	-0.161	0.310	-0.063	0.240	-0.189	1.000			
F2_TREP	0.339	-0.203	-0.177	0.317	0.658***	0.245	-0.165	-0.117	0.124	-0.020	-0.127	0.401	-0.199	0.112	0.289	0.000	1.000		
F1_TCRO	0.556*	0.139	-0.144	0.482*	0.213	0.486*	0.167	-0.230	0.198	-0.306	-0.049	0.684***	0.136	0.346	-0.217	0.490*	0.280	1.000	
F2_TCRO	0.094	0.001	-0.001	0.078	0.094	0.103	-0.042	-0.418	0.122	0.061	-0.362	0.492*	-0.327	0.105	-0.157	-0.144	0.192	0.000	1.000

Les variables biologiques incluent les 3 axes principaux de l'ACP initiale, les CPUE de 0+ en log (x + 1), ainsi que les log-abondances de chacune des trois guildes définies G1, G2, et G3. Les valeurs indiquées en rouge sont les associations significatives après correction du test pour la présence d'autocorrélations (méthode de Chelton modifiée). * : p < 0.05 ; ** : p < 0.01 ; *** : p < 0.001

Tableau 10 : Modèles linéaires généralisés sur les résidus (tendance temporelle supprimée) des variables biologiques et environnementales.

Modèle	Variable bio.	Variable env.	N	St.coef	F-ratio	p-value	AICc	Δ AICc	r ²	r ² ajusté	DW	FOA
1	CPUE_0+	F2_HCRO	26	0.389	4.584	0.044	56.747	2.141	0.173			
		F1_HCRO		0.324	3.182	0.088	56.227	0.52	0.277	0.218	2.311	-0.161
2	CPUE_0+ (-1985)	F1_HCRO	25	0.563	12.972	0.002	39.002	8.232	0.364			
		F2_HCRO		0.361	5.313	0.031	36.494	2.508	0.492	0.451	2.494	-0.248
3	G1	F2_TREP	25	0.556	14.796	0.001	38.353	10.298	0.403			
		F1_TREP		-0.403	7.772	0.011	33.647	4.706	0.559	0.519	2.415	-0.211
4	G2	F2_HCRO	26	0.385	4.036	0.056	66.722	1.444	0.148	0.112	2.138	-0.098
5	G3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	T_Eury (-1985)	F1_HCRO	25	0.604	12.653	0.002	130.4	8.276	0.365	0.338	2.105	-0.083
7	PR2	F2_TREP	25	0.508	8.089	0.009	144.39	3.201	0.207			
		F2_HCRO		0.333	3.475	0.076	143.58	0.81	0.315	0.253	1.767	0.093
8	RhPar (-1989)	F2_HCRO	25	0.531	9.224	0.006	126.65	1.763	0.167			
		F1_HREP		-0.495	7.997	0.01	121.82	4.839	0.397	0.314	1.792	0.073
9	Rh	F1_HCRO	26	0.436	6.096	0.022	121.96	3.408	0.214			
		F2_HCRO		0.327	3.431	0.077	121.19	0.766	0.32	0.238	1.621	0.167
10	Fr	F2_TREP	25	0.467	6.427	0.019	129.54	2.126	0.172			
		F2_HCRO		0.323	3.076	0.093	129.12	0.414	0.274	0.208	1.624	0.159
11	T3	F1_TCRO	25	0.392	4.17	0.053	118.25	1.568	0.153	0.117	1.906	0.041

Tous les modèles sont significatifs (a minima) au seuil 0.1. Sont présentés, en plus des variables sélectionnées, la taille de l'échantillon (N), le coefficient de régression standardisé, la statistique F et sa probabilité associée, ainsi que le critère d'Akaïk corrigé (AICc) du modèle, la différence d'AICc induite lors de l'ajout de la variable (pour la première variable, différence par rapport au modèle nul), les coefficients de détermination du modèle par variable et ajusté pour le modèle final, la statistique de Durbin-Watson et le coefficient d'autocorrélation des résidus de 1^{er} ordre.

RHÔNE À PÉAGE DE ROUSSILLON BUGEY – ANALYSES STATISTIQUES

Tableau 11 : Liste des 16 espèces retenues pour les analyses (pêche postérieure au 15.10 de l'année en cours, individus 0+, occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) moyenne, minimum et maximum.

Pour les CPUE, les effectifs sont exprimés en nombre d'individus pour 20 points de pêche EPA (échantillonnage ponctuel d'abondance).

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Abréviation	Occurrence	CPUE		
				Moyenne	Min	Max
<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	CHE	28	24.4	0	156
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	24	6.0	0	32
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	23	147.4	0	1102
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	22	6.7	0	40
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	PER	20	2.5	0	12
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	19	60.9	0	646
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	19	4.7	0	41
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	17	2.8	0	29
<i>Blicca bjoerkna</i>	Breme bordelière	BRB	16	4.9	0	45
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	14	7.7	0	188
<i>Ameiurus melas</i>	Poissons-chat	PCH	11	2.2	0	28
<i>Sander lucioperca</i>	Sandre	SAN	11	0.6	0	3
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	9	1.5	0	33
<i>Rhodeus sericeus</i>	Bouvière	BOU	7	0.5	0	5
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	7	1.6	0	30
<i>Carassius gibelio</i>	Carassin argenté	CGO	5	1.9	0	28
Total			29	276.4	5	1718

Figure 29 : Structure moyenne du peuplement de 0+ (16 espèces principales) en fin d'année.

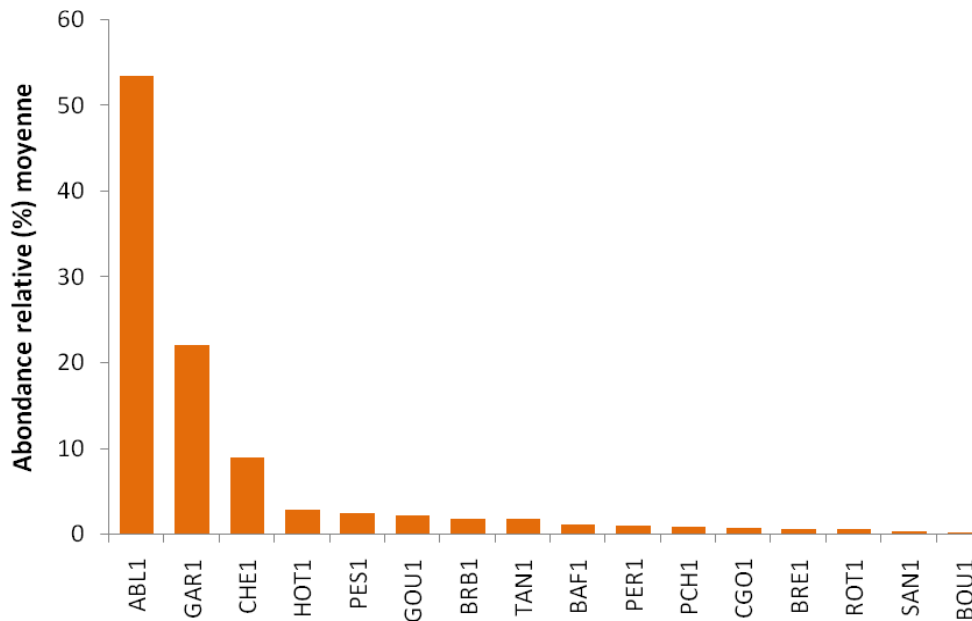


Figure 30 : Définition de guildes d'espèces synchrones sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Les deux guildes G1 et G2 se subdivisent elles-mêmes en deux sous-guildes : G1a et G1b, et G2a et G2b. Voir Tableau 9 pour les codes des espèces.

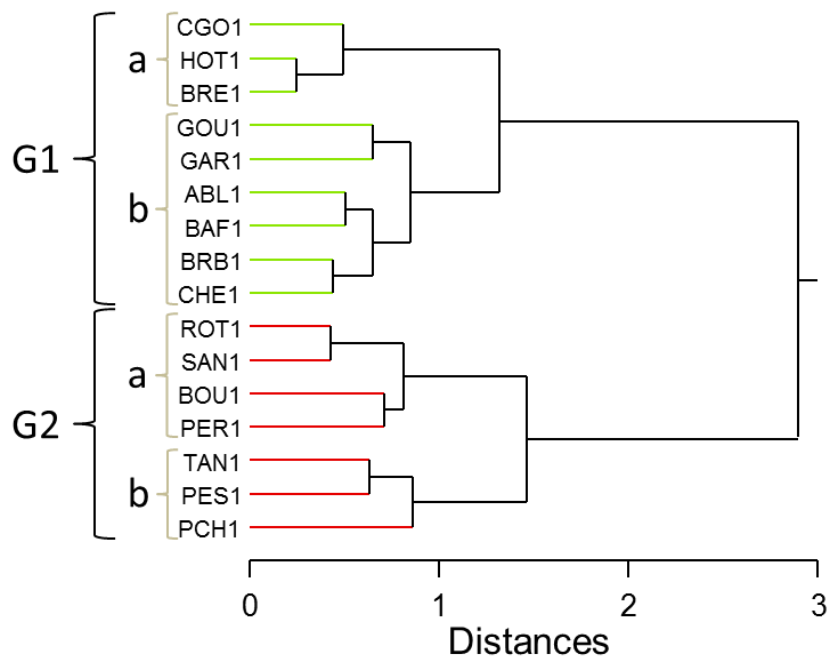
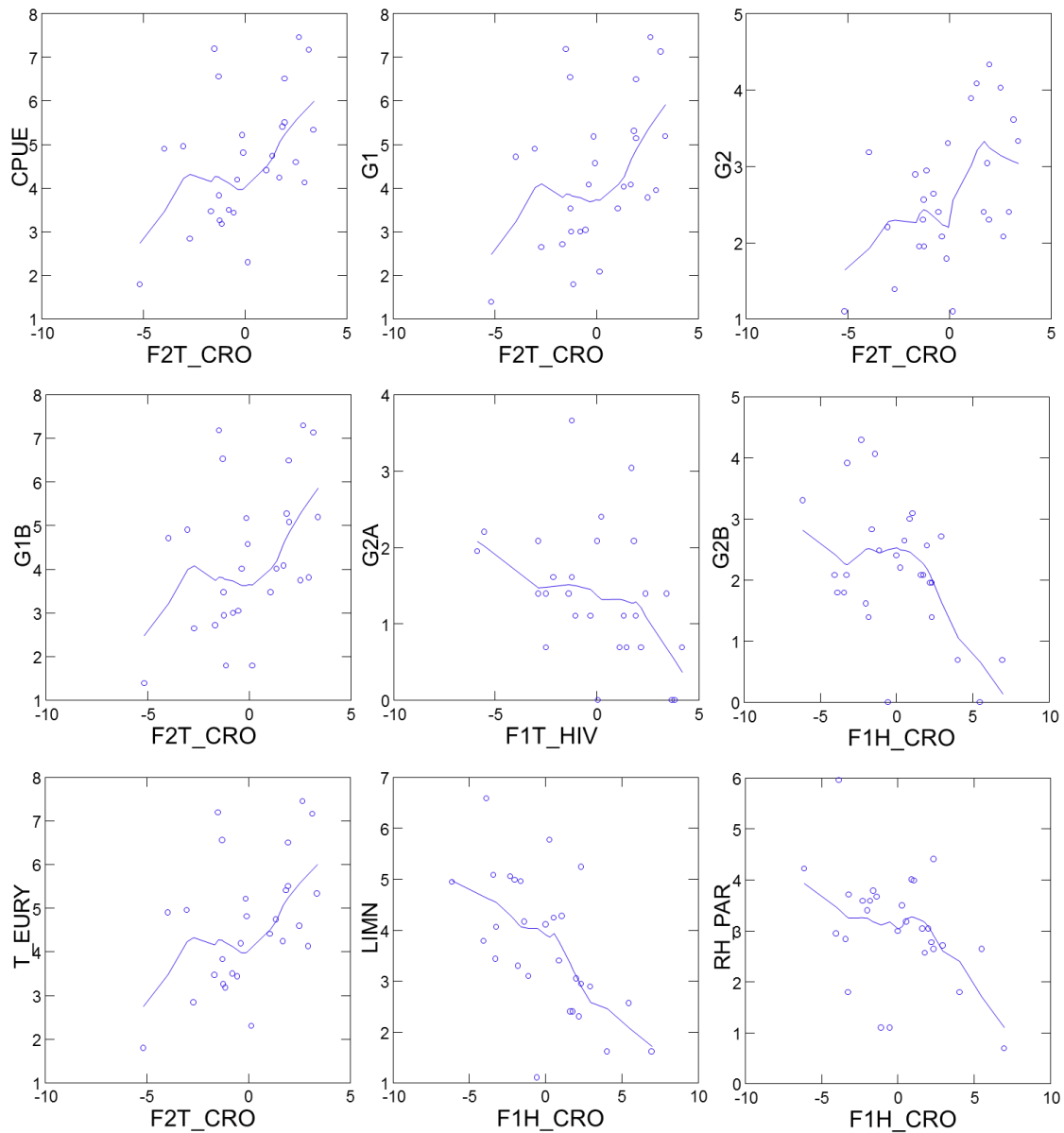


Figure 31 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques ou thermiques saisonnières.



CPUE = abondance globale du recrutement ; G1, G2, G1b, G2a, G2b = abondance des guildes définies en Fig. 1 ; T_Eury, Limn, Rh_Par = abondances des individus appartenant à des espèces eurythermes, limnophiles, ou rhéophiles pour la reproduction (respectivement). F2T_CRO représente la valeur sur l'axe factoriel F2 de l'ACP des variables thermiques pour la période de croissance, F1T_HIV les valeurs sur F1 pour la période hivernale, et F1H_CRO les valeurs sur F1 de l'ACP des variables hydrologiques en période de croissance.

Tableau 12 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole et variables hydrologiques et thermiques (axes synthétiques d'ACP) par saison..

	F1A	F2A	F3A	CPUE	G1A	G1B	G2A	G2B	G1	G2	F1H_REP	F2H_REP	F1H_CRO	F2H_CRO	F1H_HIV	F2H_HIV	F1T_HIV	F2T_HIV	F3T_HIV	F1T_REP	F2T_REP	F3T_REP	F1T_CRO	F2T_CRO	F3T_CRO	
CPUE	-0.839***	0.121	0.025	1																						
G1A	-0.745***	0.047	-0.136	0.568**	1																					
G1B	-0.835***	0.073	-0.028	0.984***	0.549**	1																				
G2A	-0.036	-0.144	0.005	0.068	-0.047	-0.003	1																			
G2B	-0.242	0.442*	0.711***	0.344	0.116	0.244	0.047	1																		
G1	-0.842***	0.069	-0.038	0.983***	0.572**	0.999***	-0.01	0.234	1																	
G2	-0.225	0.307	0.652***	0.328	0.044	0.209	0.443*	0.879***	0.2	1																
F1H_REP	-0.263	0.109	-0.299	0.097	0.38	0.068	0.315	-0.011	0.077	0.025	1															
F2H_REP	0.092	-0.022	0.234	-0.237	0.178	-0.275	-0.07	0.125	-0.263	0.088	0.06	1														
F1H_CRO	0.4*	-0.401*	-0.162	-0.47*	-0.427*	-0.407*	-0.09	-0.482*	-0.421*	-0.415*	-0.321	0.148	1													
F2H_CRO	-0.129	-0.18	0.045	0.195	0.171	0.236	-0.26	-0.142	0.244	-0.255	-0.345	-0.088	-0.015	1												
F1H_HIV	0.134	0.061	-0.035	-0.062	-0.283	-0.088	0.187	0.189	-0.096	0.313	-0.04	-0.447*	-0.236	-0.41*	1											
F2H_HIV	0.232	-0.073	-0.342	-0.094	-0.163	-0.05	-0.12	-0.372	-0.047	-0.453*	-0.291	-0.428*	0.009	0.384*	0.006	1										
F1T_HIV	0.194	0.021	0.085	-0.211	-0.116	-0.185	-0.4*	-0.062	-0.187	-0.261	0.019	0.078	0.264	0.254	-0.439*	-0.094	1									
F2T_HIV	0.015	0.014	0.128	-0.013	0.098	0.027	-0.07	-0.095	0.043	-0.109	0.025	0.394*	-0.108	0.176	-0.507**	0.112	0	1								
F3T_HIV	-0.3	0.432*	-0.123	0.208	0.354	0.216	-0.23	0.037	0.217	-0.104	0.004	0.268	-0.042	-0.111	-0.359	-0.153	0	0	1							
F1T_REP	0.244	0.022	0.339	-0.056	-0.344	-0.081	0.116	0.255	-0.088	0.357	-0.648***	0.192	0.071	-0.148	0.315	-0.052	-0.387*	0.076	0.032	1						
F2T_REP	-0.353	-0.014	-0.098	0.401*	0.151	0.399*	-0.05	0.172	0.396*	0.024	0.132	-0.234	-0.428*	-0.026	0.16	0.084	0.021	-0.164	-0.026	0	1					
F3T_REP	0.118	-0.677***	-0.201	-0.12	-0.155	-0.091	0.147	-0.335	-0.098	-0.253	-0.05	0.018	0.42*	-0.039	0.057	0.102	-0.029	-0.249	-0.065	0	0	1				
F1T_CRO	-0.276	-0.319	0.191	0.226	0.296	0.249	-0.23	0.04	0.256	-0.073	0.101	0.275	0.081	0.35	-0.506**	-0.21	0.392*	0.286	-0.16	-0.277	0.152	-0.152	1			
F2T_CRO	-0.454*	0.27	0.146	0.48*	0.444*	0.425*	0.284	0.47*	0.438*	0.493**	0.208	-0.214	-0.829***	0.094	0.189	0.033	-0.306	0.058	-0.078	-0.092	0.344	-0.355	0	1		
F3T_CRO	0.128	-0.014	0.207	-0.192	-0.107	-0.198	0.123	0.094	-0.197	0.178	0.137	0.033	-0.086	-0.183	0.026	-0.14	-0.292	0.335	-0.298	0.113	-0.265	-0.346	0	0	1	

En rouge sont indiquées les relations significatives (probabilité non corrigée) : * si p < 0.05 ; ** si p < 0.01 ; *** si p < 0.001

Tableau 13 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales.

Modèle	Variable bio.	Variable env.	N	St.coef	F-ratio	p-value	AICc	Δ AICc	r ²	r ² ajusté	DW	FOA
1	CPUE	F2T_CRO	27	0.476	7.319	0.012	96.713	4.39	0.226	0.196	1.322	0.312
2	G1	F2T_CRO	27	0.438	5.926	0.022	104.264	3.2	0.192	0.159	1.32	0.316
3	G2	F2T_CRO	27	0.508	11.52	0.002	68.184	4.961	0.243			
		F2H_HIV		-0.47	9.848	0.004	61.676	6.508	0.463	0.418	1.67	0.134
4	G1b	F2T_CRO	27	0.425	5.496	0.027	104.903	2.822	0.18	0.147	1.308	0.322
5	G2a	F1T_HIV	27	-0.407	5.398	0.029	70.807	2.176	0.16			
		F1H_REP		0.323	3.41	0.077	69.994	0.813	0.265	0.204	2.24	-0.129
6	G2b	F1H_CRO	28	-0.454	7.772	0.01	82.309	4.392	0.219			
		F2H_HIV		-0.347	4.542	0.043	80.374	1.935	0.339	0.286	1.771	0.09
7	LIMN	F1H_CRO	28	-0.603	16.059	<0.0001	86.355	10.852	0.391	0.34	1.523	0.206
8	T_EURY	F2T_CRO	27	0.476	7.319	0.012	96.713	4.39	0.226	0.196	1.322	0.312
9	RH_PAR	F1H_CRO	27	-0.53	10.991	0.003	79.865	5.185	0.249			
		F1T_CRO		0.379	5.616	0.026	76.963	2.902	0.391	0.341	1.194	0.385

Tous les modèles sont significatifs (a minima) au seuil 0.1. Sont présentés, en plus des variables sélectionnées, la taille de l'échantillon (N), le coefficient de régression standardisé, la statistique F et sa probabilité associée, ainsi que le critère d'Akaike corrigé (AICc) du modèle, la différence d'AICc induite lors de l'ajout de la variable (pour la première variable, différence par rapport au modèle nul), les coefficients de détermination du modèle par variable et ajusté pour le modèle final, la statistique de Durbin-Watson et le coefficient d'autocorrélation des résidus de 1^{er} ordre.

RHÔNE À CRUAS-MEYSSE – ANALYSES STATISTIQUES

Tableau 14 : Liste des 25 espèces retenues pour les analyses (stations amont + aval CNPE, pêche postérieure au 15.10 de l'année en cours, occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) minimum, moyenne, et maximum.

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Abréviation	Occurrence	CPUE		
				Min.	Moyenne	Max.
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	28	0	412	3630
<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	27	0	19	87
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	23	0	11	66
<i>Leuciscus souffia</i>	Blageon	BLN	10	0	3	27
<i>Rhodeus souffia</i>	Bouvière	BOU	11	0	9	137
<i>Blicca bjoerkna</i>	Breme bordelière	BRB	26	0	40	384
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	12	0	7	96
<i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	13	0	1	5
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	10	0	8	202
<i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	10	0	2	10
<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	CHE	30	44	255	908
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	EPI	12	0	2	8
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	30	2	478	6905
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	27	0	83	334
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	GRE	6	0	2	18
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	19	0	40	392
<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	LOF	18	0	10	92
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	PER	26	0	9	42
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	26	0	13	78
<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	12	0	10	67
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	23	0	7	26
<i>Sander lucioperca</i>	Sandre	SAN	13	0	3	26
<i>Silurus glanis</i>	Silure glâne	SIL	6	0	1	6
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirin	SPI	26	0	22	153
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	16	0	3	19
Total			29	80	1447	8560

Pour les CPUE, les effectifs sont exprimés en nombre d'individus pour 2 x 60 minutes de pêche (60' pour site aval + 60' pour site amont). La ligne 'Total' représente les occurrences et CPUE pour l'ensemble des espèces (peuplement) sur toutes les années.

Figure 32 : Structure moyenne du peuplement (25 espèces principales) en fin d'année sur l'ensemble du suivi, ainsi qu'au début (période 1983-1987) et à la fin de la chronique (2008-2012).

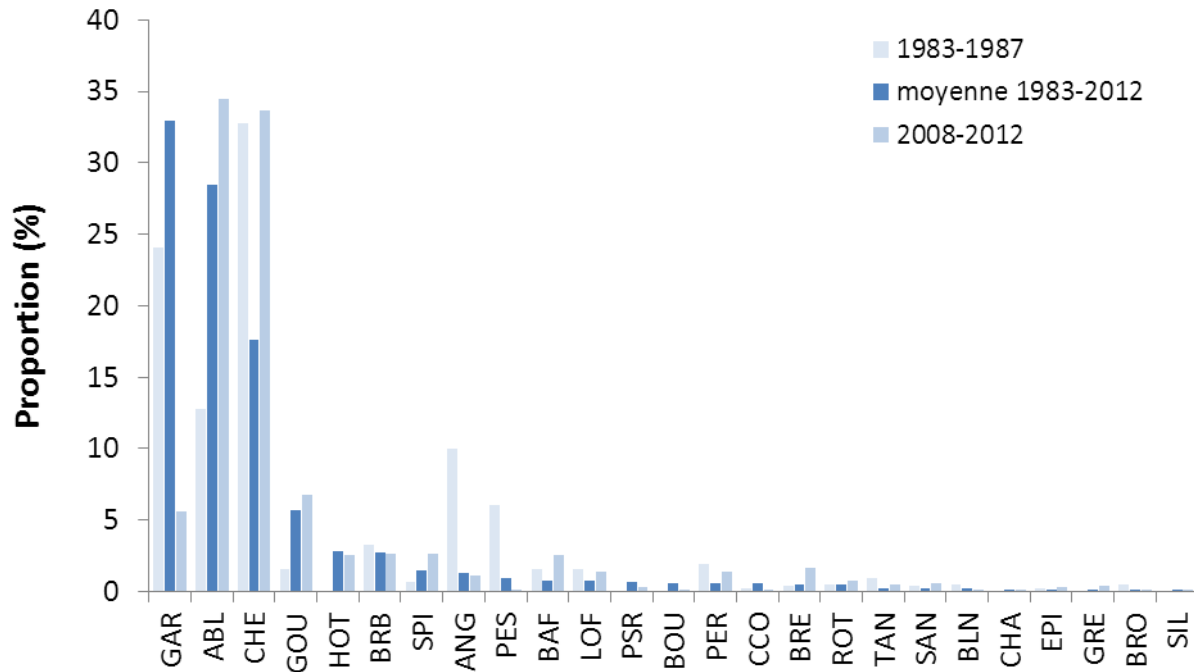


Figure 33 : Définition de guildes d'espèces synchrones (taux de croissance des populations : $\ln(x_{t+1}) - \ln(x_t)$) sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Tableau 12 pour les codes des espèces.

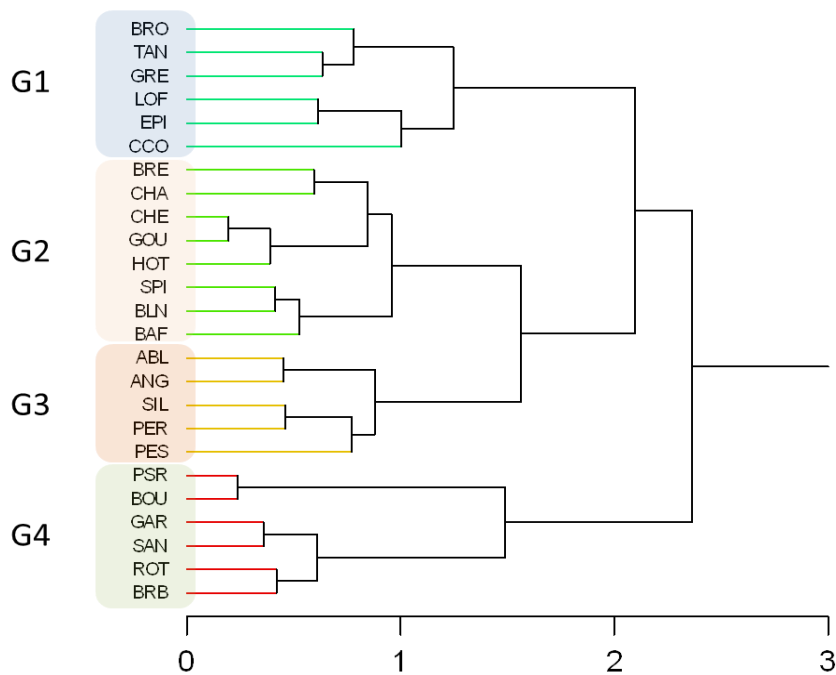
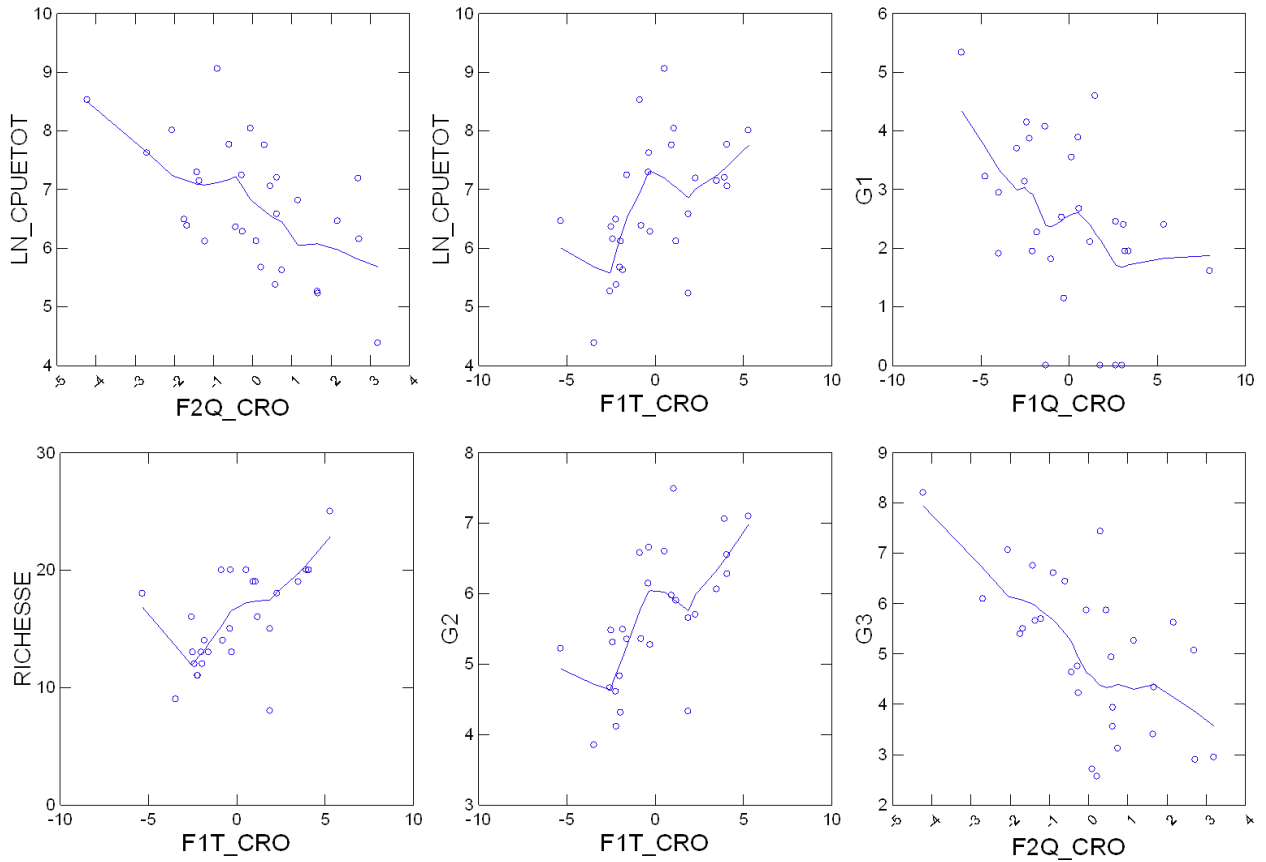


Figure 34 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques et thermiques saisonnières.



LN_CPUETOT = abondance globale du recrutement (en $\ln(x+1)$) ; G1, G2, et G3 = abondance ($\ln(x+1)$) des guildes définies en Fig. 2 ; T_Eury, Limn, Rh_Par = abondances des individus appartenant à des espèces eurythermes, limnophiles, ou rhéophiles pour la reproduction (respectivement). F1Q_CRO et F2Q_CRO représentent la valeur sur l'axe factoriel F1 (respectivement F2) de l'ACP des variables hydrologiques pour la période de croissance (ou estivale), F1T_CRO les valeurs sur F1 de l'ACP des variables thermiques pour la période estivale.

Tableau 15 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole et variables hydrologiques (Q) et thermiques (T ; axes synthétiques d'ACP) par saison.

	Ln(CPUetot)	F1	F2	G1	G2	G3	G4	F1Q_HIV	F2Q_HIV	F1Q_REP	F2Q_REP	F1Q_CRO	F2Q_CRO	F1T_HIV	F2T_HIV	F3T_HIV	F1T_REP	F2T_REP	F1T_CRO	F2T_CRO	
G1	0.291	0.344	0.451**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
G2	0.850***	0.841***	0.102	0.478**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
G3	0.770***	0.680***	-0.553**	-0.015	0.504**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
G4	0.836***	0.667***	-0.484**	0.138	0.594***	0.590***	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1Q_HIV	-0.164	-0.065	0.351*	0.373*	-0.032	-0.373*	-0.061	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2Q_HIV	0.224	0.325	0.100	0.093	0.223	0.109	0.121	0.006	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1Q_REP	-0.128	-0.230	-0.257	-0.187	-0.316	0.105	-0.156	-0.122	0.346	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2Q_REP	-0.163	-0.080	0.016	0.209	-0.230	-0.139	0.033	0.369*	0.328	0.009	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1Q_CRO	-0.330	-0.253	-0.232	-0.441*	-0.455**	0.017	-0.219	-0.328	0.014	0.327	-0.015	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2Q_CRO	-0.586***	-0.563***	0.329	0.018	-0.440*	-0.644***	-0.411*	0.392*	-0.424*	-0.447*	0.101	0.033	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.
F1T_HIV	0.098	0.062	-0.242	-0.198	-0.160	0.187	0.208	-0.414*	-0.139	-0.030	-0.013	0.256	-0.047	1.000	.	.	.	.	.	.	.
F2T_HIV	-0.110	-0.313	-0.268	-0.252	-0.192	0.065	-0.255	-0.445*	-0.151	0.184	-0.276	0.119	-0.067	0.000	1.000	.	.	.	.	.	.
F3T_HIV	-0.007	-0.028	-0.081	-0.178	0.005	0.018	-0.020	-0.284	-0.160	0.003	-0.158	0.210	-0.214	0.000	0.000	1.000	.	.	.	.	.
F1T_REP	-0.372*	-0.488**	-0.045	-0.232	-0.427*	-0.267	-0.329	0.144	0.032	0.655***	-0.095	0.233	0.021	-0.377*	0.368*	0.036	1.000	.	.	.	.
F2T_REP	-0.112	-0.300	-0.252	-0.317	-0.238	0.019	-0.131	-0.109	-0.048	0.196	-0.012	0.400*	-0.010	0.115	0.108	-0.042	0.000	1.000	.	.	.
F1T_CRO	0.494**	0.573***	0.216	0.367*	0.639***	0.297	0.329	0.055	0.048	-0.373*	-0.035	-0.663***	-0.210	-0.068	-0.268	-0.195	-0.540**	-0.416*	1.000	.	.
F2T_CRO	-0.177	-0.090	0.339	0.235	-0.050	-0.310	-0.180	0.352*	0.080	0.191	0.073	-0.234	-0.024	-0.295	-0.293	0.209	0.144	0.028	0.000	1.000	

En rouge sont indiquées les relations significatives (probabilité non corrigée pour tests multiples, mais corrigées pour la présence d'autocorrélations temporelles) : * si $p < 0.05$; ** si $p < 0.01$; *** si $p < 0.001$.

Tableau 16 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales.

Modèle	Variable bio.	Variable env.	N	St.coef	F-ratio	p-value	AICc	Δ AICc	r ²	r ² ajusté	DW	FOA
1	CPUE*	F2Q_CRO	29	-0.851	25.323	<0.001	77.645	8.088	0.315			
		F1Q_REP		-0.522	9.546	0.005	71.328	6.317	0.505	0.46	2.426	-0.222
2	G1	F1Q_CRO	29	-0.441	6.298	0.019	98.999	3.527	0.194	0.166	1.817	0.089
3	G2*	F1T_CRO	28	0.515	11.249	0.003	67.739	8.844	0.309			
		F2Q_CRO		-0.335	4.751	0.039	65.607	2.132	0.42	0.373	1.992	-0.046
4	G3	F2Q_CRO	28	-0.652	22.14	<0.001	94.145	12.483	0.415			
		F2T_CRO		-0.335	5.518	0.027	91.3	2.845	0.521	0.482	1.656	0.106
5	G4	F2Q_CRO	29	-0.601	10.541	0.003	106.224	2.668	0.169			
		F1Q_REP		-0.425	5.271	0.030	103.606	2.618	0.314	0.254	2.06	-0.035
6	T1*	F1T_CRO	28	0.434	6.935	0.014	194.963	4.627	0.225			
		F2Q_CRO		-0.326	3.909	0.059	193.635	1.328	0.33	0.276	1.6	0.192
7	T_EURY*	F1T_CRO	28	0.501	10.596	0.003	256.918	7.308	0.296			
		F2Q_CRO		-0.351	5.198	0.031	254.368	2.55	0.417	0.371	2.136	-0.075

Tous les modèles sont significatifs (a minima) au seuil 0.1. Sont présentés, en plus des variables sélectionnées, la taille de l'échantillon (N), le coefficient de régression standardisé, la statistique F et sa probabilité associée, ainsi que le critère d'Akaïké corrigé (AICc) du modèle, la différence d'AICc induite lors de l'ajout de la variable (pour la première variable, différence par rapport au modèle nul), les coefficients de détermination du modèle par variable et ajusté pour le modèle final, la statistique de Durbin-Watson et le coefficient d'autocorrélation des résidus de 1^{er} ordre. L'astérisque (*) indique les modèles pour lesquels les variables ont été 'détendancées'.

RHÔNE À TRICASTIN – ANALYSES STATISTIQUES

Tableau 17 : Liste des 18 espèces retenues pour les analyses (Viviers, Donzère-Mondragon amont + aval CNPE, Caderousse ; pêche postérieure au 01.09 de l'année en cours ; occurrence > 15% des échantillons), avec leur occurrence sur les 31 années de suivi, ainsi que les captures par unité d'effort (CPUE) minimum, moyenne, et maximum.

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Abréviation	Occurrence	CPUE		
				Min.	Moyenne	Max.
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	31	10	301	1914
<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	31	1	13	53
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	30	0	15	43
<i>Rhodeus sericeus</i>	Bouvière	BOU	20	0	20	157
<i>Blicca bjoerkna</i>	Breme bordelière	BRB	27	0	35	218
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	21	0	4	27
<i>Carassius auratus gibelio</i>	Carassin argenté	CAG	18	0	5	93
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	12	0	1	9
<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	CHE	31	16	203	686
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	31	8	146	619
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	29	0	26	132
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	22	0	31	184
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	PER	26	0	4	23
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	29	0	5	14
<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	15	0	4	33
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	19	0	2	13
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirilin	SPI	18	0	6	50
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	17	0	1	15
Total			31	82	822	2765

Pour les CPUE, les effectifs sont exprimés en nombre d'individus pour 60 minutes de pêche. La ligne 'Total' représente les occurrences et CPUE pour l'ensemble des espèces (peuplement) sur toutes les années.

Figure 35 : Structure moyenne du peuplement (18 espèces principales, occurrence > 15%) en fin d'année sur la durée du suivi (1982-2012) pour l'ensemble des sites (Viviers, Canal de Donzère-Mondragon amont et aval CNPE, et Caderousse).

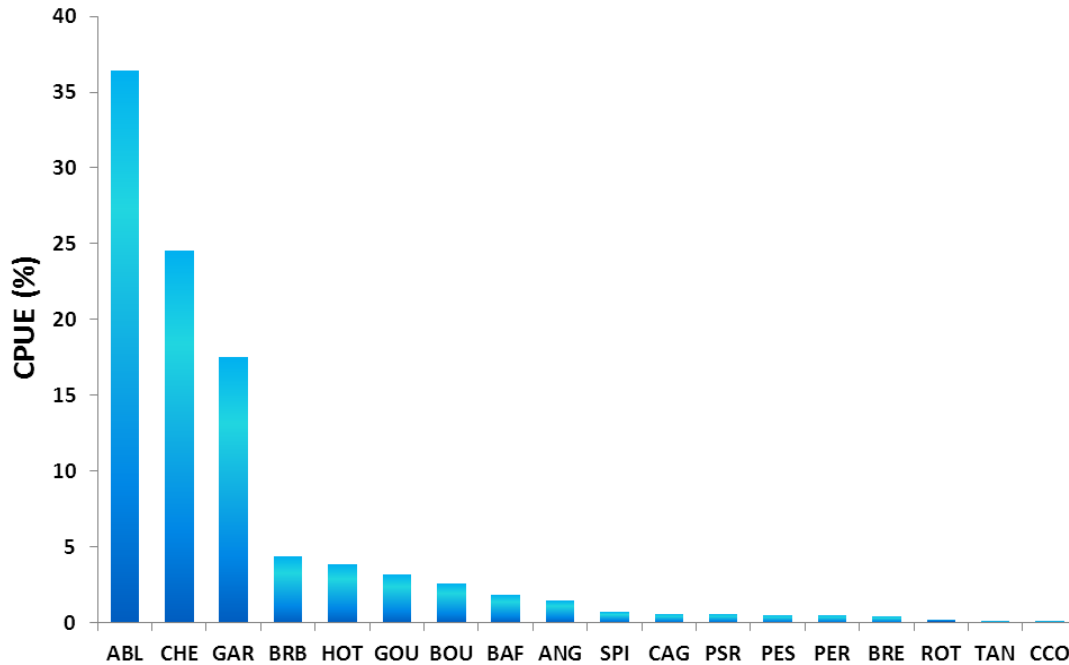


Figure 36 : Définition de guildes d'espèces synchrones (taux de croissance des populations : $\ln(x_{t+1}) - \ln(x_t)$) sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (distance 1-r, méthode de Ward). Voir Tableau 15 pour les codes des espèces.

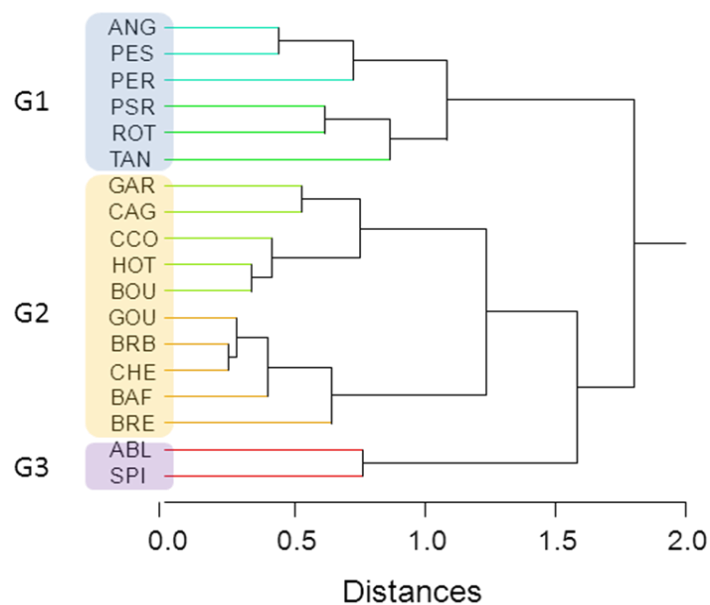
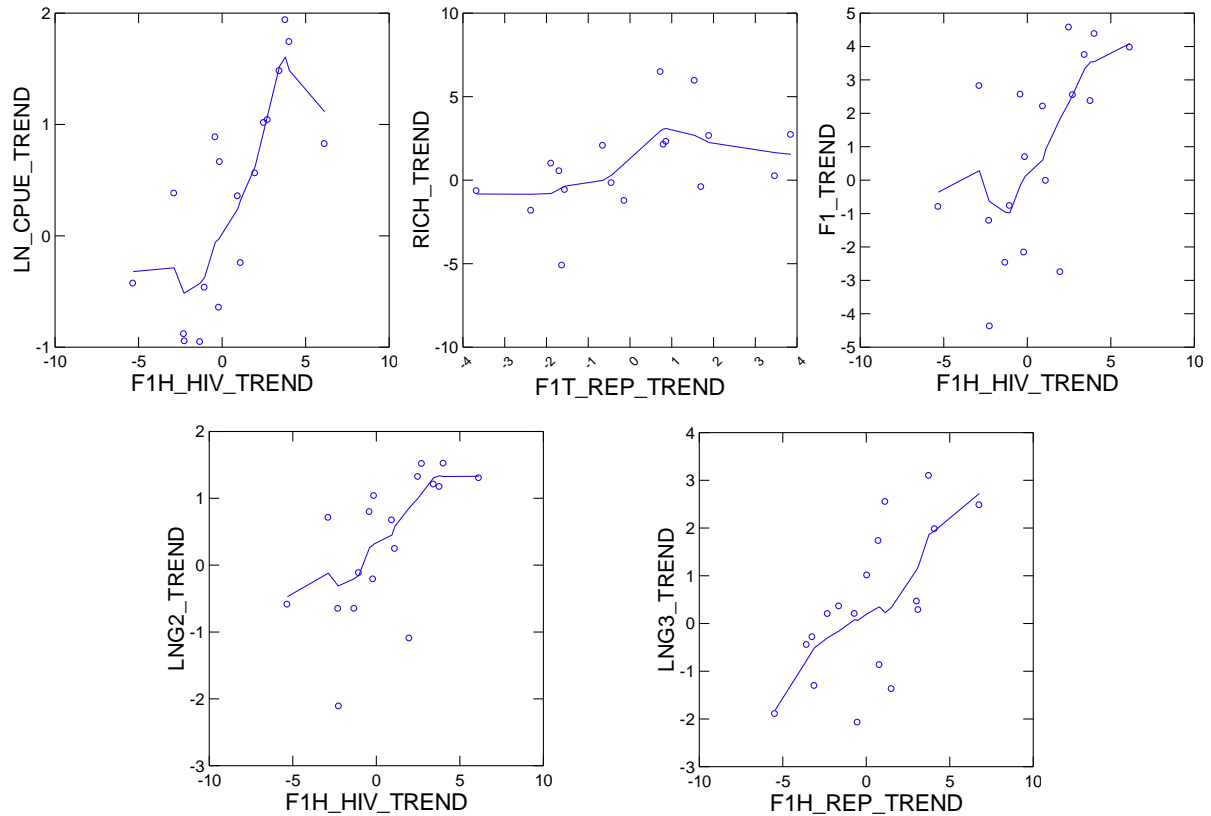


Figure 37 : Exemples de relations entre métriques du peuplement piscicole et composantes hydrologiques et thermiques saisonnières (lissage par Lowess)



. LN_CPUE = abondance globale du recrutement (en $\ln(x+1)$) ; Rich = Richesse spécifique ; F1 = axe F1 de l'ACP ; LNG1, LNG2, et LNG3 = abondance ($\ln(x+1)$) des guildes définies en Fig. 2 ; F1H et F1T représentent les valeurs sur les axes factoriels F1 des ACP des variables hydrologiques (H) et thermiques (T), pour les périodes de reproduction (REP) et hivernale (HIV). TREND indique que toutes les variables ont préalablement été « détendancées ».

Tableau 18 : Matrice de corrélation (r de Pearson) entre métriques du peuplement piscicole (axes synthétiques d'ACP, abondances des guildes, abondance globale et richesse spécifique) et variables hydrologiques (H) et thermiques (T ; axes synthétiques d'ACP) par saison.

	F1	F2	LnG1	LnG2	LnG3	LnCPUE	Richesse	F1H_HIV	F2H_HIV	F1H_REP	F2H_REP	F1H_CRO	F2H_CRO	F1T_HIV	F2T_HIV	F1T_REP	F2T_REP	F1T_CRO	F2T_CRO	
F1	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2	0.015	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LnG1	0.744***	0.029	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LnG2	0.963***	0.011	0.777***	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LnG3	0.621***	0.731***	0.430*	0.575*	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
LnCPUE	0.816***	0.415	0.525	0.809***	0.794***	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Richesse	0.867***	0.015	0.797***	0.849***	0.509*	0.587*	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1H_HIV	0.175	0.160	-0.069	0.197	0.163	0.438	-0.025	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2H_HIV	-0.103	0.084	0.099	-0.030	-0.067	-0.082	-0.111	0.005	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1H_REP	-0.264	0.605***	-0.429*	-0.367*	0.307	0.096	-0.357*	0.074	-0.332	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F2H_REP	-0.105	-0.182	-0.147	-0.143	-0.063	-0.151	-0.057	-0.303	-0.348	0.050	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F1H_CRO	0.294	-0.338	0.092	0.276	-0.038	0.038	0.216	-0.278	-0.096	-0.293	0.023	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.
F2H_CRO	-0.232	-0.160	0.053	-0.206	-0.304	-0.425*	-0.013	-0.374	0.431	-0.330	0.104	-0.048	1.000	.	.	.	.	.	.	.
F1T_HIV	-0.149	-0.200	-0.106	-0.201	-0.220	-0.200	-0.268	-0.376	-0.303	0.096	0.047	0.235	-0.034	1.000	.	.	.	.	.	.
F2T_HIV	0.391	-0.151	0.421*	0.379	0.157	0.193	0.352	-0.459*	-0.014	-0.193	0.344	0.212	0.136	0.000	1.000	.	.	.	.	.
F1T_REP	0.589*	-0.339*	0.501*	0.618*	0.125	0.307	0.597	0.058	0.115	-0.636***	0.141	0.261	-0.006	-0.300	0.472	1.000	.	.	.	.
F2T_REP	-0.273	0.295	-0.252	-0.239	-0.028	-0.073	-0.258	0.171	-0.039	0.284	-0.117	-0.439	-0.204	-0.013	-0.163	0.000	1.000	.	.	.
F1T_CRO	0.501*	-0.323	0.358	0.483*	0.116	0.262	0.320	-0.101	0.067	-0.351	0.045	0.722***	-0.097	0.117	0.329	0.488	-0.406	1.000	.	.
F2T_CRO	-0.040	-0.112	-0.170	-0.127	-0.137	-0.110	-0.131	-0.288	-0.154	0.256	0.097	0.108	-0.070	0.323	0.281	-0.179	-0.022	0.000	1.000	

En rouge sont indiquées les relations significatives (probabilité non corrigée pour tests multiples, mais corrigée pour la présence d'autocorrélations temporelles) : * si $p < 0.05$; ** si $p < 0.01$; *** si $p < 0.001$.

Tableau 19 : Modèles linéaires généralisés reliant variables biologiques et environnementales

Modèle	Variable bio.	Variable env.	N	St.coef	F-ratio	p-value	AICc	Δ AICc	r ²	r ² ajusté	DW	FOA
1	LnCPUE	F1H_HIV	18	0.748	19.106	0.001	38.542	10.975	0.560	0.516	1.247	0.304
2	Richesse	F1T_REP	18	0.482	4.53	0.050	85.374	1.497	0.232	0.181	2.181	-0.180
3	F1	F1H_HIV	18	0.607	8.756	0.010	81.408	4.827	0.369	0.322	1.529	0.181
4	LnG1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	LnG2	F1H_HIV	18	0.642	10.516	0.005	48.177	6.102	0.412	0.378	2.042	-0.034
6	LnG3	F1H_REP	18	0.602	8.529	0.011	61.115	4.664	0.440	0.405	0.761	0.536

Tous les modèles sont significatifs (a minima) au seuil 0.1. Sont présentés, en plus des variables sélectionnées, la taille de l'échantillon (N), le coefficient de régression standardisé, la statistique F et sa probabilité associée, ainsi que le critère d'Akaïké corrigé (AICc) du modèle, la différence d'AICc induite lors de l'ajout de la variable (pour la première variable, différence par rapport au modèle nul), les coefficients de détermination du modèle par variable et ajusté pour le modèle final, la statistique de Durbin-Watson et le coefficient d'autocorrélation des résidus de 1^{er} ordre. Toutes les variables ont été 'détendancées'. Les modèles ont été établis sur un jeu de données réduit (année > 1993).