



HAL
open science

Étude thermique du Rhône Phase IV. Facteurs hydroclimatiques et taille des poissons juvéniles

Marlène Meynard, Baptiste Testi, Jacques Veslot, Georges Carrel

► **To cite this version:**

Marlène Meynard, Baptiste Testi, Jacques Veslot, Georges Carrel. Étude thermique du Rhône Phase IV. Facteurs hydroclimatiques et taille des poissons juvéniles. IRSTEA, 3275 route Cézanne, 13100 Aix-en-Provence. 2012, pp.84. hal-04415327

HAL Id: hal-04415327

<https://sde.hal.science/hal-04415327>

Submitted on 24 Jan 2024

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

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

Public Domain



Etude thermique du Rhône Phase IV – Lot 2

Facteurs hydroclimatiques et taille des poissons juvéniles

17 septembre 2012

Marlène MEYNARD
Baptiste TESTI
Jacques VESLOT
Georges CARREL

UR Hydrobiologie
Iristea
3275 Route de Cézanne
CS 40061
13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5



Etude thermique du Rhône Phase IV – Lot 2

Facteurs hydroclimatiques et taille des poissons juvéniles

1	Introduction.....	8
2	Matériel et méthodes	12
2.1	Données Poissons	12
2.1.1	Provenance des données.....	12
2.1.2	Echantillonnage.....	12
2.1.2.1	<i>La pêche en continu de rive (PCR)</i>	13
2.1.2.2	<i>Echantillonnage Ponctuel d'Abondance (EPA)</i>	13
2.1.2.3	<i>La pêche par ambiances</i>	14
2.1.3	Comparaison des méthodes	14
2.1.4	Morphométrie	15
2.1.5	Sections fluviales étudiées	15
2.1.6	Constitution d'une base de données	16
2.1.7	Vérification des données	17
2.1.8	Regroupements spatiaux	17
2.1.9	Données piscicoles utilisables	23
2.1.10	Choix des espèces	29
2.2	Données thermiques.....	33
2.3	Données hydrologiques	33
2.4	Le tri et l'identification des classes d'âge.....	33
2.4.1	Usage des distributions en classes de taille	33
2.4.2	Les problèmes de discrimination des classes d'âge.....	34
2.4.2.1	<i>Les effectifs de juvéniles</i>	34
2.4.2.2	<i>La variabilité intra-spécifique de la taille</i>	35
2.4.2.3	<i>Les stratégies de ponte</i>	37
2.4.3	Vers une automatisation du tri ?	37
2.4.4	Le choix de l'expertise.....	38
2.5	La température.....	43
2.5.1	Les seuils thermiques.....	46
2.5.2	Les dates pour le calcul des SDJ.....	46
2.5.3	Le calcul des SDJ.....	46
2.6	L'hydrologie.....	48
2.6.1	Généralités	48
2.6.2	Choix d'une métrique pour la période de croissance.....	48

2.6.3	Les caractéristiques stationnelles	49
3	Résultats et discussion.....	50
3.1	Le rôle de la température.....	50
3.1.1	Une relation linéaire simple.....	50
3.1.2	Les rejets thermiques.....	52
3.1.3	Des évolutions temporelles marquées.....	54
3.2	Influence du débit.....	57
3.3	Le gradient amont-aval	58
3.4	Le fleuve aménagé	59
3.5	Les paramètres locaux.....	61
3.6	Autres facteurs de variabilité.....	66
3.6.1	Evolution de la qualité des eaux	66
3.6.2	Les facteurs biotiques	66
3.6.2.1	<i>La densité-dépendance</i>	66
3.6.2.2	<i>L'état sanitaire des populations piscicoles</i>	67
3.6.2.3	<i>Les ressources alimentaires</i>	67
4	Conclusions	68
5	Bibliographie.....	71
6	Résumé.....	78
6.1	Introduction	78
6.2	Matériel et méthodes	78
6.2.1	Données Poissons	78
6.2.2	Données thermiques.....	80
6.2.3	Données hydrologiques.....	81
6.2.4	Le tri et l'identification des classes d'âge.....	81
6.3	Résultats et discussion	82
6.3.1	Le rôle de la température	82
6.3.2	Influence du débit	82
6.3.3	Le gradient amont-aval.....	82
6.3.4	Le fleuve aménagé.....	83
6.3.5	Les paramètres locaux.....	83
6.3.6	Autres facteurs de variabilité.....	83
6.4	Conclusions	83

Table des illustrations

Figure 1 - Sectorisation sur le Rhône et ses affluents.....	18
Figure 2 - Distribution des tailles de tous les cyprinidés capturés dans le Rhône. Les tailles extrêmes sont atteintes par des carpes.	23
Figure 3 - Disparités des distributions des tailles (LT en mm) de gardons capturés d'avril à juillet par trois techniques différentes (A – engins à maille de 1 mm, B – épuisette à maille de 4 mm sur des eaux de lavages des tambours filtrants du CNPE du Tricastin, C – pêches électriques de rive entre mai et juillet avec des épuisettes à maille de 4 mm). Distributions obtenues par pêche électrique entre août et décembre (D).	27
Figure 4 - Disparités des distributions des tailles (LT en mm) de chevaines capturés d'avril à juillet par trois techniques différentes (A – engins à maille de 1 mm, B – épuisette à maille de 4 mm sur des eaux de lavages des tambours filtrants du CNPE du Tricastin, C – pêches électriques de rive entre mai et juillet avec des épuisettes à maille de 4 mm). Distributions obtenues par pêche électrique entre août et décembre (D).	28
Figure 5 - Distribution en classes de taille de 5 mm des gardons et chevaines capturés par pêche électrique (Haut-Rhône, Bas-Rhône) et paramètres synthétiques de la taille.	32
Figure 6 - Variabilité de la taille des gardons d'âge 0+ en septembre 2011. Résultats des pêches (PCR) de plusieurs stations proches sur le Bas-Rhône médian. MO (Montélimar, amont et aval du CNPE de Cruas-Meysses), DM (Donzère-Mondragon, amont, rejet et aval immédiat du CNPE du Tricastin), CA (Caderousse, amont et aval de la retenue). DM PSEV (Rhône court-circuité par l'aménagement de Donzère-Mondragon, aval de Pont-Saint-Esprit).....	36
Figure 7 - Variabilité de la taille des chevaines d'âge 0+ en septembre 2011. Résultats des pêches (PCR) de plusieurs stations proches sur le Bas-Rhône médian. MO (Montélimar, amont et aval du CNPE de Cruas-Meysses), DM (Donzère-Mondragon, amont, rejet et aval immédiat du CNPE du Tricastin), CA (Caderousse, amont et aval de la retenue). DM PSEV (Rhône court-circuité par l'aménagement de Donzère-Mondragon, aval de Pont-Saint-Esprit).....	36
Figure 8 - Distribution en classes de taille du gardon (en vert) et du chevine (en bleu) montrant les effets potentiels de leur stratégie de ponte sur la forme de la distribution et son amplitude. Retenue de Montélimar le 17 septembre 2009.	37
Figure 9 - Un extrait du tableau de découpage en classes millimétriques pour la discrimination des classes d'âge des gardons sur le secteur de Viviers. Spawn_1 indique l'année de naissance de la première classe d'âge identifiée et Ltmax la longueur maximale associée. L'exercice est poursuivi pour les classes d'âge suivantes, lorsque les données le permettent.	38
Figure 10 - Exemples de distributions en classes de taille (5 mm) des gardons capturés dans la retenue de Montélimar (regroupement des stations amont et aval) et visualisation colorée des différentes cohortes définies lors de l'expertise des données brutes	39
Figure 11 - Extraits d'un graphique panoramique représentant la chronique complète des captures de gardons dans la station de Cruas Aval (retenue de Montélimar). Les campagnes annuelles sont regroupées par mois. Chaque classe d'âge et ses effectifs sont figurés par des « navettes » de couleur différente dont la taille est proportionnelle au nombre d'individus.....	40
Figure 12 - Représentation synthétique de la discrimination par expertise des tailles de la base de données. Taille médiane des gardons d'âge 0+ en fin d'année, par année et par secteur.	41
Figure 13 - Représentation synthétique de la discrimination par expertise des tailles de la base de données. Taille médiane des chevaines d'âge 0+ en fin d'année, par année et par secteur.	42
Figure 14 - Taille médiane des chevaines et des gardons juvéniles d'âge 0+ en fonction du jour de pêche. Tous les individus pêchés depuis le début de la chronique sont représentés (points gris). En rouge et vert, les tailles des juvéniles de chaque pêche. Le modèle logistique (courbe orange) a été ajusté sur les tailles médianes des pêches de l'année civile en cours (points verts).....	45
Figure 15 - Profils thermiques du Rhône à l'amont du CNPE du Tricastin. Ensemble de la chronique et quelques années remarquables. Les lissages des valeurs moyennes journalières ont été obtenus par une régression locale (loess) sur 73 jours.....	45

Figure 16 - Nombre total de pêches par mois dans le jeu de données (en gris). Nombre de pêches contenant des gardons (en vert) et des chevaines (en bleu).	46
Figure 17 - Illustration du calcul de la sommation thermique (SDJ) en 2011 à partir des relevés de la station eDF-DTG située à l'amont du CNPE du Tricastin. La courbe représente les moyennes journalières des températures. La SDJ est égale au cumul des écarts thermiques par rapport au seuil inférieur 8.8°C (température moyenne du Rhône à l'équinoxe de mars) entre les jours juliens 80 et 220.....	47
Figure 18 - Visualisation du calcul de l'indice hydrologique, descripteur de la période de croissance. Représentation de deux années contrastées au cours de la dernière décennie (2001 et 2011). En orange, la somme des degrés-jours (SDJ) pour la période de croissance de l'équinoxe de printemps à la date du maximum thermique moyen sur le Rhône. Le débit moyen journalier du Rhône à Viviers est représenté dans la partie inférieure de chaque cadre (tracé bleu) ainsi que le tracé du lissage du Quantile 90% (pointillé). En rouge (+) et en vert (-), les valeurs journalières de l'indice de débit dont le cumul donne l'indice global de la période considérée. Un tracé et une trame bleu clair indique le dépassement du quantile (cas de l'année 2001).	49
Figure 19 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le gardon (vert) et le chevaine (bleu). La taille des points correspond à leur poids dans le modèle ($\times 0.5$ lorsque le nombre d'individus dans la pêche est inférieur à 30, $\times 1$ lorsqu'il est supérieur à 30). Les pêches des stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.....	51
Figure 20 - Tailles médianes (haut) et résidus de la régression des tailles médianes sur la SDJ (bas) pour le gardon (vert) et le chevaine (bleu) par années. Les points indiquent la médiane des tailles médianes par année; les traits fins indiquent les espaces inter-quantiles à 95%; les traits épais donnent les espaces inter-quantiles à 50%.....	51
Figure 21 - Cycle thermique annuel de la température des eaux à l'amont, au rejet du CNPE du Tricastin et à l'aval de l'usine hydroélectrique de Bollène. Moyennes journalières (points) et quantiles journaliers à 50% entre 1981 et 2011.	52
Figure 22 - Taille moyenne des gardons et des chevaines d'âge 0+ en fonction de la localisation de la station par rapport aux rejets thermiques. 0 - station sans influence d'un rejet, 1 - station située dans le panache thermique en aval d'un rejet, 3 - station située au niveau même du rejet.	53
Figure 23 - Régression de la LT médiane des gardons de chaque pêche sur la SDJ, et projection en données supplémentaires des pêches faites au rejet et à l'aval immédiat du CNPE du Tricastin. En vert (1), les pêches réalisées sur l'ensemble du Rhône (rejets exclus) ; en vert cerclé de noir (2) celles réalisées dans le panache thermique du CNPE avec la SDJ calculée sur la thermie amont du site ; en noir (3) les mêmes pêches avec la SDJ calculée avec la thermie du rejet ; en gris cerclé de noir (4) la SDJ est calculée sur la thermie moyenne entre l'amont et le rejet. Les régressions 2, 3 et 4 contiennent donc toutes les pêches du Rhône y compris les pêches du panache thermique du CNPE du Tricastin. Seules les températures utilisées pour le calcul de la SDJ changent entre ces régressions.	54
Figure 24 - Régression de la LT médiane des chevaines de chaque pêche sur la SDJ, et projection en données supplémentaires des pêches faites au rejet et à l'aval immédiat du CNPE du Tricastin. En vert (1), les pêches réalisées sur l'ensemble du Rhône (rejets exclus) ; en vert cerclé de noir (2) celles réalisées dans le panache thermique du CNPE avec la SDJ calculée sur la thermie amont du site ; en noir (3) les mêmes pêches avec la SDJ calculée avec la thermie du rejet ; en gris cerclé de noir (4) la SDJ est calculée sur la thermie moyenne entre l'amont et le rejet. Les régressions 2, 3 et 4 contiennent donc toutes les pêches du Rhône y compris les pêches du panache thermique du CNPE du Tricastin. Seules les températures utilisées pour le calcul de la SDJ changent entre ces régressions.	54
Figure 25 – Date (jour Julien) de passage du seuil de 12°C à Cruas amont au cours de la chronique. Le C12s (vert) est le premier jour de l'année où la courbe de température, lissée par régression locale (loess sur 73 jours), est au-dessus de 12°C. Le C12a (rouge) est le dernier. Evolution de la somme des degrés-jours (SDJ) sur le même secteur.	55
Figure 26 - Identification des années de pêche dans le nuage de points des LT médianes sur la SDJ pour le gardon (haut) et le chevaine (bas). Utilisation d'un dégradé de couleur allant du bleu pour les plus anciennes vers le jaune pour les plus récentes, en passant par le rouge.....	55

Figure 27 - Evolution sectorielle de la taille médiane des gardons au cours du temps.	56
Figure 28 - Evolution sectorielle de la taille médiane des chevaines au cours du temps.	56
Figure 29 - Corrélation entre la SDJ et l'indice de débit pour la période de croissance. Le coefficient de corrélation de Pearson (0.55) est hautement significatif (avec une p-value inférieure à 0,001).....	57
Figure 30 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur l'indice de débit pour le gardon (vert) et le chevaine (bleu). La taille des points correspond à leur poids dans le modèle ($\times 0.5$ lorsque le nombre d'individus dans la pêche est inférieur à 30 et $\times 1$ lorsqu'il est supérieur à 30). Les pêches faites à proximité des rejets de centrales ont été retirés des analyses.....	57
Figure 31 - Identification des tronçons fluviaux dans le nuage de points des LT médianes sur la SDJ pour le gardon (haut) et le chevaine (bas). Haut-Rhône (HR_AMT & HR_AVL), Bas-Rhône (BR_AMT, BR_MED & BR_AVL), Saône (AF_SAO) et Ain (AF_AIN).....	58
Figure 32 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le gardon en distinguant les milieux « semi-naturels » des sections fluviales de grandes dimensions. Les stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.	59
Figure 33 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le chevaine en distinguant les milieux « semi-naturels » des sections fluviales de grandes dimensions. Les stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.	60
Figure 34 - Représentation des LT médianes des gardons d'âge 0+ classées selon certaines catégories propres aux stations.	62
Figure 35 - Représentation des résidus de la régression sur la SDJ de la taille des gardons d'âge 0+ classés selon certaines catégories propres aux stations.	63
Figure 36 - Représentation des LT médianes des chevaines d'âge 0+ classées selon certaines catégories propres aux stations.....	64
Figure 37 - Représentation des résidus de la régression sur la SDJ de la taille des chevaines d'âge 0+ classés selon certaines catégories propres aux stations.	65
Figure 38 - Relation entre tailles médianes et nombre d'individus selon une échelle logarithmique, chez le gardon (Cruas aval) et le chevaine (Cruas amont) pour la chronique complète des pêches de ces deux stations.	67

Liste des tableaux

Tableau I - Origine et localisation des données de pêche	12
Tableau II - Nombre de stations par cours d'eau, caractérisées par leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. Le bief de navigation se rapporte exclusivement à la Saône dans laquelle des barrages avec écluses ont vocation de garantir un niveau minimal du plan d'eau pour permettre la navigation.....	16
Tableau III - Description des trois tables principales de la base de données piscicoles.	16
Tableau IV - Sectorisation du Haut-Rhône et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. RCC : Rhône court-circuité (ou Vieux Rhône), LON : lône ou annexe fluviale, CHE : chenal unique, CAA : canal usinier d'aménée, CAF : canal de fuite, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.	19
Tableau V - Sectorisation du Bas-Rhône et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. RCC : Rhône court-circuité (ou Vieux Rhône), LON : lône ou annexe fluviale, CHE : chenal unique, CAA : canal usinier d'aménée, CAF : canal de fuite, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.	19
Tableau VI - Sectorisation des affluents et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. CHE : chenal unique, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.	21
Tableau VII - Sectorisation simplifiée et liste des stations de relevés thermiques (données eDF-DTG et CNPE Tricastin) et hydrologiques (données de la banque nationale HYDRO) correspondantes.....	21
Tableau VIII - Statistiques résumées des tailles des Cyprinidae échantillonnés par pêche électrique (S : écart-type, Q 25% : quantile 25%, Q 75% : quantile 75%). Ensemble des captures du Haut-Rhône et du Bas-Rhône pour la période 1975-2011. Les suivis piscicoles des quatre CNPE, principaux fournisseurs de données, sont totalement effectifs à partir de 1984. Un changement majeur s'opère en 1994, consécutif aux fortes crues d'octobre 1993 et janvier 1994. Il concerne plus particulièrement le Bas-Rhône.	24
Tableau IX - Ensemble des poissons renseignés par une taille (Rhône, Saône, Ain, Durance, Ardèche) pour la période 1975-2011.....	29
Tableau X - Métriques qualitatives utilisées pour caractériser les stations.....	50

1 Introduction

L'acquisition de connaissances hydrobiologiques à large échelle sur l'axe rhodanien a débuté à la fin des années 1970, initiée par des études d'impact lors de la mise en service de nouvelles tranches de production électrique, qu'elles soient à flamme (Aramon) ou nucléaires (Bugey, Saint-Alban, Cruas, Tricastin). Ces études avaient alors pour principaux objectifs (1) de définir un état dit "de référence" et (2) d'évaluer les effets potentiels du réchauffement des eaux lié au fonctionnement de ces installations industrielles. Depuis, la plupart des sites font l'objet de suivis hydrobiologiques permanents et réglementés par les arrêtés de rejet des installations classées.

Parallèlement, de nombreux travaux ont été réalisés avant et après la mise en service des derniers aménagements hydro-électriques sur le Haut-Rhône français. Dans leur grande majorité, ces études écologiques concernent les sections court-circuitées par les ouvrages. Elles se poursuivent à plus large échelle dans le cadre des augmentations de débits réservés et de la réhabilitation des annexes fluviales de tronçons court-circuités du Rhône.

Bien que ces connaissances soient essentiellement le fruit d'études exigées par les usages industriels du fleuve, elles constituent à ce jour de longues chroniques nous renseignant sur les évolutions environnementales d'un grand fleuve fortement anthropisé.

Depuis la mise en place de ces suivis, le contexte général a beaucoup évolué, qu'il relève de la qualité des milieux aquatiques fluviaux et des eaux rhodaniennes, des usages divers de la ressource et de sa gestion à l'échelle du bassin versant, des pratiques quant à la consommation énergétique, de la perception sociale du fleuve ou du cadre législatif national et européen. Par ailleurs, le changement climatique observé au cours de ces trois dernières décennies a modifié le régime thermique du Rhône. Il s'est traduit par un échauffement moyen d'environ 1,5°C sur le Haut-Rhône et de 2,0°C sur le Bas-Rhône (POIREL et al., 2008). Dans cette dérive générale des températures, la part des échauffements cumulés causés par les rejets thermiques des centrales nucléaires est estimée à environ 0,5°C sur le Haut-Rhône et à 1,0°C à proximité d'Aramon sur le Bas-Rhône (POIREL, 2006).

Face aux évolutions hydroclimatiques futures, dont un avant-goût a été donné lors de l'épisode caniculaire de 2003, les producteurs d'énergie ont obtenu des dérogations pour passer le cap des situations climatiques exceptionnelles. Ils ont souhaité un assouplissement des contraintes à proximité et à l'aval des rejets thermiques, notamment la pérennité des dispositions prises au titre d'arrêtés dérogatoires. Les hydrobiologistes sont désormais confrontés à des questions récurrentes devenues essentielles, à savoir quelles seront les conséquences du réchauffement fluvial et, de manière plus pragmatique, quelles seraient les limites « acceptables » pour le bon fonctionnement de l'hydrosystème fluvial.

Cette demande a justifié une succession d'études entreprises par eDF et ses divers interlocuteurs sur la thermique rhodanienne (LAUTERS & POIREL, 2001a, b; POIREL et al., 2001; DESAINT & POIREL, 2004; POIREL, 2004; KHALANSKI et al., 2008; POIREL et al., 2008).

La synthèse de l'étude thermique du Rhône Phase III réalisée en 2006 a fait le point des connaissances biologiques acquises au droit des 4 grands sites nucléaires (centrales de Bugey, de Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil, de Cruas-Meysses et du Tricastin). Elle a permis d'évaluer les nombreux changements physiques, physico-chimiques et biologiques, enregistrés sur plus de deux décennies et notamment les plus récents liés à la hausse des températures. Toutefois, ce document n'a pas apporté de réponses satisfaisantes quant à la principale interrogation des gestionnaires sur les effets de la hausse des températures.

L'analyse des chroniques d'observations écologiques disponibles sur le Rhône et sur d'autres grands systèmes fluviaux tels que la Loire ou la Seine ont montré certaines tendances communes en regard des évolutions thermiques actuelles (DAUFRESNE et al.,

2003; DAUFRESNE & BOET, 2005; DAUFRESNE et al., 2007). Parmi les changements significatifs relatifs aux poissons, il faut signaler (1) le glissement graduel des peuplements constitués d'espèces inféodées à des eaux courantes froides et courantes vers des assemblages piscicoles regroupant des espèces euryèces, plutôt thermophiles ; (2) une dominance de plus en plus accentuée des jeunes individus ; (3) une augmentation significative de la proportion des petites espèces, autochtones telles que le spiralin sur le Haut-Rhône, allochtones comme le pseudorasbora et la bouvière sur le Bas-Rhône.

Cependant, les conséquences futures sur les milieux aquatiques liées au changement climatique sont difficilement prévisibles. Elles le sont d'autant plus dans un grand fleuve régulé, caractérisé par des entités morpho-hydrauliques artificielles de grandes dimensions (canaux et retenues) connectées à des substituts de plaines alluviales. Le Rhône est désormais susceptible d'atteindre en période estivale des températures supérieures à 28°C, et de présenter des déficits hydrologiques inégalés. Sachant que tous les processus métaboliques, et d'autres paramètres tels que la teneur en oxygène dissous sont dépendants de la température, ces conditions de plus en plus récurrentes placent alors la flore et la faune typiques du Rhône dans des conditions anormales (ALABASTER & LLOYD, 1982). L'étude du changement climatique passe par des études fines et détaillées de processus physiologiques, ou de paramètres intégrateurs des réponses physiologiques des organismes.

Chez les ectothermes aquatiques, dont une majorité de poissons, la température des eaux contrôle les taux métaboliques, la réactivité et la vitesse de croissance des organismes (FRY, 1971; PRITCHARD et al., 1996; WOLTER, 2007; GRAHAM & HARROD, 2009).

La taille du poisson, intégratrice des activités métaboliques et physiologiques, constitue une variable simple d'acquisition pour étudier le rôle de la température sur la croissance. De plus, si les conditions le permettent, la croissance des poissons est continue au cours de leur vie (WOOTTON, 1990). La croissance étant importante au cours de la première année, les juvéniles constituent des sujets d'étude privilégiés. L'existence d'une corrélation entre la température et le taux de croissance chez les juvéniles est liée à la thermo-dépendance de l'activité métabolique, mais aussi à la disponibilité alimentaire, variable selon la température du milieu (MANN, 1997). L'influence de la température sur la taille des juvéniles a été étudiée dans différents milieux et selon divers objectifs.

Généralement, les résultats donnent une relation linéaire positive entre la taille des juvéniles et la température, le plus souvent exprimée par une somme de degrés-jours (NEUHEIMER & TAGGART, 2007), que ce soit en laboratoire (WIESER, 1991), dans des grands lacs ou des milieux saumâtres (ENDERSON, 1985; ENDERSON & BROWN, 1985; KJELLMAN et al., 2001; ENDERSON & SEABY, 2005), dans les lacs eutrophes des Pays-Bas (MOOIJ et al., 1994; MOOIJ & VAN NES, 1998; MOOIJ et al., 2008), et dans des cours d'eau (CARREL, 1986; GRENOUILLET et al., 2001; GRENOUILLET & PONT, 2001; NUNN et al., 2007; WOLTER, 2007).

Cependant, dans une méta-analyse portant sur divers organismes aquatiques ectothermes, DAUFRESNE et al. (2009) ont montré que le réchauffement climatique augmente significativement la proportion des petites espèces et de juvéniles, et il favorise une diminution de la taille à un âge donné.

En regard des conclusions des travaux engagés sur le Rhône, DELAIGUE et al. (2007) ont cherché à mettre en évidence une relation entre la taille des juvéniles de l'année et la température (décrite en termes de degrés-jours au-dessus d'un seuil de 12°C). Ce travail présente la variabilité des paramètres de croissance (taille et poids) et de condition

(coefficient de condition de Fulton) en regard du contexte thermique et des effectifs chez de jeunes Cyprinidae (poissons d'âge 0+) capturés en fin d'été sur le Bas-Rhône¹.

Trois espèces abondantes avaient été prises en compte : le gardon *Rutilus rutilus*, le chevaine *Leuciscus cephalus* et l'ablette *Alburnus alburnus*. Les données piscicoles proviennent des campagnes d'échantillonnage effectuées entre les points kilométriques 148 et 277, de la retenue de Montélimar à l'amont d'Arles. L'effet direct de la thermie n'a pas pu être démontré sur les trois espèces de cyprinidés étudiées. Ce résultat pourrait avoir plusieurs origines. Dans l'étude initiale, les années froides, peu propices au succès du recrutement, sont caractérisées par la faiblesse des effectifs. Elles n'ont pas été, ou très partiellement, prises en compte dans ces analyses. Les données disponibles ont par contre privilégié les années à fort recrutement qui sont des années chaudes. Par contre, les auteurs ont mis en évidence une décroissance de la taille moyenne des jeunes gardons lorsque les effectifs de poissons capturés augmentent, pouvant s'expliquer par un effet de densité-dépendance (LE CREN, 1958; CRYER et al., 1986; TOWNSEND & PERROW, 1989; PERROW et al., 1990; TOWNSEND et al., 1990; WOLTER, 2007).

Dans le prolongement des conclusions de l'étude thermique du Rhône phase III et du travail précédent, nous avons proposé d'étoffer cette analyse portant sur la taille des juvéniles en intégrant des stations supplémentaires situées sur le Rhône et ses grands affluents, et faisant l'objet de suivis long terme de la part de nos collègues et partenaires de l'université de Lyon (CNRS), du bureau d'étude ARALEP, IRSTEA de Lyon et ONEMA (DR 8).

L'analyse initiale a donc été reprise à partir des données acquises sur le Haut-Rhône (secteurs de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Creys-Malville, Bugey et Jons) et le Bas-Rhône (Péage-de-Roussillon, Montélimar, Donzère-Mondragon, Caderousse, Vallabrègues). Des données complémentaires obtenues sur de grands affluents ont été intégrées dans cette réflexion (Ain, Saône, Durance).

Cette compilation de données piscicoles nous a permis (1) de regrouper un plus grand nombre d'individus par espèce, (2) de compenser le manque d'amplitude thermique existante à l'échelle d'un tronçon fluvial en ayant une vision à l'échelle du fleuve, et (3) de s'intéresser éventuellement à un plus grand nombre d'espèces.

Si ce travail utilise un patrimoine collectif important, il faut rappeler que les données utilisées ont été acquises pour satisfaire des objectifs distincts des nôtres. Une part non négligeable des données collectées n'est pas actuellement utilisable pour étudier la taille des juvéniles.

Cette étude a pour principal objectif de définir les liens associant la taille post-estivale de jeunes cyprinidés (âge 0+) et le contexte hydrologique et thermique existant au cours de la période de reproduction et de croissance de ces individus. Face aux nombreuses questions suscitées par la complexité et l'ampleur du jeu de données collectées, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à deux espèces communes et abondantes : le gardon (*Rutilus rutilus*) et le chevaine (*Squalius cephalus*).

Ces cyprinidés occupent une vaste aire de distribution (KOTTELAT & FREYHOF, 2007). Relativement tolérants vis-à-vis de la dégradation de la qualité des eaux et des milieux, ils peuvent être trouvés aussi bien en eaux courantes que lacustres. Ce sont des espèces eurythermes (TISSOT & SOUCHON, 2010). Elles constituent des modèles simples, parmi les mieux connues. Par ailleurs, le gardon est tolérant vis-à-vis des températures

¹ Les cyprinidés naissent au cours du printemps de l'année n et atteignent l'âge d'un an au printemps de l'année $n+1$. Par convention, nous parlerons de poissons d'âge 0+ pour des individus n'ayant pas encore 12 mois. Ces jeunes individus sont généralement capturables à partir de juin de l'année n , sont plus abondants dans les pêches de fin d'été et d'automne. Ils peuvent encore être en grand nombre au cours des pêches printanières si la reproduction a été importante et l'hiver clément. Après passage de leur premier anniversaire, nous parlerons ensuite de poissons d'âge 1+, et ainsi de suite.

élevées (ALABASTER & LLOYD, 1982). Il pourrait augmenter son aire de répartition et son abondance à la faveur du réchauffement climatique (GRAHAM & HARROD, 2009).

A partir de ces deux modèles, nous essayerons de répondre aux trois questions suivantes : (1) est-il possible d'établir une relation générale associant la taille automnale des juvéniles et la température enregistrée par les poissons au cours de leur croissance printanière et/ou estivale ? (2) peut-on considérer que les évolutions thermiques ont sensiblement modifié la taille des jeunes de l'année ? (3) existe-t-il des différences significatives de taille des individus d'une même classe d'âge lorsque la croissance et la capture relèvent de milieux différents ?

2 Matériel et méthodes

2.1 Données Poissons

2.1.1 Provenance des données

Les données piscicoles proviennent de l'Université Lyon 1 (UMR CNRS 5023), du bureau d'études ARALEP (Villeurbanne, ex-ARALEPBP), de Irstea (ex-Cemagref, UR BELY à Lyon, UR HYAX à Aix-en-Provence) et de l'ONEMA (Délégation Interrégionale 8, Montpellier). Le Tableau I indique leur provenance et la localisation géographique des captures.

Tableau I - Origine et localisation des données de pêche

Origine	Correspondant	Localisation des secteurs
Université Lyon 1 UMR CNRS 5023	<i>Jean-Michel Olivier</i> <i>Henri Persat</i>	Chautagne, Brégnier-Cordon, Belley, Affluents : Ain, Saône
ARALEP	<i>Jean-François Fruget</i>	Péage-de-Roussillon Miribel-Jonage Affluents : Ain, Saône
Irstea Lyon UR BELY	<i>Nicolas Lamouroux</i> <i>Hervé Capra</i> <i>Hervé Pella</i>	Creys-Malville, Bugey, Pierre- Bénite, Péage-de-Roussillon, Montélimar, Donzère- Mondragon Affluents : Ain, Ardèche
Irstea Aix-en-Provence UR HYAX	<i>Georges Carrel</i>	Montélimar, Donzère- Mondragon, Caderousse, Vallabrègues Affluent : Durance
ONEMA	<i>Fabrice Laval</i>	Affluent : Durance

2.1.2 Echantillonnage

L'échantillonnage est réalisé par pêche électrique, depuis une embarcation sur les grands cours d'eau tels que le Rhône et la Saône. Au cours des prospections en bateau,

l'échantillonnage de secteurs lotiques peu profonds nécessite parfois une pêche faite à pied, notamment pour les tronçons court-circuités du Rhône. Les pêches électriques sur les autres affluents du Rhône ont été faites exclusivement à pied.

Trois techniques ont été utilisées : la pêche en continu dite de rive, la pêche par Echantillonnage Ponctuel d'Abondance (EPA), et la pêche par ambiances.

2.1.2.1 La pêche en continu de rive (PCR)

La pêche électrique de rive en continu (PCR) est pratiquée en bateau depuis le début des suivis piscicoles du Rhône, à la fin des années 70 selon un protocole mis en place par ALLARDI et ses collaborateurs (1975). Un courant triphasé est fourni par un groupe électrogène puis redressé. Une double anode circulaire de grand diamètre, constituée de deux anneaux inoxydables concentriques et supportée par une potence, est immergée à la proue du bateau. Son rayon d'action est de l'ordre de 2 mètres. La cathode constituée de tresses en cuivre est immergée sur un flanc arrière de l'embarcation. Pendant la pêche, le bateau progresse perpendiculairement à la rive, en dérive de l'amont vers l'aval. Les poissons sont capturés à l'aide d'épuisettes de maille 5 mm par deux personnes surplombant la zone d'attractivité de l'électrode. La durée de pêche est généralement comprise entre 20 et 30 minutes. La durée de pêche est systématiquement consignée. Elle permet une évaluation quantitative par le calcul des captures par unité d'effort de pêche (CPUE), exprimées en nombre ou biomasse de poissons par unité de temps. Ce protocole a été défini par les agents du CTGREF dès le début des études sur les grands cours d'eau (Seine et Rhône). Récemment, il était encore pratiqué sans modification particulière par Irstea de Lyon pour le suivi piscicole du Haut-Rhône au droit du CNPE de Bugey (GINOT et al., 1996). Cependant des variations importantes des niveaux provoquées par les éclusées des ouvrages hydro-électriques situés en amont ont progressivement conduit l'équipe vers l'usage d'une électrode traditionnelle manipulée par l'un des pêcheurs, en raison d'une inaccessibilité des rives par le bateau.

Dans le cadre des suivis réalisés sur le Bas-Rhône par Irstea d'Aix-en-Provence, ce choix est intervenu à partir de l'année 2000. Les contraintes imposées par une anode totalement subordonnée aux déplacements du bateau, gênante lors de la progression dans de grands herbiers, ont été à l'origine du remplacement de la double anode circulaire par une anode à long manche (3 mètres) manipulée depuis la proue du bateau. Cette relative liberté du pêcheur vis-à-vis de l'embarcation simplifie notablement l'échantillonnage dans les situations délicates. Deux personnes assurent le ramassage des poissons au moyen d'épuisettes d'un vide de maille de 4 mm. Le suivi est toujours réalisé par une prospection en continu d'une rive, sur une durée totale de pêche comprise entre 20 et 30 minutes.

2.1.2.2 Echantillonnage Ponctuel d'Abondance (EPA)

La pêche par EPA est basée sur le principe d'un grand nombre d'échantillons de dimension réduite, réalisés sur un secteur défini du cours d'eau (NELVA et al., 1979). L'échantillon de base est un point fixe, limité au rayon attractif de l'anode soit approximativement une demi-sphère de 1.5 à 2 mètres de rayon. La distance choisie entre deux points doit garantir l'absence d'effet de la pêche d'un point sur le suivant. Les auteurs préconisent une distance minimale de 15 à 20 mètres dans un espace fluvial ouvert et sans abri. L'emplacement des points n'est pas défini a priori et la proportion respective des différents faciès doit être respectée au cours de l'échantillonnage du tronçon étudié (PERSAT, 1988; PERSAT & OLIVIER, 1991). Toutefois, la technique des EPA par pêche électrique est subordonnée au rayon attractif de l'anode, impliquant un échantillonnage limité aux rives dans des milieux profonds. La méthode est essentiellement pratiquée dans les grands cours d'eau, à l'aide d'une embarcation et d'une anode de grande longueur. Les poissons pêchés sur chaque point sont immédiatement dénombrés, déterminés, mesurés puis relâchés. Chaque EPA est accompagné d'un relevé qualitatif de variables physiques et biologiques. Cette méthode d'échantillonnage a été adaptée pour l'étude des plus jeunes

poissons par COPP (1989a). La méthode a été largement adoptée dans plusieurs pays d'Europe occidentale (Grande-Bretagne, Allemagne, République Tchèque) parfois en complément d'autres techniques (WOLTER & VILCINSKAS, 1997; WOLTER & BISCHOFF, 2001; WOLTER & MENZEL, 2005).

2.1.2.3 La pêche par ambiances

L'ambiance mésologique est une échelle d'observation intermédiaire entre le faciès d'écoulement (plat, radier, mouille, ...) et le micro-habitat. L'ambiance est donc une sous-unité d'un faciès, considérée comme homogène par l'expérimentateur à partir d'un ensemble de caractéristiques géomorphologiques, hydrodynamiques, et de critères qualitatifs simples appréciables à l'œil. Les critères retenus sont les suivants : hauteur d'eau, vitesse de courant, présence d'abris, hauteur de rugosité du substrat, et pente de la ligne d'eau. Sa surface est variable du fait des critères utilisés. Une valeur moyenne de 50 m² est souvent privilégiée. L'ambiance va être caractérisée par une surface (ou un volume), une information qui sera utilisée pour quantifier l'abondance d'une espèce (CPUE). Au même titre que l'EPA, elle sera accompagnée de mesures physiques descriptives, parfois très détaillées et quantitatives.

Le choix des ambiances et leur nombre doivent être représentatifs des faciès, des spécificités morpho-hydrauliques du tronçon de rivière étudié et de la variabilité spatiale longitudinale et transversale importante dans de grands cours d'eau. Habituellement, l'échantillonnage par ambiance est pratiqué par une prospection à pied, avec une seule électrode à long manche et a minima deux porteurs d'épuisettes. Cette méthode d'échantillonnage sur des zones de surfaces variables mais couvrant un habitat particulier a été utilisé par plusieurs auteurs (VADAS & ORTH, 1993; POUILLY & SOUCHON, 1994; LAMOUREUX et al., 1999; THEVENET & STATZNER, 1999; RIFFLART et al., 2009).

2.1.3 Comparaison des méthodes

L'utilisation de trois méthodes de pêche pour l'échantillonnage des poissons pose des problèmes au titre de la comparaison des effectifs capturés sachant qu'ils se rapportent à un point ou un ensemble de points (EPA), à une durée de pêche (pêche de rive) ou à une surface prospectée (ambiance). Actuellement, une comparaison possible de ces différentes méthodes de pêche ne concerne que les pêches de rive et les pêches par EPA, utilisant une évaluation faite dans un cadre méthodologique (PONT et al., 1992) mais elle reste sujette à discussion. Aucune méthode satisfaisante n'existe pour la comparaison de ces deux méthodes avec celle par ambiances, bien que des mesures portant sur le champ attractif d'une anode immobile permettent d'estimer la surface échantillonnée. L'ONEMA utilise les appareils de type «Héron» du constructeur Dream Electronique équipés d'anode de 35 cm de diamètre. Au cours du développement méthodologique pour le réseau de surveillance piscicole, le rayon efficace depuis le centre de l'électrode a été estimé à 1.5 mètre, soit une surface estimée d'échantillonnage de 7 m². Pour l'étude spécifique des larves et juvéniles, et pour améliorer leur capturabilité, COPP (1989a) avait réduit le diamètre de l'anode du Martin-Pêcheur II (matériel portatif du même constructeur) à 10 cm, obtenant un diamètre attractif de 30 cm, soit une surface estimée de 0.071 m². Par ailleurs, il utilisait une épuisette de 25 cm de diamètre à maille fine (1 mm). L'estimation de la surface échantillonnée lui a permis de standardiser les captures par unité de surface et de comparer la productivité des annexes de la plaine alluviale (COPP, 1989b).

Par conséquent, une quelconque implication des effectifs dans ces analyses sur la taille, par exemple l'éventuel effet de densité-dépendance, suppose une homogénéité méthodologique des échantillons pour être valide.

2.1.4 Morphométrie

Les individus sont identifiés et la **longueur totale** est mesurée. Celle-ci est exprimée en millimètres ou en centimètres selon les équipes. Dans cette étude, toutes les longueurs totales sont considérées en **millimètres**. Selon les études, le poids du poisson est enregistré.

La plupart du temps, ces mesures sont effectuées sur le terrain. Cependant, lorsque le nombre de juvéniles de l'année est trop important, les poissons sont traités au laboratoire après fixation au formol 4%. Ce choix est fait dès que des problèmes d'identification, ou de précision des mesures (pour la pesée notamment) se posent. Dans le cadre de la première étude de la taille des juvéniles, DELAIGUE et al (2007) ont montré qu'il était possible de regrouper les tailles mesurées sur le terrain et au laboratoire après fixation au formol. La réduction systématique de taille provoquée par le formol n'est pas décelable statistiquement parlant car elle reste à l'échelle des imprécisions de la mesure de la taille. Par contre, l'étude bivariée (poids-longueur) ne permet pas ce regroupement.

Cette première étude prenait en compte le poids afin d'étudier ces deux paramètres conjointement. Dans le cadre de ce travail, en l'absence d'enregistrement du poids dans la plupart des travaux, **seule la taille est étudiée**.

2.1.5 Sections fluviales étudiées

Nous avons pu regrouper les données de 147 stations réparties sur le Rhône de la Chautagne (Haut-Rhône, pK -146.0) jusqu'à l'aval immédiat de l'usine de Beaucaire (aménagement de Vallabrègues, Bas-Rhône, pK 269.0), et 34 stations sur quatre affluents (l'Ain dans sa basse vallée, la Saône entre Mâcon et Lyon, l'Ardèche dans son tiers médian entre Saint-Sernin et Pradons, la moyenne et basse Durance entre Manosque et Avignon).

Du fait de méthodes d'échantillonnage différentes, nous définissons la station comme l'unité spatiale de base. Une station correspond à un site de pêche inventorié le même jour, pouvant en fonction de la méthode de pêche utilisée, représenter un linéaire de rive, un regroupement de plusieurs ambiances, ou d'EPA. Les stations fluviales se situent dans des entités géographiques majoritairement associées à la présence d'un ouvrage hydro-électrique de basse chute, à raison de six sur le Haut-Rhône (à l'amont de Lyon) dénommées Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Creys-Malville, Bugey, Miribel-Jonage, et six autres sur le Bas-Rhône (à l'aval de Lyon) : Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon, Montélimar, Donzère-Mondragon, Caderousse et Vallabrègues. Des stations se trouvent aussi sur les quatre affluents cités précédemment.

Au total, 183 stations ont été échantillonnées (Tableau II) sur une période allant de 1975 à 2011.

A l'exception des stations associées à l'aménagement de Chautagne sur le Haut-Rhône, seules les stations des suivis hydrobiologiques des CNPEs présentent une continuité et une régularité temporelle de l'échantillonnage sur trois décennies. Le suivi piscicole des lônes² a été entrepris à partir de 2009 dans le cadre du plan de restauration des tronçons court-circuités.

² Ce terme d'usage rhodanien désigne un ancien bras isolé du fleuve, alimenté par des eaux souterraines ou lors des crues, pouvant alors être modifié par l'intrusion fluviale. Il désigne aussi les bras latéraux de dimensions modestes par rapport au chenal principal, pouvant être partiellement alimentés par les eaux de surface, depuis l'amont.

Tableau II - Nombre de stations par cours d'eau, caractérisées par leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. Le bief de navigation se rapporte exclusivement à la Saône dans laquelle des barrages avec écluses ont vocation de garantir un niveau minimal du plan d'eau pour permettre la navigation.

	RHONE		AFFLUENTS				Total
	Haut-Rhône	Bas-Rhône	Ain	Ardèche	Durance	Saône	
Entités hydromorphologiques							
<i>Rhône court-circuité (RCC)</i>	29	31					60
<i>Lône</i>	15	12					27
<i>Chenal</i>	14	6	8	1	16		45
<i>Retenue</i>	2	16			1		19
<i>Canal d'amenée</i>		8					8
<i>Canal de fuite</i>	1	13					14
<i>Bief de navigation</i>						10	10
	61	86	8	1	17	10	183

2.1.6 Constitution d'une base de données

Une base de données Access a été créée pour regrouper les données piscicoles, permettant d'une part d'homogénéiser des formats multiples, d'autre part de faciliter les extractions et regroupements utiles pour les analyses (Tableau III).

Tableau III - Description des trois tables principales de la base de données piscicoles.

Tables	Description
Stations	Secteur géographique Localisation (Points Kilométriques pK) Origine des données Description de la station
Espèces	Famille Nom latin Nom vernaculaire Code espèce (code à 3 lettres)
Table poissons	Code espèce Longueur totale LT en mm Station et date de capture Identifiant unique de l'individu capturé

2.1.7 Vérification des données

Pour mettre en évidence les données aberrantes, le plus souvent liées à des erreurs de saisie, nous avons effectué une analyse critique des tailles minimales et maximales par espèce. Les données "suspectes" ont été renvoyées auprès de nos correspondants pour vérification, acceptation ou refus d'une proposition de correction, voire une consultation des fiches de terrain, afin d'être corrigées dans les bases d'origine et celle conçue pour ce travail. La majorité des problèmes relevait d'une erreur de décimale (relevé de la taille en centimètres au lieu de millimètres, ou inversement). Un très faible nombre d'individus, pour lesquels la cause de l'erreur n'a pas pu être identifiée, ont été éliminés de la base.

2.1.8 Regroupements spatiaux

Afin d'obtenir des effectifs suffisants sur une chronique la plus continue possible, des regroupements géographiques des stations ont été faits en regard des caractéristiques thermiques disponibles, de l'hydrologie locale et du contexte hydro-morphologique des stations échantillonnées (Figure 1). Nous définissons le **secteur** comme le regroupement de stations considérées homogènes dans leur fonctionnement thermique, et morphologiquement proches. Par exemple, les stations situées dans un même tronçon court-circuité du Rhône (RCC) ont été regroupées et séparées des stations du chenal principal, du fait de leur fonctionnement atypique. Des données récentes obtenues dans des lônes montrent une forte hétérogénéité et il paraît nécessaire de les distinguer du secteur court-circuité auquel elles appartiennent. De même, les stations situées au rejet ou/et à l'aval immédiat d'un centre de production électrique en circuit ouvert ont été séparées des stations non soumises à ce contexte thermique particulier. A l'heure actuelle, le regroupement de stations permet de définir 54 secteurs (Tableau V, Tableau VI, Tableau VII), comprenant 12 RCC et 19 lônes localisées dans les RCC de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon).

Cependant, cette sectorisation initiale relativement détaillée a été simplifiée en regroupant des secteurs en fonction des données thermiques disponibles à l'heure actuelle. Les longues chroniques de mesure de la température des eaux collectées par les services DTG-eDF concernent le chenal principal du fleuve, un secteur court-circuité (Péage-de-Roussillon) et trois affluents : l'Ain, la Saône et l'Isère. Malgré leur précision, ces mesures évaluent le régime thermique des grandes masses d'eau en amont et aval des principales sources d'altération du régime thermique. Elles n'ont pas été conçues pour renseigner l'hétérogénéité locale inter-stationnelle (retenue, canal, RCC) et encore moins sur la variabilité existante à l'échelle du micro-habitat fréquenté par de jeunes poissons.

Par conséquent, le découpage adopté pour cette étude regroupe des tronçons fluviaux hétérogènes dont les régimes hydrologiques et thermiques ont été globalement caractérisés par un nombre restreint de stations de mesure de la température et de stations limnographiques (Tableau VII).

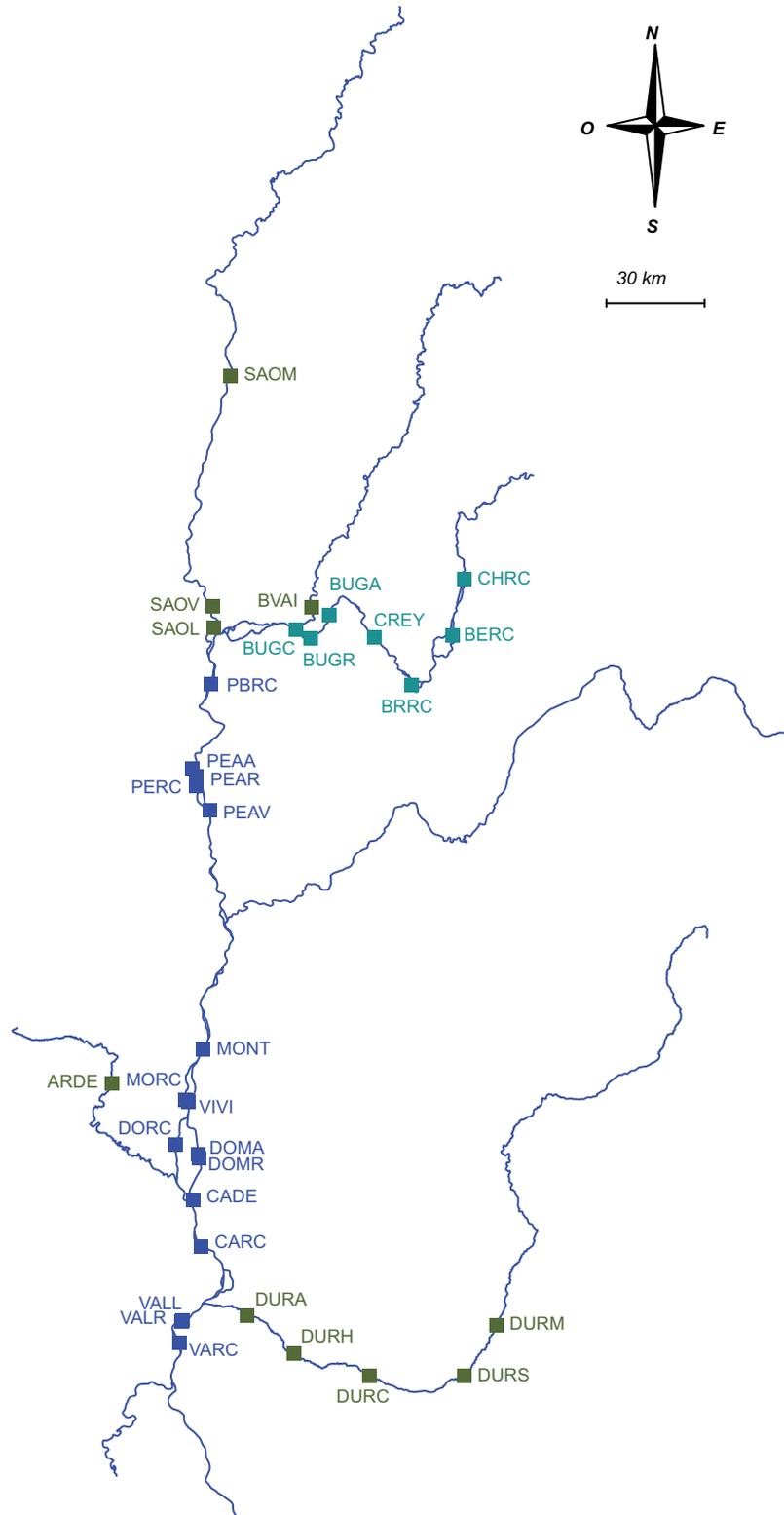


Figure 1 - Sectorisation sur le Rhône et ses affluents

Tableau IV - Sectorisation du Haut-Rhône et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. RCC : Rhône court-circuité (ou Vieux Rhône), LON : îlône ou annexe fluviale, CHE : chenal unique, CAA : canal usinier d'amenée, CAF : canal de fuite, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.

pK	Cours	Secteurs	RCC	LON	CHE	CAA	CAF	RET	BIE	Total
-140	Haut-Rhône	CHRC	8	2						10
-125	Haut-Rhône	BERC	6	4						10
-95	Haut-Rhône	BRRC	6	7						13
-90	Haut-Rhône	BRRC		2						2
-77.5	Haut-Rhône	CREY			2					2
-75.5	Haut-Rhône	CREY			1					1
-71.5	Haut-Rhône	CREY						2		2
-51	Haut-Rhône	BUGA			1					1
-50	Haut-Rhône	BUGA			2					2
-44	Haut-Rhône	BUGR			2					2
-41	Haut-Rhône	BUGA			1					1
-40	Haut-Rhône	BUGA			1					1
-40	Haut-Rhône	BUGR			1					1
-38	Haut-Rhône	BUGR			1					1
-33.5	Haut-Rhône	BUGC			1					1
-25	Haut-Rhône	JONS	1							1
-20	Haut-Rhône	JONS	2							2
-19	Haut-Rhône	JONS	1							1
-13	Haut-Rhône	JONS	1							1
-12	Haut-Rhône	JONS	3							3
-11	Haut-Rhône	JONS	1							1
-9	Haut-Rhône	JONS					1			1
0	Haut-Rhône	LYON			1					1
Total Haut-Rhône			29	15	14	0	1	2	0	61

Tableau V - Sectorisation du Bas-Rhône et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. RCC : Rhône court-circuité (ou Vieux Rhône), LON : îlône ou annexe fluviale, CHE : chenal unique, CAA : canal usinier d'amenée, CAF : canal de fuite, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.

pK	Cours	Secteurs	RCC	LON	CHE	CAA	CAF	RET	BIE	Total
7	Bas-Rhône	PBRC	1							1
7.5	Bas-Rhône	PBRC	2							2
10	Bas-Rhône	PBRC	1	3						4
13	Bas-Rhône	PBRC	2							2
37	Bas-Rhône	PEAA			3					3
47	Bas-Rhône	PEAA						1		1
49	Bas-Rhône	PEAR						1		1
51	Bas-Rhône	PERC		1						1
53	Bas-Rhône	PERC	1							1
53.5	Bas-Rhône	PERC	1							1
54	Bas-Rhône	PERC	2							2
55	Bas-Rhône	PERC	2							2
57	Bas-Rhône	PERC		3						3
58	Bas-Rhône	PERC	1							1

pK	Cours	Secteurs	RCC	LON	CHE	CAA	CAF	RET	BIE	Total
58.5	Bas-Rhône	PERC	2							2
61	Bas-Rhône	PERC	1							1
63	Bas-Rhône	PEAV					1			1
136	Bas-Rhône	BAIX	1							1
144	Bas-Rhône	MONT			1					1
145	Bas-Rhône	MONT						1		1
148	Bas-Rhône	MONT						2		2
150	Bas-Rhône	MONT						1		1
152	Bas-Rhône	MONT						1		1
153.5	Bas-Rhône	MORC	1							1
165	Bas-Rhône	MORC	2							2
166	Bas-Rhône	MORC	1							1
166	Bas-Rhône	VIVI					1			1
166.5	Bas-Rhône	VIVI			1					1
170.5	Bas-Rhône	DOMA				1				1
172	Bas-Rhône	DORC	1	6						7
180	Bas-Rhône	DORC	1							1
183	Bas-Rhône	DOMA				1				1
184.5	Bas-Rhône	DOMR				1				1
185	Bas-Rhône	DOMR				1				1
187	Bas-Rhône	DOMR				1				1
190	Bas-Rhône	CADE					1			1
192	Bas-Rhône	CADE					1			1
193	Bas-Rhône	DORC	1							1
195	Bas-Rhône	CADE					1			1
200	Bas-Rhône	CADE					1			1
200	Bas-Rhône	DORC	2							2
202	Bas-Rhône	CADE						1		1
210.5	Bas-Rhône	CADE						1		1
213	Bas-Rhône	CADE						1		1
215	Bas-Rhône	CADE				1				1
216	Bas-Rhône	CADE					1			1
218	Bas-Rhône	CARC	1							1
239	Bas-Rhône	VALL				1	1			2
255.5	Bas-Rhône	VALL						1		1
256	Bas-Rhône	VALL					1			1
256.5	Bas-Rhône	VALR						1		1
257	Bas-Rhône	VALL						1		1
259.5	Bas-Rhône	VALL						1		1
260	Bas-Rhône	VALL						1		1
261	Bas-Rhône	VALL						1		1
263	Bas-Rhône	VARC	1							1
265	Bas-Rhône	VALL				1	3			4
265	Bas-Rhône	VARC	1							1
266	Bas-Rhône	VALL					1			1
268.5	Bas-Rhône	VARC	1							1
269	Bas-Rhône	VALL			1					1
Total Bas-Rhône			30	13	6	8	13	16	0	86

Tableau VI - Sectorisation des affluents et nombre de stations par secteur, classées selon leur appartenance à des entités structurantes du paysage fluvial. CHE : chenal unique, RET : retenue, BIE : bief de navigation ne concernant que la Saône.

Affluents	pK Rhône	Secteur	RCC	LON	CHE	CAA	CAF	RET	BIE	Total
Ain	-34	BVAI			8					8
Saône	0	Mâcon							2	2
	0	Villefranche							3	3
	0	Lyon							5	5
Ardèche	191.5	ARDE			1					1
Durance	248	Oraison			3					3
	248	Manosque			4					4
	248	St-Paul			3					3
	248	Cadenet			2					2
	248	Cheval Blanc			2					2
	248	Avignon			2					2
	248	Vallabrègues						1		1
			38	15	40	0	2	3	10	36

Tableau VII - Sectorisation simplifiée et liste des stations de relevés thermiques (données eDF-DTG et CNPE Tricastin) et hydrologiques (données de la banque nationale HYDRO) correspondantes.

Sections fluviales	Secteurs	Stations thermiques	Stations hydrologiques
Haut-Rhône	CHRC	Pont de Pougny	Pougny
	BERC	Pont de Pougny	Pougny
	BRRC	Creys	Lagnieu
	CREY	Creys	Lagnieu
	BUGA	Bugey	Lagnieu
	BUGR	Jons	Perrache
	BUGC	Jons	Perrache
Ain	BVAI	Pont de Chazey	Chazey
Haut-Rhône	JONS	Jons	Perrache
	LYON	Jons	Perrache
Saône	SAOM	Mâcon & Couzon	Mâcon & Couzon
	SAOV	Mâcon & Couzon	Mâcon & Couzon
	SAOL	Mâcon & Couzon	Mâcon & Couzon
Bas-Rhône	PBRC	St-Alban-du-Rhône	Ternay
	PEAA	St-Alban-du-Rhône	Ternay
	PEAR	St-Alban-du-Rhône	Ternay
	PEAV	St-Alban-du-Rhône	Ternay
	PERC	Seuil de Peyraud	Ternay
	BAIX	Cruas	Viviers
	MONT	Cruas	Viviers
	MORC	Cruas	Viviers
	VIVI	Tricastin amont	Viviers
	DOMA	Tricastin amont	Viviers
	DOMR	Tricastin rejet & aval	Viviers

Sections fluviales	Secteurs	Stations thermiques	Stations hydrologiques
	DORC	Aramon	Viviers
	CADE	Aramon	Viviers + Ardèche
	CARC	Aramon	Viviers + Ardèche
	VALL	Aramon	Vallabrègues
	VALR	Aramon	Vallabrègues
	VARC	Aramon	Vallabrègues

2.1.9 Données piscicoles utilisables

Malgré la diversité méthodologique précédemment signalée, les juvéniles ont tous été capturés par pêche électrique. Cette technique permet une prospection relativement efficace et peu sélective des zones rivulaires, préférentiellement occupées par de jeunes poissons, et cela quelles que soient la complexité de l'habitat échantillonné et les difficultés d'accès.

Cependant nos objectifs supposent (1) d'avoir une mesure individuelle de la taille de précision millimétrique, (2) des effectifs de juvéniles suffisants pour une exploitation réaliste des distributions de tailles. Certaines données ne satisfont pas ces exigences pour l'étude de la taille. Malgré la continuité méthodologique appliquée par les divers organismes de recherche, les données piscicoles les plus anciennes nécessitent un regard critique. Les distributions des tailles des cyprinidés capturés par pêche électrique montrent que les effectifs de juvéniles sont très faibles en début de chronique, contrastant singulièrement avec les données de la fin des années 80 (Figure 2, Tableau VIII).

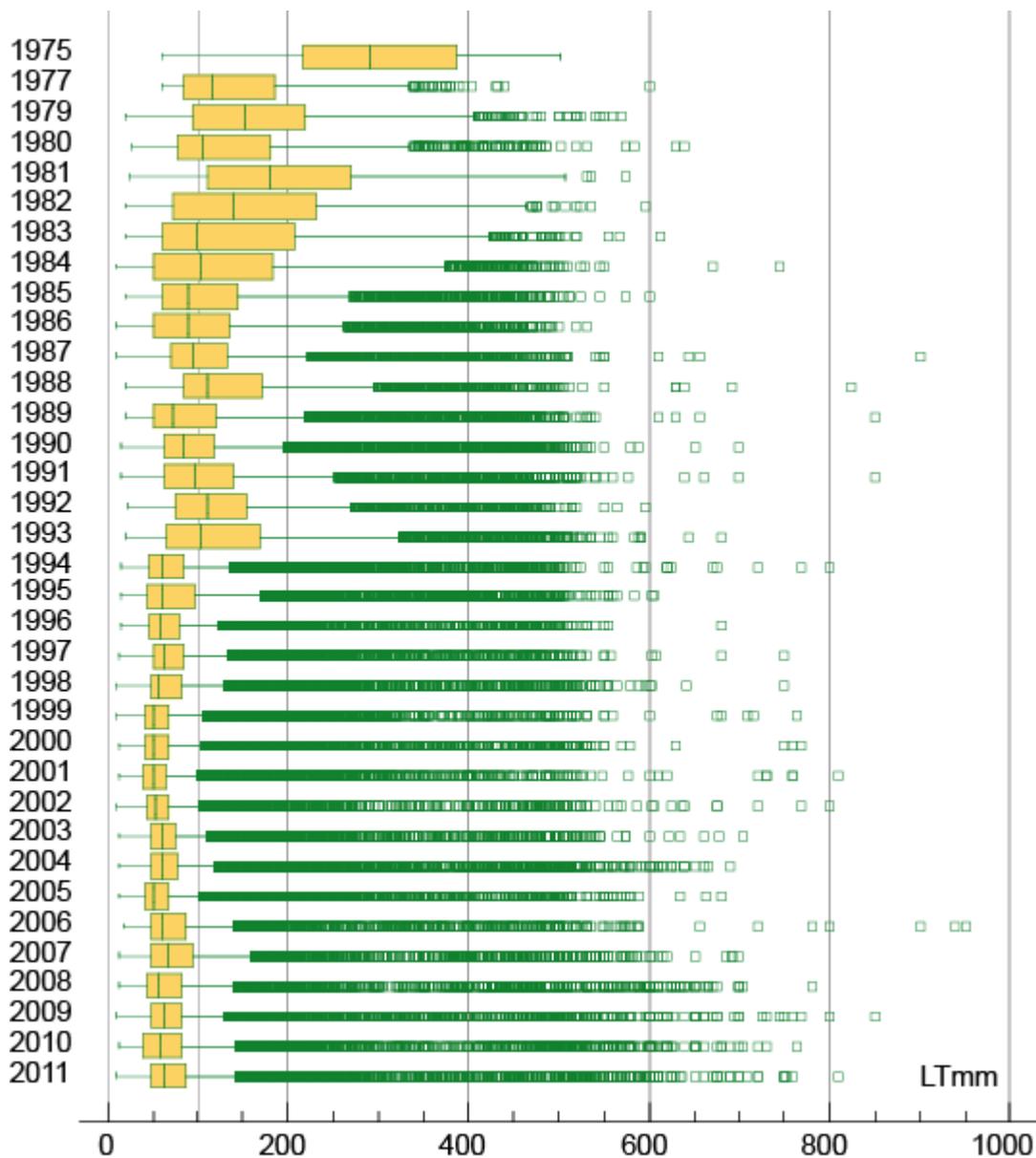


Figure 2 - Distribution des tailles de tous les cyprinidés capturés dans le Rhône. Les tailles extrêmes sont atteintes par des carpes.

Tableau VIII - Statistiques résumées des tailles des Cyprinidae échantillonnés par pêche électrique (S : écart-type, Q 25% : quantile 25%, Q 75% : quantile 75%). Ensemble des captures du Haut-Rhône et du Bas-Rhône pour la période 1975-2011. Les suivis piscicoles des quatre CNPE, principaux fournisseurs de données, sont totalement effectifs à partir de 1984. Un changement majeur s'opère en 1994, consécutif aux fortes crues d'octobre 1993 et janvier 1994. Il concerne plus particulièrement le Bas-Rhône.

Années	Effectifs	Moyenne	S	Minimum	Q 25%	Médiane	Q 75%	Maximum
1975	109	302.1	101.42	60	216	290	388	502
1977	677	148.5	79.82	60	85	115	185	600
1979	1113	173.9	103.96	20	94	153	220	570
1980	1897	141.4	93.76	26	78	106	181	640
1981	1564	195.6	106.33	25	110	180	270.5	575
1982	1877	170.6	114.49	20	73	140	230	595
1983	4049	144.4	111.46	20	60	100	206	613
1984	6797	135.6	102.55	10	52	105	183	745
1985	8054	122.6	98.97	20	60	90	145	600
1986	6992	114.9	94.73	10	50	90	136	530
1987	9374	118.7	85.27	10	70	95	132	900
1988	5698	141.0	92.22	20	84	110	170	825
1989	10723	103.7	85.64	19	52	72	120	850
1990	16787	107.1	78.77	15	63	85	118	700
1991	13699	115.9	81.37	15	63	97	140	850
1992	8357	128.0	77.32	23	76	111	155	595
1993	7111	132.2	92.96	20	65	103	169	680
1994	14141	84.2	74.09	15	47	60	84	800
1995	14255	87.6	77.99	15	45	60	96	605
1996	15207	75.9	63.82	14	46	58	79	680
1997	15996	80.5	59.60	13	51	63	85	750
1998	26386	77.2	58.00	10	48	56	82	750
1999	21392	67.4	51.94	10	42	52	69	765
2000	26582	64.1	50.62	12	42	52	68	770
2001	29494	59.8	41.53	12	39	50	65	810
2002	19582	63.8	48.06	10	43	53	68	800
2003	34382	69.6	43.63	12	49	60	75	705
2004	26827	75.2	60.19	12	48	60	78	690
2005	32128	63.6	47.78	12	41	52	67	680
2006	17840	75.6	55.37	18	49	61	87	950
2007	13642	84.1	68.65	12	49	69	95	700
2008	16092	74.4	72.24	13	43	56	83	780
2009	28742	74.2	58.71	11	48	63	83	850
2010	28584	72.1	61.68	13	40	58	83	764
2011	26929	78.8	66.37	11	48	63	87	810
Total	513079	82.8	69.45	10	47	61	91	950

Les causes semblent multiples, pouvant relever à la fois d'un intérêt limité pour l'étude des jeunes stades, des conditions d'échantillonnage, mais aussi de pollutions ou d'épizootie ayant singulièrement diminué les effectifs de juvéniles. Des événements hydrologiques majeurs structurent ces distributions et les assemblages piscicoles (CATTANEO et al., 1999).

L'échantillonnage des poissons de l'année suppose un matériel adapté, notamment l'usage d'épuisettes à mailles fines. Du fait de leur taille, ils sont plus fragiles, difficiles à identifier et à mesurer. Souvent plus nombreux, ils demandent plus de temps de manipulation comparativement aux individus âgés. Ce sont des éléments peu favorables à un échantillonnage objectif de cette classe d'âge. Un biais d'échantillonnage, une sous-évaluation des effectifs, des mesures peu rigoureuses, ne peuvent être exclus. Lorsque les captures de juvéniles ont été importantes, leur nombre a bien souvent été à l'origine de stratégies diverses appliquées sur le terrain : (1) regroupements par lots définis par une taille minimale, une taille maximale, et un effectif, (2) dénombrement, sous un label « juvénile » sans mesure de la longueur totale si celle-ci se trouvait inférieure à un seuil défini pour l'espèce considérée, (3) simplification de la mesure en adoptant une précision centimétrique ou demi-centimétrique. Ces données posent de véritables problèmes quant aux analyses de taille.

Si des réserves sont émises sur l'échantillonnage, il faut aussi signaler que d'autres facteurs sont susceptibles d'avoir affecté les populations piscicoles et contribué à l'obtention de distributions de taille et d'effectifs très atypiques.

Lorsque démarrent les premières études piscicoles sur les fleuves français, et notamment sur le Rhône, une pandémie de bucéphalose larvaire associée à l'expansion géographique du sandre affecte l'ensemble des populations piscicoles, des cyprinidés en particulier (DE KINKELIN et al., 1969). Elle pourrait expliquer les faibles captures de l'époque et entre autres des juvéniles. Cependant il n'existe, à notre connaissance, aucun suivi précis de cette pandémie sur l'axe rhodanien pour confirmer cette hypothèse si ce n'est une citation régulière de la maladie dans les premiers rapports et sur des fiches de terrain.

Par ailleurs, sur le Rhône, les vidanges tri-annuelles, initialement peu contrôlées, des réservoirs proches de la frontière franco-suisse ont eu des impacts en aval de ces ouvrages. La vidange catastrophique du barrage de Génissiat, en juin 1978, a provoqué une mortalité piscicole sans précédent sur l'axe rhodanien et éliminé les jeunes classes d'âge chez de nombreuses espèces (CARREL, 1981; ROUX, 1984). Les effets de ces opérations ont depuis été largement atténués par un contrôle strict mis en place suite à ce sinistre épisode, et par l'aménagement progressif du Haut-Rhône par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). Malgré des problèmes récents soulevés par certains polluants, la pollution urbaine du fleuve a largement diminué au cours de ces décennies et aucune pollution accidentelle grave n'a été signalée depuis 1985.

Par conséquent, les données utilisables avant la fin des années 80 sont rares, et rendent difficile une exploration croisée taille/thermie rigoureuse au cours de la période comptant les années les plus froides de la chronique.

Il est probable que les premières thèses en écologie piscicole et fluviale de l'Université Lyon 1 (NELVA, 1985; PERSAT, 1988), et notamment celles orientées sur la connaissance des jeunes stades (CARREL, 1986; COPP, 1987; OLIVIER, 1992; POIZAT, 1993; GRENOUILLET et al., 2000) aient façonné un autre regard sur les populations piscicoles des grands fleuves, augmentant ainsi l'intérêt porté aux juvéniles au début des années 1980.

Les jeunes poissons dominent actuellement dans les pêches de rives, notamment depuis les années 90 (Figure 2) après les grandes crues des années 1993 et 1994. Ces changements expliquent en partie le renouveau d'intérêt pour des études spécifiques de la fraction juvéniles du peuplement. Mais les suivis des sites industriels n'ont jamais eu pour

objectif de la caractériser précisément et les techniques de capture n'ont pas été prévues à cette fin.

Les équipes de pêche utilisent des épuisettes optimisant la capture de toutes les espèces, mais pas forcément de toutes les tailles. Actuellement, les mailles utilisées sont de 4 mm (Irstea, Université, Onema) et de 4.5 mm (Aralep). Dans une étude portant spécifiquement sur la taille des juvéniles, la maille des engins peut être à l'origine d'un biais important sur des échantillonnages au printemps et au début de l'été en tronquant à gauche les distributions de tailles. Par ailleurs, au cours de ces pêches, les informations sont sommaires car les effectifs enregistrés sont alors insignifiants face à l'abondance réelle des jeunes stades. Ces problèmes se traduisent le plus souvent par un simple signalement (présence d'alevins).

Hormis des études spécifiques sur les jeunes stades, l'identification et la mesure de des jeunes recrues d'une espèce donnée ne constituent que des relevés fragmentaires, essentiellement qualitatifs.

Dans la base, nous avons centralisé des relevés obtenus par des méthodes différentes, adaptées pour des objectifs distincts. Ils permettent d'illustrer ces problèmes quant à la distribution printanière et estivale des jeunes gardons et chevaines (poissons d'âge 0+).

Pour cela, nous utiliserons :

(A) des relevés hebdomadaires réalisés avec des engins (carré et épuisette) à maille fine (1 mm) construits pour une étude de la croissance des larves et juvéniles de deux annexes fluviales du Haut-Rhône (CARREL, 1986) ;

(B) des échantillons à l'épuisette (maille de 4 mm) effectués en sortie des eaux de lavage des tambours filtrants du CNPE du Tricastin, au cours de cycles d'observation de 24 heures ;

(C) des pêches électriques de rives faites à Viviers et dans le canal de Donzère-Mondragon (Figure 3, Figure 4) pouvant être mises en parallèle avec les captures des tambours filtrants.

Dans le premier cas (A), il s'agit de prélèvements hebdomadaires ayant débuté dès l'apparition des plus jeunes stades. La maille utilisée permet la capture des plus petits individus. Dans le cas suivant (B), il s'agit de relevés mensuels. Les jeunes stades passent la maille filtrante des tambours et ne sont pas ou très peu observés dans nos relevés faits avec une épuisette de même maille, sauf s'ils arrivent avec des débris végétaux. La distribution est tronquée à droite (grande taille) car les poissons plus âgés évitent l'entraînement par les prises d'eau. Dans le troisième cas (C), les plus jeunes individus sont pratiquement inexistantes des pêches électriques de rive. La distribution est très étalée vers la droite car elle compte des poissons pêchés au niveau du rejet thermique. Si les prises d'eau n'étaient pas sélectives, les distributions B et C devraient être similaires.

A la fin de l'été, la majorité des individus ont une taille suffisante pour minimiser les problèmes associés aux poissons de très petite taille. A l'heure actuelle, du fait des évolutions climatiques, des espèces à pontes multiples réalisent parfois des pontes tardives et nous avons observé plusieurs fois de très jeunes et petits individus en fin d'année au cours de cette dernière décennie.

Pour minimiser les problèmes liés à cette sous-évaluation des plus petits individus par les engins utilisés, l'analyse des tailles des jeunes poissons de l'année portera essentiellement sur des pêches réalisées à compter du mois d'août, lorsque la taille des juvéniles est suffisante pour obtenir des échantillons valides. Nous évitons ainsi une surestimation des tailles des jeunes individus consécutive à l'absence de capture des plus petits individus.

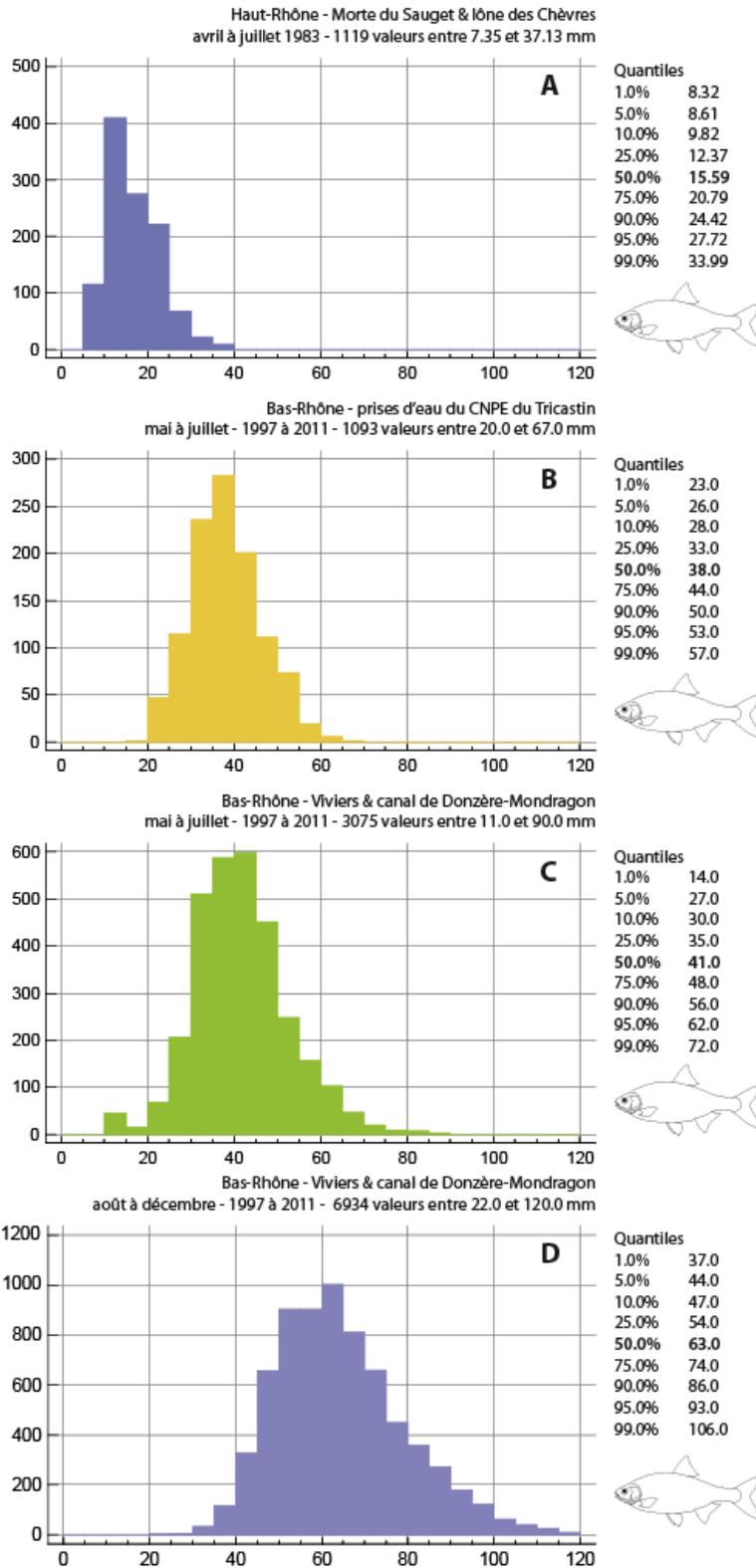


Figure 3 - Disparités des distributions des tailles (LT en mm) de gardons capturés d'avril à juillet par trois techniques différentes (A – engins à maille de 1 mm, B – épuisette à maille de 4 mm sur des eaux de lavages des tambours filtrants du CNPE du Tricastin, C – pêches électriques de rive entre mai et juillet avec des épuisettes à maille de 4 mm). Distributions obtenues par pêche électrique entre août et décembre (D).

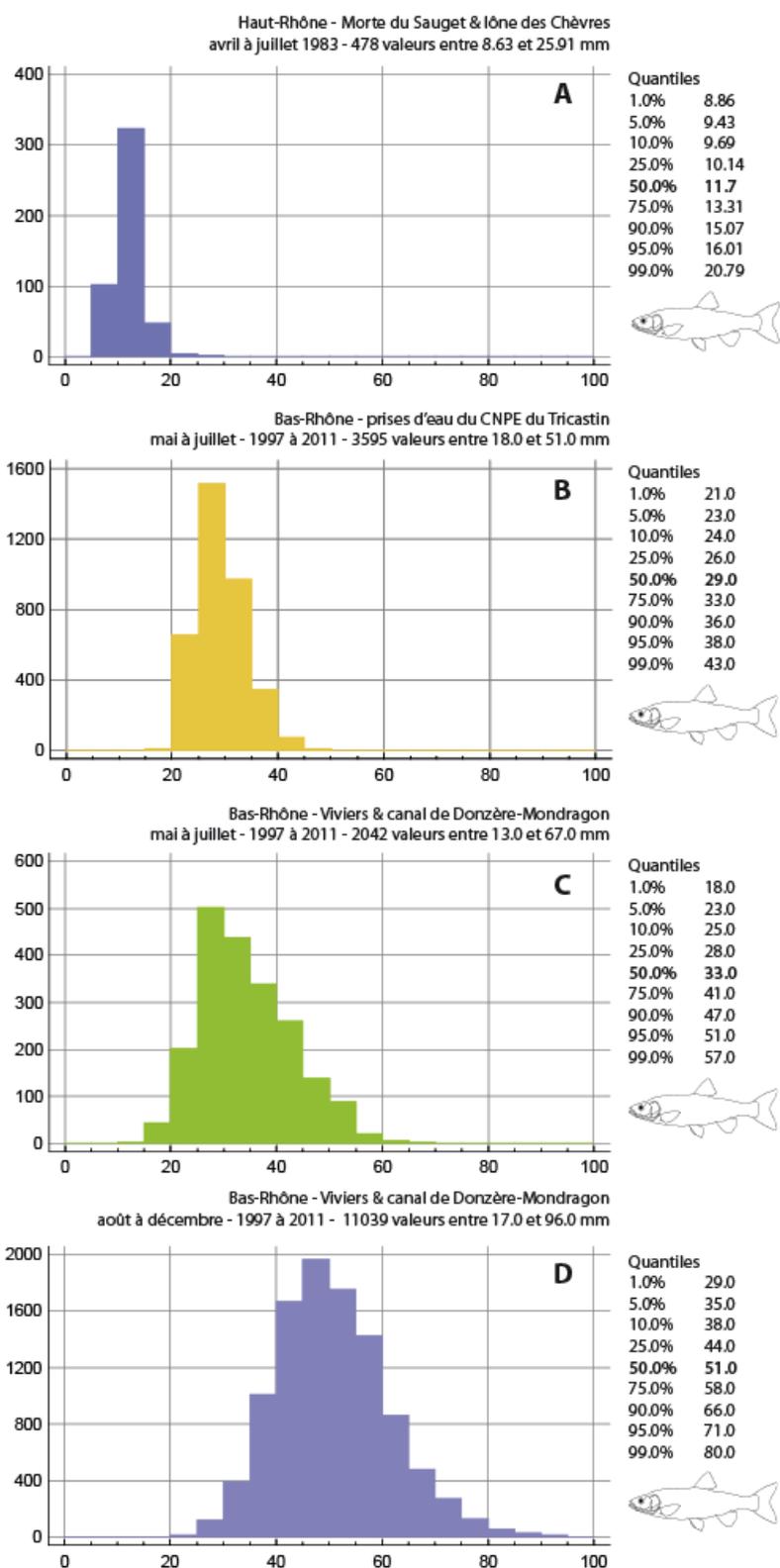


Figure 4 - Disparités des distributions des tailles (LT en mm) de chevaines capturés d'avril à juillet par trois techniques différentes (A – engins à maille de 1 mm, B – époussette à maille de 4 mm sur des eaux de lavages des tambours filtrants du CNPE du Tricastin, C – pêches électriques de rive entre mai et juillet avec des époussettes à maille de 4 mm). Distributions obtenues par pêche électrique entre août et décembre (D).

2.1.10 Choix des espèces

Malgré des effectifs élevés de poissons (Tableau IX) et notamment des trois cyprinidés dominants (gardon, chevaine, ablette), les différentes contraintes de cette étude ont rapidement limité le nombre d'espèces réellement utilisables. En effet, il est nécessaire d'avoir par station et par date un nombre d'individus juvéniles suffisamment élevé pour (1) définir des classes d'âge à partir d'une distribution des tailles, (2) identifier correctement des cohortes de poissons de l'année (âge 0+) pour le calcul des paramètres descriptifs de la taille, (3) obtenir par année plusieurs échantillons satisfaisant les différentes échelles spatiales et temporelles de notre jeu de données.

Tableau IX - Ensemble des poissons renseignés par une taille (Rhône, Saône, Ain, Durance, Ardèche) pour la période 1975-2011.

Familie	Nom scientifique	Nom vernaculaire								Totaux
			Code	HRH	Ain	BRH	SAO	ARD	DUR	
Anguillidae										
	<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	115		7 833	12	135	482	8 577
Balitoridae										
	<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	LOF	6 444	2 138	6 492	2	595	9 046	24 717
Blenniidae										
	<i>Salaria fluviatilis</i>	Blennie fluviatile	BLE	35		47			1	83
Centrarchidae										
	<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	1 847	62	9 516	2 006	137	727	14 295
	<i>Micropterus salmoides</i>	Achigan	BBG			92			51	143
Clupeidae										
	<i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Alose du Rhône	ALR			25			1	26
Cobitidae										
	<i>Cobitis bilineata</i>	Loche italienne	LOB						912	912
	<i>Cobitis taenia</i>	Loche de rivière	LOR		2					2
Cottidae										
	<i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	244	227	290	7		35	803
Cyprinidae										
	<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	15 632	634	111 921	6 678	205	2 137	137 207
	<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	CHE	36 542	2 069	70 266	2 398	3 275	12 149	126 699
	<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	12 198	86	92 907	5 076	1 566	2 115	113 948
	<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirilin	SPI	30 522	1 114	3 148	6	7 434	13 557	55 781
	<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	11 192	575	14 868	1 772	5 709	3 642	37 758
	<i>Phoxinus phoxinus</i>	Vairon	VAI	16 213	12 146	1 104		2 486	5 763	37 712
	<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	14 368	1 067	6 447	72	2 153	7 972	32 079
	<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	11 927	586	15 589	99	432	1 332	29 965
	<i>Blicca bjoerkna</i>	Brème bordelière	BRB	1 616	3	15 982	1 243	2	810	19 656
	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	VAN	11 771	1 418	145	18	69	6	13 427
	<i>Telestes souffia</i>	Blageon	BLN	1 640	909	178		2 127	6 346	11 200
	<i>Rhodeus amarus</i>	Bouvière	BOU	961		7 006	821	3	236	9 027
	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	3 121	25	2 233	1 617	20	617	7 633
	<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	163	10	3 952	234		47	4 406
	<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	312	21	2 020	636		94	3 083

Familie Nom scientifique	Nom vernaculaire								
		Code	HRH	Ain	BRH	SAO	ARD	DUR	Totaux
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	542	38	1 300	212	9	284	2 385
<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Toxostome	TOX	19	2	44		195	1 598	1 858
<i>Carassius gibelio</i>	Carassin argenté	CAG	2		1 484	40		16	1 542
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	23	1	704	128	7	62	925
<i>Carassius auratus</i>	Carassin doré	CAA	1		154		15		170
<i>Carassius carassius</i>	Carassin commun	CAS	12		56			12	80
<i>Chondrostoma sp.</i>	Chondrostome	CHO						68	68
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe miroir	CMI	9		17				26
<i>Leuciscus idus</i>	Ide mélanote	IDE			21	4			25
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe cuir	CCU	1		1		1		3
<i>Leucaspis delineatus</i>	Able de Heckel	ABH	2		1				3
Esocidae									
<i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	838	76	263	13		56	1 246
Gasterosteidae									
<i>Gasterosteus gymnurus</i>	Epinoche	EPI	1 059	47	246			2	1 354
Ictaluridae									
<i>Ameiurus melas</i>	Poisson chat	PCH	146	5	5 086	252	1	11	5 501
Lotidae									
<i>Lota lota</i>	Lote de rivière	LOT	105	1	1				107
Moronidae									
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Loup	BAR			15				15
Mugilidae									
<i>Liza ramada</i>	Mulet porc	MUP			294			49	343
<i>Mugil cephalus</i>	Mulet cabot	MUC			14			19	33
Percidae									
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche commune	PER	2 406	316	2 718	1 092	19	312	6 863
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	GRE	652	5	463	76		46	1 242
<i>Sander lucioperca</i>	Sandre	SAN	40		586	86		39	751
<i>Zingel asper</i>	Apron	APR		1				61	62
Petromyzontidae									
<i>Lampetra planeri</i>	Lamproie de Planer	LPP	7	3	4				14
<i>non identifiée</i>	Lamproie (larve)	LPA			1				1
Poeciliidae									
<i>Gambusia affinis</i>	Gambusie	GAM			2			136	138
Salmonidae									
<i>Salmo trutta</i>	Truite commune	TRF	971	415	85		16	116	1 603
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	OBR	483	68					551
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truite arc en ciel	TAC	36		27		1	9	73
Siluridae									
<i>Silurus glanis</i>	Silure	SIL	454		598	96			1 148
Nombre d'espèces	51	Total	184 671	24 070	386 246	24 696	26 612	70 974	717 269

La famille des Cyprinidae compte 23 espèces, regroupe un peu plus de 90% des effectifs et la majorité des espèces dominantes sur les cours d'eau. Des espèces abondantes de petite taille (ablette, bouvière, pseudorasbora, goujon, spirilin), à croissance rapide et à maturité précoce posent de réel problème d'identification des classes d'âge en l'absence de scalimétrie et/ou d'otolithométrie. Les nombreuses espèces à ponte multiple, parmi lesquelles se trouvent les plus petites espèces, génèrent plusieurs cohortes au cours de la saison de reproduction à l'origine d'une grande dispersion des tailles et des chevauchements avec celles des individus de l'année précédente (RINCHARD & KESTEMONT, 1996; RINCHARD et al., 1998).

Parmi les espèces longévives les plus abondantes (gardon, chevaine, barbeau fluviatile, hotu, brème bordelière et vandoise), toutes n'ont pas une répartition homogène sur l'axe rhodanien. La vandoise n'est trouvée que sur le Haut-Rhône. La brème bordelière est nettement plus abondante sur le Bas-Rhône. La répartition de deux grands rhéophiles (barbeau et hotu) n'est pas uniforme dans le temps sur le Bas-Rhône puisque leur réapparition effective dans les chroniques du Bas-Rhône a été postérieure aux crues 1933-1994.

Finalement, il ne reste que deux espèces euryèces parmi les plus abondantes dans ces pêches faites sur l'axe rhodanien : le gardon et la chevaine (Figure 5). Ces deux espèces étant typiquement associées aux habitats rivulaires à tous les stades de vie (WOLTER & BISCHOFF, 2001), la méthode d'échantillonnage adoptée est globalement représentative de la répartition diurne de toutes les classes d'âge de ces deux populations. Ce ne serait pas le cas pour les brèmes commune et bordelière, deux espèces potamiques préférentiellement inféodées au chenal dès leur plus jeune âge.

Bien que toutes deux euryèces, tolérantes vis-à-vis de la dégradation physique du milieu et ayant une vaste distribution européenne, elles constituent deux modèles biologiques contrastés.

Parmi les aspects importants dans cette étude, leurs traits écologiques associés à la reproduction sont nettement différents, les plaçant parmi deux guildes reproductives généralistes mais distinctes (KRYZHANOVSKII, 1974; BALON, 1975).

La chevaine est lithophile. Il dépose ses œufs sur des fonds pierreux localisés dans des secteurs courants (PONCIN, 1996). Le substrat abrite les larves photophobes jusqu'au début de leur nutrition externe. Elles ne possèdent pas de glandes cémentaires permettant leur fixation sur le substrat.

Le gardon est phyto-lithophile. La femelle dépose préférentiellement ses œufs sur des macrophytes des eaux calmes, mais peut pondre sur d'autres substrats si nécessaire tels que des débris ligneux, des graviers et des blocs. Les larves ont des glandes cémentaires leur permettant d'adhérer au substrat de ponte et d'éviter les eaux anoxiques proches du fond dans les milieux eutrophes.

Ces deux espèces présentent des stratégies de reproduction différentes. Le gardon est une espèce à ponte unique, réalisée en quelques jours. La fraie dure 2 à 3 jours dans le lac Léman (GILLET, 1989) si les conditions climatiques sont favorables. Si elles se dégradent, la ponte peut être interrompue temporairement, voire définitivement.

La chevaine peut réaliser plusieurs pontes. Toutefois, parmi les espèces à pontes multiples, ce caractère est moins prononcé que chez l'ablette, la brème bordelière ou le goujon (RINCHARD & KESTEMONT, 1996; RINCHARD et al., 1997; RINCHARD et al., 1998). LIBOSVARSKI (1979) a montré que les ovaires des femelles contenaient plusieurs groupes d'ovules permettant la réalisation potentielle de trois pontes successives. Par ailleurs, PENAZ et al. (1978) ont observé trois fraies successives (du 10 au 12 mai, du 24 au 27 mai et du 2 au 5 juin 1977) dans la rivière Jihlava (République Tchèque). NUNN et al. (2007) signalent un minimum annuel de deux cohortes de chevaines 0+ dans la rivière Trent. Ces pontes multiples étaient plus apparentes en 1999, 2003 et 2004. Par contre, les pontes

multiples n'étaient pas évidentes chaque année dans deux autres rivières dans lesquelles le recrutement annuel a été plus vraisemblablement le résultat d'une ponte unique.

La ponte multiple est à l'origine d'une plurimodalité marquée des distributions des tailles des jeunes chevaines de l'année (CARREL, 1986; NUNN et al., 2002) et d'une grande disparité des tailles des jeunes de l'année (BOLLAND et al., 2007).

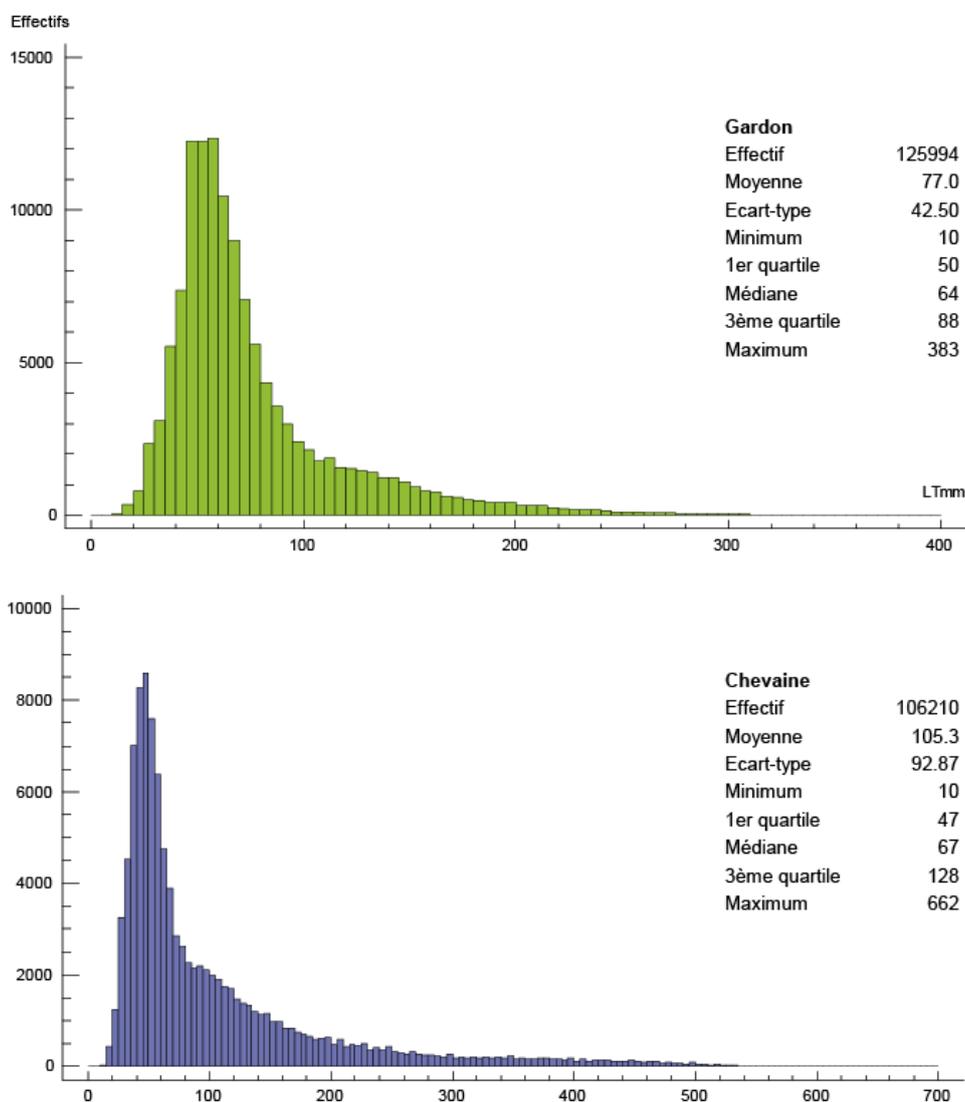


Figure 5 - Distribution en classes de taille de 5 mm des gardons et chevaines capturés par pêche électrique (Haut-Rhône, Bas-Rhône) et paramètres synthétiques de la taille.

2.2 Données thermiques

Une convention a été mise en place entre eDF et Irstea Aix-en-Provence afin de disposer des données thermiques moyennes journalières vérifiées, validées et centralisées par le service Ressources en Eau, Branche Environnement, eDF-DTG de Grenoble. Les températures utilisées dans ce travail proviennent des stations permanentes du Rhône [Creys, Bugey amont, Jons, Loire-sur-Rhône, Saint-Alban amont, Seuil de Peyraud (RCC Péage-de-Roussillon), Cruas amont, Tricastin amont, Tricastin aval, Aramon amont], de la Saône (Couzon) et de l'Ain (Pont de Chazey) (LAUTERS & POIREL, 2001a, b).

La température du rejet de Tricastin, fournie par le CNPE de Tricastin, est une valeur calculée, fonction de la température du fleuve à l'amont, du débit du canal de Donzère-Mondragon et de la production énergétique. Les valeurs au droit du rejet sont environ de +10°C par rapport à l'amont. Le panache thermique est plaqué en rive droite du canal, constituant une zone de mélange très hétérogène. Le mélange complet des masses d'eau ne s'effectue qu'au passage de l'usine de Bollène. Dans ce secteur, nous avons deux stations de pêche (rejet et aval immédiat). Afin de considérer une température plus proche des conditions ambiantes locales, nous avons calculé une température moyenne entre la température amont et la température calculée des eaux réchauffées.

L'emplacement des stations de mesure eDF a été adapté pour renseigner au mieux la température de la masse d'eau du chenal principal. Or, de nombreux relevés biologiques sont localisés dans un contexte thermique distinct du chenal principal. Ils sont traités avec les relevés thermiques disponibles les plus proches, une approximation acceptée malgré la forte hétérogénéité spatiale de la température, en particulier des sections fluviales court-circuitées. La température printanière et estivale des eaux de la masse d'eau principale est généralement plus basse que celle de la frange utilisée par les jeunes stades, proche des rives et de la surface.

Les poissons sont aptes à rechercher des conditions thermiques optimales, notamment des eaux plus chaudes chez les jeunes stades. Les larves sont à même de se déplacer dans un gradient thermique pour optimiser leur croissance en fonction de leur stade de développement (GOLOVANOV & SMIRNOV, 2011). Par conséquent, quelles que soient les données thermiques utilisées, même les plus précises et les plus pertinentes, il y aura toujours une grande approximation des conditions réelles.

2.3 Données hydrologiques

Les chroniques hydrologiques proviennent des stations de la banque HYDRO, gérées soit par les deux grands exploitants de la ressource hydraulique, eDF et la Compagnie Nationale du Rhône, soit par les services de l'Etat : DREAL Rhône-Alpes, DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, et le Service de Prévision des Crues Grand Delta. La donnée de base utilisée est le débit moyen journalier (m³/s) relevé au droit des stations limnigraphiques.

2.4 Le tri et l'identification des classes d'âge

2.4.1 Usage des distributions en classes de taille

En zone tempérée, la croissance des poissons est fortement saisonnalisée, fonction de la température de l'eau, la longueur du jour et la disponibilité alimentaire. Elle se traduit par une augmentation rapide de la taille et du poids au cours de l'été, un arrêt progressif lors de la baisse des températures et la diminution de la longueur du jour, puis une absence virtuelle durant les mois d'hiver avant la reprise printanière. Les données permettant d'établir des courbes de croissance saisonnière sont souvent obtenues par des échantillonnages réguliers au cours de l'année et à partir des histogrammes de taille, une technique couramment adoptée pour le suivi de la croissance des juvéniles dans tous les types de

milieux aquatiques (FECHHELM et al., 1997; POWER et al., 2000; NUNN et al., 2002; RIBEIRO et al., 2004).

Pour la majorité des Cyprinidés, seules les plus jeunes classes d'âge peuvent être identifiées à partir des distributions de taille, essentiellement les classes d'âge 0+ (jeunes de l'année n), et 1+ (jeunes de l'année n-1). Généralement, un troisième groupe est distinct dans une distribution de taille (individus majoritairement d'âge 2+). Mais il présente un chevauchement considérable avec les classes d'âge proches (1+, 3+ et au-delà).

En l'absence d'une identification précise de l'âge par des techniques spécifiques appropriées (scalimétrie, otolithométrie), ce travail est basé sur une discrimination des âges à partir des histogrammes de taille.

Cette étape, coûteuse en temps, a été rendue possible par l'abondance des juvéniles dans les pêches électriques de rives, l'existence de campagnes pluriannuelles sur de nombreux sites, une relative homogénéité des dates d'échantillonnage dans les longues chroniques des sites industriels, et la complémentarité des informations recueillies par cette approche pluri scalaire, spatiale et temporelle.

Dans l'identification des jeunes de l'année, certaines études considèrent une valeur de taille « butoir » en-deçà de laquelle les individus sont considérés de l'année. Ce choix est discutable dans une étude prenant en compte d'une part l'axe rhodanien français orienté nord-sud, ses nombreux milieux, et des situations extrêmes représentées par les rejets thermiques ; et d'autre part l'usage de chroniques pluri-décennales alors que le contexte hydrologique et thermique est fortement structuré par le changement climatique actuel.

La multiplicité des situations observées n'autorise pas cette simplification extrême d'autant que l'intérêt de ce jeu de données réside dans la variabilité de la taille selon les années et les secteurs. A ce sujet, TEDESCO et al. (2009) préconisent la prise en compte des spécificités locales et notamment le gradient longitudinal, plutôt que de s'appuyer sur des valeurs globales issues de la bibliographie.

Par conséquent, chaque tableau associé à une espèce comporte l'ensemble des pêches par station et par date où l'espèce est présente.

2.4.2 Les problèmes de discrimination des classes d'âge

Malgré les atouts du jeu de données, le travail reste complexe du fait (1) de la forte variabilité des effectifs des juvéniles, (2) de la variabilité intra-spécifique de la croissance des juvéniles selon les années et les secteurs et (3) de la stratégie de ponte des espèces.

2.4.2.1 Les effectifs de juvéniles

Bien que les effectifs de juvéniles dominent dans les pêches électriques réalisées sur le Rhône, ils sont très variables dans l'espace, au cours de l'année, et d'une année à l'autre. Cette grande amplitude de variabilité a plusieurs origines.

Les conditions de reproduction peuvent ne pas avoir été favorables et les effectifs des pêches automnales sont alors très faibles, voire nuls. Connaissant le synchronisme important à large échelle régionale des réponses aux conditions hydroclimatiques (LE CREN, 1955; HOLMES & HENDERSON, 1990; HUGUENY et al., 1995; FOX et al., 2000; GRENOUILLET et al., 2001), cet effet négatif concerne alors un long linéaire et il s'accroît dans un système fluvial fortement artificialisé dans lequel l'homogénéité et la pauvreté de l'habitat accentue le rôle de l'hydrologie (SCHIEMER et al., 2001). A l'opposé, les conditions peuvent avoir été très favorables pour une ou plusieurs espèces et ce recrutement exceptionnel marquera les années suivantes (MILLS & MANN, 1985).

Dans un milieu fortement dégradé et eutrophe, la compétition intra- et interspécifique peut réduire les capacités de reproduction des adultes au cours des années suivantes (LAMMENS, 1986; TOWNSEND, 1989; TOWNSEND & PERROW, 1989; BRITTON et al.,

2009). Nous ne pouvons exclure cette hypothèse dans les années qui ont suivi le fort recrutement du gardon en 1989, à laquelle s'ajoute la dégradation progressive de l'état sanitaire des poissons au cours des années 1990 à 1992.

Des événements hydroclimatiques majeurs, ou des pollutions, marqués par leur brièveté, sont survenus après la reproduction et ont éliminé les jeunes alors que les conditions de fraie avaient été satisfaisantes (la pollution industrielle sur le Bas-Rhône en 1985, la crue d'octobre 1993 sur le Bas-Rhône, la crue majeure et les vidanges conjointes des ouvrages hydro-électriques de la Basse-Isère en juin 2008, ...).

Les stations étudiées peuvent ne pas être propices à la présence de juvéniles du fait d'un habitat physique peu diversifié, ou de leur éloignement des sites de fraie (exemple du canal de Donzère-Mondragon et des stations situées à proximité immédiate du CNPE de Tricastin).

L'échantillonnage peut aussi être à l'origine de ces disparités. Nous rappelons que ces données n'ont pas été acquises pour étudier la taille des juvéniles. Par conséquent, si les effectifs étaient faibles voire nuls, aucun effort n'a été fourni pour obtenir une information minimale sur le niveau de recrutement et la taille potentielle de la cohorte annuelle. Par ailleurs, ces espèces sont grégaires. Les bancs, souvent mono-spécifiques, rassemblent des individus de la même taille. Lorsqu'une année est peu productive en termes de juvéniles, les maigres résultats d'une pêche peuvent provenir d'une capture qui relève du hasard : échantillonnage partiel de l'unique banc existant sur la station dans une prospection en continue de la rive, capture totale des individus présents sur un seul EPA.

Même à l'échelle de ce jeu de données, les problèmes liés aux larges fluctuations d'effectifs et déjà rencontrés par DELAIGUE et al. (2007), restent perceptibles.

2.4.2.2 La variabilité intra-spécifique de la taille

A l'échelle de quelques kilomètres, une hétérogénéité spatiale de la distribution des tailles est largement perceptible (Figure 6, Figure 7). La multiplicité des milieux situés entre deux ouvrages et interconnectés (section court-circuitée et ses annexes, canaux, retenue, affluents) sont autant d'espaces aquatiques présentant des différentiels de ressources à l'origine de taux de croissance distincts. L'existence de cohortes multiples, liées d'une part à la stratégie de reproduction et d'autre part à des reproducteurs d'âge différents pouvant utiliser ces différents milieux, exacerbe la variabilité intra-spécifique de la taille enregistrée à une date donnée. Le fonctionnement hydraulique des sections fluviales court-circuitées peut se résumer à deux états, l'un marqué par la stabilité et l'existence de conditions de reproduction favorables (débit réservé), l'autre par sa variabilité et relative hostilité lors des surverses. Le changement de « statut hydraulique » est propice à une dérive accrue des juvéniles vers l'aval. Il peut alors y avoir des chevauchements au sein des distributions de taille, consécutifs à cette dérive massive depuis ces secteurs « semi-naturels » vers les espaces aquatiques artificialisés situés en aval. Les probabilités d'obtention de distributions hétérogènes issues du « mélange » d'individus de provenances diverses augmentent au cours de la saison froide.

La représentativité de la distribution de tailles pouvant être incertaine du fait des difficultés d'échantillonner un hydrosystème de cette envergure, des méthodes et outils d'échantillonnage utilisés, de la subjectivité du découpage en classe de tailles, nous avons choisi de caractériser statistiquement chaque pêche par la **médiane** des longueurs totales des juvéniles. Celle-ci étant peu sensible aux valeurs extrêmes, elle nous apparaît comme un descripteur robuste de la distribution des tailles.

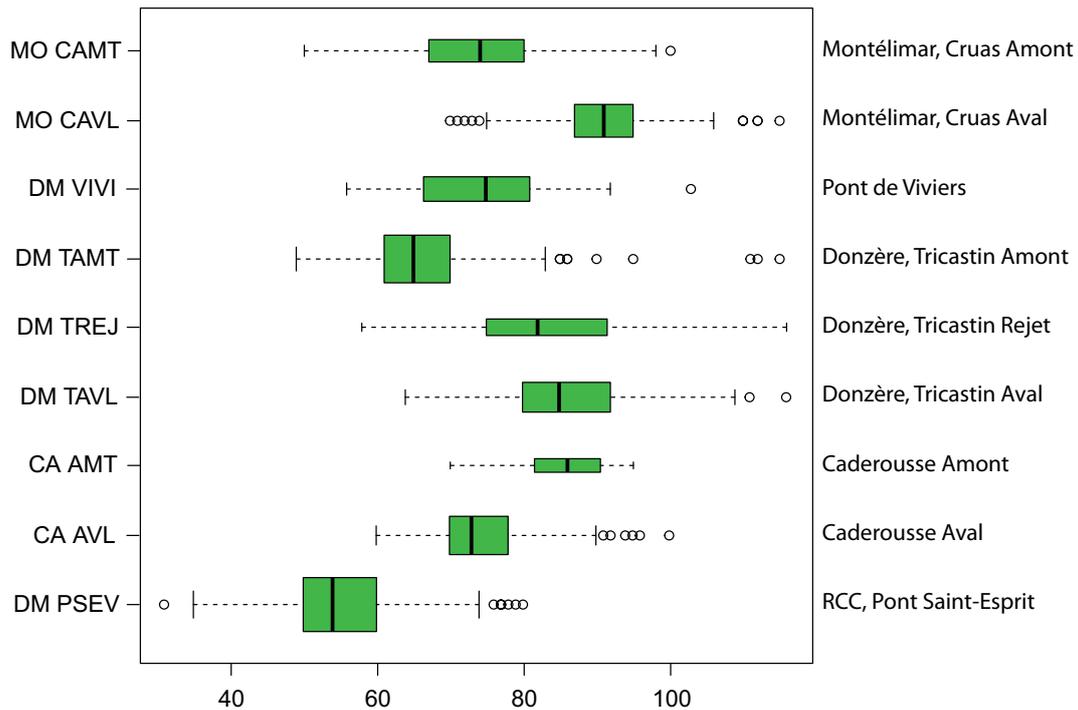


Figure 6 - Variabilité de la taille des gardons d'âge 0+ en septembre 2011. Résultats des pêches (PCR) de plusieurs stations proches sur le Bas-Rhône médian. MO (Montélimar, amont et aval du CNPE de Cruas-Meysse), DM (Donzère-Mondragon, amont, rejet et aval immédiat du CNPE du Tricastin), CA (Caderousse, amont et aval de la retenue). DM PSEV (Rhône court-circuité par l'aménagement de Donzère-Mondragon, aval de Pont-Saint-Esprit)

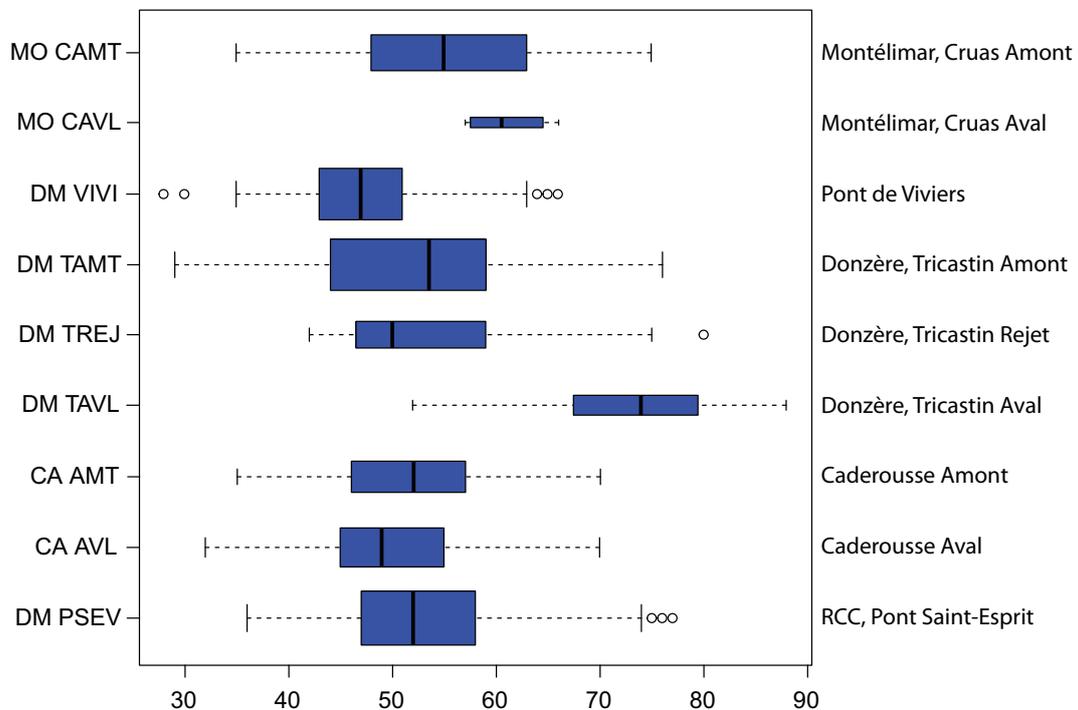


Figure 7 - Variabilité de la taille des chevaines d'âge 0+ en septembre 2011. Résultats des pêches (PCR) de plusieurs stations proches sur le Bas-Rhône médian. MO (Montélimar, amont et aval du CNPE de Cruas-Meysse), DM (Donzère-Mondragon, amont, rejet et aval immédiat du CNPE du Tricastin), CA (Caderousse, amont et aval de la retenue). DM PSEV (Rhône court-circuité par l'aménagement de Donzère-Mondragon, aval de Pont-Saint-Esprit)

2.4.2.3 Les stratégies de ponte

Selon la stratégie de ponte, la distribution en classes de taille des juvéniles est très contrastée (Figure 8). La résultante des pontes multiples (cas du chevaîne) peut être une succession de cohortes de tailles diverses pour une même pêche, avec parfois un chevauchement des distributions de tailles entre les individus nés tardivement l'année n - 1 et de ceux nés précocement l'année n.

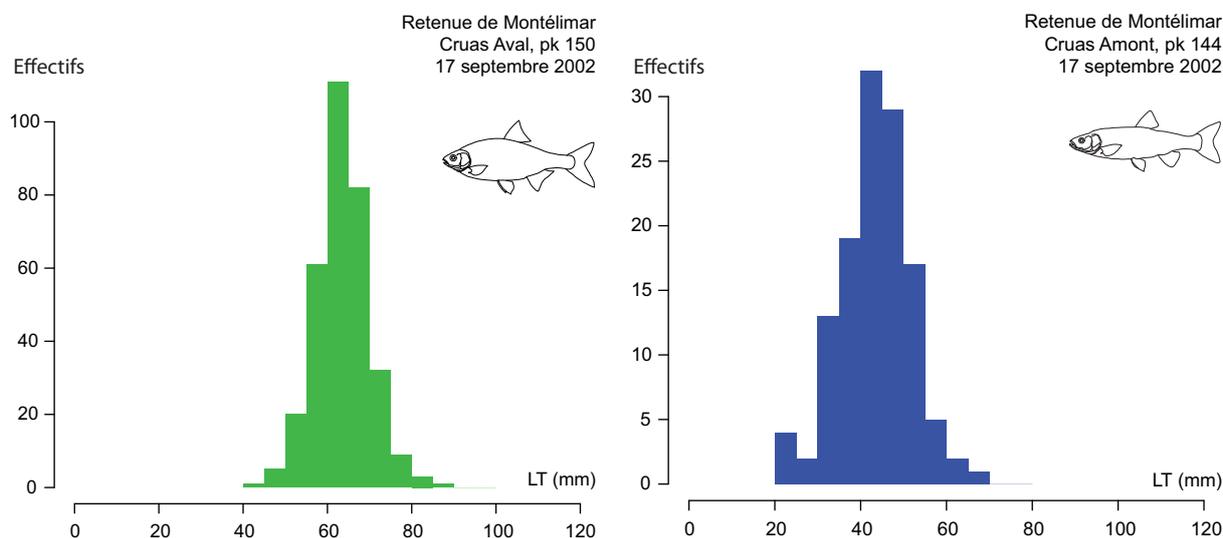


Figure 8 - Distribution en classes de taille du gardon (en vert) et du chevaîne (en bleu) montrant les effets potentiels de leur stratégie de ponte sur la forme de la distribution et son amplitude. Retenue de Montélimar le 17 septembre 2009.

Les difficultés rencontrées avec le chevaîne deviennent problématiques avec de petites espèces comme l'ablette, le goujon, la bouvière, ou le pseudorasbora.

Chez le gardon, la distribution en classe de taille est a priori idéale pour l'identification des âges. Cependant, malgré une stratégie de ponte unique, la distribution uni-modale parfaite est rarement observée à l'échelle des stations de pêche. Elle le sera encore moins lors d'un regroupement sectoriel. La distribution automnale des tailles des individus résulte d'un regroupement progressif de bancs de jeunes poissons dont les tailles sont hétérogènes car la croissance est contrastée à l'échelle locale (CARREL, 1986). Cette hétérogénéité des tailles est favorisée par la dérive active et/ou accidentelle depuis de multiples frayères (JURAJDA, 1998) et aux déplacements des jeunes poissons au cours des premiers mois de leur vie.

2.4.3 Vers une automatisation du tri ?

DELAIGUE et al. (2007) ont proposé une procédure de découpage automatisé en classes d'âge à partir des distributions des longueurs totales des individus.

La discrimination des individus d'âges 0+ et 1+ est réalisée à l'aide d'un modèle de mélange gaussien ajusté par maximisation de la vraisemblance. Le modèle est basé sur un mélange de deux lois normales car les pêches contiennent majoritairement des individus ayant moins de deux ans. Pour chaque année et chaque station, les valeurs seuils ont ainsi été définies pour ces deux classes d'âge.

Les limites de cette procédure sont de deux types.

Le modèle ne permet pas de traiter les distributions présentant de faibles effectifs (limite fixée arbitrairement à 30 individus). Or les années marquées par de faibles effectifs

présentent généralement des singularités thermiques et/ou hydrologiques. Dans ce travail, il n'est pas envisageable d'écarter ces années singulières.

La procédure nécessite un contrôle systématique a posteriori, puisque de nombreux cas particuliers ont posé problème. Les distributions de taille unimodales caractérisées par une absence d'individus d'âge 0+ n'ont pas été correctement discriminées, de même que certaines distributions bimodales atypiques (distributions très rapprochées, importance relative des juvéniles 0+ et 1+ inversée, ou poissons d'âge 0+ présentant une distribution multimodale). Les distributions à plus de deux modes, ainsi que celles comportant peu d'effectifs mais largement dispersées, posent d'autres problèmes. Il s'avère que les distributions atypiques sont nombreuses et l'expertise devient obligatoire.

Le tri des classes d'âge à partir des distributions de la taille étant long et délicat, nous avons essayé de compléter ce travail par des approches complémentaires de classification automatique. Cette question a fait l'objet d'une étude spécifique et d'un rapport détaillé rédigé par Jacques VESLOT dans le cadre d'une convention complémentaire de la phase IV.

2.4.4 Le choix de l'expertise

Afin de se départir des problèmes rencontrés lors des procédures automatiques, nous avons choisi la discrimination des classes d'âges par expertise.

L'expertise a été principalement faite à partir des tableaux croisés des données brutes comportant les tailles en colonne et les stations-dates en ligne (Figure 9). L'intérêt majeur du tableur Excel dans une procédure de ce type réside dans la possibilité d'utiliser des filtres en colonne permettant d'opérer des regroupements de lignes selon des critères spatiaux et/ou temporels, ou une combinaison de ces critères (dates, mois, années, stations, secteurs, tronçons, ...). Ils facilitent les nombreux allers-retours et la perception visuelle des données dans de grands tableaux.

B	F	G	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX		
r_secte	mois	annee_pect	spawn_1	Ltmax_1	Ltmin	spawn_2	Ltmax_2	spawn_3	Ltmax_3	10	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
VIVI	6	1993	1993	31	0	1992	105	1991	143								2				1																			
VIVI	6	1996	1996	30	0		0		0		1	3	4	9	7	8	4	2	1																					
VIVI	6	2005	2005	41	0		0		0				2	1	1	3																								
VIVI	7	2005	2005	65	0		0		0														1																	
VIVI	7	2007	2007	60	0	2006	127		0													1	1														1	1		
VIVI	7	2008	2008	58	0	2007	106		0													1	1															1	1	
VIVI	8	2005	2005	86	0		0		0																															
VIVI	9	1994	1994	88	0		0		0																															
VIVI	9	1995	1994	126	0		0		0																															
VIVI	9	1996	1996	83	0		0		0																															
VIVI	9	1997	1997	80	0	1996	116		0																															
VIVI	9	2000	2000	88	0		0		0																														1	
VIVI	9	2001	2001	80	0		0		0																															
VIVI	9	2002	2002	90	0		0		0																															
VIVI	9	2003	2003	95	0		0		0																															
VIVI	9	2004	2004	77	0		0		0																															
VIVI	9	2005	2005	83	0		0		0																															
VIVI	9	2006	2006	83	0	2005	133		0																															
VIVI	9	2007	2007	77	0	2006	131		0																														2	1
VIVI	9	2008	2008	90	0		0		0																															
VIVI	10	1998	1998	80	0	1997	117		0															1																
VIVI	11	1999	1998	128	0		0		0																															

Figure 9 - Un extrait du tableau de découpage en classes millimétriques pour la discrimination des classes d'âge des gardons sur le secteur de Viviers. Spawn_1 indique l'année de naissance de la première classe d'âge identifiée et Ltmax la longueur maximale associée. L'exercice est poursuivi pour les classes d'âge suivantes, lorsque les données le permettent.

Il est possible de délimiter les tailles maximales et minimales des individus d'âge 0+, et 1+ pour la plupart des stations lorsqu'au moins un individu est présent dans chaque classe d'âge. Les pêches à très faibles effectifs initialement écartées au début de l'étude, ont été réinsérées pour aider les opérations de tri et de discrimination.

Dans une première étape, la délimitation est faite sur les données brutes, accompagnée d'une lecture en parallèle de représentations graphiques (histogrammes des distributions).

Dans une seconde étape, les résultats de l'identification des classes d'âge sont repris par des histogrammes dans lesquelles l'ajout de couleurs distinctes attribuées à chaque classe d'âge permet de visualiser et de vérifier les résultats de l'étape initiale (Figure 10).

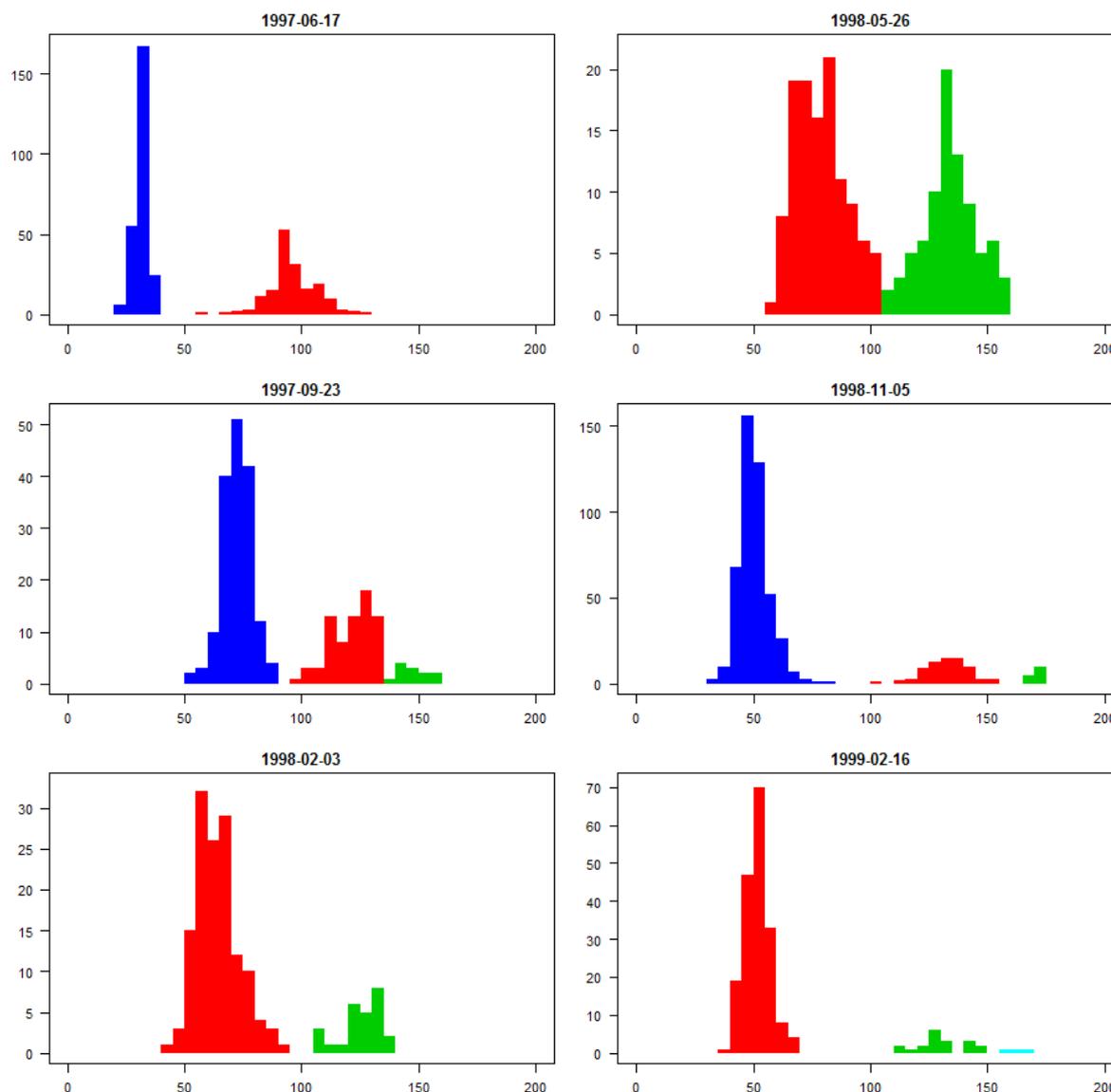


Figure 10 - Exemples de distributions en classes de taille (5 mm) des gardons capturés dans la retenue de Montélimar (regroupement des stations amont et aval) et visualisation colorée des différentes cohortes définies lors de l'expertise des données brutes

Les représentations graphiques ont nécessité de nombreuses adaptations afin de pouvoir utiliser au mieux les potentialités d'affichage des écrans, faciliter l'observation et la rapidité d'affichage dans des zooms avant et arrière sur des figures au format Adobe pdf en haute définition (Figure 11).

L'analyse multivariée - Analyse Factorielle des Correspondances sur les classes de taille (PERSAT & CHESSEL, 1989) – a été utilisée à plusieurs reprises pour la mise en évidence de cohortes atypiques et corriger des erreurs manifestes du découpage.

Des espèces, autres que le gardon et le chevaîne, ont fait l'objet de la première étape du tri. La plupart nécessitent de rassembler des connaissances complémentaires pour le découpage en classes d'âge, par des recherches bibliographiques, voire la lecture d'écaillés de spécimens récoltés sur le terrain. C'est principalement le cas pour de petites espèces

telles que la bouvière et le pseudorasbora, deux espèces pour lesquelles le chevauchement est tel qu'il nous est actuellement impossible de les délimiter sans des erreurs grossières.

L'expertise présente l'inconvénient de travailler a priori, et d'ajouter une part d'interprétation et une part de subjectivité, rendant la méthode difficilement reproductible, mais en l'absence de méthodes automatiques efficaces, elle s'avère actuellement la plus fiable. Les tableaux expertisés ont servi de base de travail pour une évaluation des méthodes de tri automatique.

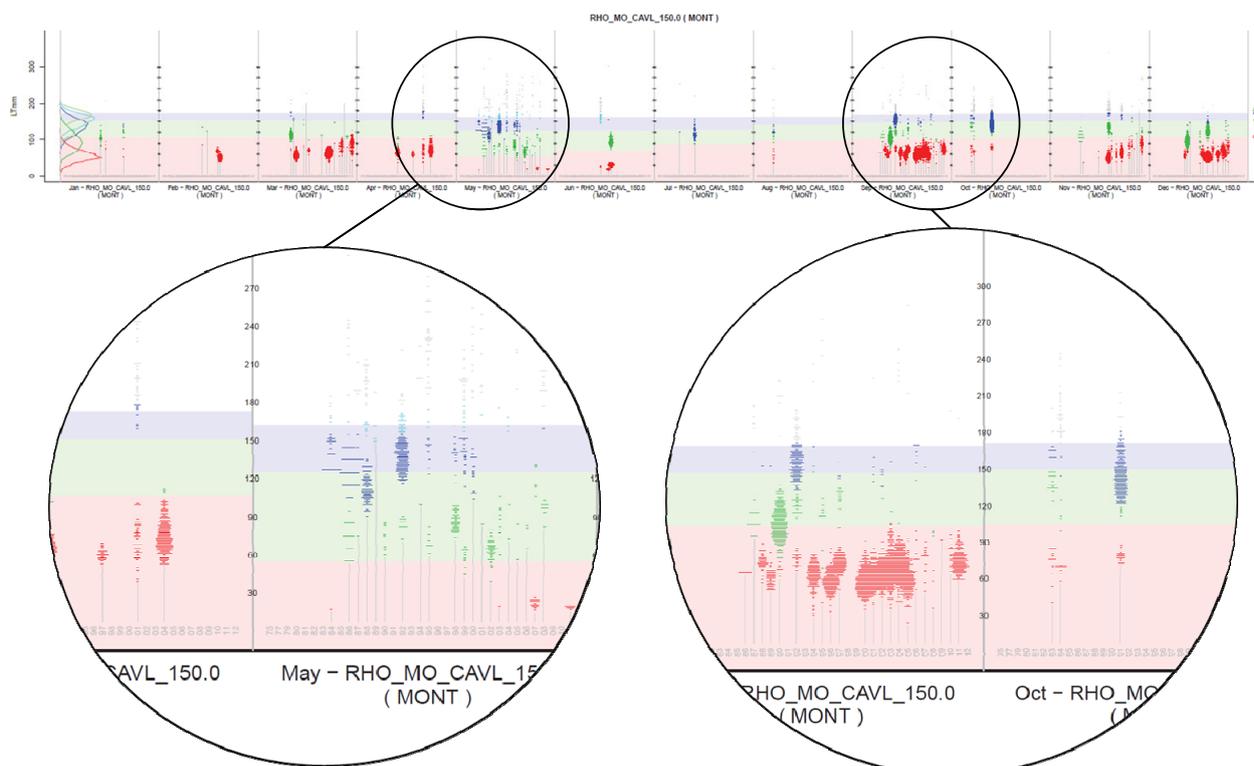


Figure 11 - Extraits d'un graphique panoramique représentant la chronique complète des captures de gardons dans la station de Cruas Aval (retenue de Montélimar). Les campagnes annuelles sont regroupées par mois. Chaque classe d'âge et ses effectifs sont figurés par des « navettes » de couleur différente dont la taille est proportionnelle au nombre d'individus.

La synthèse par année et par secteur des principaux résultats issus de la discrimination des tailles des poissons d'âge 0+ (Figure 12, Figure 13) permet de visualiser les informations disponibles pour aborder les relations potentielles associant la longueur totale des juvéniles 0+ et les paramètres hydro-climatiques majeurs. Il faut signaler (1) la relative disparité spatiale et temporelle du jeu de données malgré l'abondance de ces deux espèces, (2) des tailles globalement contrastées que ce soit au niveau spatial ou temporel lorsque de longues chroniques existent. Au niveau spatial, de forts contrastes existent entre un affluent froid (Ain) et un affluent chaud (Saône), ainsi qu'entre le Haut-Rhône et le Bas-Rhône. Sur l'axe fluvial, les secteurs sous influence d'un rejet thermique sont marqués par de plus grandes tailles (Bugey - BUGR, Péage - PEAR, Tricastin - DOMR). Sur les longues chroniques, les contrastes signalés dans la Figure 2 se retrouvent en partie dans ces tableaux croisés.

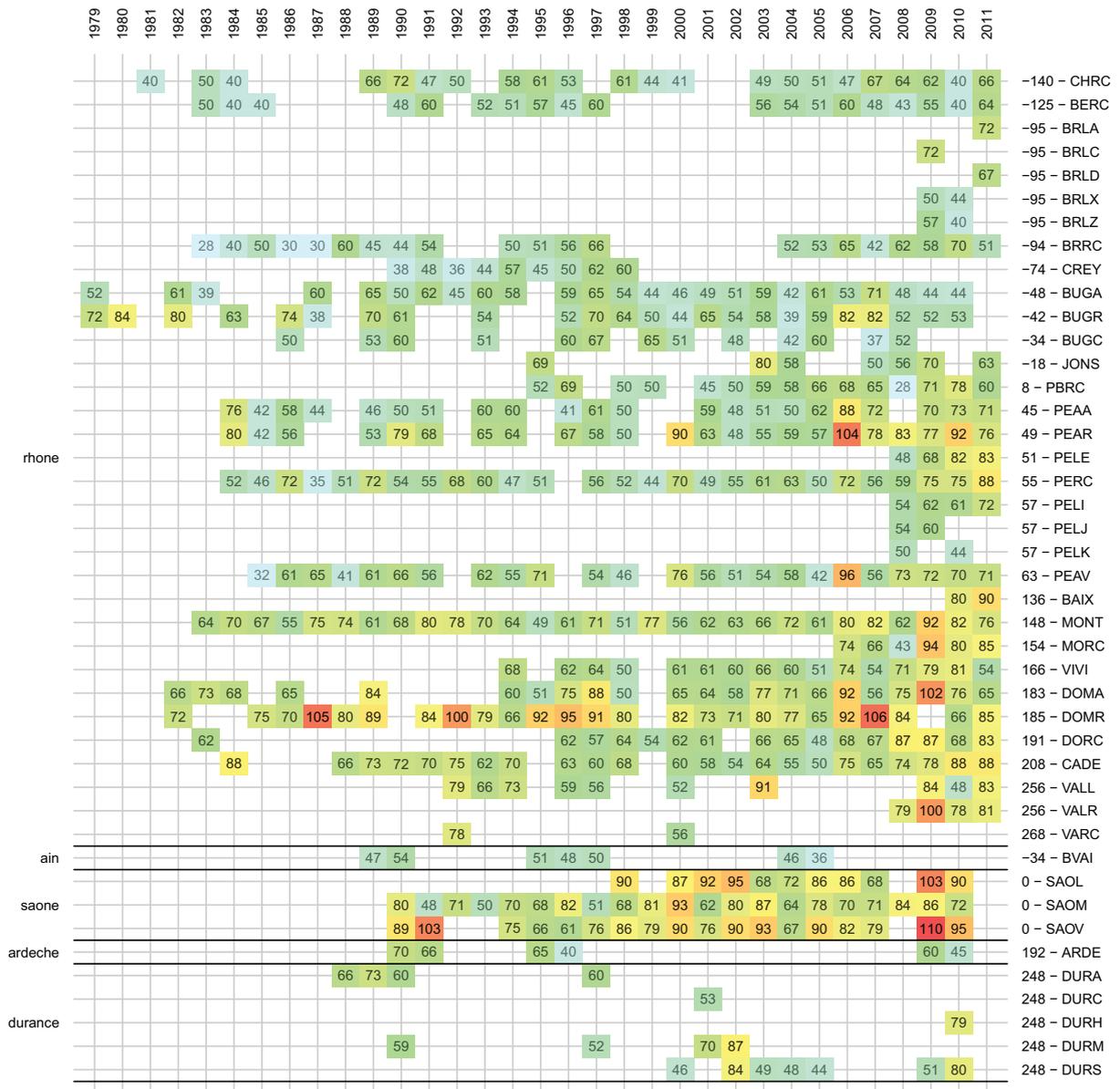


Figure 12 - Représentation synthétique de la discrimination par expertise des tailles de la base de données. Taille médiane des gardons d'âge 0+ en fin d'année, par année et par secteur.

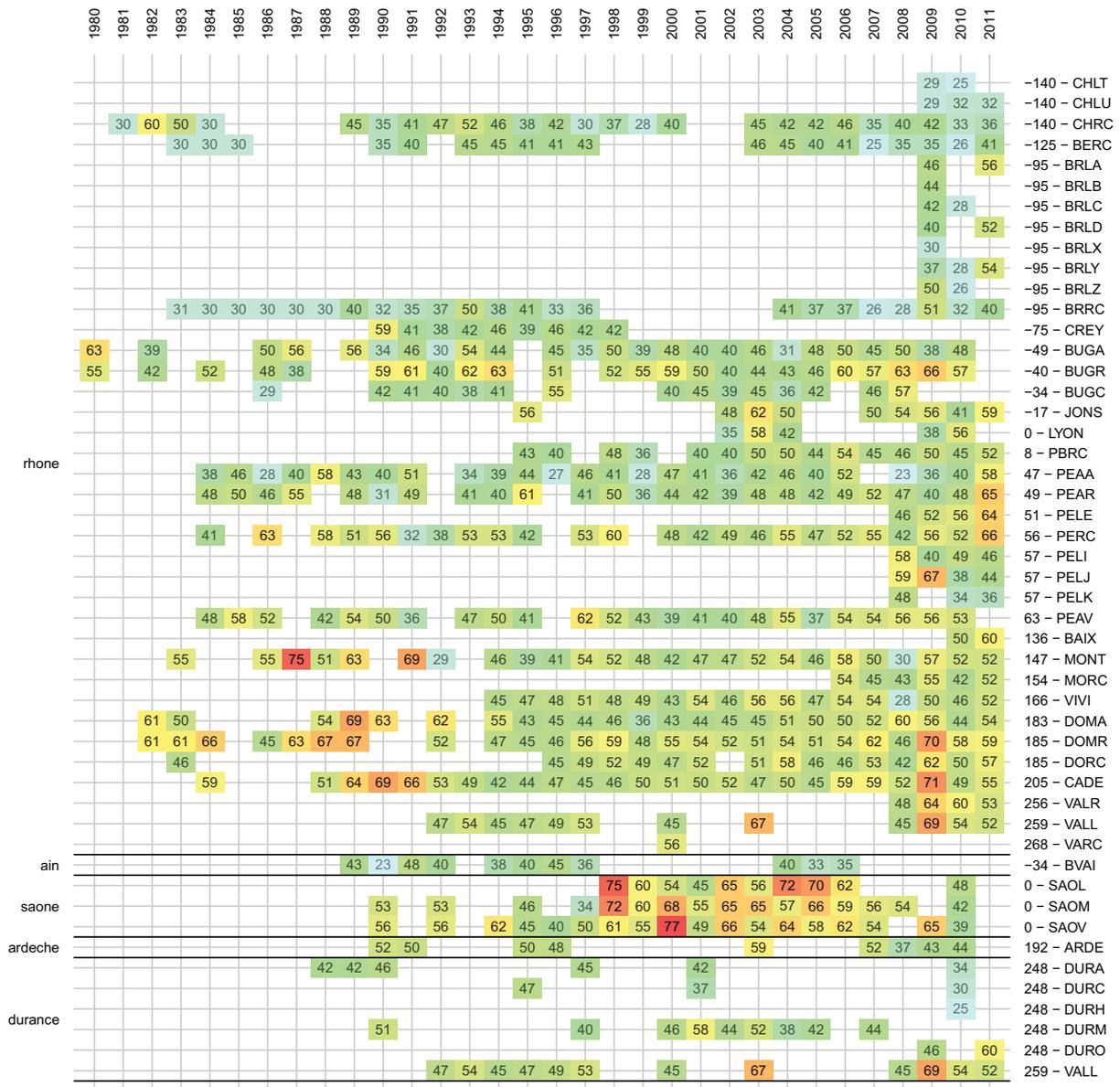


Figure 13 - Représentation synthétique de la discrimination par expertise des tailles de la base de données. Taille médiane des chevaines d'âge 0+ en fin d'année, par année et par secteur.

2.5 La température

Nous avons utilisé des paramètres simples et/ou synthétiques tels que ceux définis dans des travaux antérieurs (LAUTERS & POIREL, 2001a, b; POIREL et al., 2001; CARREL et al., 2003; POIREL, 2004; BOISNEAU et al., 2008; POIREL et al., 2008). Parmi ces paramètres synthétiques, le plus usuel est la somme des degrés-jours au-dessus d'un seuil, calculée pour un intervalle de temps donné.

La sommation thermique, connue sous le nom de degrés-jours de croissance, est utilisée depuis des décennies par les praticiens agricoles et les entomologistes comme outil de prédiction de la croissance et du développement des plantes et des insectes. C'est une donnée couramment manipulée en aquaculture pour caractériser le « temps physiologique » (combinaison du temps calendaire et de la température) nécessaire pour atteindre un stade de développement (éclosion, résorption de vésicule vitelline, ...). NEUHEIMER et TAGGART (2007) recommandent son usage dans l'étude de la croissance des poissons, montrant par de nombreux exemples la performance de cette variable pour simplifier des modèles de croissance des organismes aquatiques ectothermes. Les relations linéaires entre la taille et la somme de degrés-jours (SDJ) supposent d'être dans la gamme normale de tolérance de l'espèce et de ne pas être proche des limites supérieures de la niche thermique de l'espèce (NEUHEIMER et al., 2011).

Les principales difficultés associées à l'usage de cette variable résident dans le choix de la température seuil et de la date fixant le début de la sommation thermique. Les études dans les eaux tempérées ont montré que les seuils de température pour la croissance effective des cyprinidés sont dans un intervalle de 12-15°C (MANN, 1991). La valeur de 12°C a été largement utilisée, notamment pour le gardon (MANN, 1973; MÜLLER & MENG, 1986; GRENOUILLET et al., 2001; DELAIGUE et al., 2007).

L'usage d'un seuil de 12°C s'avère discutable face à l'extrême variabilité des régimes thermiques rencontrée dans l'aire biogéographique de répartition des deux espèces. Les espèces à large aire de distribution sont capables de s'adapter aux conditions thermiques régionales afin d'assurer la viabilité de leur progéniture (KUCHARCZYK et al., 1997).

Pour le gardon, GILLET (1989) cite un seuil de 20°C pour initier la fraie du gardon dans le lac Léman. Cet auteur signale que l'amplitude thermique journalière peut excéder 5°C à cette époque de l'année, et que la ponte peut alors se dérouler à des températures inférieures (valeurs citées comprises entre 14 et 17°C). ALABASTER et LLOYD (1982) indiquent des valeurs habituellement comprises entre 8 et 19.4°C. TISSOT et SOUCHON (2010) donnent des valeurs comprises entre 10 et 18°C, avec des extrêmes de 7 et 22°C. En 1976, les gardons de la Jihlava (PEÑÁZ et al., 1978) ont pondu deux fois, les 9-10 mai (température moyenne de 15.4°C) et 25-27 mai (mêmes conditions thermiques). Dans une étude estonienne, relative aux effets du changement climatique sur la variabilité des dates de ponte du gardon et de la brème commune, NOGES et JÄRVET (2005) indiquent des températures très basses pendant la fraie, avec des médianes de 8.7°C pour les lacs et de 7.8°C pour les rivières (1951-1990). Selon les auteurs, ces mesures ne sont pas représentatives de la réalité thermique des lieux de ponte. Ces travaux portant sur une longue chronique (40 années) ont montré que malgré la hausse des températures printanières, il n'y avait pas d'évolution significative des dates de ponte du gardon. L'espèce pond en moyenne vers le 30 avril (jour 120) dans les cours d'eau et le 5 mai dans les lacs, si ce n'est que la température moyenne des eaux lors de la fraie s'est accrue de 3 à 3.5°C au cours de la période considérée. La moitié des relevés s'établissent sur 16 jours, entre le 26 avril et le 11 mai.

Les pontes du chevaie sont plus tardives. Leur multiplicité étale la reproduction sur une longue période. NUNN et al. (2007) ont signalé des pontes multiples entre la mi-juin et la mi-juillet dans des cours d'eau anglo-saxons. Dans la rivière Stour (Grande-Bretagne), MANN (1976) a observé les pontes fin mai et courant juin. Dans la rivière Jihlava

(République Tchèque), en 1976, PENAZ et al. (1978) ont observé trois pontes successives réparties entre le 10 mai et le 5 juin 1976, avec des températures moyennes de 15.8, 15.4 et 15.1°C. Les auteurs indiquent que la première ponte a été initiée lorsque le premier pic thermique a dépassé 15°C. La ponte s'est interrompue à chaque chute de la température, reprenant dès que ce seuil était atteint de nouveau. Dans la rivière Spree (Allemagne), les chevaines ont migré deux fois de suite sur les mêmes lieux de ponte en 1995 et 1996, respectivement les 21-22 mai et 17-18 juin. En 1995, la première ponte a eu lieu lors d'une hausse rapide de la température, de 13 à 21°C. La seconde s'est déroulée alors que la température montait de 16 à 19°C (FREDRICH et al., 2003).

Sur l'axe rhodanien, nous n'avons pas d'informations quant aux dates de ponte des deux espèces, hormis une estimation faite en 1983 à partir des courbes de croissance des larves et juvéniles de deux annexes fluviales du Haut-Rhône (CARREL, 1986). Plusieurs cohortes ont été identifiées au cours du suivi : cinq pour le gardon, six pour la chevaine. Les pontes ont été estimées entre le 23 avril et le 7 juillet pour le gardon, entre le 7 et le 25 juin pour la chevaine. La première ponte du gardon se serait déroulée avec des températures plutôt basses (9°C) ; celle de la chevaine lors d'une hausse thermique de 16 à 19°C, en accord avec les travaux cités précédemment.

Ces quelques informations nous renseignent indirectement sur la température approximative et la période initiale du développement embryonnaire. Ces deux informations pourraient être une base du calcul des degrés-jours dans la mesure où nous aurions à la fois le seuil et la date de début de la sommation. Mais ces données sont trop limitées au regard de la taille du bassin versant.

En l'absence de ces données, il nous fallait établir des valeurs arbitraires et réalistes vis-à-vis des espèces étudiées et permettant de vérifier notre hypothèse, à savoir qu'il existerait une relation linéaire entre le cumul thermique (SDJ) et taille (LT) en fin d'année des jeunes poissons, alors que la période de croissance saisonnière est terminée. Un ajustement logistique sur l'ensemble des pêches disponibles montre que la croissance initialement rapide des juvéniles 0+ diminue progressivement en fin de saison chaude, puis se stabilise vers une valeur maximale entre l'automne et le printemps suivant (Figure 14). Nous utilisons des pêches réalisées entre la fin août et la fin de l'année pour tester cette hypothèse en considérant que la taille maximale des individus 0+ est atteinte alors que la courbe thermique annuelle est décroissante (Figure 15). La majorité des données utilisées proviennent de pêches effectuées en septembre (Figure 16).

La taille des juvéniles en fin d'année est intimement liée au cumul d'énergie reçue au cours de la période de croissance (MANN, 1991). La durée réelle de cette période nous est inconnue, et elle est variable (1) d'une année à l'autre selon la précocité et/ou la tardiveté thermique, et (2) selon la localisation spatiale des captures sur le gradient latitudinal et le type de milieu.

Pour les deux espèces, nous avons défini un seuil thermique inférieur pour le calcul de degrés-jours (DJ), et deux dates fixes entre lesquelles nous avons calculé le cumul des températures (SDJ).

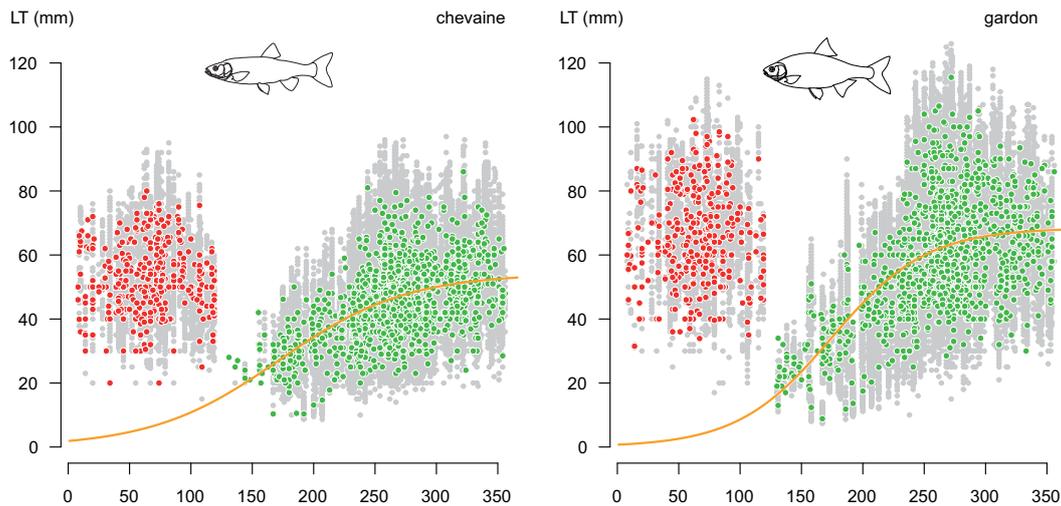


Figure 14 - Taille médiane des chevaines et des gardons juvéniles d'âge 0+ en fonction du jour de pêche. Tous les individus pêchés depuis le début de la chronique sont représentés (points gris). En rouge et vert, les tailles des juvéniles de chaque pêche. Le modèle logistique (courbe orange) a été ajusté sur les tailles médianes des pêches de l'année civile en cours (points verts).

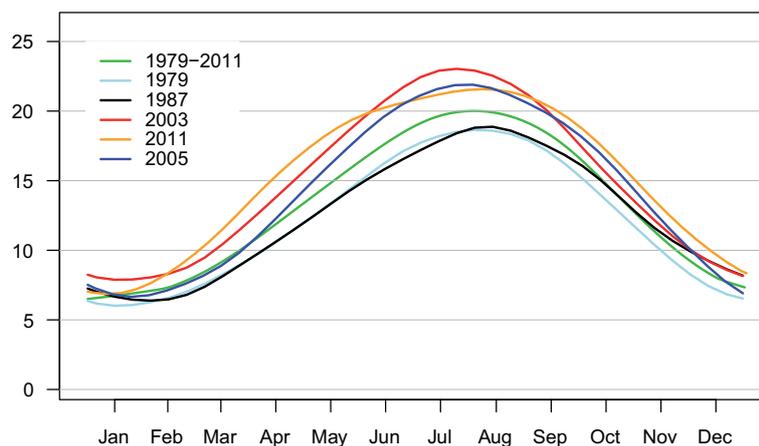


Figure 15 - Profils thermiques du Rhône à l'amont du CNPE du Tricastin. Ensemble de la chronique et quelques années remarquables. Les lissages des valeurs moyennes journalières ont été obtenus par une régression locale (loess) sur 73 jours.

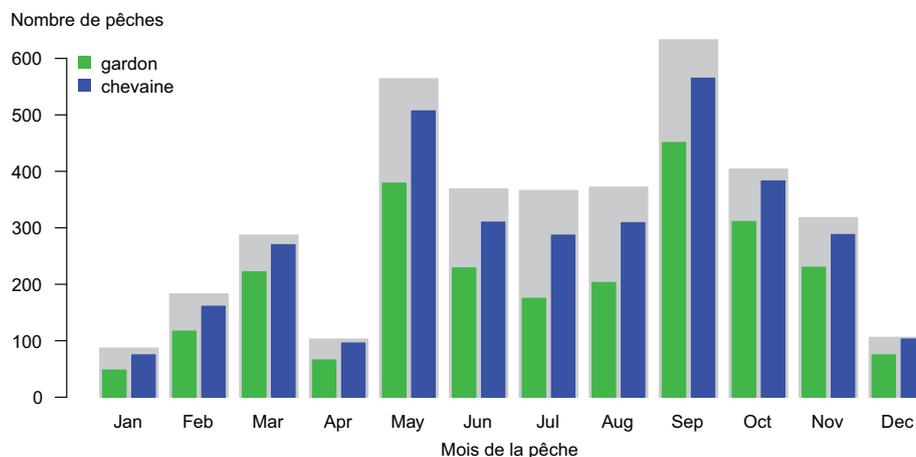


Figure 16 - Nombre total de pêches par mois dans le jeu de données (en gris). Nombre de pêches contenant des gardons (en vert) et des chevaines (en bleu).

2.5.1 Les seuils thermiques

Face à la variabilité des températures de ponte et de croissance des cyprinidés, leur capacité d'adaptation au contexte thermique régional et à des périodes favorables de courte durée (PIVNICKA, 1983; MILLS, 1988; NOGES & JARVET, 2005), le seuil de 12°C a été considéré comme trop élevé. Nous ne pouvons pas exclure la possibilité de pontes très précoces suite à des conditions favorables conjoncturelles, et ignorer l'apport énergétique par le choix d'une valeur seuil élevée.

Nous avons donc défini une valeur seuil nettement plus basse (8.8°C), correspondant à la moyenne des valeurs journalières à l'équinoxe du printemps (20 mars), et calculée sur l'ensemble des chroniques thermiques à notre disposition (données eDF-DTG). Ce seuil a été appliqué dans le calcul des SDJ pour les deux espèces bien qu'il puisse être considéré comme bas pour le chevaine.

Nous n'avons pas fixé de seuil limite supérieur, considérant que les juvéniles des espèces étudiés ne se trouvaient pas en situation de stress thermique au plus fort de l'été (ALABASTER & LLOYD, 1982).

2.5.2 Les dates pour le calcul des SDJ

Le calcul des SDJ a été réalisé depuis l'équinoxe de printemps (20 mars), jusqu'au jour moyen du maximum thermique³ (Cmax) calculé pour le bassin versant du Rhône (date du 8 août).

La période de croissance est donc définie entre l'équinoxe de printemps et le 8 août, soit entre les jours juliens 80 et 220.

2.5.3 Le calcul des SDJ.

Les SDJ ont été calculées par année-secteur. Chaque secteur regroupe un ensemble de stations de pêches supposées avoir le même régime thermique ; régime caractérisé par la station d'enregistrement de la température la plus proche.

La SDJ est calculée par :

$$\sum_{j=80}^{220} (T_{syj} - 8,8^{\circ}C)$$

Avec j jour julien compris entre 80 et 220 de l'année y dans le secteur s où la température T est supérieure au seuil de 8.8°C (Figure 17).

Une valeur unique de SDJ est attribuée à toutes les pêches d'un même secteur pour une même année (Figure 17).

³ Les courbes de températures des chroniques complètes ont été lissées par régression de Lowess sur 73 jours. Le 8 août correspond à la moyenne du jour du maximum thermique (Cmax) de toutes ces courbes lissées.

Température (°C) de l'année 2011 à Tricastin amont

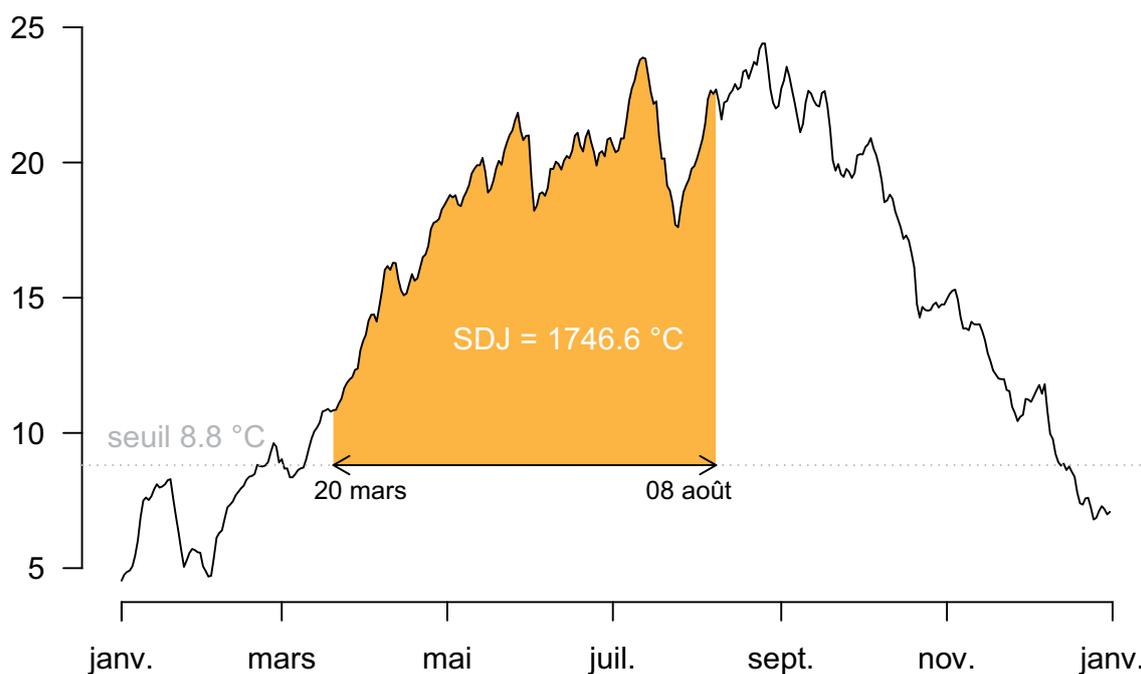


Figure 17 - Illustration du calcul de la sommation thermique (SDJ) en 2011 à partir des relevés de la station eDF-DTG située à l'amont du CNPE du Tricastin. La courbe représente les moyennes journalières des températures. La SDJ est égale au cumul des écarts thermiques par rapport au seuil inférieur 8.8°C (température moyenne du Rhône à l'équinoxe de mars) entre les jours juliens 80 et 220.

2.6 L'hydrologie

2.6.1 Généralités

L'influence des débits sur la croissance des juvéniles est difficile à évaluer dans la mesure où le débit et la température de l'eau sont des paramètres intimement liés et négativement corrélés à certaines périodes de l'année. Au cours de la période de reproduction et de croissance des poissons, des débits forts associés à la fonte des neiges et/ou des événements pluvieux se traduisent par des températures basses, et inversement des débits faibles résultant d'un déficit hydrique et d'un ensoleillement important favorisent la hausse des températures.

L'hydrologie a des effets essentiellement indirects sur la taille des jeunes poissons en augmentant ou en réduisant le volume des nurseries, des espaces lenticules ou stagnants propices à la croissance des jeunes poissons (GARNER, 1996), et en modifiant les teneurs de matières en suspension donc de la turbidité des eaux. La transparence permet le bon développement des macrophytes et des herbiers qui servent d'abris et de zones préférentielles de productions phyto- et zooplanctoniques (GRENOUILLET et al., 2000; GRENOUILLET et al., 2001). Elle facilite la sélectivité et la capturabilité des proies par les poissons.

La variabilité hydrologique est à l'origine d'une dispersion plus grande des individus en augmentant la dérive accidentelle (PAVLOV et al., 2008). Des charges minérales élevées augmentent la mortalité des jeunes stades (REICHARD et al., 2002; REICHARD & JURAJDA, 2004). Les chasses sédimentaires peuvent être à l'origine d'une élimination totale des cohortes de juvéniles de l'année (ROUX, 1984).

Le débit est le facteur abiotique majeur qui contrôle le succès du recrutement d'une classe d'âge (Year-Class Strength, YCS) en agissant directement sur la mortalité par une action mécanique (CATTANEO et al., 2001), ou indirectement via une réduction de la croissance par des températures plus basses, une augmentation des dépenses énergétiques ou une disponibilité alimentaire réduite (NUNN et al., 2003).

2.6.2 Choix d'une métrique pour la période de croissance

L'hydrologie est vraisemblablement le facteur abiotique le plus complexe à appréhender, que les hydrologues analysent par un grand nombre de descripteurs plus ou moins redondants (OLDEN & POFF, 2003) et généralement peu satisfaisants pour nos préoccupations.

NUNN et al. (2003) ont opté pour une variable synthétique sensiblement équivalente au SDJ en calculant un cumul de débits journaliers (débit-jour) au-dessus d'un débit de base pour la période d'avril à septembre inclus. Le débit seuil correspond au débit moyen journalier calculé pour chaque mois sur 15 années.

Nous avons opté pour une démarche similaire. Afin d'éliminer des effets spatiaux liés à l'augmentation progressive des débits de l'amont vers l'aval, le descripteur est basé sur les centiles des débits moyens journaliers classés de chaque station limnigraphique. Il a été calculé pour la période allant du 20 mars au 8 août, en utilisant les chroniques complètes de débits disponibles dans la banque HYDRO⁴.

⁴ Nous avons utilisé les relevés des stations limnigraphiques suivantes : Rhône (Pougny, Lagnieu, Perrache, Ternay, Viviers, Beaucaire), Saône (Couzon, Macon), Ain (Chazey). Nous avons estimé les débits du Rhône à Caderousse en sommant les débits du fleuve à Viviers et ceux de l'Ardèche à Sauze.

L'indice de débit est calculé par année et par station limnigraphique. Chaque jour, le débit moyen est remplacé par le score centré-réduit du centile auquel il appartient. La même opération est réalisée sur l'ensemble des jours de la période, puis les scores journaliers sont sommés pour obtenir l'indice de débit caractéristique de l'année et de la station (Figure 18).

Un indice positif indique des débits plutôt élevés entre le 20 mars et le 8 août par rapport à l'ensemble de la chronique et inversement pour un indice négatif. L'hypothèse sous-jacente est qu'une période caractérisée par de forts débits serait défavorable à la croissance des juvéniles et qu'une période d'étiage serait plutôt favorable.

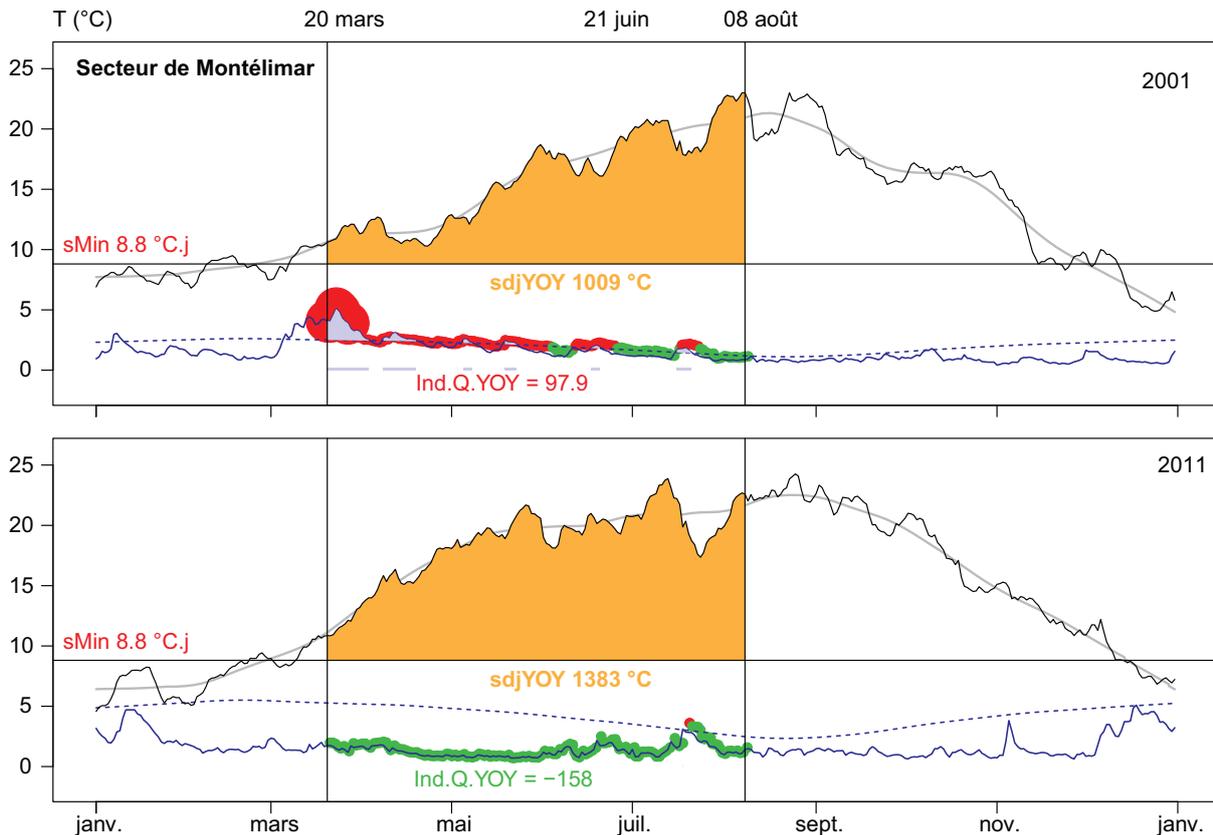


Figure 18 - Visualisation du calcul de l'indice hydrologique, descripteur de la période de croissance. Représentation de deux années contrastées au cours de la dernière décennie (2001 et 2011). En orange, la somme des degrés-jours (SDJ) pour la période de croissance de l'équinoxe de printemps à la date du maximum thermique moyen sur le Rhône. Le débit moyen journalier du Rhône à Viviers est représenté dans la partie inférieure de chaque cadre (tracé bleu) ainsi que le tracé du lissage du Quantile 90% (pointillé). En rouge (+) et en vert (-), les valeurs journalières de l'indice de débit dont le cumul donne l'indice global de la période considérée. Un tracé et une trame bleu clair indique le dépassement du quantile (cas de l'année 2001).

2.6.3 Les caractéristiques stationnelles

Afin d'évaluer l'influence des caractéristiques stationnelles sur la taille des jeunes poissons, mise en évidence par GRENOUILLET et al. (2001), nous avons proposé des métriques descriptives des stations. Ces métriques ont été construites avec deux contraintes : (1) représenter au mieux la gamme de milieux existants dans le jeu de données, (2) être les plus simples et objectives possible. Le Tableau X présente les métriques utilisées.

Tableau X - Métriques qualitatives utilisées pour caractériser les stations.

Situation	Localisation géographique par tronçons
Affluents	Situation par rapport aux principaux affluents
Vitesse	Indice global de vitesse du courant, de nulle à faible (0) à forte (3)
Macrophytes	Emprise moyenne des macrophytes, de nulle (0) à forte(3)
Type de berge	bétonnée, enrochement, enrochement + naturel(faible, fort, mixte), naturel (faible, fort, mixte), naturel à pente faible, naturel à pente forte
Rejets thermiques	0 - absence, 1 - dans le panache thermique, 2 – dans le rejet
Largeur du chenal	0 à 50 m, 50-150, 150-300, > à 300 m
Annexes fluviales	Niveau d'isolement par rapport au chenal principal (0, 1, 2)
Complexité hydraulique	Trois niveaux croissants

Les métriques des stations de pêche ont été renseignées par les collaborateurs du projet, en demandant un avis d'expert. Certains descripteurs n'ont pas été utilisés. D'autre part, le descripteur "type de berge" demanderait à être amélioré, car il s'est avéré difficile à renseigner et à interpréter.

Les tests utilisés sont non paramétriques : le test de Kruskal-Wallis pour l'égalité des moyennes entre les groupes, et le test post-hoc Pairwise Wilcoxon rank sum test pour l'égalité des moyennes des groupes pris deux à deux, avec correction de Bonferroni pour les tests multiples dans le second cas.

3 Résultats et discussion

3.1 Le rôle de la température

Nous rappelons deux questions initiales de ce travail. Existe-t-il une relation générale associant la taille automnale des juvéniles et la température au cours de leur croissance printanière et/ou estivale ? Peut-t-on considérer que les tailles des jeunes de l'année ont sensiblement été modifiées par les évolutions thermiques actuelles ?

3.1.1 Une relation linéaire simple

Malgré une dispersion importante des tailles médianes, il est possible d'établir une relation linéaire simple et positive entre la taille des juvéniles d'âge 0+ en fin d'été et la somme des degrés-jours au cours de la période de croissance des jeunes poissons (Figure 19), totalement applicable à l'échelle d'un grand bassin versant.

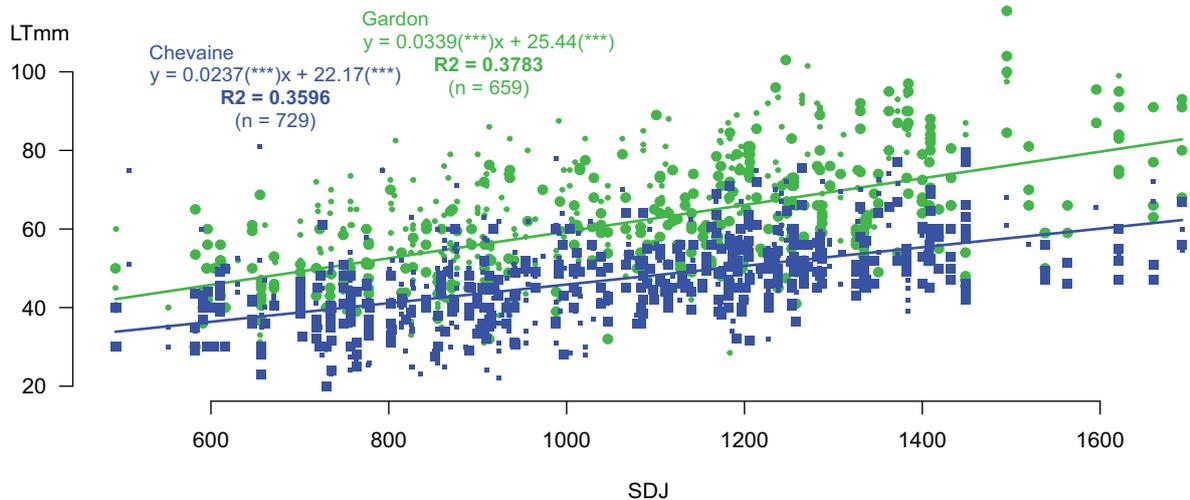


Figure 19 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le gardon (vert) et le chevaïne (bleu). La taille des points correspond à leur poids dans le modèle ($\times 0.5$ lorsque le nombre d'individus dans la pêche est inférieur à 30, $\times 1$ lorsqu'il est supérieur à 30). Les pêches des stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.

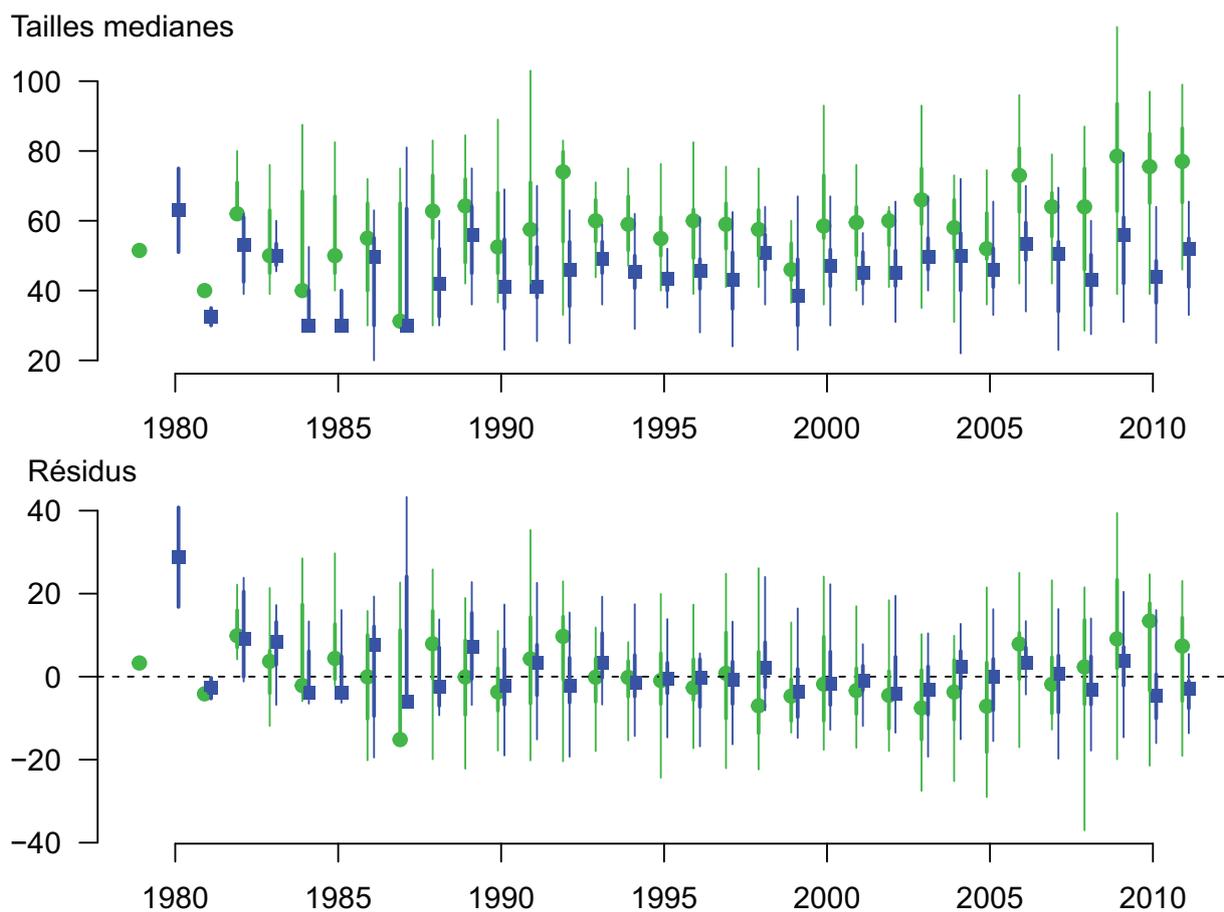


Figure 20 - Tailles médianes (haut) et résidus de la régression des tailles médianes sur la SDJ (bas) pour le gardon (vert) et le chevaïne (bleu) par années. Les points indiquent la médiane des tailles médianes par année; les traits fins indiquent les espaces inter-quantiles à 95%; les traits épais donnent les espaces inter-quantiles à 50%.

La SDJ explique à elle seule 37% de la variabilité des LT médianes en fin d'année pour le gardon et 35% pour le chevaïne, avec une pente significativement différente de 0. Pour le gardon, la taille médiane en fin d'année est plus grande de 0,03 mm pour chaque degré-jour cumulé supplémentaire, et de 0,02 mm pour le chevaïne.

Dans les rubriques précédentes, nous avons énuméré un ensemble de problèmes en partie explicatifs des résidus de la régression.

3.1.2 Les rejets thermiques

Les stations situées au niveau des rejets thermiques des CNPE fonctionnant en circuit ouvert présentent des spécificités, au-delà d'une simple augmentation de la température. A ce niveau, la température des eaux est élevée (+10°C) et les observations biologiques sont d'un autre ordre en regard de situations normales (Figure 21). En effet, de nombreuses espèces évitent ces secteurs car les températures sont au-dessus des limites tolérables (HADDERINGH, 1975). Chez les cyprinidés, relativement tolérants vis-à-vis des températures élevées, la croissance des juvéniles de gardon et de brème pourrait s'interrompre au-delà de 28°C (ALABASTER & LLOYD, 1982) mais le cycle saisonnier thermique étant très décalé vers les hautes valeurs par rapport à une situation amont, la durée de la période de croissance est notablement étendue. La photopériode redevient alors le facteur de contrôle (KARAS & NEUMAN, 1981). Cet effet « positif » doit être modéré quand les autres effets physiologiques sont considérés (LUKSIENE & SANDSTRÖM, 1994; LUKSIENE & SVEDÄNG, 1997).

La relation linéaire précédente a été établie en ne prenant pas en compte les stations singulières situées dans les panaches thermiques. MATTHEEUWS et al. (1981) ont montré que les gardons de la Meuse soumis aux rejets thermiques de la centrale de Tihange auraient une reproduction avancée de 3 semaines. Cette précocité de la reproduction peut expliquer aisément une taille plus grande dans des eaux chaudes si les ressources alimentaires ne sont pas limitées. Cette croissance rapide est largement mise à profit dans la pisciculture (PEÑÁZ, 1980; PONCIN et al., 1989).

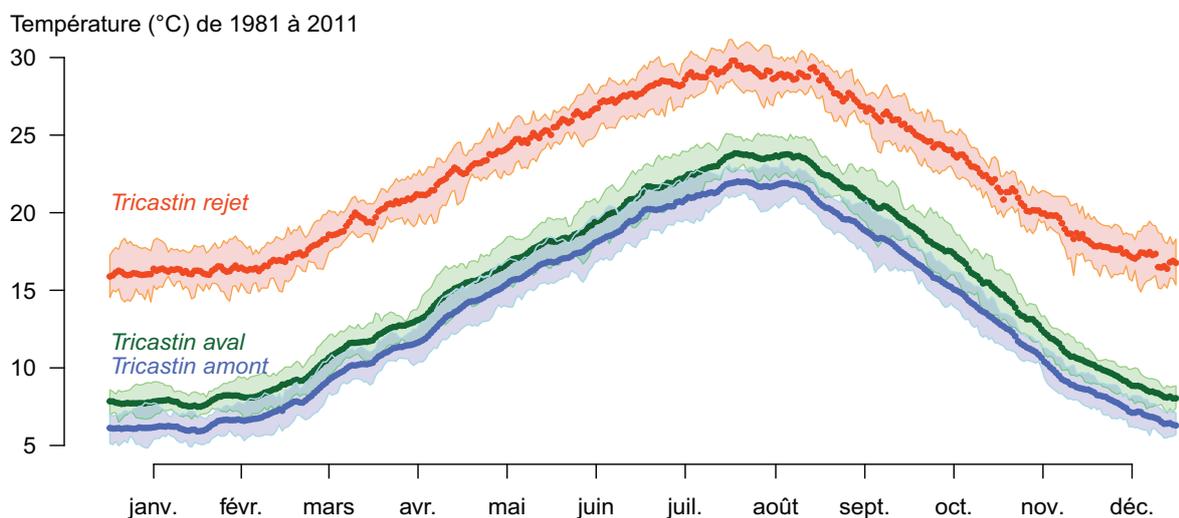


Figure 21 - Cycle thermique annuel de la température des eaux à l'amont, au rejet du CNPE du Tricastin et à l'aval de l'usine hydroélectrique de Bollène. Moyennes journalières (points) et quantiles journaliers à 50% entre 1981 et 2011.

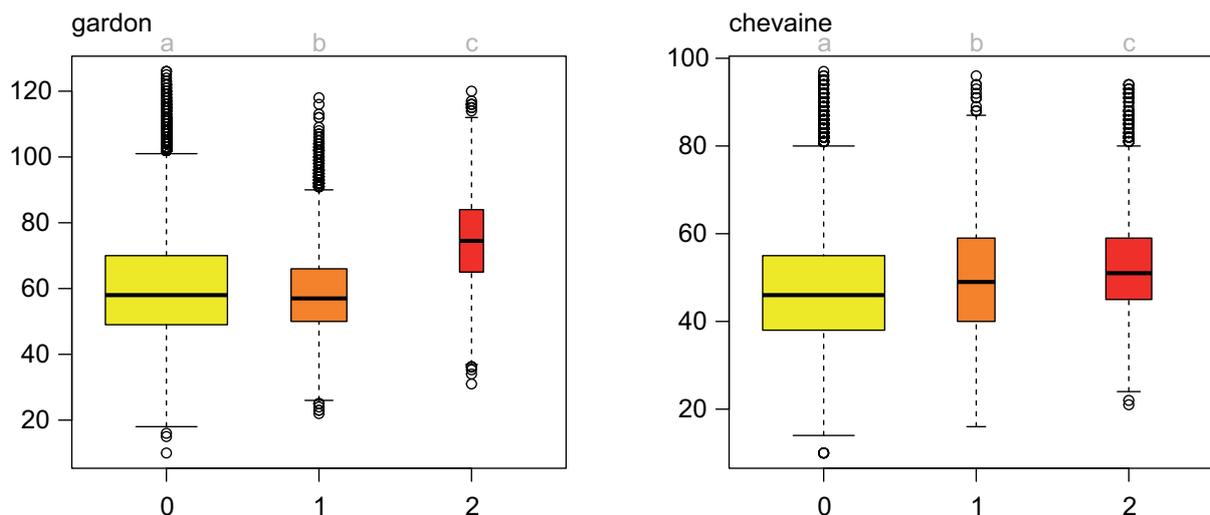


Figure 22 - Taille moyenne des gardons et des chevaines d'âge 0+ en fonction de la localisation de la station par rapport aux rejets thermiques. 0 - station sans influence d'un rejet, 1 - station située dans le panache thermique en aval d'un rejet, 3 - station située au niveau même du rejet.

Bien que nous ayons à notre disposition la température du rejet de Tricastin, cette valeur n'est guère représentative du panache thermique dans lequel circulent les poissons. Par ailleurs, bien que ces deux poissons eurythermes puissent momentanément tolérer ces températures extrêmes (ALABASTER & LLOYD, 1982), ils ne séjournent pas en permanence dans les eaux réchauffées comme le montrent les premiers résultats des expérimentations de nos collègues de Irstea Lyon (BERGE et al., 2011).

Les tailles des gardons et chevaines d'âge 0+ sont significativement différentes selon les trois modalités (Figure 22). La différence de taille est cependant plus marquée chez le gardon.

Cette différence de taille peut être associée à la durée de croissance « potentielle » plus longue dans les zones réchauffées, et vraisemblablement une productivité localement plus importante de la flore et de la faune benthique (ROGER et al., 1991).

Il est important de prendre en compte les déplacements possibles des juvéniles. En effet, si la température devient trop élevée pour leur survie, ils ont la possibilité de s'éloigner du rejet thermique, et de retrouver des conditions plus favorables. L'existence des déplacements des juvéniles entre les zones réchauffées et non réchauffées ont pu être mises en évidence en milieu lacustre (McINERNY & DEGAN, 1991).

Les pêches faites à Tricastin montrent que la taille globalement plus grande des juvéniles n'est toutefois pas en accord avec le cumul thermique enregistré dans les eaux du rejet. Nous avons calculé des SDJ à partir des données thermiques du rejet, puis à partir d'une température moyenne entre l'amont et le rejet afin d'évaluer la pertinence de la relation initiale vis-à-vis de situations extrêmes. L'exercice a été fait pour les deux espèces et il montre la robustesse de cette relation linéaire (Figure 23, Figure 24), mais aussi la nécessité d'avoir des relevés thermiques « au plus près » des habitats thermiques fréquentés par les poissons.

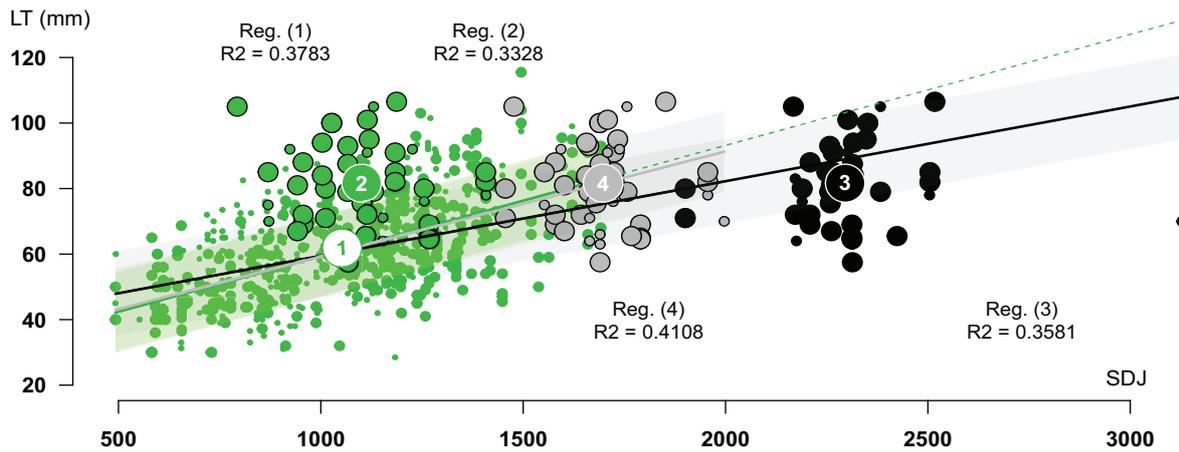


Figure 23 - Régression de la LT médiane des gardons de chaque pêche sur la SDJ, et projection en données supplémentaires des pêches faites au rejet et à l'aval immédiat du CNPE du Tricastin. En vert (1), les pêches réalisées sur l'ensemble du Rhône (rejets exclus) ; en vert cerclé de noir (2) celles réalisées dans le panache thermique du CNPE avec la SDJ calculée sur la thermie amont du site ; en noir (3) les mêmes pêches avec la SDJ calculée avec la thermie du rejet ; en gris cerclé de noir (4) la SDJ est calculée sur la thermie moyenne entre l'amont et le rejet. Les régressions 2, 3 et 4 contiennent donc toutes les pêches du Rhône y compris les pêches du panache thermique du CNPE du Tricastin. Seules les températures utilisées pour le calcul de la SDJ changent entre ces régressions.

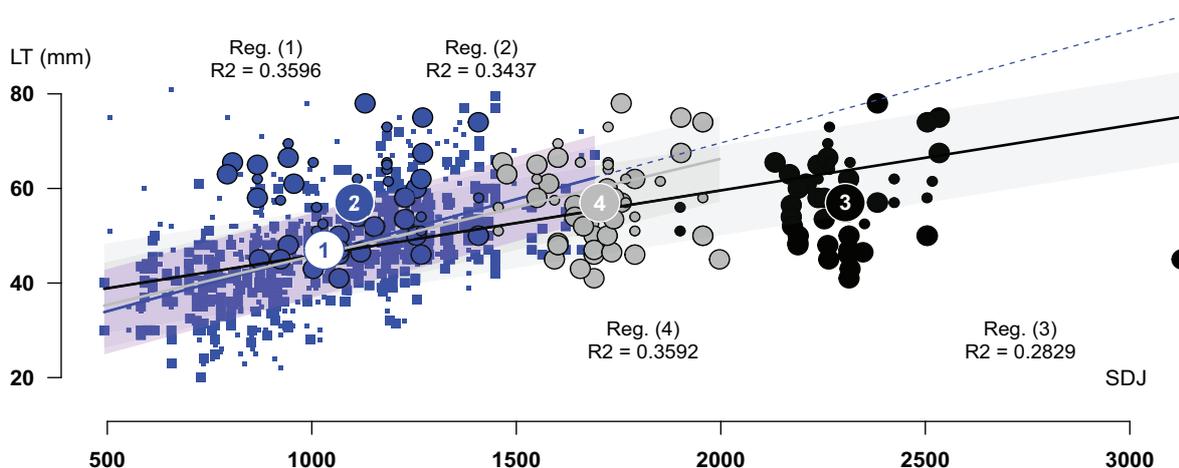


Figure 24 - Régression de la LT médiane des chevaines de chaque pêche sur la SDJ, et projection en données supplémentaires des pêches faites au rejet et à l'aval immédiat du CNPE du Tricastin. En vert (1), les pêches réalisées sur l'ensemble du Rhône (rejets exclus) ; en vert cerclé de noir (2) celles réalisées dans le panache thermique du CNPE avec la SDJ calculée sur la thermie amont du site ; en noir (3) les mêmes pêches avec la SDJ calculée avec la thermie du rejet ; en gris cerclé de noir (4) la SDJ est calculée sur la thermie moyenne entre l'amont et le rejet. Les régressions 2, 3 et 4 contiennent donc toutes les pêches du Rhône y compris les pêches du panache thermique du CNPE du Tricastin. Seules les températures utilisées pour le calcul de la SDJ changent entre ces régressions.

3.1.3 Des évolutions temporelles marquées

Il importe de rappeler que les évolutions de la thermie du Rhône consécutives au changement climatique se traduisent par des températures estivales de plus en plus élevées et une accélération de la hausse thermique printanière. La prolongation de la saison chaude vers la fin de l'automne est un phénomène plus récent. Ces changements peuvent être traduits simplement par le suivi inter-annuel de la date de passage d'un seuil thermique, par exemple 12°C (Figure 25).

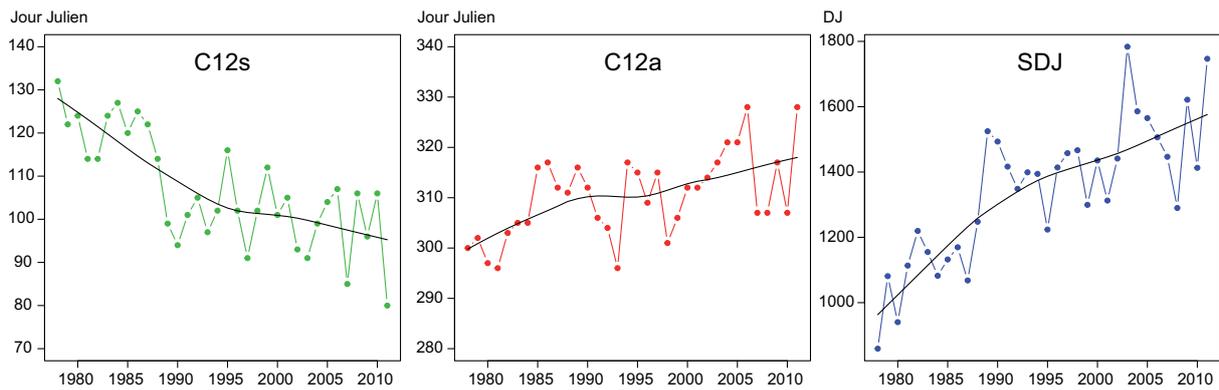


Figure 25 – Date (jour Julien) de passage du seuil de 12°C à Cruas amont au cours de la chronique. Le C12s (vert) est le premier jour de l’année où la courbe de température, lissée par régression locale (loess sur 73 jours), est au-dessus de 12°C. Le C12a (rouge) est le dernier. Evolution de la somme des degrés-jours (SDJ) sur le même secteur.

Lorsque les années de relevés sont projetées sur la relation linéaire, il s’avère que la taille des jeunes poissons a globalement suivi la hausse thermique (Figure 26) de la dernière décennie.

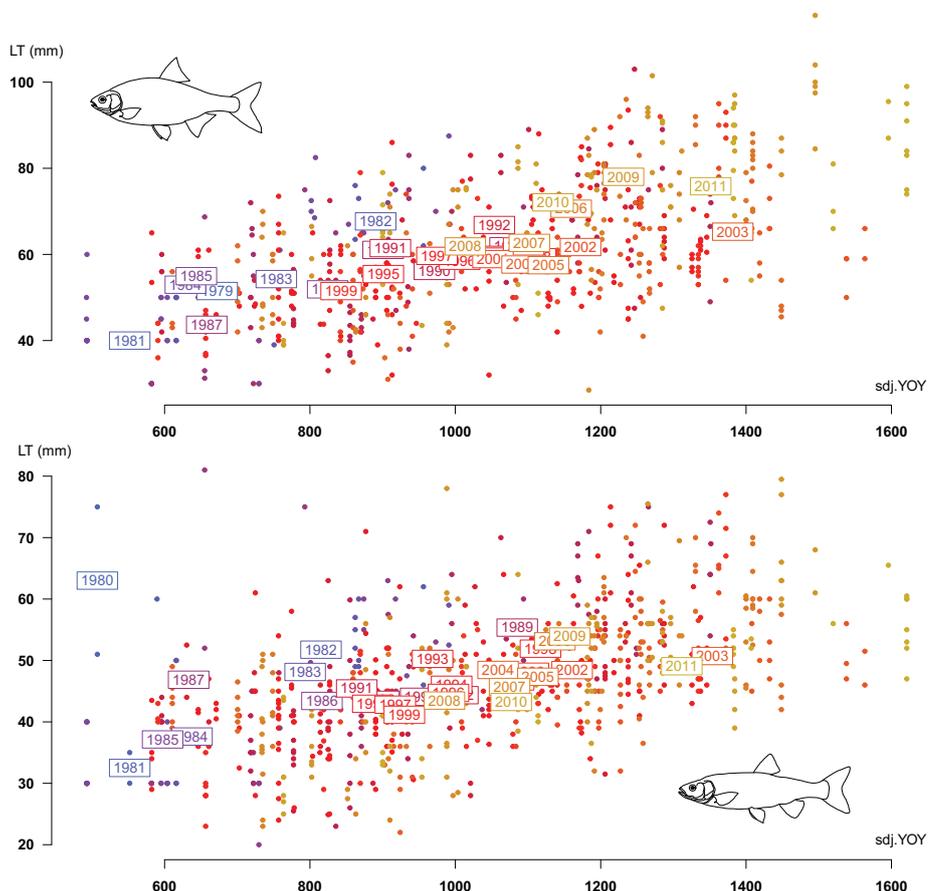


Figure 26 - Identification des années de pêche dans le nuage de points des LT médianes sur la SDJ pour le gardon (haut) et le chevaine (bas). Utilisation d’un dégradé de couleur allant du bleu pour les plus anciennes vers le jaune pour les plus récentes, en passant par le rouge.

Cependant, l’évolution croissante de la taille ne prend réellement effet qu’à partir des années 1990 (Figure 27, Figure 28).

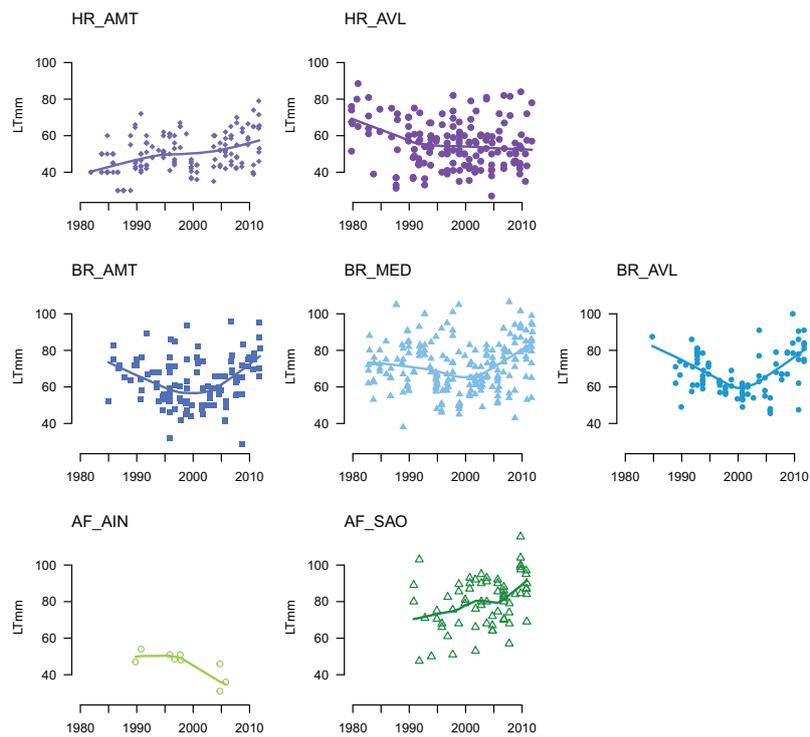


Figure 27 - Evolution sectorielle de la taille médiane des gardons au cours du temps.

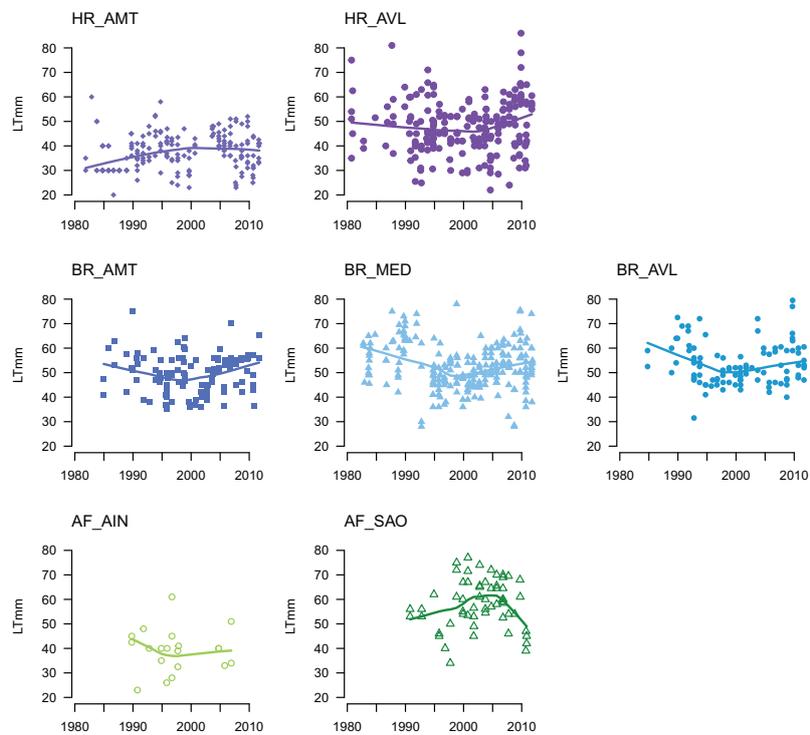


Figure 28 - Evolution sectorielle de la taille médiane des chevaines au cours du temps.

3.2 Influence du débit

La régression de la taille médiane sur l'indice de débit (Figure 30) explique 12% de la variabilité pour le gardon et 8% pour le chevaîne. Toutefois cet indice est très corrélé à la SDJ (Figure 29). Lorsqu'ils sont tous deux intégrés en covariables pour expliquer la LT médiane, la pente associée à l'indice de débit n'est plus significative.

La corrélation négative associant l'indice de débit et la somme des degrés-jours montre parfaitement l'influence du débit sur la température de l'eau pendant la période de printanière.

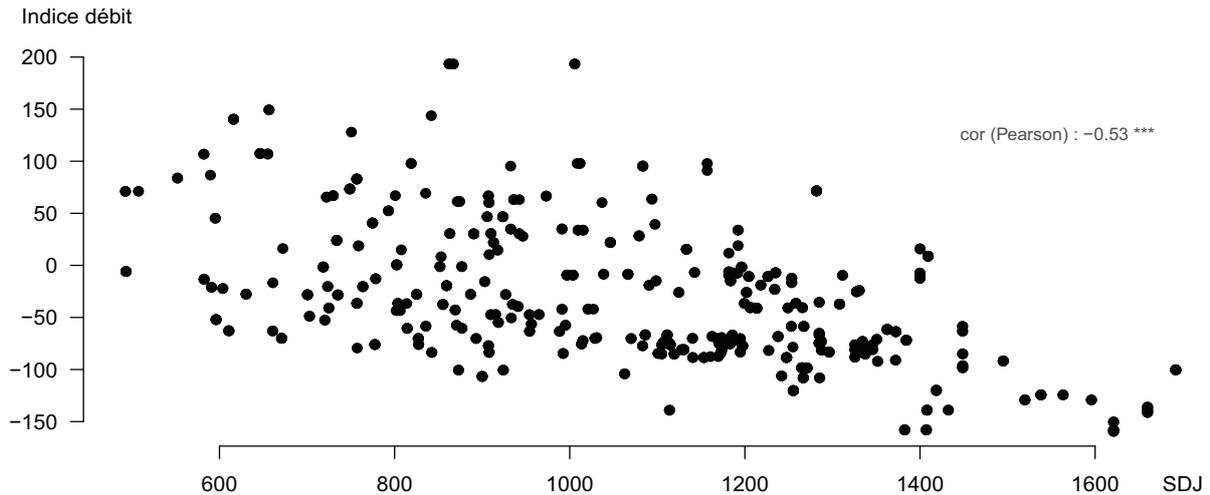


Figure 29 - Corrélation entre la SDJ et l'indice de débit pour la période de croissance. Le coefficient de corrélation de Pearson (0.55) est hautement significatif (avec une p-value inférieure à 0,001).

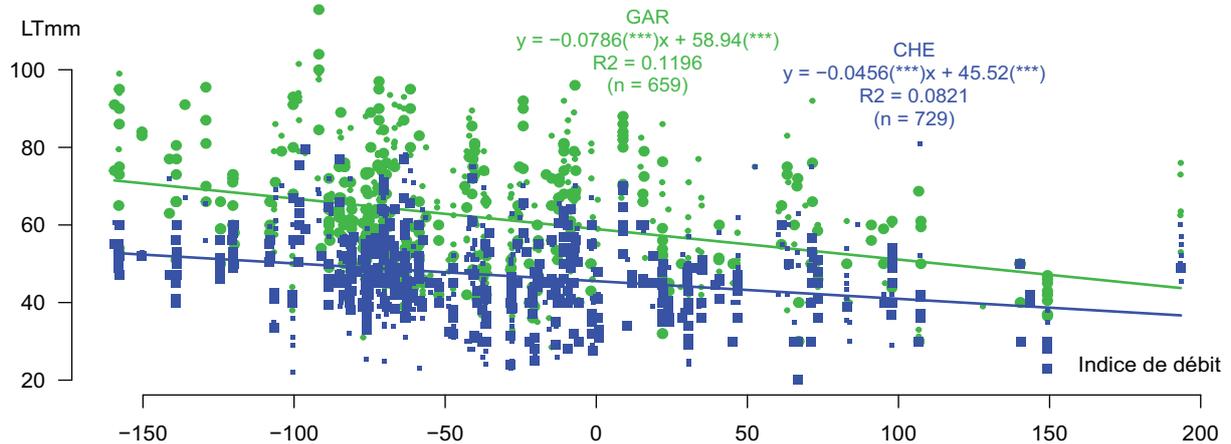


Figure 30 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur l'indice de débit pour le gardon (vert) et le chevaîne (bleu). La taille des points correspond à leur poids dans le modèle ($\times 0.5$ lorsque le nombre d'individus dans la pêche est inférieur à 30 et $\times 1$ lorsqu'il est supérieur à 30). Les pêches faites à proximité des rejets de centrales ont été retirés des analyses.

3.3 Le gradient amont-aval

A l'échelle du Rhône, dont le bassin versant est nettement orienté nord-sud, le gradient spatial est marqué. Les jeunes gardons et chevaines sont petits dans les stations du Haut-Rhône et de l'Ain. Leur taille est intermédiaire dans les stations du tiers amont du Bas-Rhône, tandis que les plus grands sont retrouvés en aval. Mais les poissons 0+ de la Saône se démarquent de tous les autres ensembles géographiques par leur grande taille, et une relative similarité avec les stations du Bas-Rhône aval, voire les rejets thermiques. Dans une étude portant sur la taille du chevaîne dans le gradient longitudinal et latitudinal de l'axe Saône-Rhône, TEDESCO et al., (2009) ont montré l'accroissement de la taille sur ce gradient sans avoir cependant la donnée thermique nécessaire pour faire la part des effets respectifs liés à la température et à l'habitat.

Nos données couvrent une échelle spatiale et temporelle beaucoup plus importante sur laquelle la structuration fluviale par grands tronçons est bien définie (Figure 31).

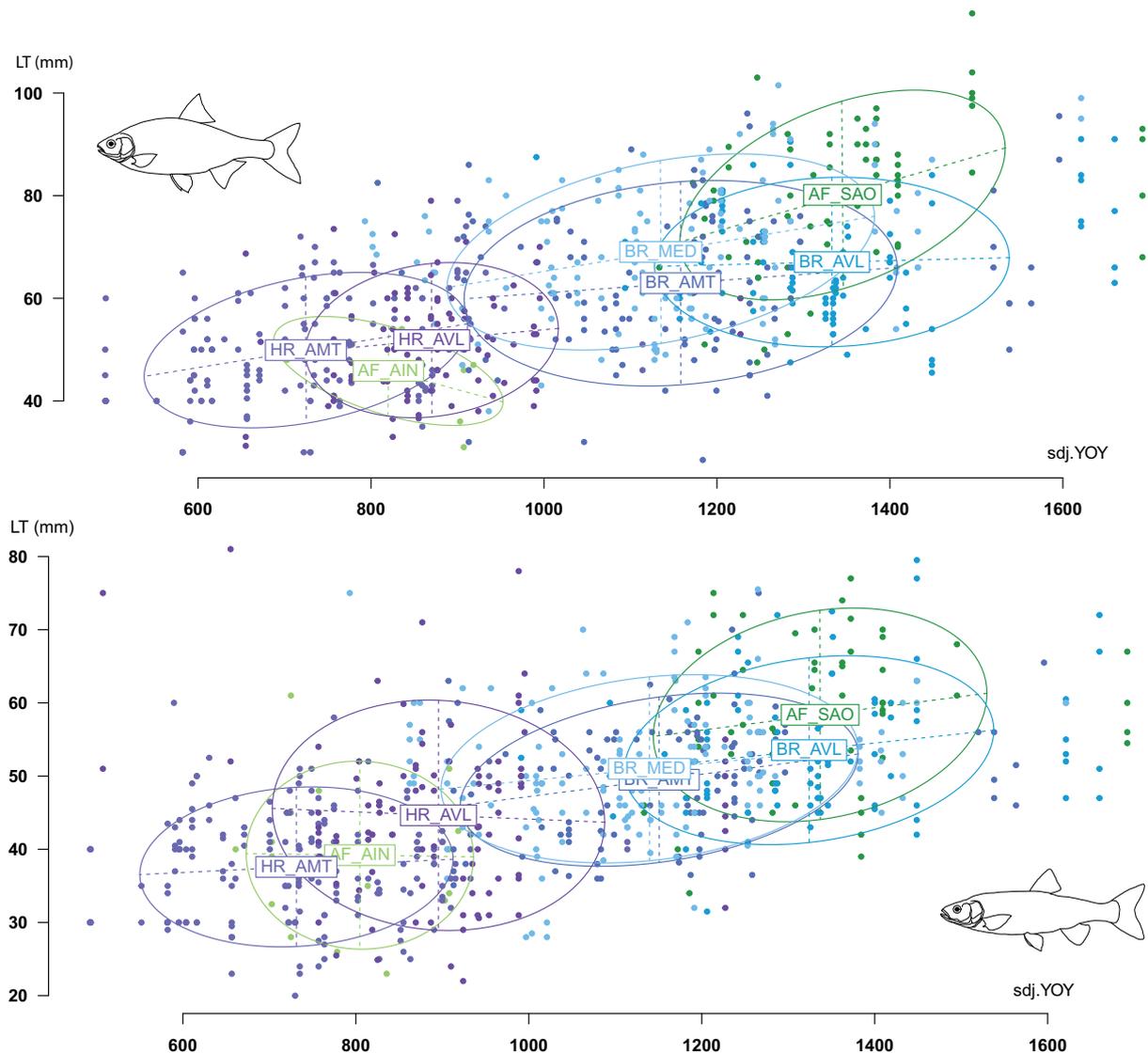


Figure 31 - Identification des tronçons fluviaux dans le nuage de points des LT médianes sur la SDJ pour le gardon (haut) et le chevaîne (bas). Haut-Rhône (HR_AMT & HR_AVL), Bas-Rhône (BR_AMT, BR_MED & BR_AVL), Saône (AF_SAO) et Ain (AF_AIN).

3.4 Le fleuve aménagé

L'usage par défaut de valeurs thermiques identiques pour caractériser plusieurs stations réparties dans des entités fluviales contrastées (lône, RCC, chenal « naturel », canal, retenue) est vraisemblablement à l'origine d'une grande partie de la variance non expliquée. Nous n'avons pas la possibilité de renseigner thermiquement les sections court-circuitées du fleuve et avons utilisé les relevés thermiques « chenal principal » les plus proches.

En distinguant les pêches selon leur appartenance à des entités « semi-naturelles » (anciens tracés du Rhône) ou des sections chenalisées de grandes dimensions (chenal, canal de navigation, retenue, bief sur la Saône), la relation ne change pas entre les deux grands types de milieux avec une pente non significativement différente (Figure 32, Figure 33). Il n'apparaît pas d'effet du milieu, ni d'interaction : p-values respectivement de 0.36 et 0.14 pour le gardon, et 0.06 et 0.53 pour le chevaie. Le R2 montre même un meilleur ajustement là où la thermie est censée être la plus approximative. Faut-il considérer que la thermie utilisée pour le cours principal représente aussi une grande approximation des conditions locales ?

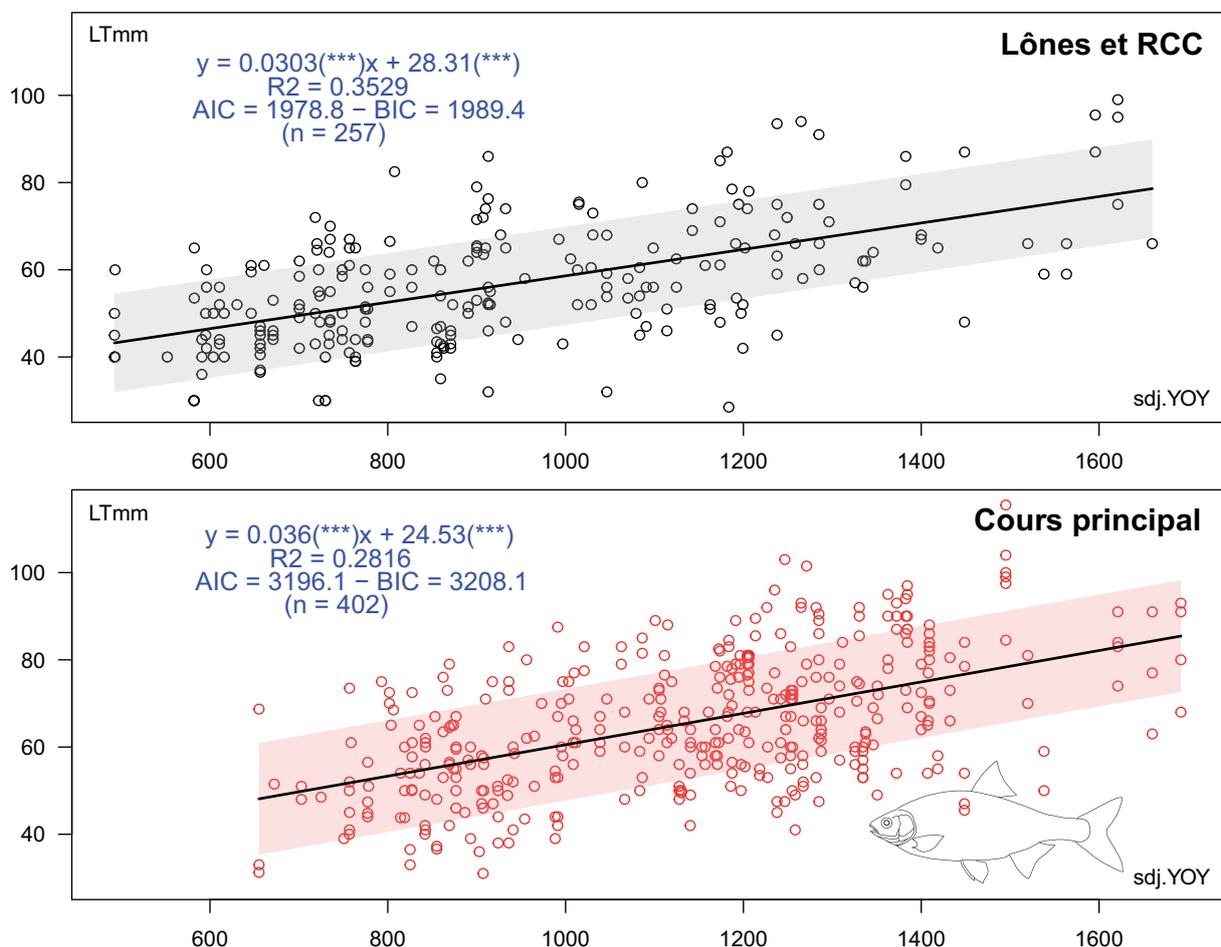


Figure 32 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le gardon en distinguant les milieux « semi-naturels » des sections fluviales de grandes dimensions. Les stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.

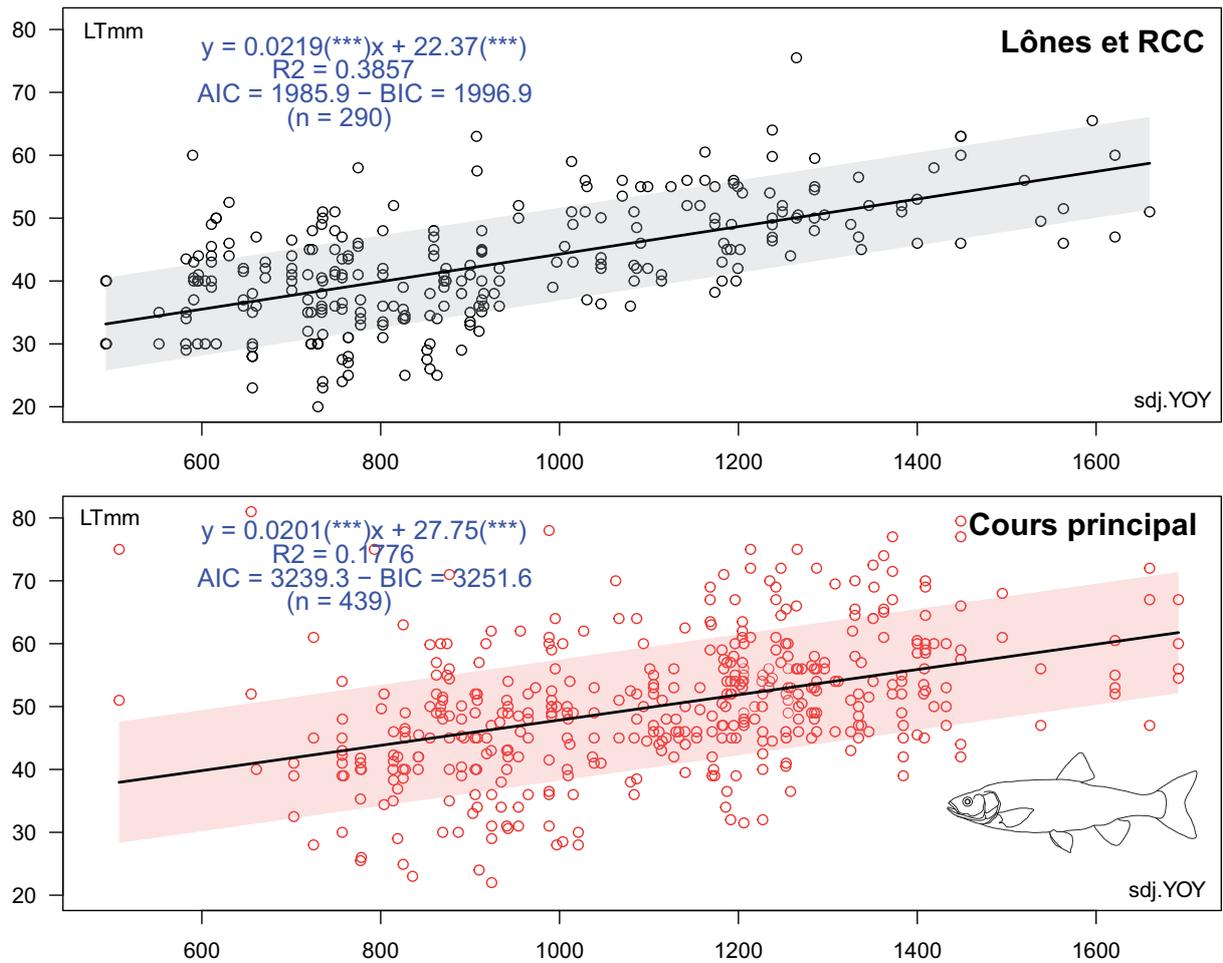


Figure 33 - Régression de la LT médiane de chaque pêche sur la SDJ pour le chevaie en distinguant les milieux « semi-naturels » des sections fluviales de grandes dimensions. Les stations sous influence d'un rejet thermique ont été retirées des analyses.

3.5 Les paramètres locaux

Afin de prendre en compte des facteurs abiotiques autres qu'hydroclimatiques, chaque station a fait l'objet d'une description qualitative simplifiée.

En regroupant les stations de pêches selon les différentes catégories définies pour ces facteurs, des différences significatives des LT médianes peuvent apparaître entre les catégories (Figure 34, Figure 36).

Ces différences s'amoindrissent après contrôle de la thermie (par la SDJ) (Figure 35, Figure 37).

Les écarts de taille entre grands secteurs se réduisent, moins cependant chez le gardon. Pour ce dernier, la Saône ainsi que le Bas-Rhône médian reste au-dessus des autres. Les caractéristiques de ces tronçons se retrouvent en partie dans d'autres descripteurs (bief pour la Saône, canal amenée pour le Bas-Rhône médian, nature des berges, la présence de macrophytes). Pour le chevaîne, l'écart positif ne persiste que pour la Saône.

Rappel des catégories de la description qualitative des stations utilisées dans les figures suivantes (Figure 34, Figure 35, Figure 36, Figure 37).

- **Situation (AF_AIN : Ain, AF_SAO : Saône, BR_AMT : Bas-Rhône amont, BR_AVL : Bas-Rhône aval, BR_MED : Bas-Rhône médian, HR_AMT : Haut-Rhône amont, HR_AVL : Haut-Rhône aval.**

- **Milieu (BIE : Bief, CAA : Canal d'amenée, CAF : Canal de fuite, CHE : Chenal, RCC : Rhône court-circuité, RET : Retenue)**

- **Berges (be : béton, en : enrochement, en/na-mi : enrochement/naturel mixte, en/nafa : enrochement/naturel à pente faible, na/fa : naturel à pente faible, na-mi : naturel mixte, na-pefa : naturel à pente faible, na-pefo : naturel à pente forte)**

- **Macrophytes (0 : absence, 1 : densité faible, 2 : densité moyenne, 3 : densité forte)**

- **Annexe [Niveau d'isolement par rapport au chenal principal (0, 1, 2)]**

- **Largeur du chenal (en mètres)**

- **Chenal [1 : chenal unique, 2 : chenal tressé (plusieurs chenaux sur la station)]**

- **Complexité hydraulique (1 : homogène, largeur fixe, 2 : semi-hétérogène, largeur variable, 3 : type "plaine d'inondation »)**

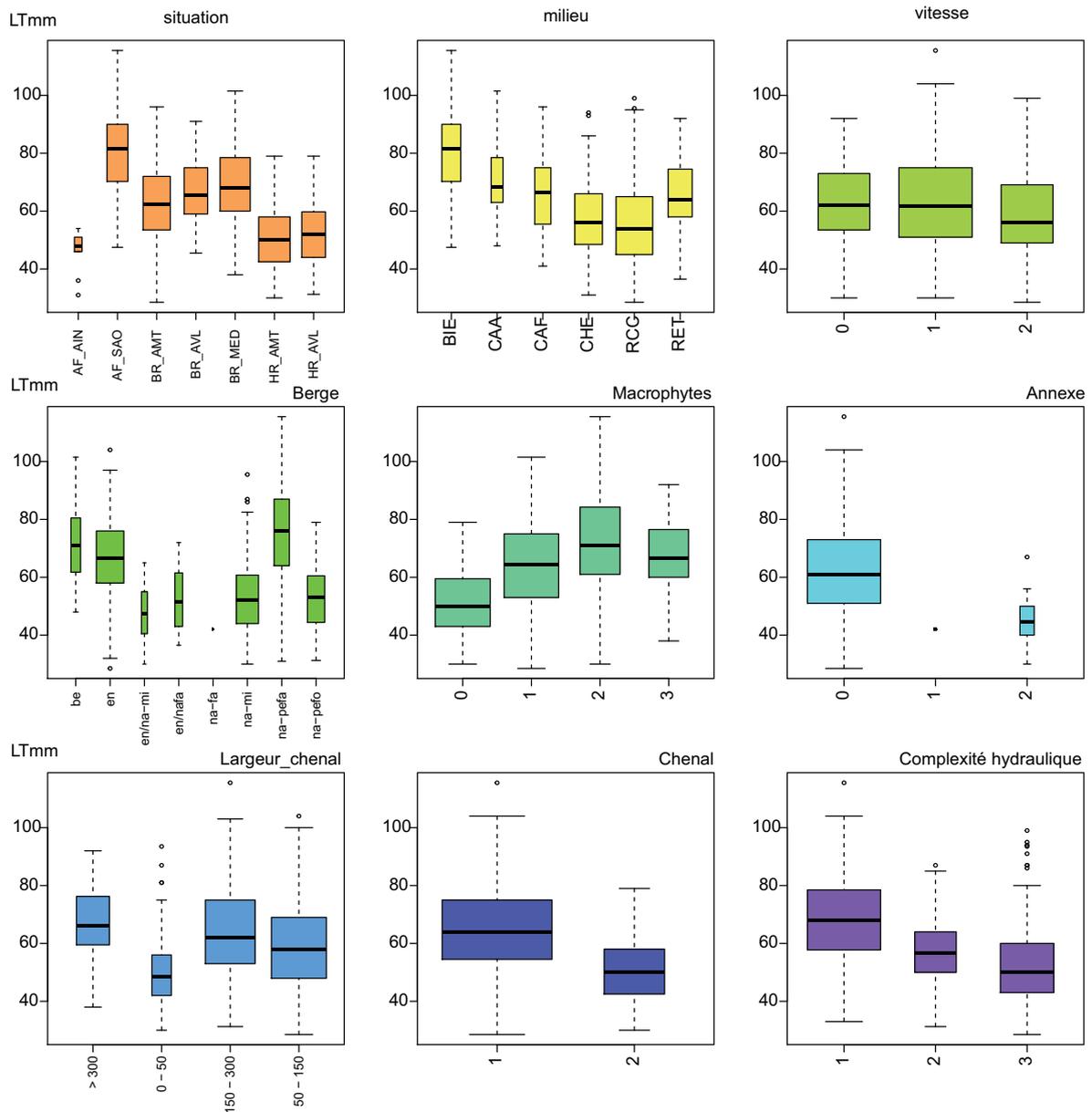


Figure 34 - Représentation des LT médianes des gardons d'âge 0+ classées selon certaines catégories propres aux stations.

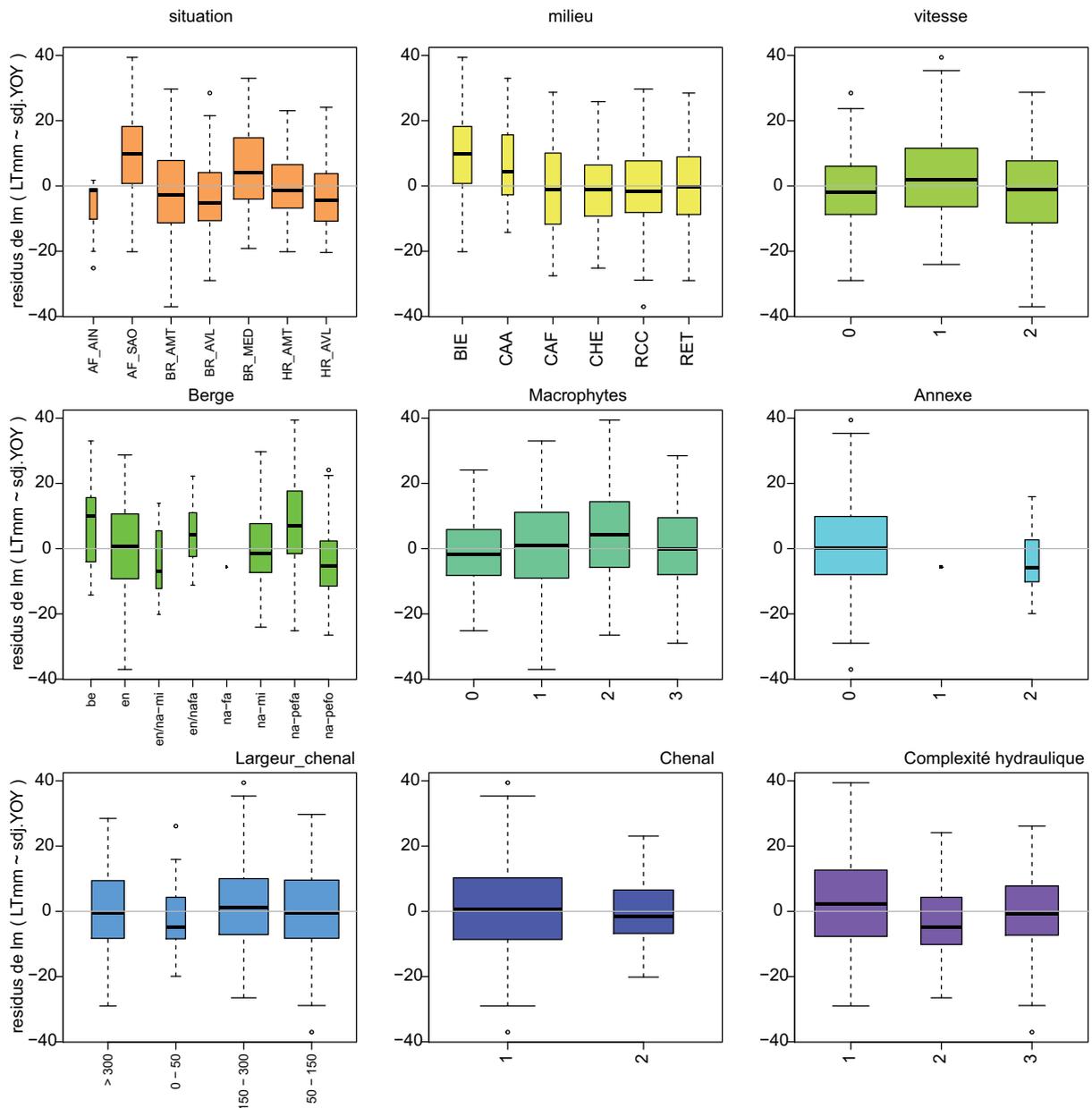


Figure 35 - Représentation des résidus de la régression sur la SDJ de la taille des gardsons d'âge 0+ classés selon certaines catégories propres aux stations.

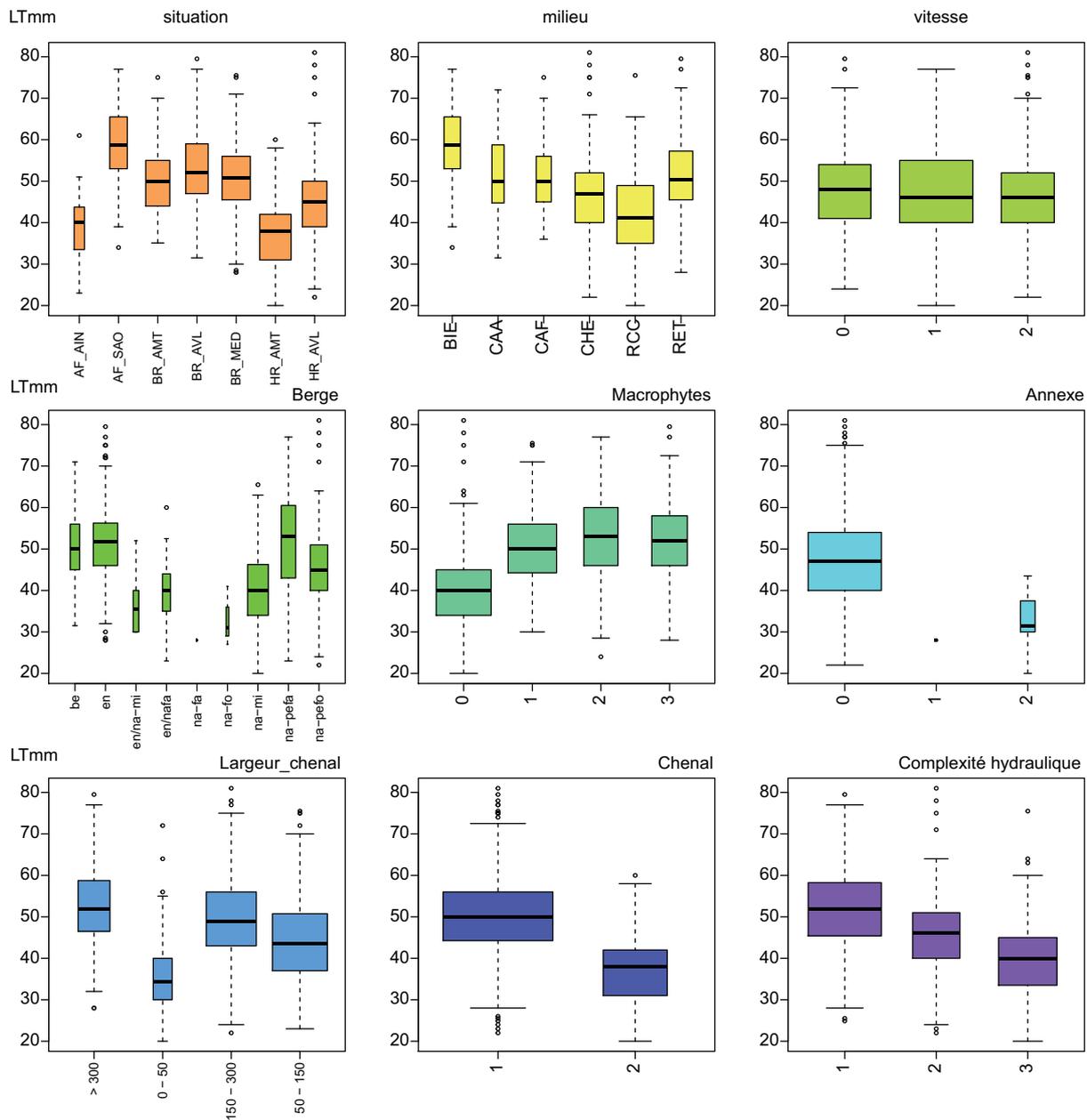


Figure 36 - Représentation des LT médianes des chevaines d'âge 0+ classées selon certaines catégories propres aux stations.

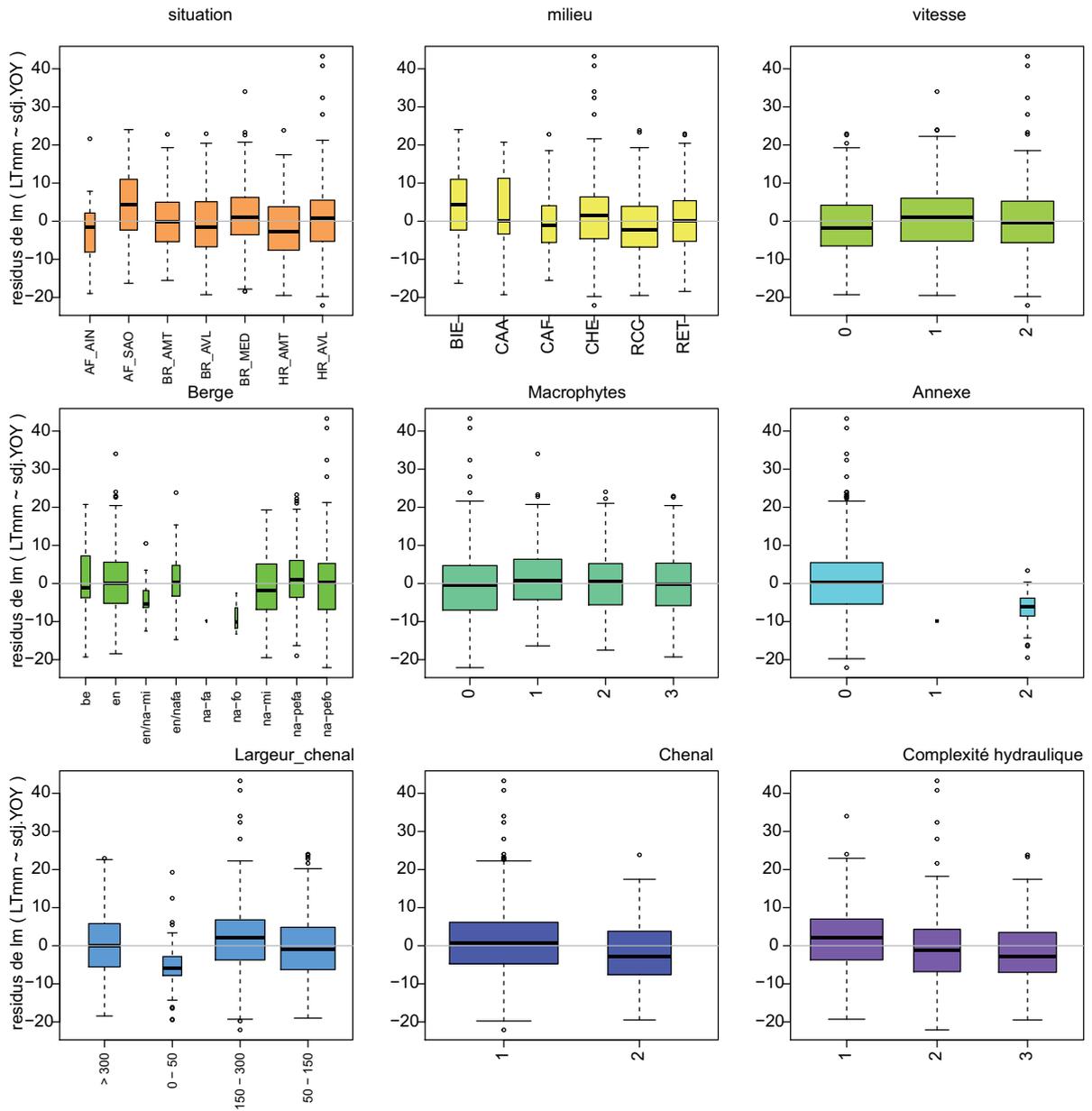


Figure 37 - Représentation des résidus de la régression sur la SDJ de la taille des chevaines d'âge 0+ classés selon certaines catégories propres aux stations.

3.6 Autres facteurs de variabilité

Une part importante de la littérature relative à l'écologie des jeunes poissons en eaux courantes est consacrée aux effets directs des facteurs hydroclimatiques sur le recrutement et la croissance. Bien que les paramètres hydrologiques et thermiques soient intimement associés, l'hydrologie joue un rôle majeur dans le succès du recrutement et la température, agissant sur le métabolisme des organismes ectothermes, s'avère déterminante pour la croissance des poissons.

Cependant, nombre d'autres facteurs abiotiques et biotiques plus difficiles à appréhender agissent sur la reproduction et la croissance des poissons. Des publications récentes mettent l'accent sur des facteurs peu étudiés, tel que le parasitisme (LONGSHAW et al., 2010) ou une amélioration de la qualité des eaux (BEARDSLEY & BRITTON, 2012).

3.6.1 Evolution de la qualité des eaux

Bien que cela ne soit pas encore la panacée, les efforts contemporains réalisés pour améliorer la qualité des eaux, en particulier minimiser la pollution urbaine et industrielle, ont inversé des tendances observées avant épuration des eaux.

A partir de chroniques long terme sur la rivière Wensum en Grande-Bretagne, BEARDSLEY et BRITTON (2012) ont montré qu'un changement des procédés de traitement des eaux avait entraîné une réduction des apports en nutriments et un glissement progressif vers des conditions moins eutrophes. Sur une période de 25 ans, le gardon a montré une baisse significative de sa croissance. Les taux de croissance observés en 2005 et 2008 sont beaucoup plus bas que ceux enregistrés entre 1983 et 1994. Avant la mise en place de ces nouveaux procédés d'épuration, la thermique expliquait l'essentiel de la variabilité de la croissance. Cette relation n'est plus valide depuis la modification des conditions trophiques, et la croissance est désormais expliquée par les apports annuels d'ortho-phosphates.

Nos observations sur le long terme montrent des changements structurels inexpliqués, tels que l'augmentation de la proportion de juvéniles dans les pêches postérieures aux grands épisodes de crues, et à l'arrêt de rejets industriels de phosphates dans le tiers amont du Bas-Rhône.

3.6.2 Les facteurs biotiques

3.6.2.1 La densité-dépendance

DELAIGUE et al. (2007) avaient proposé la densité-dépendance pour expliquer la taille des juvéniles. Nous rappelons que les années de faible recrutement avaient été « éliminées » du jeu de données du fait de la modicité des effectifs. Nous pouvons supposer que cette relation négative entre les effectifs et la taille pourrait être effective lorsque les effectifs deviennent importants.

Dans cette étude, aucune relation valide n'a été obtenue entre les effectifs et la taille des juvéniles d'âge 0+ (Figure 38). Des observations ponctuelles sur la chronique suggèrent cependant cet effet lors de recrutement massif et de faible mortalité hivernale (exemple du gardon en 1989).

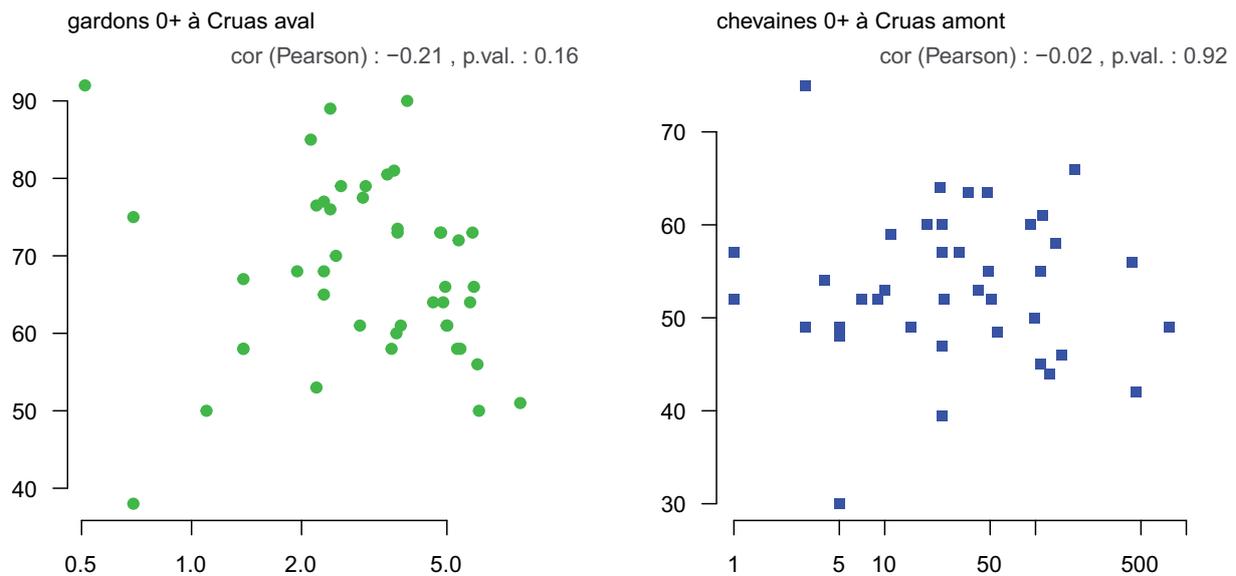


Figure 38 - Relation entre tailles médianes et nombre d'individus selon une échelle logarithmique, chez le gardon (Cruas aval) et le chevine (Cruas amont) pour la chronique complète des pêches de ces deux stations.

3.6.2.2 L'état sanitaire des populations piscicoles

LONGSHAW et al. (2010) se sont intéressés aux effets du parasitisme sur la croissance au cours de la première année et sur le succès du recrutement du gardon et du chevine. L'étude a été conduite sur 3 rivières du Yorkshire (Angleterre) entre 1993 et 2006. Elle a montré que des infections parasitaires des muscles avaient des effets négatifs majeurs sur la croissance des juvéniles 0+ et diminuaient le recrutement annuel des deux espèces. Dans ces cours d'eau de plaine, le parasitisme pourrait avoir une influence supérieure à celle des paramètres abiotiques.

Les études spécifiques sur l'état sanitaire des poissons du Rhône n'ont réellement démarré qu'après l'épisode caniculaire 2003. Mais il est probable que les faibles effectifs de juvéniles dans les pêches du début de la chronique aient une part d'explication dans l'épizootie de bucéphalose signalée sur le fleuve au cours des premières études d'impact.

3.6.2.3 Les ressources alimentaires

Parmi les métriques thermiques utilisées par WOLTER (2007) dans le cadre des études piscicoles de la Basse-Oder (Allemagne), cet auteur a fait une association entre la durée de la période de développement des macrophytes (une durée fixée par l'application d'un même seuil thermique au printemps et à l'automne) et un cumul de DJ sur cette période⁵. La métrique VegSum est corrélée positivement avec la taille des jeunes gardons. Elle associe les effets saisonniers de plusieurs composantes climatiques (la température et l'ensoleillement) sur la présence, le développement des herbiers, et la croissance des jeunes poissons utilisant les macrophytes comme abris et zones préférentielles d'alimentation. D'une certaine manière, la conjonction de la durée de vie de l'abri végétal et de la température des eaux favorisent la croissance de ses occupants.

Les données montrent que la taille est maximale dans la Saône. L'abondance des herbiers et l'eutrophie de cette grande rivière de plaine pourrait favoriser la croissance. Cet effet est vraisemblablement important dans toutes les grandes retenues, en particulier sur le

⁵ VegPeriod : Number of days from first reaching and last having 10°C water temperature, VegSumme : Cumulative degree-days of VegPeriod, VegSum12 : Cumulative degree-days above 12°C of VegPeriod.

Bas-Rhône. Il est probable que les périodes de déficit hydrologique et les étiages prolongés favorisent le développement massif des herbiers et indirectement la croissance des jeunes poissons.

4 Conclusions

Les chroniques hydrobiologiques du Rhône présentent les avantages de leur durée et de leur homogénéité en termes de méthodes et sites d'échantillonnage pour pouvoir évaluer l'évolution spatio-temporelle des assemblages faunistiques. Réalisées dans le cadre des suivis hydrobiologiques permanents des sites industriels, ou celui de la restauration du fleuve, elles peuvent être utiles pour aborder d'autres questions (ROGER & FAESSEL, 1989; ROGER et al., 1991; DESSAIX et al., 1995; DOLEDEC et al., 1996; CATTANEO et al., 2001; FRUGET et al., 2001; GRENOUILLET et al., 2001; DAUFRESNE et al., 2003; DAUFRESNE et al., 2007; DELAIGUE et al., 2007; DESSAIX & FRUGET, 2008; OLIVIER et al., 2009; PIFFADY et al., 2010).

Cependant, les objectifs des suivis hydrobiologiques permanents ont orienté le choix des stations (par ex. amont, rejet, aval d'un site), des méthodes d'échantillonnage (pêches électriques) et leur saisonnalité, la nature (vision globale de l'assemblage) et le niveau de précision dans l'acquisition de ces données (par ex. la constitution de lots lorsque la fraction juvénile est trop importante). Leur usage pour satisfaire de nouveaux objectifs, ou répondre à des questions nouvelles soulevées par les gestionnaires, n'est pas sans problèmes.

Les chroniques piscicoles ont montré la part croissante des juvéniles dans les captures, et la nécessité d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement écologique du fleuve à partir de cette fraction juvénile très sensible aux modifications anthropiques. Des propositions dans ce sens ont déjà été faites par des collègues européens (JURAJDA et al., 2010) lorsque l'échantillonnage des adultes pose de réels problèmes.

Une première étude a été effectuée par DELAIGUE et al. (2007) afin d'étudier la variabilité de la taille et du coefficient de condition des juvéniles de l'année en utilisant des pêches collectées sur le Rhône par Irstea Aix-en-Provence. Ces données concernaient essentiellement le Bas-Rhône médian (de la retenue de Montélimar à celle de Caderousse). Les pêches comportant peu d'individus juvéniles ($n < 30$) avaient été écartées des analyses. Or ces pêches correspondent le plus souvent à des années de faible recrutement, caractérisées par des hautes eaux printanières et un printemps froid. Par conséquent, les analyses ont privilégié les années à fort recrutement, plutôt chaudes. L'extension de cette étude préliminaire à l'échelle du bassin versant (183 stations dans le cadre de cette compilation) a permis d'avoir une amplitude thermique plus grande, et des températures froides sans pour autant avoir de faibles effectifs de juvéniles. Grâce à nos partenaires de l'étude Rhône Phase 4, nous avons pu bénéficier de chroniques physiques (relevés des températures eDF-DTG) et piscicoles à l'échelle du Rhône français susceptibles de fournir des situations hydroclimatiques contrastées et biologiquement renseignées.

Après avoir validé les données et les avoir intégrées dans une base de données, il a fallu procéder à l'identification des âges à partir des distributions de taille en l'absence d'informations sur l'âge des poissons capturés. Une part très importante de ce travail a été consacrée à cette identification des classes d'âge, sur la base d'une analyse par expertise des histogrammes de tailles pour avoir entre autres les tailles des juvéniles de l'année (âge 0+).

La complexité de cette tâche est liée (1) à l'extrême variabilité saisonnière des effectifs, (2) à une variabilité du recrutement d'une année sur l'autre, (3) au gradient thermique créé par la répartition longitudinale des stations sur environ 450 km, depuis la Chautagne jusqu'à Vallabrègues, et (4) un décalage progressif des modes des histogrammes de taille des poissons 0+ sur trois décennies, surtout perceptible à partir des années 1990, du fait des évolutions thermiques actuelles.

Initialement, nous avons travaillé sur les cyprinidés dominants. Parmi les grandes espèces (chevaine, gardon, barbeau, hotu, vandoise, brème bordelière), seuls le chevaine et le gardon présentent une répartition spatiale et temporelle sur l'ensemble des tronçons étudiés. Elles sont très documentées par la littérature scientifique européenne. Ces deux espèces ont donc fait l'objet des nombreux allers-retours dans la boucle « vérification-correction-validation », aidé dans cette opération par des d'outils graphiques conçus pour simplifier l'expertise, et l'usage de l'analyse multivariée (PERSAT & CHESSEL, 1989). Nous avons ainsi pu obtenir les tableaux finaux a priori valides pour la suite des analyses.

Les autres grandes espèces ont été triées mais la validation n'a pas été réalisée. Ces espèces présentent un intérêt pour des approches géographiques plus réduites car leur répartition est spatialement limitée. Certaines d'entre elles sont quasiment absentes des pêches pendant de longues périodes. Les espèces de petite taille sont des espèces à pontes multiples (ablette, spiralin, goujon, bouvière, pseudorasbora). L'identification des classes d'âge est plus complexe encore en raison de la présence de plusieurs modes ; et la petite taille des adultes amplifie le chevauchement des cohortes annuelles. Elles nécessitent des travaux spécifiques sur la croissance, avec identification des âges par des techniques appropriées. C'est surtout le cas de la bouvière et du pseudorasbora, deux espèces dont les effectifs n'ont fait qu'augmenter au cours des dernières années.

Un travail spécifique portant sur des méthodes de tri automatique a été réalisé afin de construire de nouveaux outils permettant de réduire le temps consacré à la discrimination des classes d'âge. Les essais ont été réalisés à partir de la base de tri expertisée (VESLOT, 2012).

L'étude de la croissance saisonnière a été réalisée sur la base de plusieurs pêches échelonnées entre mai et septembre sur quelques sites, avec toutes les réserves liées aux problèmes d'échantillonnage des stades les plus jeunes. Elle a été complétée par des suivis spécifiques réalisés en 1983 sur des annexes fluviales du Haut-Rhône (CARREL, 1986). Pour répondre à notre premier objectif, à savoir l'influence de la température de la période de croissance sur la taille des poissons en fin de leur première année, il fallait s'assurer de la relative stabilité du palier atteint en fin d'été pour ne pas biaiser cette relation par la prise en compte d'individus n'ayant pas achevé leur première saison de croissance. L'étude de la taille est faite sur des poissons capturés après la date moyenne du maximum thermique (8 août).

Une majorité de travaux portant sur l'étude de la croissance des organismes ectothermes utilise la somme des degrés-jours pour caractériser le « temps physiologique » (combinaison du temps calendaire et de la température) nécessaire pour atteindre un stade de développement (éclosion, résorption de vésicule vitelline, ...). Bien que la sommation des degrés-jours puisse être faite avec un seuil fixé à 0°C, des seuils thermiques plus élevés sont utilisés en fonction de l'organisme étudié, considérant qu'il n'y a pas de croissance effective en dessous de ce seuil. Le seuil de 12°C proposé par Richard Mann est le plus communément utilisé pour les cyprinidés. Toutefois, la variabilité des températures de ponte indiquées dans la littérature nous a incités à prendre un seuil thermique beaucoup plus bas (8.8°C) correspondant à la température moyenne du 20 mars (équinoxe de printemps) pour l'ensemble du Rhône. Sachant que les cyprinidés terminent leur gamétogénèse au cours du printemps, nous pouvons considérer que le choix de ce seuil nous permet de prendre en compte une énergie utile pour les adultes reproducteurs, favorable pour leur migration vers les frayères (WOLTER, 2007), et pouvant générer une précocité de la ponte. Nous avons calculé une somme de degrés-jours au dessus de 8.8°C (SDJ) pour la période dite de croissance comprise entre le 20 mars et le 8 août de chaque année et chaque station thermique.

L'hydrologie est contraignante pour la reproduction et la croissance des poissons (CATTANEO et al., 2001; PETERSON & JENNINGS, 2007). Nous avons opté pour un cumul de débits-jours pour la période de croissance. L'indice de débit a été calculé en sommant les

débites journaliers exprimés par les centiles normés issus des chroniques complètes de débits (données HYDRO). Du fait d'une relation inverse entre le débit et la température, la taille diminue lorsque les débits printaniers sont soutenus car la température des eaux est alors plus froide.

Les tailles des gardons et des chevaines sont globalement croissantes de l'amont vers l'aval. Plus petites sur le Haut-Rhône amont et sur l'Ain, elles augmentent sur le Haut-Rhône aval, puis nettement sur le Bas-Rhône. Les tailles maximales ont été enregistrées sur la Saône, sur le Bas-Rhône aval, et au niveau des rejets thermiques des centrales. Pour ces deux espèces, nous avons obtenu une relation linéaire positive associant la taille des juvéniles mesurée après le maximum thermique et la température printanière (traduite par le cumul de degrés-jours).

Avec la hausse des températures attribuée au changement climatique, la période favorable pour la croissance s'allonge du fait d'une précocité printanière de plus en plus marquée. Une prolongation de la période chaude en automne a été observée plusieurs fois dans les années récentes. Les résultats des pêches faites en 2011, l'année thermique la plus chaude des chroniques météorologiques, ont montré une précocité exceptionnelle, et la poursuite de la croissance en cours d'automne, mise en évidence sur des sites ayant deux pêches successives en fin d'année. A l'heure actuelle, du fait des évolutions climatiques, la taille des juvéniles de l'année de ces deux espèces tend à augmenter. Cette tendance a débuté au cours des années 1990.

Contrairement à de nombreux travaux réalisés sur de grands cours d'eau de plaine, qui ont mis en évidence des effets de compétition sur la taille, nous n'avons pas obtenu de relations significatives négatives (DELAIGUE et al., 2007; WOLTER, 2007) entre la taille et les effectifs de poissons capturés, une diminution de la taille attribuée à la compétition intra-et/ou interspécifique pour l'exploitation de ressources trophiques (DELAIGUE et al., 2007; WOLTER, 2007). Il est probable que ce constat soit en partie attribuable au niveau trophique des hydrosystèmes étudiés (rivières et grands cours d'eau de plaine).

D'autres facteurs ayant des effets majeurs sur la croissance ont été étudiés dans des publications récentes, tels que le parasitisme des jeunes poissons (diminution de la taille) (LONGSHAW et al., 2010), ou l'amélioration de la qualité des eaux (diminution de la taille) (BEARDSLEY & BRITTON, 2012). Ils montrent que des facteurs sans liens directs avec l'hydro-climatologie ne peuvent être sous-estimés.

Nous avons une base de données dans laquelle l'identification des poissons d'âge 0+ de deux espèces peut être considérée comme valide. Le tri préliminaire a été réalisé sur 7 autres espèces (ablette, barbeau, blageon, brème bordelière, goujon, hotu, rotengle, spirin et vandoise). Le travail accompli pour l'analyse de la taille des gardons et des chevaines mériterait d'être assuré pour ces 7 autres espèces. Un travail préparatoire a été réalisé pour deux petites espèces (bouvière et pseudorasbora), mais la complexité du tri nous a conduits à leur abandon. Ces espèces nécessitent des informations complémentaires (lecture d'otolithes) pour garantir la véracité d'un tri par expertise sur les tailles.

5 Bibliographie

- ALABASTER, J.S. & LLOYD, R. (1982): Water quality criteria for freshwater fish. - Butterworths, London, 361 p.
- ALLARDI, J., DUGUET, C. & LEYNAUD, G. (1975): Etude du peuplement ichthyologique d'un milieu fluvial réchauffé artificiellement. - In: WELCOMME, R.L. (Ed.), Symposium on the methodology for the survey, monitoring and appraisal of fishery resources in lakes and large rivers. EIFAC Technical Paper, FAO, Rome, pp. 209-227.
- BALON, E.K. (1975): Reproductive guilds of fishes: a proposal and definition. - J. Fish. Res. Board Can. **32**: 821-864.
- BEARDSLEY, H. & BRITTON, J.R. (2012): Contribution of temperature and nutrient loading to growth rate variation of three cyprinid fishes in a lowland river. - Aquat. Ecol. **46**: 143-152.
- BOISNEAU, C., MOATAR, F., BODIN, M. & POISNEAU, P. (2008): Does global warming impact on migration patterns and recruitment of Allis shad (*Alosa alosa* L.) young of the year in the Loire River, France? - Hydrobiologia **602**: 179-186.
- BOLLAND, J.D., BRITTON, J.R. & COWX, I.G. (2007): Lifetime consequences of variable 0 year group length in riverine populations of chub *Leuciscus cephalus* (L.). - J. Fish Biol. **71**: 1810-1819.
- BRITTON, J.R., DAVIES, G.D. & BRAZIER, M. (2009): Eradication of the invasive *Pseudorasbora parva* results in increased growth and production of native fishes. - Ecol. Freshwat. Fish **18**: 8-14.
- CARREL, G. (1981): Etude physico-chimique et piscicole d'une lône du Haut-Rhône français. Analyse de plusieurs méthodes d'observation et de comptage des poissons en eau courantes. - DEA Ecologie fondamentale et appliquée des eaux continentales, Université Lyon 1, Villeurbanne, 73 p.
- CARREL, G. (1986): Caractérisation physico-chimique du Haut-Rhône français et de ses annexes ; incidences sur la croissance des populations d'alevins. - Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Villeurbanne, France, 186 p.
- CARREL, G., OLIVIER, J.-M., POIREL, A. & BREIL, P. (2003): Analyse des réponses biologiques à la variabilité climatique par l'examen de chroniques temporelles. Variabilité inter-annuelle de la reproduction des poissons cyprinidae dans le Rhône à l'aval de Lyon : rôle de la température. - In: PONT, D. (Ed.), Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises. Rapport final MEDD - GICC Aquabio, Paris.
- CATTANEO, F., BREIL, P. & CARREL, G. (1999): Variabilité inter-annuelle des assemblages piscicoles en relation avec le régime hydrologique : le Bas-Rhône à Montélimar, 4ème Congrès International de Limnologie-Océanographie, Bordeaux, 7-10 Septembre 1999.
- CATTANEO, F., CARREL, G., LAMOUREUX, N. & BREIL, P. (2001): Relationship between hydrology and cyprinid reproductive success in the Lower Rhône at Montélimar, France. - Arch. Hydrobiol. **151**: 427-450.
- COPP, G.H. (1987): Le rôle et le fonctionnement des milieux aquatiques du Haut-Rhône français comme sites de reproduction et de nurserie pour les poissons du fleuve. - Doctorat de l'Université, Lyon I, 97 p.
- COPP, G.H. (1989a): Electrofishing for fish larvae and juveniles: equipment modifications for increased efficiency with short fishes. - Aquacult. Fish. Manage. **20**: 453-462.
- COPP, G.H. (1989b): The habitat diversity and fish reproductive function of floodplain ecosystems. - Environ. Biol. Fish. **26**: 1-27.
- CRYER, M., PEIRSON, G. & TOWNSEND, C.R. (1986): Reciprocal interactions between roach, *Rutilus rutilus*, and zooplankton in a small lake: prey dynamics and fish growth and recruitment. - Limnol. Oceanogr. **31**: 1022-1038.

- DAUFRESNE, M., BADY, P. & FRUGET, J.F. (2007): Impacts of global changes and extreme hydroclimatic events on macroinvertebrate community structures in the French Rhone River. - *Oecologia* **151**: 544-559.
- DAUFRESNE, M. & BOET, P. (2005): Evolution temporelle de la structure des peuplements piscicoles des grands fleuves français. EDF - Cemagref, Antony, 19 p.
- DAUFRESNE, M., LENGFELLNER, K. & SOMMER, U. (2009): Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. - *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **106**: 12788-12793.
- DAUFRESNE, M., ROGER, M.C., CAPRA, H. & LAMOUREUX, N. (2003): Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. - *Glob. Change Biol.* **10**: 124-140.
- DE KINKELIN, P., TUFFERY, G., LEYNAUD, G., ARRIGNON, J., POIRIER, M., JAMAIN, M.M., JOANNIS, G., JOLLET, G. & LECLERCQ, J. (1969): La Bucéphalose larvaire à *Bucephalus polymorphus* (Baer 1827) : pathogénie, épizootologie, possibilités d'intervention. - *Bull. fr. Piscic.* **234**: 5-20.
- DELAIGUE, O., CARREL, G. & PONT, D. (2007): Influence de la température sur la croissance des juvéniles de poissons Cyprinidae. Cemagref, U.R. Hydrobiologie, Aix-en-Provence, France, 44 p.
- DESAINT, B. & POIREL, A. (2004): Etude thermique du Rhône - Phase 2 - Rapport final. - D4161/RAP/2004-00314-A. EDF - DTG - Dpt Surveillance - Branche Environnement aquatique, Grenoble, 88 p.
- DESSAIX, J., FRUGET, J.-F., OLIVIER, J.-M. & BEFFY, J.-L. (1995): Changes of the macroinvertebrate communities in the dammed and by-passed sections of the French Upper Rhône after regulation. - *Regul. Rivers* **10**: 265-279.
- DESSAIX, J. & FRUGET, J.F. (2008): Évolution des peuplements de crustacés du Rhône Moyen au cours des 20 dernières années, relation avec la variabilité hydroclimatique. - *Hydroécol. Appl.* **16**: 1-27.
- DOLEDEC, S., DESSAIX, J. & TACHET, H. (1996): Changes within the Upper Rhône River macrobenthic communities after the completion of three hydroelectric schemes: anthropogenic effects or natural change? - *Arch. Hydrobiol.* **136**: 19-40.
- FECHHELM, R.G., BRYAN, J.D., GRIFFITHS, W.B. & MARTIN, L.R. (1997): Summer growth patterns of northern Dolly Varden (*Salvelinus malma*) smolts from the Prudhoe Bay region of Alaska. - *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **54**: 1103-1110.
- FOX, C.J., PLANQUE, B.P. & DARBY, C.D. (2000): Synchrony in the recruitment time-series of plaice (*Pleuronectes platessa* L) around the United Kingdom and the influence of sea temperature. - *J. Sea Res.* **44**: 159-168.
- FREDRICH, F., OHMANN, S., CURIO, B. & KIRSCHBAUM, F. (2003): Spawning migrations of the chub in the River Spree, Germany. - *J. Fish Biol.* **63**: 710-723.
- FRUGET, J.-F., CENTOFANTI, M., DESSAIX, J., OLIVIER, J.-M., DRUART, J.-C. & MARTINEZ, P.-J. (2001): Temporal and spatial dynamics in large rivers: examples of a long-term monitoring of the middle Rhône River. - *Annales de Limnologie* **37**: 237-251.
- FRY, F.E.J. (1971): The effect of environmental factors on the physiology of fish. - In: HOAR, W.S. & RANDALL, D.J. (Eds), *Fish Physiology*. Academic Press, pp. 1-98.
- GARNER, P. (1996): Microhabitat use and diet of 0+ cyprinid fishes in a lentic, regulated reach of the River Great Ouse, England. - *J. Fish Biol.* **48**: 367-382.
- GILLET, A. (1989): Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres. - *Hydroécol. Appl.* **1/2**: 117-143.
- GINOT, V., SOUCHON, Y. & ROGER, P. (1996): Impact de l'élévation artificielle de température induite par le fonctionnement du Centre Nucléaire du Bugey (fleuve Rhône) sur les communautés de poissons. - *Hydroécol. Appl.* **8**: 1-33.
- GOLOVANOV, V. & SMIRNOV, A. (2011): Specific features of thermoregulation behavior in early juveniles of roach "*Rutilus rutilus*" under thermogradient conditions. - *J. Ichthyol.* **51**: 466-473.
- GRAHAM, C.T. & HARROD, C. (2009): Implications of climate change for the fishes of the British Isles. - *J. Fish Biol.* **74**: 1143-1205.

- GRENOUILLET, G., HUGUENY, B., CARREL, G., OLIVIER, J.M. & PONT, D. (2001): Large-scale synchrony and inter-annual variability in roach recruitment in the Rhône River: the relative role of climatic factors and density-dependent processes. - *Freshwat. Biol.* **46**: 11-26.
- GRENOUILLET, G. & PONT, D. (2001): Juvenile fishes in macrophyte beds: influence of food resources, habitat structure and body size. - *J. Fish Biol.* **59**: 939-959.
- GRENOUILLET, G., PONT, D. & OLIVIER, J.M. (2000): Habitat occupancy patterns of juvenile fishes in a large lowland river: interactions with macrophytes. - *Arch. Hydrobiol.* **149**: 307-326.
- HADDERINGH, R.H. (1975): Effects of the cooling water discharge on the macrofauna and fish populations around Flevo power station. - *Elektrotechnik* **53**: 127-135.
- HENDERSON, B.A. (1985): Factors affecting growth and recruitment of yellow perch, *Perca flavescens* Mitchell, in South Bay, Lake Huron. - *J. Fish Biol.* **26**: 449-458.
- HENDERSON, B.A. & BROWN, E.H., Jr (1985): Effects of abundance and water temperature on recruitment and growth of alewife (*Alosa pseudoharengus*) near South Bay, Lake Huron, 1954-82. - *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **42**: 1608-1613.
- HENDERSON, P.A. & SEABY, R.M. (2005): The role of climate in determining the temporal variation in abundance, recruitment and growth of sole *Solea solea* in the Bristol Channel. - *J. mar. biol. Ass. U. K.* **85**: 197-204.
- HOLMES, R.H.A. & HENDERSON, P.A. (1990): High fish recruitment in the Severn Estuary: the effect of a warm year? - *J. Fish Biol.* **36**: 961-963.
- HUGUENY, B., PERSAT, H., BAGLINIERE, J.L., BOET, P., CARREL, G., OLIVIER, J.M., PAUGY, D., PONT, D. & TRAORE, K. (1995): Long-term variability in riverine fish assemblages : results from french and west african rivers. - *Bull. Fr. Pêche Piscic.* **337/338/339**: 93-99.
- JURAJDA, P. (1998): Drift of larval and juvenile fishes, especially *Rhodeus sericeus* and *Rutilus rutilus*, in the River Morava (Danube basin). - *Arch. Hydrobiol.* **141**: 231-241.
- JURAJDA, P., SLAVIK, O., WHITE, S. & ADAMEK, Z. (2010): Young-of-the-year fish assemblages as an alternative to adult fish monitoring for ecological quality evaluation of running waters. - *Hydrobiologia* **644**: 89-101.
- KARAS, P. & NEUMAN, E. (1981): First-year growth of perch (*Perca fluviatilis* L) and roach (*Rutilus rutilus* (L.)) in a heated Baltic bay. - *Rep. Inst. Freshwat. Res., Drottningholm* **59**: 48-63.
- KHALANSKI, M., CARREL, G., DESAINT, B., FRUGET, J.-F., OLIVIER, J.-M., POIREL, A. & SOUCHON, Y. (2008): Étude thermique globale du Rhône - Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. - *Hydroécol. Appl.* **16**: 53-108.
- KJELLMAN, J., LAPPALAINEN, J. & URHO, L. (2001): Influence of temperature on size and abundance dynamics of age-0 perch and pikeperch. - *Fish. Res.* **53**: 47-56.
- KOTTELAT, M. & FREYHOF, J. (2007): Handbook of European freshwater fishes. - Kottelat & Freyhof, Cornol, Switzerland, Berlin, Germany, 646 p.
- KRYZHANOVSKII, S.G. (1974): Eco-morphological principles and patterns of development among minnows, loaches and catfishes. Part II. Ecological groups of fishes and patterns of their distribution. - Department of the Environment Fisheries and Marine Service, Namaimo, B.C, 197 p.
- KUCHARCZYK, D., LUCZYNSKI, M., KUJAWA, R. & CZERKIES, P. (1997): Effect of temperature on embryonic and larval development of bream (*Abramis brama* L.). - *Aquat. Sci.* **59**: 214-224.
- LAMMENS, E. (1986): Interactions between fishes and the structure of fish communities in Dutch shallow, eutrophic lakes. - Doctorat, Agricultural University of Wageningen, 100 p.
- LAMOUREUX, N., OLIVIER, J.M., PERSAT, H., POUILLY, M., SOUCHON, Y. & STATZNER, B. (1999): Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. - *Freshwat. Biol.* **42**: 275-299.
- LAUTERS, F. & POIREL, A. (2001a): Description statistique des longues séries de mesure de température de l'eau sur le Rhône et ses grands affluents (période 1977-1999).

- EDF - Département Surveillance Eau & Ouvrages - Branche Environnement, Grenoble, 28 p.
- LAUTERS, F. & POIREL, A. (2001b): Description statistique des longues séries de mesure de température de l'eau sur le Rhône et ses grands affluents (période 1977-1999) - Annexes. EDF - Département Surveillance Eau & Ouvrages - Branche Environnement, Grenoble, 150 p.
- LE CREN, E.D. (1955): Year to year variation in the year-class strength of *Perca fluviatilis*. - Ver. Internat. Verein. Limnol. **12**: 187-192.
- LE CREN, E.D. (1958): Observations of the growth of perch (*Perca fluviatilis* L.) over twenty-two years with special reference to the effects of temperature and changes in population density. - J. Anim. Ecol. **27**: 287-334.
- LIBOSVARSKI, J. (1979): Gonad weight and egg numbers in chub, *Leuciscus cephalus*, from the Rokytna stream. - Folia Zool. **28**: 35-42.
- LONGSHAW, M., FREAR, P.A., NUNN, A.D., COWX, I.G. & FEIST, S.W. (2010): The influence of parasitism on fish population success. - Fish. Mgmt Ecol. **17**: 426-434.
- LUKSIENE, D. & SANDSTRÖM, O. (1994): Reproductive disturbance in a roach (*Rutilus rutilus*) population affected by cooling water discharge. - J. Fish Biol. **45**: 613-625.
- LUKSIENE, D. & SVEDÄNG, H. (1997): A review on fish reproduction with special reference to temperature anomalies. The Swedish Board of Fisheries, Öregrund, Sweden, 35 p.
- MANN, R.H.K. (1973): Observations on the age, growth, reproduction and food roach *Rutilus rutilus* (L.), in two rivers in southern England. - J. Fish Biol. **5**: 707-736.
- MANN, R.H.K. (1976): Observation on the age, growth, reproduction and food of the chub *Squalius cephalus* (L.) in the River Stour, Dorset. - J. Fish Biol. **8**: 265-288.
- MANN, R.H.K. (1991): Growth and production. - In: WINFIELD, I.J. & NELSON, J.S. (Eds), Cyprinid Fishes. Systematics, biology and exploitation. Fish and fisheries Series 3. Chapman & Hall, London, pp. 456-482.
- MANN, R.H.K. (1997): Temporal and spatial variations in the growth of 0 group roach (*Rutilus rutilus*) in the River Great Ouse, in relation to water temperature and food availability. - Regul. Rivers **13**: 277-285.
- MATTHEEUWS, A., GENIN, M., DETOLLENAERE, A., MICHA, J.-C. & MINE, Y. (1981): Etude de la reproduction du gardon (*Rutilus rutilus*) et des effets d'une élévation provoquée de la température en Meuse sur cette reproduction. - Hydrobiologia **85**: 271-282.
- McINERNEY, M.C. & DEGAN, D.J. (1991): Dynamics of a black crappie population in a heterogeneous cooling reservoir. - Trans. Am. Fish. Soc. **11**: 525-533.
- MILLS, C.A. (1988): The effect of extreme northerly climatic conditions on the life history of the minnow, *Phoxinus phoxinus* (L.). - J. Fish Biol. **33**: 545-561.
- MILLS, C.A. & MANN, R.H.K. (1985): Environmentally-induced fluctuations in year-class strength and their implications for management. - J. Fish Biol. **27**: 209-226.
- MOOIJ, W.M., DE SENERPONT DOMIS, L.N. & HÜLSMANN, S. (2008): The impact of climate warming on water temperature, timing of hatching and young-of-the-year growth of fish in shallow lakes in the Netherlands. - J. Sea Res. **60**: 32-43.
- MOOIJ, W.M., LAMMENS, E.H.R.R. & DENSEN, W.L.T., Van (1994): Growth rate of 0+ fish in relation to temperature, body size, and food in shallow eutrophic lake Tjeukemeer. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. **51**: 516-526.
- MOOIJ, W.M. & VAN NES, E.H. (1998): Statistical analysis of the somatic growth rate of 0+ fish in relation to temperature under natural conditions. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. **55**: 451-458.
- MÜLLER, R. & MENG, J.H. (1986): Factors governing the growth rate of roach *Rutilus rutilus* (L.) in pre-alpine Lake Sarnen. - Aquatic Sciences - Research Across Boundaries **48**: 135-144.
- NELVA, A. (1985): Biogéographie, démographie et écologie de *Chondrostoma nasus nasus* (L., 1758) (Hotu, Poisson, Téléostéen, Cyprinidé). - Doctorat d'Etat, Lyon I, 363 p.
- NELVA, A., PERSAT, H. & CHESSEL, D. (1979): Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichtyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage

- ponctuel d'abondance. - Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris **289**: 1295-1298.
- NEUHEIMER, A.B. & TAGGART, C.T. (2007): The growing degree-day and fish size-at-age: the overlooked metric. - *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **64**: 375-385.
- NEUHEIMER, A.B., THRESHER, R.E., LYLE, J.M. & SEMMENS, J.M. (2011): Tolerance limit for fish growth exceeded by warming waters. - *Nature Clim. Change* **1**: 110-113.
- NOGES, P. & JARVET, A. (2005): Climate driven changes in the spawning of roach (*Rutilus rutilus* (L.)) and bream (*Abramis brama* (L.)) in the Estonian part of the Narva River basin. - *Boreal Env. Res.* **10**: 45-55.
- NUNN, A.D., COWX, I.G., FREAR, P.A. & HARVEY, J.P. (2003): Is water temperature an adequate predictor of recruitment success in cyprinid fish populations in lowland rivers? - *Freshwat. Biol.* **48**: 579-588.
- NUNN, A.D., COWX, I.G. & HARVEY, J.P. (2002): Recruitment patterns of six species of cyprinid fishes in the lower River Trent, England. - *Ecol. Freshwat. Fish* **11**: 74-84.
- NUNN, A.D., HARVEY, J.P. & COWX, I.G. (2007): Variations in the spawning periodicity of eight fish species in three English lowland rivers over a 6 year period, inferred from 0+ year fish length distributions. - *J. Fish Biol.* **70**: 1254-1267.
- OLDEN, J.D. & POFF, L.N. (2003): Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. - *River Res. Applic.* **19**: 101-121.
- OLIVIER, J.M. (1992): Rythmes de dérives des alevins en milieu fluvial. Suivi dans le Rhône au niveau des prises d'eau et influence des vidanges de barrages. - Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 129+264 p.
- OLIVIER, J.M., CARREL, G., LAMOUREUX, N., DOLE-OLIVIER, M.J., MALARD, F., BRAVARD, J.P. & AMOROS, C. (2009): The Rhône River Basin. - In: TOCKNER, K., UEHLINGER, U. & ROBINSON, C.T. (Eds), *Rivers of Europe*. Academic Press, Elsevier, London, pp. 247-295.
- PAVLOV, D., MIKHEEV, V., LUPANDIN, A. & SKOROBOGATOV, M. (2008): Ecological and behavioural influences on juvenile fish migrations in regulated rivers: a review of experimental and field studies. - *Hydrobiologia* **609**: 125-138.
- PEŇÁZ, M. (1980): Fish cultures in the area of the nuclear power station Dukovany and their prospects. - *Folia Zool.* **29**: 87-96.
- PEŇÁZ, M., PROKEŠ, M. & WOHLGEMUTH, E. (1978): Fish fry community of the Jilhava River near Mohelno. - *Acta Sc. Nat. Brno* **12**: 1-36.
- PERROW, M.R., PEIRSON, G. & TOWNSEND, C.R. (1990): The dynamics of a population of roach (*Rutilus rutilus* (L.)) in a shallow lake: is there a 2-year cycle in recruitment? - *Hydrobiologia* **191**: 67-73.
- PERSAT, H. (1988): De la biologie des populations de l'ombre commun *Thymallus thymallus* (L. 1758) à la dynamique des communautés dans un hydrosystème fluvial aménagé, le Haut-Rhône français. Eléments pour un changement d'échelles. - Doctorat d'Etat, Université Lyon I, 223 p.
- PERSAT, H. & CHESSEL, D. (1989): Typologie de distributions en classes de taille : intérêt dans l'étude des populations de poissons et d'invertébrés. - *Acta Oecologica - Oecol. gener.* **10**: 175-195.
- PERSAT, H. & OLIVIER, J.M. (1991): The point abundance sampling, a fishing strategy for large rivers: short presentation of the concept, its appliance, and some results. - In: PENAZ, M. (Ed.), *Biological monitoring of large rivers*. Czech Academy of Sciences, Brno & Gabčíkovo, Czechoslovakia, pp. 104-113.
- PETERSON, R.C. & JENNINGS, C.A. (2007): Effects of river discharge on abundance and instantaneous growth of age-0 carpsuckers in the Oconee River, Georgia, USA. - *River Res. Applic.* **9999**: n/a.
- PIFFADY, J., SOUCHON, Y., CAPRA, H. & PARENT, E. (2010): Quantifying the effects of temperature and flow regime on the abundance of 0+ cyprinids in the upper River Rhone using Bayesian hierarchical modelling. - *Freshwat. Biol.* **55**: 2359-2374.
- PIVNICKA, K. (1983): Growth capacity of some fish species in different environmental conditions. - *Věstník Čs. Spol. Zool.* **47**: 272-287.

- POIREL, A. (2004): Etude thermique du Rhône - Phase 1 - Complément d'étude. Extension des résultats à la période 2000-2003. - D4161/RAP/2004-00135-A. EDF - DTG - Dpt Surveillance - Branche Environnement aquatique, Grenoble, 60 p.
- POIREL, A. (2006): Etude thermique globale du Rhône - Phase III - Lot 5 : Synthèse des phases I, II & III. **eDF**, Division Technique Générale, Département Surveillance, Service Environnement Aquatique, Grenoble, 4 p.
- POIREL, A., CARREL, G. & OLIVIER, J.M. (2001): Illustration de la complémentarité des chroniques environnementales dans l'étude d'un hydrosystème fluvial : régime thermique et peuplements piscicoles du Rhône., Scientifiques & décideurs. Agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Lyon, France - Web: http://www.eaurmc.fr/lyon-fleuves-2001/page_html/p_somme_alelier4.html.
- POIREL, A., LAUTERS, F. & DESAINT, B. (2008): 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. - Hydroécol. Appl. **16**: 191-213.
- POIZAT, G. (1993): Echelle d'observation et variabilité des abondances de juvéniles de poissons dans un secteur aval du Rhône. - Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I.
- PONCIN, P. (1996): Reproduction chez nos poissons. - Le Pêcheur Belge, Bruxelles, 77 p.
- PONCIN, P., MELARD, C. & PHILIPPART, J.C. (1989): Controlled reproduction of chub, *Leuciscus cephalus* (L.) in captivity. - In: DE PAUW, N., JASPERS, E., ACKEFORS, H. & WILKINS, N. (Eds), Aquaculture: a biotechnology in progress. Volume 1., pp. 567-571.
- PONT, D., TORRE, F. & POIZAT, G. (1992): Etablissement d'une méthodologie pour un suivi piscicole du Rhône. Etude Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Université Lyon 1, Laboratoire d'Ecologie des Systèmes Fluviaux, Arles, 57 p.
- POUILLY, M. & SOUCHON, Y. (1994): Méthode de simulation de la capacité d'accueil physique des cours d'eau pour les poissons : application aux cours d'eau de taille moyenne (module supérieur à 30 m³ par s), aide à la détermination d'un débit réservé dans le cadre de l'application de l'article L 232-5 du code rural, 61 p.
- POWER, M., ATTRILL, M.J. & THOMAS, R.M. (2000): Temporal abundance patterns and growth of juvenile herring and sprat from the Thames estuary 1977-1992. - J. Fish Biol. **56**: 1408-1426.
- PRITCHARD, G., HARDER, L.D. & MUTCH, R.A. (1996): Development of aquatic insect eggs in relation to temperature and strategies for dealing with different thermal environments. - Biological Journal of the Linnean Society **58**: 221-244.
- REICHARD, M. & JURAJDA, P. (2004): The effects of elevated river discharge on the downstream drift of young-of-the-year cyprinid fishes. - J. Freshwat. Ecol. **19**: 465-471.
- REICHARD, M., JURAJDA, P. & ONDRACKOVA, M. (2002): Interannual variability in seasonal dynamics and species composition of drifting young-of-the-year fishes in two European lowland rivers. - J. Fish Biol. **60**: 87-101.
- RIBEIRO, F., CRAIN, P.K. & MOYLE, P.B. (2004): Variation in condition factor and growth in young-of-year fishes in floodplain and riverine habitats of the Cosumnes River, California. - Hydrobiologia **527**: 77-84.
- RIFFLART, R., CARREL, G., LE COARER, Y. & NGUYEN THE FONTEZ, B. (2009): Spatio-temporal patterns of fish assemblages in a large regulated alluvial river. - Freshwat. Biol. **54**: 1544-1559.
- RINCHARD, J. & KESTEMONT, P. (1996): Comparative study of reproductive biology in single- and multiple-spawner cyprinid fish .I. Morphological and histological features. - J. Fish Biol. **49**: 883-894.
- RINCHARD, J., KESTEMONT, P. & HEINE, R. (1997): Comparative study of reproductive biology in single- and multiple-spawner cyprinid fish .II. Sex steroid and plasma protein phosphorus concentrations. - J. Fish Biol. **50**: 169-180.

- RINCHARD, J., PONCIN, P. & KESTEMONT, P. (1998): Croissance ovocytaire et régulation stéroïdienne chez les poissons à pontes unique et multiples : une revue. - *Annales de Limnologie* **34**: 211-226.
- ROGER, M.C. & FAESSEL, B. (1989): Effets de l'échauffement artificiel de l'eau du Rhône sur le développement et la production des Gammaridae. - *Hydroécol. Appl.* **1-2**: 53-83.
- ROGER, M.C., FAESSEL, B. & LAFONT, M. (1991): Impact thermique des effluents du Centre de Production Nucléaire du Bugey sur les invertébrés benthiques du Rhône. - *Hydroécol. Appl.* **3**: 63-110.
- ROUX, A.L. (1984): The impact of emptying and cleaning reservoirs on the physico-chemical and biological water quality of the Rhône downstream of the dams. - In: LILLEHAMMER, A. & SALTVEIT, S.J. (Eds), *Regulated rivers*. Universitetsforlaget AS, Oslo, pp. 61-70.
- SCHIEMER, F., KECKEIS, H., RECKENDORFER, W. & WINKLER, G. (2001): The "inshore retention concept" and its significance for large rivers. - *Arch. Hydrobiol. Suppl.* **135**: 509-516.
- TEDESCO, P.A., SAGNES, P. & LAROCHE, J. (2009): Variability in the growth rate of chub *Leuciscus cephalus* along a longitudinal river gradient. - *J. Fish Biol.* **74**: 312-319.
- THEVENET, A. & STATZNER, B. (1999): Linking fluvial fish community to physical habitat in large woody debris: sampling effort, accuracy and precision. - *Arch. Hydrobiol.* **145**: 57-77.
- TISSOT, L. & SOUCHON, Y. (2010): Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. - *Hydroécol. Appl.* **17**: 17-76.
- TOWNSEND, C.R. (1989): Population cycles in freshwater fish. - *J. Fish Biol.* **35**: 125-131.
- TOWNSEND, C.R. & PERROW, M.R. (1989): Eutrophication may produce population cycles in roach, *Rutilus rutilus* (L.), by two contrasting mechanisms. - *J. Fish Biol.* **34**: 161-164.
- TOWNSEND, C.R., SUTHERLAND, W.J. & PERROW, M.R. (1990): A modelling investigation of population cycles in the fish *Rutilus rutilus*. - *J. Anim. Ecol.* **59**: 469-485.
- VADAS, R.L., Jr & ORTH, D.J. (1993): A new technique for estimating the abundance and habitat use of stream fishes. - *J. Freshwat. Ecol.* **8**: 305-317.
- VESLOT, J. (2012): Discrimination automatique des cohortes de juvéniles à partir des distributions de tailles. Irstea, UR Hydrobiologie, Aix-en-Provence, 120 p.
- WIESER, W. (1991): Physiological energetics and ecophysiology. - In: WINFIELD, I.J. & NELSON, J.S. (Eds), *Cyprinid Fishes. Systematics, biology and exploitation*. Fish and fisheries Series 3. Chapman & Hall, London, pp. 426-455.
- WOLTER, C. (2007): Temperature influence on the fish assemblage structure in a large lowland river, the lower Oder River, Germany. - *Ecol. Freshwat. Fish* **16**: 493 - 503.
- WOLTER, C. & BISCHOFF, A. (2001): Seasonal changes of fish diversity in the main channel of the large lowland River Oder. - *Regul. Rivers* **17**: 595-608.
- WOLTER, C. & MENZEL, R. (2005): Using commercial catch statistics to detect habitat bottlenecks in large lowland rivers. - *River Res. Applic.* **21**: 245-255.
- WOLTER, C. & VILCINSKAS, A. (1997): Characterization of the typical fish community of inland waterways of the north-eastern lowlands in Germany. - *Regul. Rivers* **13**: 335-343.
- WOOTTON, R.J. (1990): *Ecology of Teleost Fishes*. Fish and Fisheries Series 1. - Chapman & Hall, London, 404 p.

6 Résumé

6.1 Introduction

Confrontés à une hausse progressive de la température du fleuve, les producteurs d'énergie ont souhaité un assouplissement des contraintes de rejets. Nous sommes désormais confrontés à des questions essentielles, portant sur les conséquences écologiques du réchauffement climatique et, de manière plus pragmatique, sur les limites « acceptables » pour le bon fonctionnement de l'hydrosystème fluvial.

La synthèse de l'étude thermique du Rhône Phase III (2006) a fait le point des connaissances acquises au droit des 4 grands sites nucléaires (centrales de Bugey, de Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil, de Cruas-Meysses et du Tricastin). Mais ce travail n'a pas apporté de réponses satisfaisantes quant aux effets biologiques de la hausse des températures.

Les conséquences du changement climatique sont difficilement prévisibles. A l'heure actuelle, en période estivale, le Rhône peut atteindre des températures supérieures à 28°C, et présenter des déficits hydrologiques inégaux. Sachant que tous les processus métaboliques, et d'autres paramètres tels que la teneur en oxygène dissous sont dépendants de la température, ces conditions désormais récurrentes ont des effets de plus en plus marqués sur la flore et la faune typiques du Rhône.

Chez les ectothermes aquatiques, dont une majorité de poissons, la taille est dépendante de la température des eaux. Généralement, une relation linéaire, significativement positive, associe la taille et la température exprimée par une somme de degrés-jours.

Suite à l'étude thermique Rhône phase III, nous avons proposé une analyse de la taille des juvéniles à l'échelle du Rhône et de ses grands affluents.

Cette compilation de données piscicoles a permis (1) de regrouper un grand nombre d'individus par espèce, (2) de compenser le manque d'amplitude thermique existante à l'échelle d'un tronçon fluvial et (3) d'avoir une vision globale du fleuve.

Cette étude a pour principal objectif de définir les liens associant la taille post-estivale de jeunes cyprinidés (âge 0+) et le contexte thermique existant au cours de la période de reproduction et de croissance des poissons. Elle porte sur deux cyprinidés communs et abondants : le gardon (*Rutilus rutilus*) et le chevaine (*Squalius cephalus*).

A partir de ces deux modèles biologiques, nous avons essayé de répondre aux questions suivantes :

- existe-t-il des différences significatives de taille des individus d'une même classe d'âge dans les différents milieux aquatiques à l'échelle locale et régionale ?
- est-il possible d'obtenir une relation générale associant la taille des juvéniles capturés en fin d'été et la température enregistrée au cours de la période de croissance printanière ?
- peut-on considérer que les évolutions thermiques ont sensiblement modifié la taille des jeunes de l'année ?

6.2 Matériel et méthodes

6.2.1 Données Poissons

Les données piscicoles proviennent de l'Université Lyon 1 (UMR CNRS 5023), du bureau d'études ARALEP (Villeurbanne, ex-ARALEPBP), de Irstea (ex-Cemagref, UR BELY

à Lyon, UR HYAX à Aix-en-Provence) et de l'ONEMA (Délégation Interrégionale 8, Montpellier) pour la Durance.

L'échantillonnage a été réalisé par pêche électrique selon trois méthodes différentes : la pêche en continu dite de rive (PCR), la pêche par Echantillonnage Ponctuel d'Abondance (EPA), et la pêche par ambiances.

Dans le cadre de ce travail, seule la longueur totale (LT) exprimée en mm a été utilisée.

Une base de données Access a été créée pour regrouper les données piscicoles obtenues entre 1975 et 2011. Elle rassemble 51 espèces et plus de 717 000 poissons capturés dans 147 stations réparties sur le Rhône de la Chautagne (Haut-Rhône, pK -146.0) jusqu'à l'aval immédiat de l'usine de Beaucaire (aménagement de Vallabrègues, Bas-Rhône, pK 269.0), et 34 stations sur quatre affluents (l'Ain dans sa basse vallée, la Saône entre Mâcon et Lyon, l'Ardèche dans son tiers médian entre Saint-Sernin et Pradons, la moyenne et basse Durance entre Manosque et Avignon). La famille des Cyprinidae compte 23 espèces, regroupe plus de 90% des effectifs et la majorité des espèces dominantes.

Du fait de méthodes d'échantillonnage différentes, nous avons défini la station comme l'unité spatiale de base. Elle correspond à un site de pêche inventorié le même jour, pouvant en fonction de la méthode de pêche utilisée, représenter un linéaire de rive, un regroupement de plusieurs ambiances, ou d'EPA. Les stations sont majoritairement associées à la présence d'un ouvrage hydro-électrique de basse chute, à raison de six sur le Haut-Rhône (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Creys-Malville, Bugey, Miribel-Jonage), six sur le Bas-Rhône (Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon, Montélimar, Donzère-Mondragon, Caderousse et Vallabrègues), et à la présence de 5 centrales thermiques (Bugey, Saint-Alban-Saint-Maurice l'Exil, Cruas-Meysses, Tricastin et Aramon). Des stations se trouvent aussi sur les quatre affluents. Seules les stations des suivis des CNPE présentent une continuité et une régularité temporelle de l'échantillonnage sur trois décennies.

Afin d'obtenir des effectifs suffisants sur la chronique, des regroupements géographiques ont été faits en regard des caractéristiques thermiques disponibles, de l'hydrologie locale et du contexte hydro-morphologique des stations échantillonnées. Nous définissons le secteur comme le regroupement de stations considérées homogènes dans leur fonctionnement thermique, et morphologiquement proches. A l'heure actuelle, le regroupement de stations a permis de définir 54 secteurs, comprenant 12 RCC et 19 îlots localisés dans les RCC de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon, Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon.

Les stations de pêche ont été caractérisées par un nombre restreint de stations de mesure de la température et de stations limnigraphiques. Des métriques qualitatives simplifiées ont été renseignées par les collaborateurs du projet pour caractériser les stations de pêche.

Nos objectifs supposent (1) d'avoir une mesure individuelle de la taille de précision millimétrique, (2) des effectifs de juvéniles suffisants pour une exploitation des distributions en classes de tailles.

Malgré la continuité méthodologique appliquée par les divers organismes de recherche, les données piscicoles les plus anciennes nécessitent un regard critique. Les effectifs de juvéniles très faibles en début de chronique, contrastent avec de forts effectifs à la fin des années 80. Les causes sont multiples : intérêt limité pour l'étude des jeunes stades, les techniques d'échantillonnage, la pollution, une épizootie de bucéphalose ayant affecté les populations piscicoles au début de la chronique, des événements hydrologiques majeurs (crués, voire des étiages prolongés), des vidanges d'ouvrages régulières,... Les jeunes poissons dominent actuellement dans les pêches de rives, notamment depuis les années 90 après les grandes crués des années 1993 et 1994.

A la fin de l'été, les individus ont une taille suffisante pour réduire les problèmes liés aux petites tailles. Malgré leur nombre et l'existence de dix espèces de cyprinidés dominants, seules deux espèces euryèces ont été conservées : le gardon et le chevaîne.

Elles sont associées aux habitats rivulaires à tous les stades de vie, l'échantillonnage par pêche électrique est globalement représentatif de la répartition diurne de toutes leurs classes d'âge. Tolérantes vis-à-vis de la dégradation physique du milieu et ayant une vaste distribution européenne, elles constituent deux modèles biologiques distincts.

Le gardon est phyto-lithophile. La femelle dépose préférentiellement ses œufs sur des macrophytes des eaux calmes, mais peut pondre sur d'autres substrats si nécessaire. Les larves ont des glandes cémentaires pour adhérer au substrat de ponte et éviter les zones anoxiques dans les milieux eutrophes. Le gardon est une espèce à ponte unique, réalisée en quelques jours.

Le chevaîne est lithophile. Il dépose ses œufs sur des fonds pierreux dans des secteurs courants. Le substrat abrite les larves photophobes jusqu'au début de leur nutrition externe. Elles ne possèdent pas de glandes cémentaires pour leur fixation sur le substrat. Elle peut réaliser plusieurs pontes sur une durée supérieure au mois ; à l'origine de plusieurs modes dans la distribution annuelle des tailles.

6.2.2 Données thermiques

Une convention a été mise en place entre eDF et Irstea Aix-en-Provence afin de disposer des températures moyennes journalières centralisées par le service Ressources en Eau, Branche Environnement, eDF-DTG de Grenoble. Les températures proviennent des stations permanentes du Rhône [Creys, Bugey amont, Jons, Loire-sur-Rhône, Saint-Alban amont, Seuil de Peyraud (RCC Péage-de-Roussillon), Cruas amont, Tricastin amont, Tricastin aval, Aramon amont], de la Saône (Couzon) et de l'Ain (Pont de Chazey).

La température du rejet de Tricastin, est une valeur calculée, fonction de la température du fleuve à l'amont, du débit du canal de Donzère-Mondragon et de la production énergétique. Afin de considérer une valeur proche des conditions ambiantes locales, nous avons calculé une température moyenne entre la température amont et la température calculée des eaux réchauffées.

Les relevés biologiques localisés dans un contexte thermique autre que celui du chenal principal ont été traités avec les relevés thermiques disponibles les plus proches, une approximation acceptée malgré la forte hétérogénéité spatiale de la température, en particulier des sections fluviales court-circuitées.

Nous avons utilisé des paramètres simples et/ou synthétiques dont le plus usuel est la somme des degrés-jours au-dessus d'un seuil, calculée sur un intervalle de temps donné. Des auteurs recommandent son usage dans l'étude de la croissance des poissons pour simplifier les modèles de croissance des organismes ectothermes. Les relations linéaires obtenues entre la taille et la somme de degrés-jours (SDJ) supposent d'être dans la gamme normale de tolérance de l'espèce et de ne pas être proche des limites de la niche thermique de l'espèce.

Les principales difficultés résident dans le choix de la température seuil et de la date fixant le début de la sommation thermique. En l'absence de ces données, il a fallu définir des valeurs arbitraires et réalistes. Pour les deux espèces, nous avons utilisé un unique seuil thermique pour l'obtention des degrés-jours (DJ), et deux dates fixes pour le calcul du cumul des températures (SDJ). Nous avons défini une valeur seuil basse (8.8°C), correspondant à la moyenne des valeurs journalières à l'équinoxe du printemps (20 mars), et calculée sur l'ensemble des chroniques thermiques à notre disposition (eDF-DTG). Le calcul des SDJ a été réalisé depuis l'équinoxe de printemps (20 mars), jusqu'au jour moyen du maximum thermique (Cmax) calculé pour le bassin versant du Rhône (8 août). La période de

croissance est définie entre l'équinoxe de printemps et le 8 août, entre les jours juliens 80 et 220.

Les SDJ ont été calculées par année-secteur.

La SDJ est calculée par :

$$\sum_{j=80}^{220} (T_{syj} - 8,8^{\circ}C)$$

Avec j jour julien compris entre 80 et 220 de l'année y dans le secteur s où la température T est supérieure au seuil inférieur de $8,8^{\circ}C$.

Une valeur unique de SDJ est attribuée à toutes les pêches d'un même secteur pour une même année.

6.2.3 Données hydrologiques

Les chroniques hydrologiques proviennent des stations de la banque HYDRO. La donnée utilisée est le débit moyen journalier (m³/s).

Le débit et la température de l'eau sont des paramètres négativement corrélés au cours du printemps.

Afin d'éliminer des effets spatiaux liés à l'augmentation des débits de l'amont vers l'aval, un indice de débit a été basé sur les centiles des débits moyens journaliers classés. Il a été calculé pour la période allant du 20 mars au 8 août (usage des chroniques complètes de débits disponibles dans la banque HYDRO), par année et par station limnigraphique. Chaque jour, le débit moyen est remplacé par le score centré-réduit du centile auquel il appartient. La même opération est réalisée sur l'ensemble des jours de la période, puis les scores journaliers sont sommés pour obtenir l'indice de débit caractéristique de l'année et de la station. Un indice positif indique des débits plutôt élevés par rapport à l'ensemble de la chronique et inversement pour un indice négatif.

6.2.4 Le tri et l'identification des classes d'âge

En l'absence d'une identification précise de l'âge par des techniques spécifiques appropriées (scalimétrie, otolithométrie), ce travail a nécessité une discrimination des âges par expertise à partir des histogrammes de taille sachant que seules les plus jeunes classes d'âge peuvent être identifiées, essentiellement les classes d'âge 0+ (jeunes de l'année n), et 1+ (jeunes de l'année $n-1$).

Malgré les atouts du jeu de données, le travail est long et complexe du fait (1) de la forte variabilité des effectifs des juvéniles, (2) de la variabilité intra-spécifique de la croissance des juvéniles selon les années et les secteurs et (3) de la stratégie de ponte des espèces.

Parce que le tri des classes d'âge, à partir des distributions de la taille, est une opération longue et difficile, nous avons complété ce travail par des approches complémentaires de classification automatique afin d'optimiser ce tri dans de futurs travaux. Cette question a fait l'objet d'un rapport détaillé de Jacques VESLOT (Irstea Aix).

La discrimination des classes d'âges est issue d'une expertise qui présente l'inconvénient de travailler a priori, et ajoute une part d'interprétation et une part de subjectivité. Elle rend la méthode difficilement reproductible. En l'absence de méthodes automatiques efficaces, elle s'avère actuellement la plus fiable. La phase initiale des procédures de tri a été réalisée sur plusieurs cyprinidés (gardon, chevaine, barbeau, hotu, vandoise, brème bordelière, blageon, ablette, goujon) mais seuls le gardon et la chevaine ont fait l'objet des procédures complètes développées pour faciliter la vérification du découpage.

La représentativité de la distribution de tailles pouvant être incertaine du fait des difficultés d'échantillonnage, des méthodes et outils utilisés, de la subjectivité du découpage en classe de tailles, nous avons choisi de caractériser statistiquement chaque pêche par la médiane des longueurs totales des juvéniles. Celle-ci étant peu sensible aux valeurs extrêmes, elle nous apparaît comme un descripteur robuste de la distribution des tailles.

6.3 Résultats et discussion

6.3.1 Le rôle de la température

Malgré la dispersion des tailles, il est possible d'établir une relation linéaire simple et positive entre la taille médiane des juvéniles d'âge 0+ en fin d'été et la somme des degrés-jours au cours de la période de croissance des jeunes poissons, applicable à l'échelle d'un grand bassin versant. Elle a été calculée sans les stations situées dans les panaches thermiques.

La SDJ explique à elle seule 37% de la variabilité des tailles en fin d'année pour le gardon et 35% pour le chevaîne, avec une pente significativement différente de 0. Pour le gardon, la taille médiane en fin d'année est plus grande de 0,03 mm pour chaque degré-jour cumulé supplémentaire, et de 0,02 pour le chevaîne.

Au niveau des rejets thermiques, les tailles des poissons d'âge 0+ sont significativement plus élevées. La différence de taille est cependant plus marquée chez le gardon. Cette différence de taille peut être associée à une durée « potentiellement » longue de croissance dans les zones réchauffées, et une productivité plus importante de la flore et de la faune benthique. Les relevés de Tricastin montrent que la taille des juvéniles n'est toutefois pas en accord avec le cumul thermique des eaux du rejet. Nous avons calculé des SDJ à partir des températures du rejet, puis à partir d'une température moyenne entre l'amont et le rejet. L'exercice montre la robustesse de cette relation linéaire, mais aussi la nécessité d'avoir des relevés thermiques « au plus près » des habitats fréquentés par les poissons.

Il importe de rappeler que les évolutions de la thermie du Rhône consécutives au changement climatique se traduisent par des températures estivales de plus en plus élevées, une précocité et une accélération de la hausse thermique printanière. La prolongation de la saison chaude vers la fin de l'automne est un phénomène plus récent. Lorsque les années sont projetées sur la relation linéaire, il s'avère que la taille des jeunes poissons a globalement suivi la hausse thermique de la dernière décennie.

6.3.2 Influence du débit

La corrélation négative associant l'indice de débit et la somme des degrés-jours montre l'influence du débit sur la température de l'eau pendant la période de printanière. La régression de la taille médiane sur l'indice de débit explique 12% de la variabilité pour le gardon et 8% pour le chevaîne. Toutefois cet indice est très corrélé à la SDJ. Lorsque l'indice de débit et la SDJ sont intégrés dans un même modèle pour expliquer la taille des juvéniles, la pente associée à l'indice de débit n'est plus significative.

6.3.3 Le gradient amont-aval

A l'échelle du Rhône, dont le bassin versant est nettement orienté nord-sud, le gradient spatial est marqué. Les gardons et les chevaines sont petits dans les stations du Haut-Rhône et de l'Ain. Leur taille est intermédiaire dans les stations du tiers amont du Bas-Rhône, tandis que les plus grands sont retrouvés en aval. Les poissons 0+ de la Saône se démarquent par leur grande taille, et présentent une relative similarité avec les stations du Bas-Rhône aval, voire les rejets thermiques.

6.3.4 Le fleuve aménagé

L'usage par défaut de valeurs thermiques identiques pour caractériser plusieurs stations réparties dans des entités fluviales contrastées (lône, RCC, chenal « naturel », canal, retenue) est vraisemblablement à l'origine d'une grande part de la variance non expliquée. Nous n'avons pas la possibilité de renseigner thermiquement les sections court-circuitées du fleuve et avons utilisé les relevés « chenal principal » les plus proches.

En dissociant les pêches selon leur appartenance à des entités « semi-naturelles » (anciens tracés du Rhône) ou des sections chenalées de grandes dimensions (chenal, canal de navigation, retenue, bief sur la Saône), la relation linéaire est conservée dans les deux types de milieux avec une pente non significativement différente.

6.3.5 Les paramètres locaux

Afin de prendre en compte des facteurs abiotiques autres qu'hydroclimatiques, chaque station a fait l'objet d'une description qualitative simplifiée. En regroupant les stations de pêches selon différentes catégories pour ces facteurs (type de milieu, nature des berges, abondance des macrophytes, vitesse du courant, complexité hydraulique, ...), des différences significatives des LT médianes peuvent apparaître entre les catégories. Ces différences disparaissent en grande partie après contrôle de la thermie exprimée par la SDJ.

6.3.6 Autres facteurs de variabilité

Des publications anglaises récentes mettent l'accent sur des facteurs peu étudiés, tel que le parasitisme ou une amélioration de la qualité des eaux.

Nos observations sur le long terme montrent des changements structurels inexplicables, tels que l'augmentation de la proportion de juvéniles dans les pêches postérieures aux grands épisodes de crues, et à l'arrêt de rejets industriels de phosphates dans la vallée du Rhône.

La complexité des études portant sur les parasites a beaucoup contribué à l'abandon d'études spécifiques de longue durée. Or des travaux récents montrent que le parasitisme chez les jeunes poissons peut être un facteur négatif déterminant sur les effectifs et la taille des jeunes poissons. Il est probable que les faibles effectifs de juvéniles en début de chronique aient une grande part d'explication dans l'épizootie de Bucephalose signalée au début des études rhodaniennes.

La densité-dépendance est abondamment citée dans la littérature comme un facteur explicatif de la taille des juvéniles. Lorsque les effectifs sont élevés, la compétition intra-et/ou interspécifique pour l'exploitation des ressources trophiques se traduit par une taille moindre des individus. Dans ce travail, nous n'avons pas obtenu de relations significatives entre les effectifs et la taille des juvéniles d'âge 0+, bien que des observations ponctuelles sur la chronique suggèrent cet effet lors de recrutement important et d'une mortalité réduite au cours de l'hiver suivant (exemple du gardon en 1989).

La taille est maximale dans la Saône. L'abondance des herbiers et l'eutrophie de cette rivière de plaine favorise la croissance des jeunes poissons. Cet effet est vraisemblablement important dans toutes les grandes retenues, en particulier sur le Bas-Rhône.

6.4 Conclusions

Les chroniques piscicoles du Rhône ont permis d'évaluer l'évolution des assemblages piscicoles. Par ailleurs, lorsque la nature des données l'autorise, elles peuvent être utiles pour aborder d'autres questions. Cependant, les objectifs des suivis permanents ont orienté le choix des stations, des méthodes, et la nature des données. Les chroniques

acquises dans le cadre des arrêtés préfectoraux (l'essentiel de notre base de données) montrent que leur usage pour satisfaire de nouveaux objectifs n'est pas sans problèmes.

Les chroniques révèlent la part croissante des juvéniles dans nos captures, et la nécessité d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement écologique du fleuve à partir de cette fraction juvénile sensible aux modifications anthropiques. Avec l'aide de nos partenaires de l'étude Rhône Phase 4, nous avons pu rassembler des chroniques physiques et biologiques conjointes à l'échelle du Rhône français. Elles ont permis d'obtenir des situations hydroclimatiques contrastées.

En l'absence d'informations précises sur l'âge des poissons capturés, obtenues par des techniques appropriées telles que l'otolithométrie, une part importante de ce travail a été consacrée à l'identification des classes d'âge, entre autres des juvéniles de l'année (âge 0+), sur la base d'une analyse par expertise des histogrammes de tailles. La complexité de cette tâche est liée (1) à l'extrême variabilité des effectifs d'une saison et d'une année sur l'autre, (2) à la répartition longitudinale des stations depuis la Chautagne jusqu'à Vallabrègues, et (3) à la modification temporelle progressive des structures en taille, en particulier du fait du changement climatique.

Initialement, nous avons travaillé sur les cyprinidés dominants. Parmi les grandes espèces (chevaine, gardon, barbeau, hotu, vandoise, brème bordelière), seules les deux premières ayant une répartition spatiale et temporelle sensiblement homogènes ont fait l'objet des procédures complètes développées pour aider au découpage par expertise. Les autres espèces ont une répartition spatialement limitée et leurs effectifs évoluent beaucoup sur la période considérée. Les espèces de petite taille sont des espèces à pontes multiples (ablette, goujon, bouvière, pseudorasbora). L'identification des classes d'âge est complexe par la présence de plusieurs modes, et la petite taille des adultes augmente le chevauchement des cohortes annuelles. Elles nécessitent des travaux spécifiques sur la croissance, avec identification des âges par des techniques appropriées.

Les tailles des gardons et des chevaines sont globalement croissantes de l'amont vers l'aval. Plus petites sur le Haut-Rhône amont et sur l'Ain, elles augmentent sur le Haut-Rhône aval, puis nettement sur le Bas-Rhône. Les tailles maximales sont observées sur le Bas-Rhône aval, sur la Saône, et au droit des rejets des centrales.

Pour ces deux espèces, nous avons obtenu une relation linéaire positive associant la taille des juvéniles enregistrée à l'automne et la température printanière (traduite sous la forme d'un cumul de degrés-jours). Du fait d'une relation inverse existante entre le débit et la température, la taille diminue lorsque les débits printaniers sont élevés.

Bien que la taille des juvéniles en fin d'année puisse être différente selon les stations, la prise en compte de la température de l'eau explique une part importante de la taille en fin de saison chaude.

Avec la hausse des températures attribuée au changement climatique, la période favorable pour la croissance s'allonge du fait d'une précocité printanière de plus en plus marquée. Une prolongation de la période chaude en automne a été observée plusieurs fois dans les années récentes. Par conséquent, à l'heure actuelle, du fait des évolutions climatiques, la taille des juvéniles de l'année tend à augmenter. Cette tendance a débuté au cours des années 1990.

Contrairement à d'autres travaux réalisés sur de grands cours d'eau de plaine, nous n'avons pas observé de relation négative significative entre la taille et les effectifs de poissons capturés, attribuée à la compétition pour l'exploitation de ressources trophiques.

D'autres facteurs ayant des effets majeurs sur la croissance ont été publiés récemment, tels que le parasitisme des jeunes poissons, ou l'amélioration de la qualité des eaux. Ils montrent que des facteurs autres que hydroclimatiques ne peuvent être sous-estimés.

Irstea Aix-en-Provence

UR Hydrobiologie

3275 Route de Cézanne

CS 40061

13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5

