

- RAPPORT D'ETUDE -



2020 N° 8/15

Suivi des passes-pièges à anguilles sur le Rhône aval

- Tendances 2008-2020 -

LAMBREMON J., RIVOALLAN D., • Mars 2021



Photo de couverture
(© MRM)

Référence à citer

LAMBREMON J., RIVOALLAN D., 2021. Suivi des passes-pièges à anguilles sur le Rhône aval. Campagne d'Études 2020. Association Migrateurs Rhône-Méditerranée. 40 p + annexes

Remerciements

L'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée (MRM) tient à remercier vivement tous ceux qui, par leur collaboration technique ou financière, ont contribué à la réalisation de cette étude.

PARTENAIRES FINANCIERS

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse
- Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur
- Fédération Nationale pour la Pêche en France
- Compagnie Nationale du Rhône dans le cadre de ses missions d'intérêt général

MEMBRES MRM

- Fédérations Départementales des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique (FDAAPPMA) de l'Ain, des Alpes de Haute Provence, des Hautes-Alpes, des Alpes-Maritimes, de l'Ardèche, de l'Aude, des Bouches-du-Rhône, de la Corse, de la Drôme, du Gard, de l'Hérault, de l'Isère, de la Loire, des Pyrénées-Orientales, du Rhône, de la Savoie, de Haute-Savoie, de Haute-Saône, de la Saône et Loire, du Var et du Vaucluse
- Association Régionale des Fédérations de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique PACA (ARFPPMA PACA)
- Association Régionale des Fédérations de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique Auvergne-Rhône-Alpes (ARPARA)

PARTENAIRES TECHNIQUES

- Compagnie Nationale du Rhône, notamment Direction Régionale d'Avignon

Résumé

Afin d'améliorer le franchissement des usines-écluses de Beaucaire, Avignon et Caderousse par l'Anguille et de répondre aux objectifs du plan de gestion des poissons migrateurs, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) a équipé de passes-pièges à anguilles ses 3 premiers aménagements sur chacune des rives. Le suivi de ces dispositifs est assuré par l'Association Migrateurs Rhône Méditerranée depuis leur installation et doit permettre de mieux connaître la dynamique migratoire de l'espèce et de fournir un indicateur de colonisation de l'axe Rhône.

Le suivi 2020 a été effectif du 3 juin au 31 novembre (début tardif suite à la pandémie du Covid-19). La période de suivi s'étale donc cette saison sur 180 jours durant laquelle 55 relèves ont été réalisées à Beaucaire, 48 à Avignon et 32 à Caderousse. Le fonctionnement des dispositifs a été moyennement bon cette saison (malgré 83 % de fonctionnement en moyenne sur la période de suivi), notamment pour la passe installée en rive droite de Beaucaire (38 % du temps en fonctionnement) et la passe installée en rive droite d'Avignon (77 % du temps en fonctionnement couplé un problème de configuration du débit d'attrait sur la totalité de la période de suivi).

Les effectifs comptabilisés en 2020 font partie des plus faibles de la chronique de suivi (37 377 à Beaucaire, 4 507 à Avignon et 5 057 à Caderousse). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en vidéo-comptage sur la passe à poissons de Sauveterre qui enregistre 1 782 anguilles en 2020.

La migration s'est étendue de début juin à début octobre sur l'aménagement de Beaucaire. Les captures sur l'aménagement d'Avignon se concentrent du début du mois de juin à début août. Les captures sur l'aménagement de Caderousse sont quant à elles observées de fin juin à début juillet.

La répartition globale des classes de taille montre une faible proportion d'individus de tailles inférieures à 100 mm attestant de captures d'anguilles provenant de précédentes cohortes et déjà présentes au droit des ouvrages en début de suivi.

L'évolution mensuelle des classes de tailles est ainsi atypique en 2020 avec une sous-représentativité d'individus issus du recrutement de l'année sur Beaucaire. Il semblerait que le mauvais recrutement observé ces 5 dernières années et particulièrement marqué en 2018-2019 couplé à une hydrologie peu soutenue en 2020 se traduiraient d'une part par une baisse des individus de tailles < à 100 mm et de l'autre par le déplacement limité de l'ensemble des individus engendrant globalement de faibles captures.

Les problèmes de fonctionnement des dispositifs de captures pourraient également avoir joué un rôle dans les faibles captures de 2020.

Concernant l'état de la population, des analyses parasitologiques ont été menées en 2017 et 2018 sur 301 anguilles montrant qu'en moyenne, 77 % des individus sont parasités par le nématode *Anguillicoloides crassus*.

Les prévalences parasitaires sont identiques entre les 3 sites (Chi-2, $p > 0,05$) mais l'intensité parasitaire moyenne est plus élevée à Beaucaire que sur les aménagements amont (test Kruskal-Wallis suivi d'un Dunn-Bonferroni, $p < 0,05$).

Ce résultat pourrait s'expliquer d'une part par des conditions plus favorables pour la réalisation du cycle du parasite à l'aval (présence d'hôtes intermédiaires par exemple) et de l'autre par le fait que les anguilles les plus performantes (i.e. moins parasitées), auraient plus de chances de passer les différents barrages et remonter le Rhône (Amilhat, 2019).

Par ailleurs, en partant de l'hypothèse que les anguilles capturées ont des tailles correspondant en majorité à des individus âgés jusqu'à 3 ans, les tendances interannuelles peuvent être calculées au travers des « moyennes mobiles 3 ans » (i.e. la valeur de 2020 correspond à la moyenne des effectifs 2018, 2019, 2020).

Sur Beaucaire, une tendance à l'augmentation est ainsi observée jusqu'en 2015/2016 suivi d'une baisse ces dernières années.

Sur Avignon, une nette diminution des effectifs est également observée depuis 2015/2016.

Les résultats sur Caderousse sont quant à eux difficilement interprétables compte tenu des problèmes de fonctionnement récurrents des dispositifs.



Sommaire

Introduction	7
1 Résultats	8
1.1 Campagne de suivi	8
a) Fonctionnements des passes-pièges	8
b) Évolution des paramètres environnementaux	10
c) Évolution des captures 2020	14
d) Comparaison du flux migratoire aux éclusées nocturnes	16
e) Structure en taille de la population migrante	17
f) État sanitaire des individus capturés dans les passes-pièges	22
g) thèse de la migration 2020	23
1.2 Tendances interannuelles	24
a) Évolution des flux migratoires	24
b) Fonctionnement des dispositifs	31
2 Conclusion et perspectives	33
Bibliographie	35
Table des figures	39
Table des tableaux	40
Table des annexes	40

Introduction

L'Anguille européenne, poisson migrateur amphihaline thalassophile, a connu un effondrement de sa population ces vingt dernières années. Elle est classée en liste rouge de l'UICN et subit en effet de nombreuses pressions (d'origines anthropiques et naturelles) qui affectent chaque phase de son cycle biologique. Son déclin a conduit à l'instauration en 2007 d'un règlement européen (n° 1100/2007) visant à ramener la population à ses valeurs historiques et transcrit dans un Plan National de Gestion de l'Anguille.

Sur le Rhône, les trois premiers aménagements hydroélectriques de la Compagnie Nationale du Rhône rencontrés depuis l'embouchure sont Beaucaire-Vallabrègues, Avignon et Caderousse et représentent des points de blocage importants pour l'ensemble des espèces piscicoles et plus particulièrement pour les poissons migrateurs.

Ainsi, dans le cadre du Plan de Gestion des Poissons Migrateurs (PLAGEPOMI) et afin de répondre aux objectifs du Plan de Gestion Anguille, la CNR a équipé ces trois ouvrages de systèmes de franchissement spécifiques à l'Anguille. Une première passe-piège a ainsi été installée en rive gauche de Beaucaire en 2005 et une seconde sur l'autre rive en 2006. Les deux aménagements amont ont quant à eux été équipés, sur chacune de leur rive, en 2010 (fonctionnelles à partir de 2012).

Le suivi de ces dispositifs est assuré par l'Association Migrateurs Rhône Méditerranée depuis leur installation et doit permettre de mieux connaître la dynamique migratoire de l'espèce et de fournir un indicateur de colonisation de l'axe Rhône. De plus, les données récoltées alimentent « l'Observatoire des poissons migrateurs » du bassin Rhône Méditerranée et plus largement le réseau de surveillance européen de l'espèce (conformément au règlement européen n° 1100/2007) *via* notamment l'aménagement de Beaucaire retenu comme site index du Plan de Gestion Anguille.

Le suivi des passes-pièges de ces aménagements revêt donc un intérêt majeur pour la préservation et la restauration de la population d'Anguille européenne et a ainsi été inscrit dans le programme de suivi pérenne des populations de poissons migrateurs du PLAGEPOMI 2016-2021 (orientation 3).

Le présent rapport annonce les résultats de la campagne 2020 ainsi que les tendances observées depuis le début de ces suivis. Les informations concernant le contexte des sites et la méthodologie du suivi sont présentées en annexe (*Annexe 1*).

1 Résultats

1.1 Campagne de suivi

Le suivi 2020 a été effectif du **3 juin** au **30 novembre** (début de suivi tardif en raison de la propagation du Covid-19). La période de suivi s'étale donc cette saison sur **180 jours** durant laquelle 55 relèves ont été réalisées à Beaucaire, 48 à Avignon et 32 à Caderousse (Tableau 1).

Tableau 1 : Synthèse de la campagne de suivi 2020 sur les 3 aménagements

	Beaucaire		Avignon		Caderousse	
	RD	RG	RD	RG	RD	RG
Mise en service	03/06/2020	03/06/2020	03/06/2020	03/06/2020	03/06/2020	03/06/2020
Dernière relève réalisée	30/11/2020	30/11/2020	30/11/2020	30/11/2020	30/11/2020	30/11/2020
Jours de suivi	180	180	180	180	180	180
Total jours d'arrêt	8	111	4	42	1	19
Jours effectifs de suivi	172	69	176	138	179	161
Fonctionnement	96%	38%	98%	77%	99%	89%
Nombre de relèves	55		48		32	

a) Fonctionnements des passes-pièges

Certains dysfonctionnements et arrêts volontaires des passes-pièges sont survenus durant le suivi, engendrant ainsi un nombre de jours effectifs de suivi inférieur à 180. Le fonctionnement des dispositifs a été moyennement bon cette saison (malgré 83 % de fonctionnement en moyenne sur la période de suivi), notamment pour la passe installée en rive droite de Beaucaire (38 % du temps en fonctionnement) et la passe installée en rive droite d'Avignon (77 % du temps en fonctionnement cependant couplé un problème de configuration du débit d'attrait sur la totalité de la période de suivi).

Ces arrêts ou dysfonctionnements peuvent influencer la dynamique migratoire et biaiser la comparaison des captures entre les différents dispositifs. Il est donc important de les identifier afin d'ajuster les interprétations des résultats mais aussi de trouver les solutions qui permettront un fonctionnement optimal des passe-pièges. Les principales causes de ces perturbations sont les suivantes :

- **Des dysfonctionnements électriques** des pompes hydrauliques (décelés grâce aux compteurs horaires).
- **Des mises hors d'eau de la pompe** sur le dispositif installé en rive gauche de Beaucaire (observées lorsque le débit est inférieur à 650 m³/s et décelées en confrontant le relevé du compteur au débit).
- **Des colmatages de la pompe et/ou du bac de capture** observés essentiellement en période de crue lorsque d'importantes quantités de particules fines sont mises en suspension. Au niveau de la pompe, elles engendrent des variations de débit d'alimentation qui perturbent les écoulements sur la rampe de montaison et au sein du bac de captures. S'ils s'affaiblissent, les écoulements au niveau de la rampe peuvent être interrompus, empêchant alors la remontée des anguilles et le renouvellement de l'eau du bac de capture devient beaucoup plus lent causant alors une mauvaise oxygénation.

En cas de pic de captures, et de fortes densités dans le bac, cette mauvaise oxygénation peut induire de la mortalité. Au contraire, lorsque le débit s'intensifie (généralement à la relance de la pompe par un opérateur), les vitesses d'écoulement, trop fortes, peuvent constituer une barrière, notamment pour les plus petits individus.

Par ailleurs, le colmatage de la grille de fond par les particules fines empêche le renouvellement de l'eau au sein du bac pouvant créer des problèmes d'oxygénation et donc de mortalités en cas de pics de captures. D'autre part, il entraîne un débordement du bac permettant aux individus piégés de s'échapper, et impactant alors le jeu de données. Enfin, les débris végétaux, lors d'épisodes de hautes eaux, sont aspirés par la pompe et bouchent le débit d'attrait, masquant ainsi l'entrée de la passe.

- **D'autres types d'arrêts exceptionnels**, tels que la réalisation de travaux sur les dispositifs ou une mise en service retardé pour des raisons organisationnelles propres à chaque aménagement (rendez-vous pour l'élaboration des plans de prévention).

Tableau 2 : Nombre de jours de dysfonctionnements et d'arrêts par dispositif entre le 3 juin et le 30 novembre 2020

	Beaucaire		Avignon		Caderousse	
	RD	RG	RD	RG	RD	RG
Dysfonctionnements électriques	6	0	0	0	0	0
Pompe hors d'eau	0	54	0	0	0	0
Colmatage	2	0	4	7	1	12
TOTAL Dysfonctionnements	8	54	4	7	1	12
Arrêts volontaires	0	57	0	35	0	7
Autre (travaux, retard mise en service...)	0	0	0	0	0	0
TOTAL Arrêts	8	111	4	42	1	19

À Beaucaire, les problèmes de fonctionnement de la passe-piège en rive droite sont causés majoritairement par des **pannes électriques** (75 %) et du **colmatage** (25 %). Concernant la passe installée en rive gauche, la majorité des arrêts sont causés par la **mise hors d'eau de la pompe**. Ces arrêts ne sont généralement pas préjudiciables pour les anguilles puisqu'ils surviennent en période de bas débits lorsque la migration est faible voire nulle.

Des épisodes de mortalité ont cependant été constatés le 26 juin et le 6 juillet 2020 lors des relèves de la passe en rive gauche (12,6kg d'anguilles au total). Ces épisodes de mortalité font suite à des arrêts de la pompe entraînant un non renouvellement de l'eau du bac entre deux relèves.

Ces arrêts ont été imputés à la réalisation de marnages qui permettent en période de bas débits de maintenir un minimum d'activité hydroélectrique sur l'aménagement, les périodes où le niveau d'eau est au plus bas entraînant une mise hors d'eau de la pompe. Seuls les débits associés à l'épisode de mortalité du 6 juillet (3kg) est compatible avec une mise hors d'eau de la pompe et l'épisode de mortalité du 26 juin serait lié à un arrêt de pompe d'une autre nature (moyenne de 1 261 m³/s entre le 24 et le 26 juin et minimum de 989 m³/s à 01:00 le 26 juin sur la station de Beaucaire-Tarascon de la base de données HYDRO).

L'épisode de mortalité du 6 juillet montre cependant que des mouvements d'anguilles peuvent survenir lorsque les débits sont faibles et qu'une solution doit être trouvée permettant un fonctionnement optimal de la passe localisée en rive gauche sur l'ensemble de la période de suivi (réamorçage automatique de la pompe, déplacement de la pompe, abaissement de la dalle béton sur laquelle la pompe est actuellement positionnée, etc.).

Un dysfonctionnement sur la pompe localisée en rive gauche et nécessitant son changement est également survenu le 6 octobre entraînant un arrêt du dispositif jusqu'à la fin du suivi. Ce dysfonctionnement a pu perturber la migration car même si les effectifs étaient faibles, une seconde vague de captures a été observée sur le dispositif en rive droite début octobre.

Sur l'aménagement d'Avignon, les arrêts de la passe-piège installée en rive droite sont exclusivement des dysfonctionnements liés au **colmatage de la pompe hydraulique**.

Les arrêts sur la passe en rive gauche sont également liés au colmatage (17 %) bien que la majorité soient volontaires (83 %) suite au décrochage de la partie terminale de la rampe de reptation le 27 octobre. De plus, bien que le fonctionnement du dispositif en rive gauche fût correct en 2020 (77 %), une partie de la rampe avait été remplacée en début de saison et le débit d'attrait s'écoulait directement sur les brosses sans qu'une gouttière permettant son écoulement en aval de la rampe soit mise en place au cours du suivi.

Bien que les effectifs observés en rive droite soient tout aussi faibles que ceux observés en rive gauche, l'absence de gouttière aurait potentiellement perturbé la montaison en créant des vitesses d'écoulement trop importantes et il faudrait veiller à ce qu'une gouttière soit installée pour le suivi 2021.

Enfin, sur l'aménagement de Caderousse, les arrêts en rive droite et en rive gauche sont en majorité liés à des colmatage des pompes (100 % en rive droite et 63 % en rive gauche).

Bien que ces arrêts soient peu nombreux, ils ont causé en rive gauche un épisode important de mortalité (15 kg d'anguilles le 1^{er} juillet, soit la presque totalité des captures de cette saison). Des bulleurs ont été installés pour prévenir de nouveaux épisodes de mortalité bien qu'une absence de renouvellement de l'eau du bac associé aux fortes chaleurs reste préjudiciable pour les anguilles compte tenu de la capacité modérée du bac (200 litres).

Les dysfonctionnements du dispositif sont à l'origine des mortalités observées et une vérification plus régulière des passes est à prévoir côté CNR ou MRM. En rive gauche, 37 % du reste des arrêts sont volontaires suite à une fuite survenue sur la canalisation de la pompe du 17 au 24 septembre.

b) Évolution des paramètres environnementaux

Selon la bibliographie et l'analyse pluriannuelle de la chronique de données de Beaucaire entre 2008 et 2015 (Georgeon *et al*, 2018), il a été identifié que les paramètres influençant le plus la migration des anguilles sont la température et le débit. Il s'avère ainsi qu'une température supérieure à 15°C soit nécessaire pour observer les premiers pics de montaison et que les captures sont majoritaires pour des débits supérieurs à 1 000 m³/s.

- Température

Entre le 1^{er} avril et le 31 octobre, la température de l'eau du Rhône a oscillé entre 11°C (le 1^{er} avril à Avignon) et 27°C (le 31 juillet à Beaucaire). Le **seuil de 15°C** a été atteint à partir du **10 avril à Beaucaire** et à **Avignon** et le **18 avril à Caderousse** (pour rappel, début du suivi le 3 juin pour l'ensemble des aménagements) (*Figure 1*).

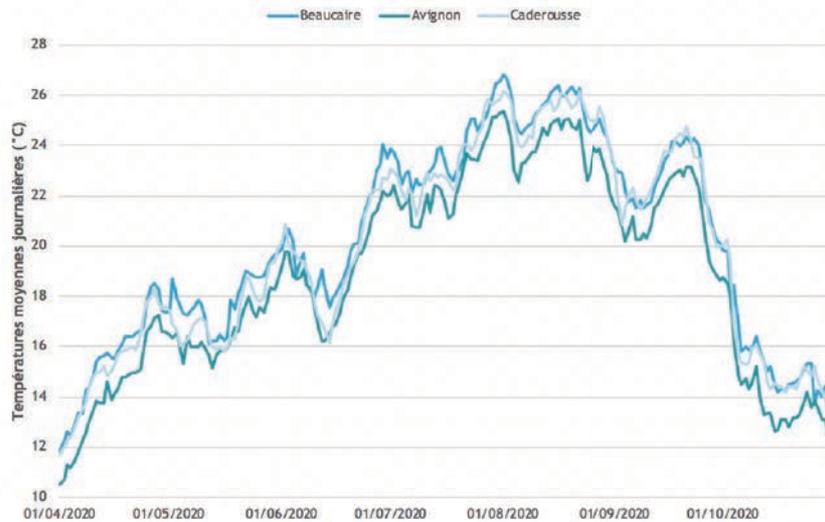


Figure 1 : Température du Rhône sur les 3 aménagements

- Débit

Entre le 1er avril et le 31 octobre, le débit moyen journalier du Rhône a suivi les mêmes tendances d'évolution entre les 3 aménagements et peut-être analysé conjointement au travers des débits observés sur l'aménagement de Beaucaire. Le débit a ainsi oscillé entre 485 m³/s le 26 août et 2 532 m³/s le 14 mai et se distingue en 4 phases (Figure 2) :

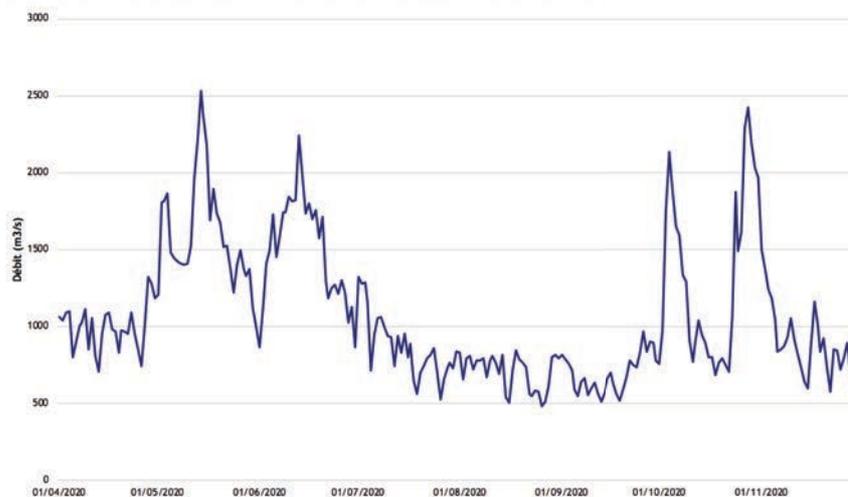


Figure 2 : Évolution du débit moyen journalier du Rhône à Beaucaire durant la période de suivi

- Des débits oscillants autour du seuil de 1 000 m³/s jusqu'au 27 avril (963 m³/s en moyenne) ;
- Une augmentation du débit au-dessus du seuil des 1 000 m³/s à partir du 28 avril (1 490 m³/s en moyenne jusqu'au 8 juillet) avec quelques pics de débit importants autour de mi-mai et mi-juin ;
- Une baisse progressive du débit qui passe sous le seuil des 1 000 m³/s à partir du 9 juillet ;
- Des épisodes de pics de débit début et fin octobre avant une baisse du débit jusqu'à la fin novembre.

En se focalisant sur chaque aménagement, la comparaison des débits entre l'usine-écluse de Beaucaire, le barrage de Vallabrègues et l'apport du Gardon montre une attractivité du canal de fuite (où sont localisées les passes-pièges) par rapport au Rhône court-circuité sur 99,5 % du temps entre avril et octobre (Figure 3).

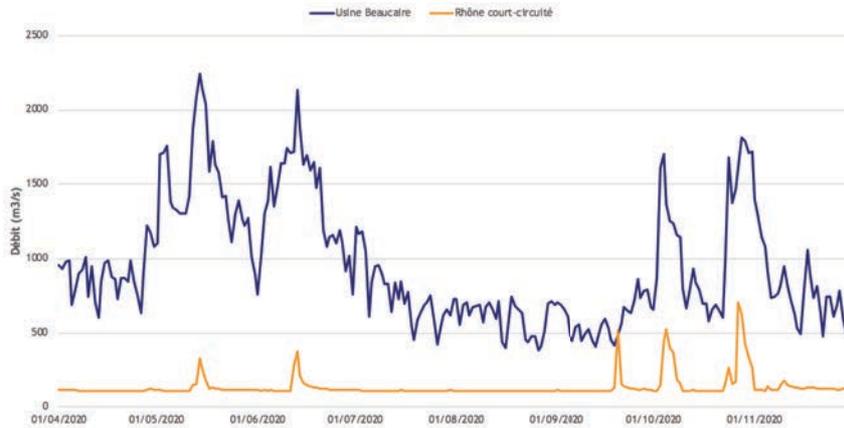


Figure 3 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement de Beaucaire sur la période de suivi (Le Rhône court-circuité correspond aux déversements du barrage de dérivation ajouté au débit du Gardon)

La configuration particulière du Rhône à Avignon nécessite une analyse plus fine des débits. On observe sur 214 jours entre avril et octobre une attractivité plus forte pour le bras de Villeneuve sur 57 % du temps. Quand le bras de Villeneuve était plus attractif, le canal de fuite a toujours été plus attractif que le Rhône court-circuité, dénotant ainsi une attractivité globale des passes-pièges sur 57 % du temps entre avril et novembre (Figure 4).

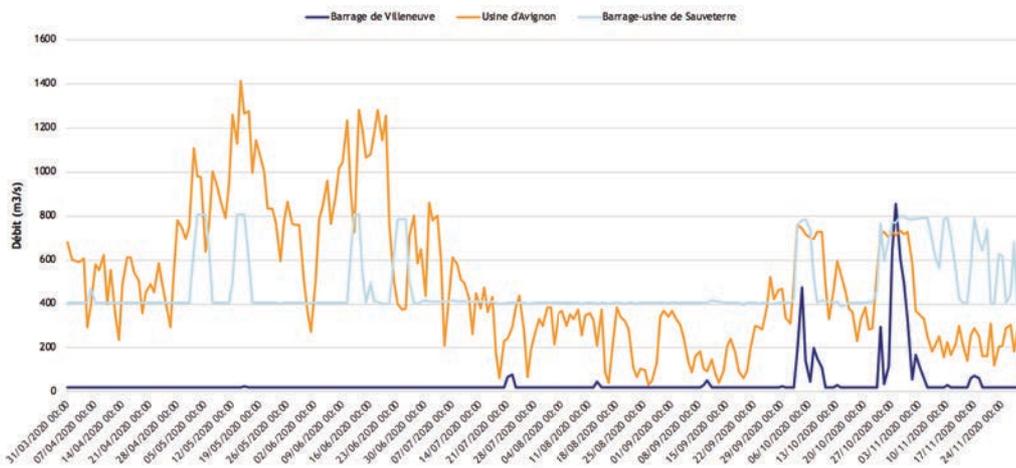


Figure 4 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement d'Avignon sur la période de suivi

Un lien pourrait être établi entre les captures aux passes d'Avignon et l'attractivité du bras de Villeneuve. On observe en effet la quasi-totalité des captures les jours après où le débit était concentré sur le bras de Villeneuve, ce qui attesterait d'un attrait amenant les anguilles à se diriger vers les passes-pièges (Figure 5). Les observations d'anguilles sur le système de vidéocomptage du barrage de Sauveterre attestent néanmoins de passages majoritaires entre le 2 juin et le 11 juillet (93% des individus) alors que le bras de Villeneuve était attractif sur 75 % pour cette période.

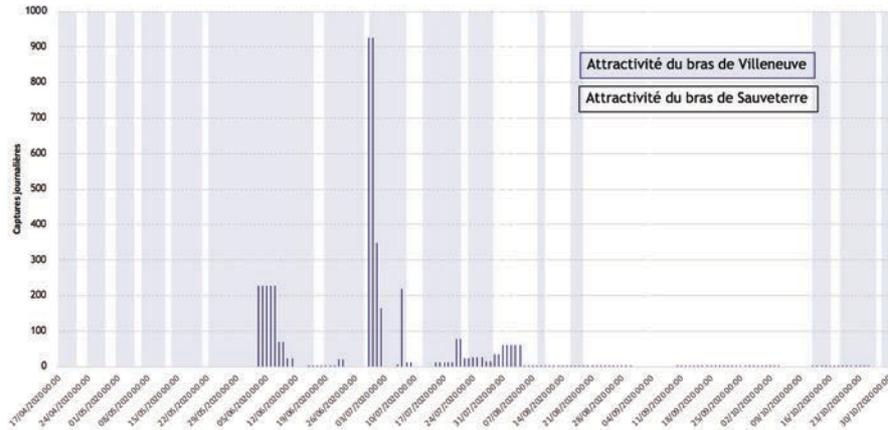


Figure 5 : Attractivité du bras de Villeneuve sur le bras de Sauveterre en 2020

Concernant l'aménagement de Caderousse, l'analyse de la répartition des débits entre l'usine-écluse de Caderousse, le barrage de Caderousse et l'apport de la Cèze montre que le canal de fuite a été plus attractif sur 91,6 % du temps entre avril et octobre (Figure 6).

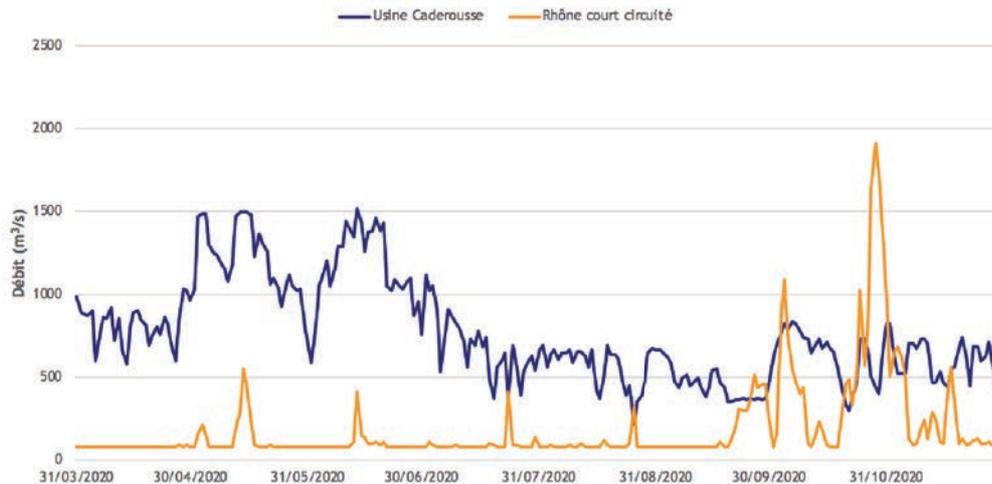


Figure 6 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement de Caderousse sur la période de suivi (Le Rhône court-circuité correspond aux déversements du barrage de dérivation ajouté au débit de la Cèze)

- Synthèse des conditions environnementales

Lors de la campagne 2020, la température du Rhône a dépassé sensiblement le seuil de 15°C à partir du 10 avril. L'hydrologie, quant à elle, a été relativement faible hormis entre le 28 avril et le 9 juillet et en début et fin octobre avec des débits supérieurs au seuil de 1 000 m³/s.

Ainsi, la fenêtre potentielle de migration (période durant laquelle les seuils de température et de débits sont conjointement favorables) s'étale sur plus de deux mois entre avril et octobre : du **28 avril au 9 juillet**, du **3 octobre au 9 octobre** puis du **23 au 31 octobre** sur Beaucaire, Avignon et Caderousse (89 jours).

Par ailleurs, les conditions de débit rencontrées cette année sur l'aménagement d'Avignon montrent que sur les 89 jours où les conditions de migration sont favorables, le canal de fuite de l'usine-écluse d'Avignon a été attractif sur 88 jours (soit un seul jour pour lequel les passes n'étaient potentiellement pas attractives).

c) Évolution des captures 2020

Depuis le début du suivi, l'ensemble des captures est observé entre mi-mai et mi-novembre (soit une période potentielle de 6 mois). La période de migration est identifiée en considérant chaque année le début de migration à 5 % des captures totales de la saison et la fin à 95 % de cet effectif.

Bien que le débit semble régir les mouvements d'anguilles, il s'avère que son influence diffère selon la période de l'année. Ainsi, jusqu'à fin juillet, les captures paraissent indépendantes des variations de débit et sont observées chaque année de manière plus ou moins continue et en simultané sur l'ensemble des aménagements. Puis, entre août et novembre, les pics de captures sont, quant à eux, brefs, beaucoup plus intenses et très fortement corrélés aux variations de débit. Ils ne sont, de plus, pas observés chaque année à Beaucaire et jamais sur les aménagements amont (Georgeon *et al*, 2018).

- Aménagement de Beaucaire

37 377 anguillettes ont été capturées au niveau de l'aménagement de Beaucaire cette saison (contre une moyenne de près de 230 000 depuis 2008) avec une répartition des captures relativement plus importante en rive droite : 26 139 (70 %) en rive droite contre 11 239 (30 %) en rive gauche (Figure 7). Les captures sont très faibles cette saison, comme en atteste le maximum de captures observé le 5 octobre avec un peu plus de 10 000 individus capturés sur les deux dispositifs.

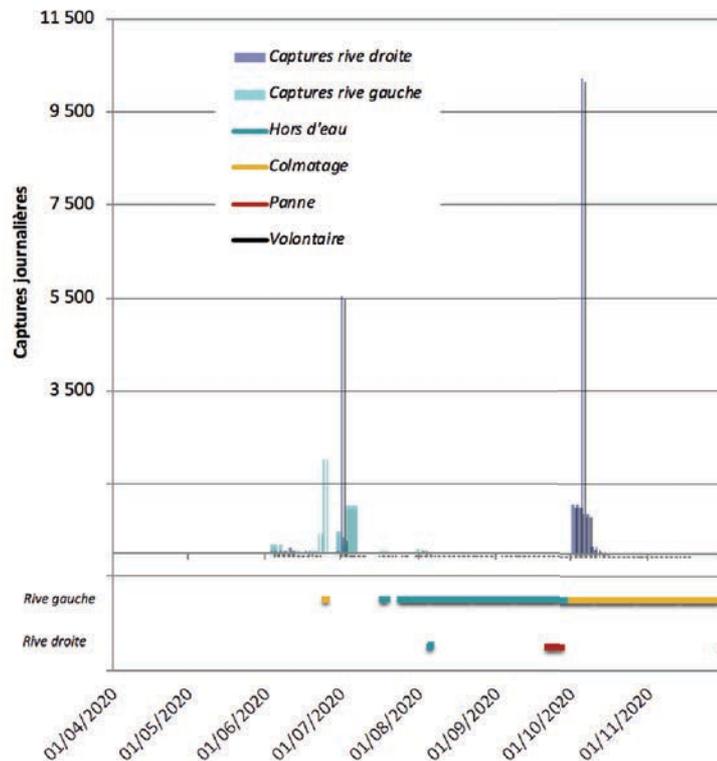


Figure 7 : Anguilles capturées aux passes-pièges de Beaucaire en 2020

Les premières captures amorçant le début de la colonisation, bien que très faibles, ont été enregistrées le 14 juin (5 % des captures totales, respectivement 31 et 47 captures journalières en rive droite et rive gauche).

Les captures se sont poursuivies jusqu'au 9 juillet avec près de 51 % des captures totales enregistrées au cours de ces 26 jours de suivi. Les captures restent faibles jusqu'en octobre, elles ne reprennent réellement qu'à partir du 1^{er} octobre pour se poursuivre jusqu'au 7 octobre (95 % des captures totales).

La période de migration est ainsi étendue sur 91 jours avec cependant une première vague de captures entre mi-juin et mi-juillet suivie d'une deuxième vague début octobre. Ces captures de deuxième partie de saison seraient expliquées par des pics de débit observés à Beaucaire à partir du 3 octobre.

- Aménagement d'Avignon

4 507 anguilles ont été dénombrées au sein de l'aménagement d'Avignon cette saison (contre près de 75 000 en moyenne depuis 2012) avec des captures plus importantes en rive gauche : 1 589 (35 %) en rive droite et 2 918 (65 %) en rive gauche. Les premières captures significatives ont été observées le 4 juin (227 individus par jour en rive droite), bien que le début de suivi tardif (3 juin) laisse supposer un début de migration plus précoce. Ces captures se déroulent relativement tôt en comparaison de Beaucaire (14 juin) où elles sont généralement observées 15 jours avant. Les captures se poursuivent jusqu'au 1^{er} août offrant une période de migration de 59 jours au total (Figure 8).

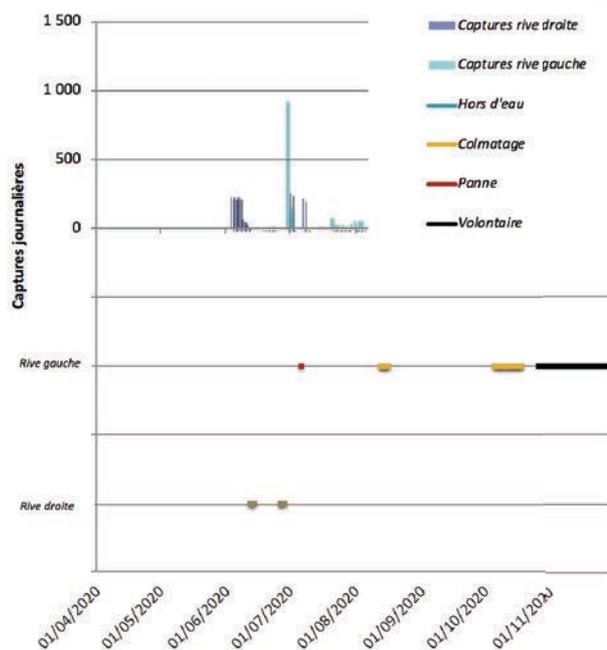


Figure 8 : Anguilles capturées aux passes-pièges d'Avignon en 2020

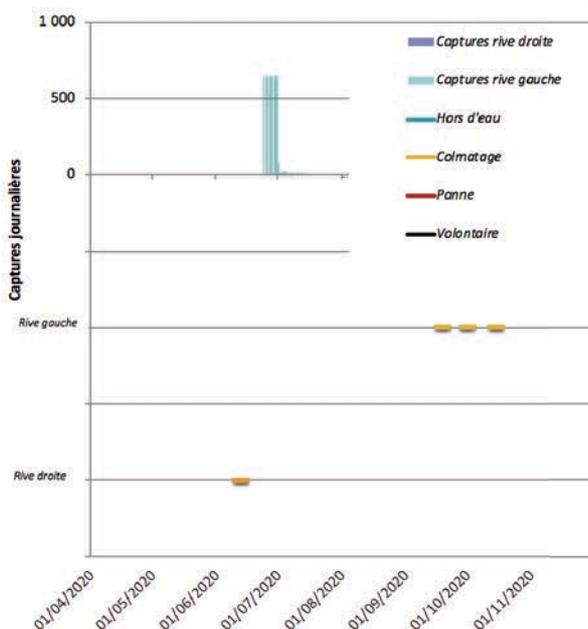


Figure 9 : Anguilles capturées sur les passes-pièges de Caderousse en 2020

- Aménagement de Caderousse

5 057 anguilles ont été capturées en 2020 à Caderousse (contre près de 13 000 en moyenne depuis 2012) presque exclusivement sur le dispositif installé en rive gauche de l'aménagement (1 seule anguille capturée en rive droite en lien avec les dysfonctionnements enregistrés sur ce dispositif). Les premières captures significatives ont été enregistrées le 24 juin et se sont poursuivies jusqu'au 5 juillet. La migration est ainsi courte cette saison (11 jours contre 40 en moyenne depuis 2012), bien que les problèmes de fonctionnement des dispositifs limitent fortement l'interprétation des résultats (Figure 9).

- Comparaison inter-sites

La migration s'est déroulée **majoritairement de mi-juin à début octobre** sur l'aménagement de **Beaucaire** avec toutefois deux vagues distinctes de captures ayant étendu la période de migration. Les captures sur l'aménagement d'**Avignon** se concentrent du début du mois de **juin à début août**. Les captures sur l'aménagement de **Caderousse** sont quant à elles observées de **fin juin à début juillet**.

Par ailleurs, en accord avec la bibliographie, une érosion du nombre de captures est normalement observée de l'aval vers l'amont. En effet, entre deux aménagements les anguilles ont la possibilité de trouver un milieu favorable à leur développement, impliquant une sédentarisation ou la possibilité de coloniser un autre axe de migration *via* les affluents (cas de la Durance, de l'Ouvèze et du bras des Arméniers entre Beaucaire et Avignon et de la Cèze et de l'Aigues entre les aménagements d'Avignon et de Caderousse) ainsi que les contre-canaux. Aujourd'hui, seule la Durance fait l'objet d'un suivi similaire à Mallemort. Toutefois, le nombre et la franchissabilité de certains ouvrages à l'aval de ce site de suivi ne permettent pas d'obtenir des données comparables.

En 2020, bien que l'érosion des effectifs soit visible entre l'aménagement de Beaucaire et ceux des deux aménagements amont, les captures observées sur l'aménagement d'Avignon et de Caderousse sont sensiblement identiques. Ce constat viendrait soutenir l'hypothèse d'un faible recrutement en 2020 (captures à Beaucaire exceptionnellement faibles) couplé à une hydrologie peu soutenue. Les dysfonctionnements observés en rive gauche de Beaucaire (remplacement de la pompe en octobre au moment de la seconde vague de captures) et dans une moindre mesure en rive gauche d'Avignon (absence de gouttière ayant pu perturber la montaison bien que les effectifs observés en rive droite soient tout aussi faibles), seraient également des facteurs ayant pu conditionner les captures de cette saison.

d) Comparaison du flux migratoire aux éclusées nocturnes

Bien que l'efficacité des éclusées spécifiques à poissons sur les anguilles ne soit pas connue, elles sont réalisées en moyenne de 1 à 1,5 fois par nuit entre les mois d'avril et de juin. Par la suite, et conformément au cahier des charges basé sur celui mis en place pour les aloses, elles deviennent rares jusqu'à la fin du suivi en novembre. Le constat est semblable concernant les éclusées diurnes, qui peuvent toutefois être supposées moins efficaces pour les anguillettes compte tenu de leur caractère lucifuge (Georgeon, 2017b).

Au 30 juin, 22 % des captures totales étaient observées à Beaucaire, 67 % à Avignon et 92 % à Caderousse (*Figure 10*). Les caractéristiques de la migration 2020 avec des captures majoritaires sur l'aménagement de Beaucaire soulignent ainsi un décalage entre les opérations d'éclusées spécifiques et le flux migratoire des anguilles. Ce constat serait en faveur d'une extension de la période des éclusées spécifiques sur le mois de juillet.

De plus, les conditions hydrologiques limitantes de 2020 n'ont permis qu'un nombre limité d'éclusées d'avril à juin, notamment à Beaucaire qui enregistre 82 éclusées nocturnes contre les 91 à 136 préconisées selon le cahier des charges (169 éclusées enregistrées à Avignon et 161 à Caderousse).

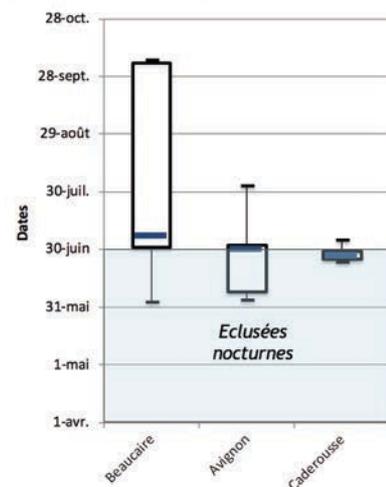


Figure 10 : Comparaison des périodes de migration sur les 3 aménagements avec les éclusées nocturnes en 2020

e) Structure en taille de la population migrante

- Analyses otolithométriques réalisées à Beaucaire en 2005 et 2006

Les analyses otolithométriques menées au niveau de l'aménagement de Beaucaire en 2005 et 2006 montraient que la majorité des individus de moins de 100 mm correspond à des anguilles arrivées durant l'année et que les individus de 100 à 150 mm sont majoritairement des individus âgés d'un an (Auphan et Delhom, 2006) (Figure 11).

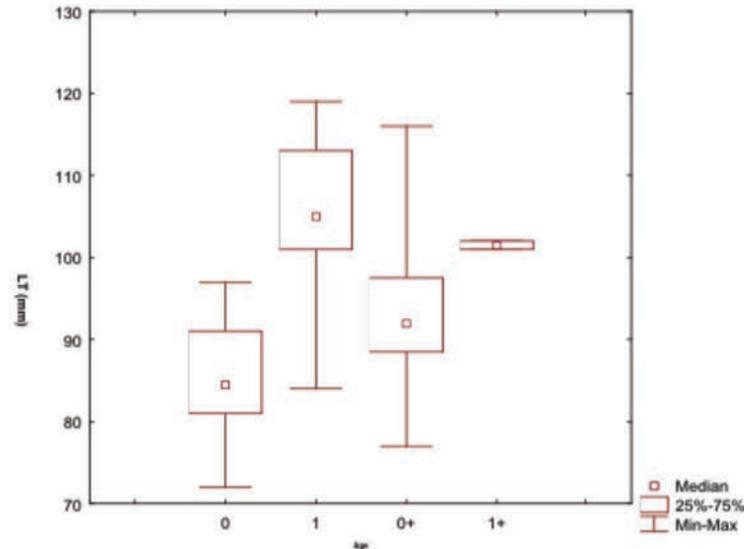


Figure 11 : Répartition des tailles en fonction de l'âge (Auphan et Delhom, 2006)
0 : individus issus du recrutement de l'année, 1 : individus d'1 an

- Compléments d'informations suite aux analyses de 2017 et 2018

En 2017 et 2018, des analyses ont été confiées à l'université de Perpignan et visaient à déterminer le niveau d'infestation par le parasite *Anguillicola crassus* de 302 anguilles de tailles comprises entre 100 et 200 mm prélevées sur les 3 aménagements.

En complément, des analyses otolithométriques ont également été réalisées dans le but d'évaluer l'importance de l'âge des individus sur les prévalences du parasite. Le but principal de cette étude portant sur l'analyse du parasite *Anguillicola crassus*, les résultats présentés ci-dessous permettent d'apporter des compléments d'informations suite aux analyses de 2005 et 2006 sans pour autant se substituer à une étude spécifique de lecture d'âges.

La distribution des âges des anguilles analysées à Beaucaire est tout d'abord significativement différente de celles d'Avignon et de Caderousse (Kruskal-Wallis puis Dunn, $p < 0,05$), avec des anguilles en moyenne plus jeunes sur le site aval de Beaucaire (Figure 12).

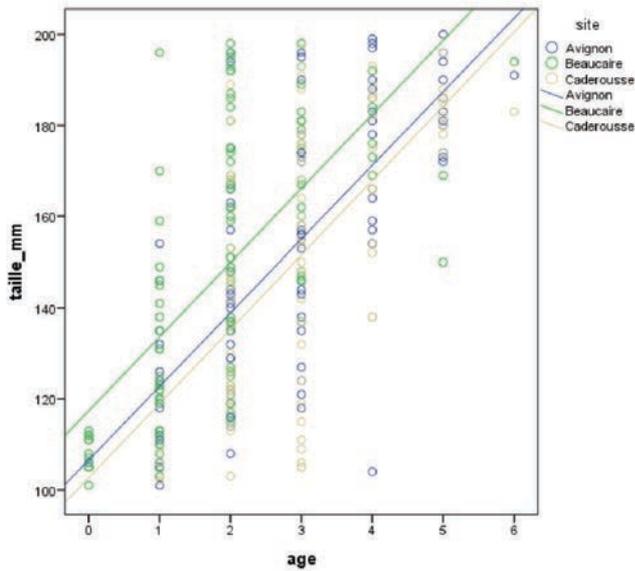


Figure 12 : Distribution des âges des anguilles prélevées à Beaucaire, Avignon et Caderousse entre 2017 et 2018

Les tailles moyennes, minimum et maximum par site et par âge sont présentées en annexe (Annexe E). Ces résultats semblent cohérents avec les classes de tailles actuellement utilisées pour l'analyse de la distribution annuelle des anguilles ($< 100 \text{ mm} = 0+$, $]100 ; 150] = 1+$, $> 150 \text{ mm} = 2+$) et souligneraient que la majorité des individus capturés chaque année aux passes-pièges correspondent à des individus âgés de 3 ans ou moins.

En regardant de façon plus précise, on observe néanmoins une grande variabilité des tailles pour un même âge entre les sites toute années confondues (Figure 13). Ceci souligne ainsi l'intérêt de mener une étude spécifique de lecture d'âges qui permettrait de préciser l'âge des individus rencontrés sur les passes.

Ainsi, dans le cadre d'une étude spécifique de lecture d'âges, des échantillonnages supplémentaires ainsi qu'une validation d'âges pourraient être conduits. Ces nouvelles analyses viseraient la création de classes de tailles plus précises et pertinentes qui permettraient *in fine* de quantifier l'apport de chaque cohorte à la population d'anguilles du Rhône.

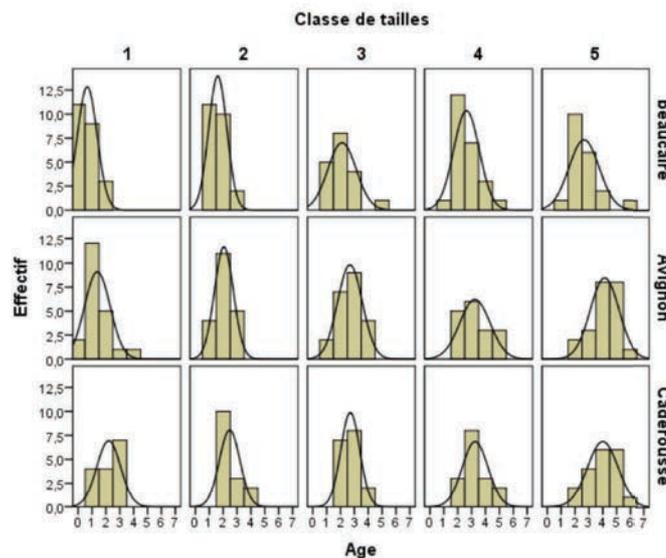
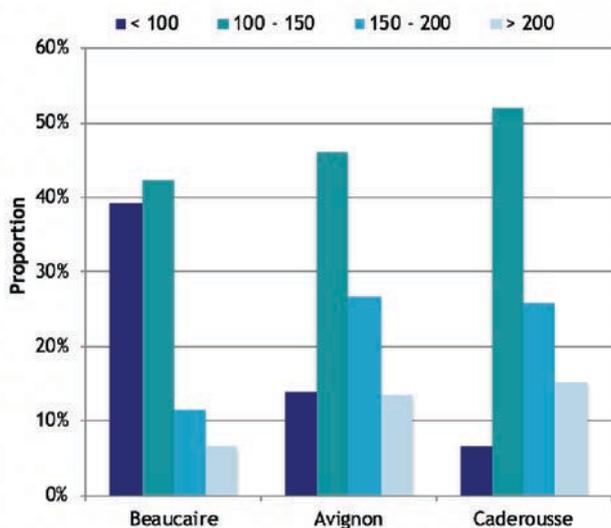


Figure 13 : Histogramme des âges par classe de tailles en mm* et par site pour les années 2017 et 2018 confondues (Amilhat, 2019)

(*1 : [100 - 120[; 2 : [120 - 130[; 3 : [130 - 140[; 4 : [140 - 150[; 5 : [150 - 160[)

• Distribution annuelle

Généralement, la majorité des individus capturés dans les passes-pièges du Rhône ont une taille inférieure à 150 mm (supposés âgés de 1 an et moins) et leur proportion est relativement bien équilibrée entre les sites (81 % à Beaucaire, 61 % à Avignon et 62 % à Caderousse) (Figure 14).



La répartition des classes de tailles évolue cependant différemment selon les sites. La proportion d'individus de taille inférieure à 100 mm (individus issus du recrutement de l'année) décroît ainsi nettement de l'aval vers l'amont (39 % à Beaucaire, 14 % à Avignon et 7 % à Caderousse en moyenne) alors que la proportion d'individus de 100 à 150 mm (âgés de plus d'1 an) augmente de l'aval vers l'amont (42 % à Beaucaire, 46 % à Avignon et 52 % à Caderousse).

Figure 14 : Répartition des classes de tailles interannuelles sur les 3 aménagements entre 2008 et 2019

En 2020, les individus de moins de 150 mm sont majoritaires à Beaucaire (88 %) (Figure 15). Comme observé depuis 2016, ces individus sont, cependant, déficitaires sur les aménagements amont et ne représentent que 36 % à Avignon et 51 % à Caderousse (contre respectivement 60 % et 59 % en moyenne de 2012 à 2019). Ce déficit en petits individus sur les aménagements amont est particulièrement marqué pour les individus de tailles inférieures à 100 mm. Il en est de même pour l'aménagement de Beaucaire qui présente seulement 26% d'anguilles de tailles inférieures à 100 mm (contre 39% en moyenne).

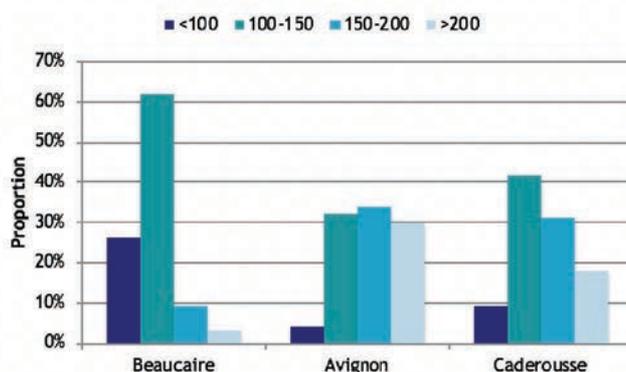


Figure 15 : Proportions des classes de taille 2020 sur les 3 aménagements

Ce constat viendrait appuyer l'hypothèse d'un faible recrutement se traduisant par une présence faible d'individus de l'année. La présence d'autant plus faible de ces individus de petites tailles pourrait également être la résultante de la succession des ouvrages qui entrainerait une sédentarisation des individus de l'année en aval des aménagements.

La présence plus marquée d'individus âgés de plus d'1 an sur les aménagements amont traduirait alors un retard à la migration. En comparaison des répartitions des tailles observées depuis 2008, les individus de tailles comprises entre 150 et 200 mm et supérieures à 200 mm sont ainsi surreprésentés en 2020 sur les aménagements amont et correspondraient à des individus âgés d'au moins 2 ans.

Les tailles moyennes en 2020 varient entre **115 mm à Beaucaire**, **155 mm à Avignon** et **125 mm à Caderousse** et sont significativement différentes entre les aménagements cette année avec un gradient amont/aval perturbé par la présence d'individus majoritairement supérieurs à 150 mm à Avignon (Figure 16).

La taille du plus petit individu capturé sur chaque aménagement n'augmente que sensiblement de l'aval vers l'amont (**85 mm à Beaucaire**, **95 mm à Avignon** et à Caderousse).

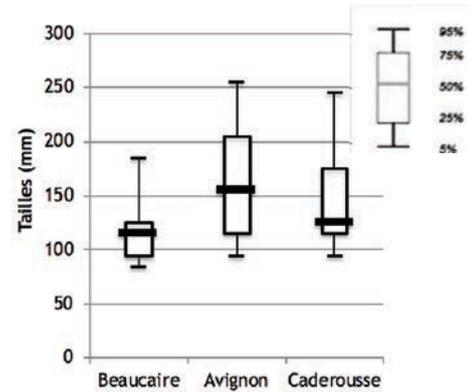


Figure 16 : Tailles moyennes observées sur chaque aménagement en 2020

L'érosion marquée des petites classes de tailles qui semble s'accroître depuis 2016 sur les aménagements amont alors qu'ils sont présents sur l'aménagement de Beaucaire permettrait d'avancer plusieurs hypothèses pouvant se compléter :

- **Hypothèse 1 : Colonisation préférentielle des affluents**

Plusieurs affluents sont positionnés entre les aménagements de Beaucaire et de Caderousse : Gardon, Durance, Ouvèze, Bras des Armeniers, Aigues et Cèze. Selon la répartition des débits sur chaque aménagement, une colonisation préférentielle des affluents par les anguilles est possible (individus de tailles inférieures à 300 mm). Comprendre les modalités de la colonisation des anguilles sur ces affluents (classes de tailles, débits, température) permettrait de mieux cerner la répartition des classes de tailles entre les aménagements. Des échantillonnages ciblant les anguilles migrantes de moins de 300 mm sur les affluents positionnés entre Beaucaire et Caderousse apporterait des informations complémentaires pour confirmer cette hypothèse.

- **Hypothèse 2 : Passage préférentiel par le bras de Sauveterre ou le bras de Villeneuve**

Les conditions de débit rencontrées cette année dans le canal de fuite de l'usine d'Avignon montrent une attractivité du canal de fuite de l'usine-écluse d'Avignon de 55 jours sur les 76 jours où les conditions de migration semblaient être favorables, laissant ainsi une fenêtre d'une vingtaine de jours pour la colonisation d'autres axes. Cette hypothèse reste cependant à pondérer par le fait que des anguilles sont observées au vidéocomptage de la passe à poissons du barrage de Sauveterre même sur des périodes où le canal de fuite de l'usine-écluse d'Avignon semble être plus attractif.

- **Hypothèse 3 : Passage préférentiel par les écluses sans détection possible**

Cette hypothèse ne peut à elle seule expliquer la répartition des classes de tailles entre les aménagements, d'autant plus que les caractéristiques de la migration 2019 soulignent un décalage entre les opérations d'éclusages nocturnes spécifiques et le flux migratoire des anguilles.

Il peut toutefois être envisagé qu'une portion non négligeable d'anguilles puisse avoir emprunté les écluses des usines pour accéder aux zones amont avant la fin des éclusages nocturnes (30 juin).

- **Hypothèse 4 : Retards à la migration en lien avec les éclusées nocturnes**

L'inadéquation des périodes d'éclusages nocturnes avec les périodes de migration cités plus haut pourraient engendrer un retard à la migration des individus de moins de 100 mm. Ces individus seraient présents sur l'aménagement de Beaucaire mais ne seraient capturés que les années suivantes sur les aménagements d'Avignon et de Caderousse et présenteraient alors des tailles de plus de 150 mm.

- Distributions mensuelles

Chaque année, on observe une arrivée progressive des individus issus du recrutement de l'année (< 100 mm) sur tous les aménagements entre les mois d'avril (22 % à Beaucaire, 8 % à Avignon en moyenne) et d'octobre (55 % à Beaucaire, 27 % à Avignon en moyenne). Par ailleurs, ces individus deviennent majoritaires à partir du mois d'août sur l'aménagement de Beaucaire alors qu'ils ne le sont jamais sur les aménagements amont (Georgeon *et al*, 2018) (Figure 17).

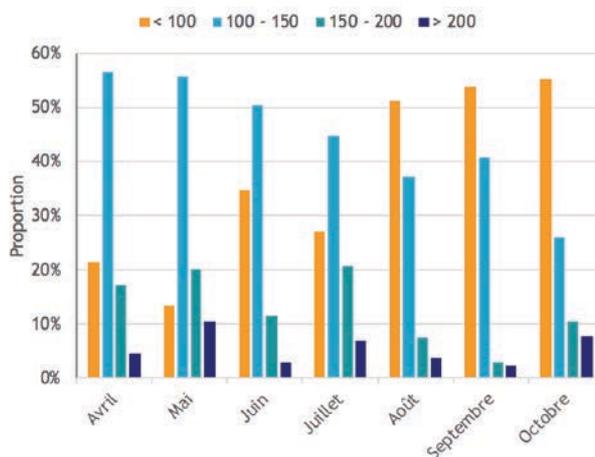


Figure 17 : Répartition des classes de tailles mensuelles habituellement observées à Beaucaire

En 2020, l'évolution mensuelle des classes de tailles à Beaucaire est différente (Figure 18).

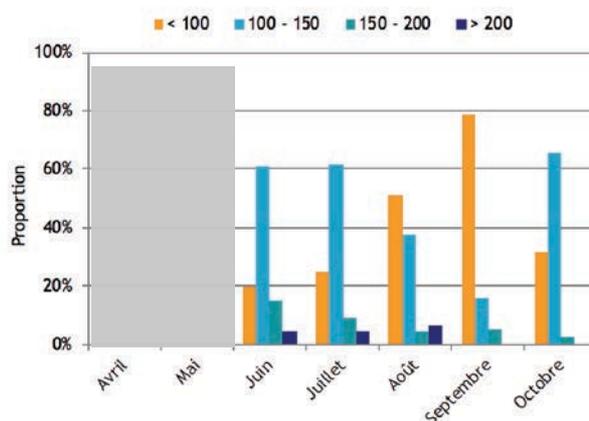


Figure 18 : Répartition des classes de tailles mensuelles à Beaucaire en 2020

Le début du suivi en juin est caractérisé par la présence majoritaire d'individus de tailles supérieures à 100 mm (20 % de moins de 100 mm contre 35% en moyenne). Bien que les effectifs soient faibles à cette période en 2020, la tendance s'inverse bel et bien en août mais les individus de tailles inférieures à 100 mm deviennent à nouveau minoritaires en octobre au moment de la seconde vague de captures.

Ainsi, le mauvais recrutement de 2018-2019 se traduirait par une baisse des individus de tailles < à 100 mm. Le déplacement limité des individus de tailles supérieures à 100 mm pourrait s'expliquer par une hydrologie peu soutenue au courant de l'été 2020 mais également par les faibles recrutements observés sur ces 5 derniers années. Les problèmes de fonctionnement des dispositifs cités auparavant pourraient également avoir impacté la migration.

f) État sanitaire des individus capturés dans les passes-pièges

Les analyses et résultats issus de ce travail concernent uniquement la population d'anguilles ayant réussi à accéder aux bacs de captures et ne reflètent donc pas la population du Rhône. En effet, il est probable que les individus présentant de fortes anomalies ne soient pas observés en raison de l'effort que demande le franchissement des rampes (11m à Beaucaire).

- Épidémiologie du parasite *Anguillicoloides crassus*

En complément des lectures d'âges réalisées sur les 302 anguilles, des analyses parasitologiques ont été menées en 2019 sur 301 anguilles (une des anguilles ne pouvant pas faire l'objet d'analyses). Il s'avère ainsi que 77 % des individus sont parasités par le nématode *Anguillicoloides crassus* (82 % à Beaucaire, 72 % à Avignon et 79 % à Caderousse). L'intensité moyenne s'élève à 3,7 vers/individu parasité (maximum de 68 ; 5,6 en moyenne à Beaucaire, 2,7 à Avignon et 2,5 à Caderousse) et il n'existe pas de corrélation significative entre le nombre total de parasites observés dans la vessie et la taille ou l'âge des anguilles ($p > 0,05$ pour chaque site).

L'état de dégénérescence de la vessie natatoire (SDI) est globalement faible (1,18) avec une valeur de 4 au maximum (valeur de l'indice comprise entre 1 et 6). Par ailleurs, une corrélation positive existe entre le nombre total de parasites observés dans la vessie et le SDI ($p < 0,01$).

Les prévalences parasitaires sont identiques entre les 3 sites (Chi-2, $p > 0,05$) mais l'intensité parasitaire moyenne est plus élevée à Beaucaire que sur les aménagements amont (test Kruskal-Wallis suivi d'un Dunn-Bonferroni, $p < 0,05$). Ce résultat pourrait s'expliquer d'une part par des conditions plus favorables pour la réalisation du cycle du parasite à l'aval (présence d'hôtes intermédiaires par exemple) et de l'autre par le fait que les anguilles les plus performantes (i.e. moins parasitées), auraient plus de chances de passer les différents barrages et remonter le Rhône (Amilhat, 2019).

- Indices pathologiques

Comme chaque année depuis la mise en place de ce suivi, deux types d'anomalies sont observées : les lésions avec les érosions, hémorragies et plaies et les parasites avec l'observation de points blancs (*Ichthyophthirius multifiliis*). Jusqu'en 2018, les grosseurs abdominales étaient supposées comme étant la conséquence de la présence du nématode *Anguillicoloides crassus* dans la vessie natatoire. Une étude en 2017 complétée en 2018 visait néanmoins à valider cette hypothèse. Les analyses montrent cependant qu'il n'existe pas de corrélation significative entre la présence du nématode et les grosseurs abdominales ($p\text{-value} > 0,05$). L'indice parasitaire auparavant calculé à partir des grosseurs abdominales n'a ainsi pas été calculé cette année.

Sur l'ensemble des anguilles analysées, il apparaît une proportion plus forte d'anomalies chez les individus supérieurs à 100 mm qui peut néanmoins s'expliquer par le fait que ces individus correspondent à ceux majoritairement présents dans les captures (Figure 19A).

Il s'avère que cette année l'état sanitaire est précaire sur l'ensemble des aménagements (Figure 19C).

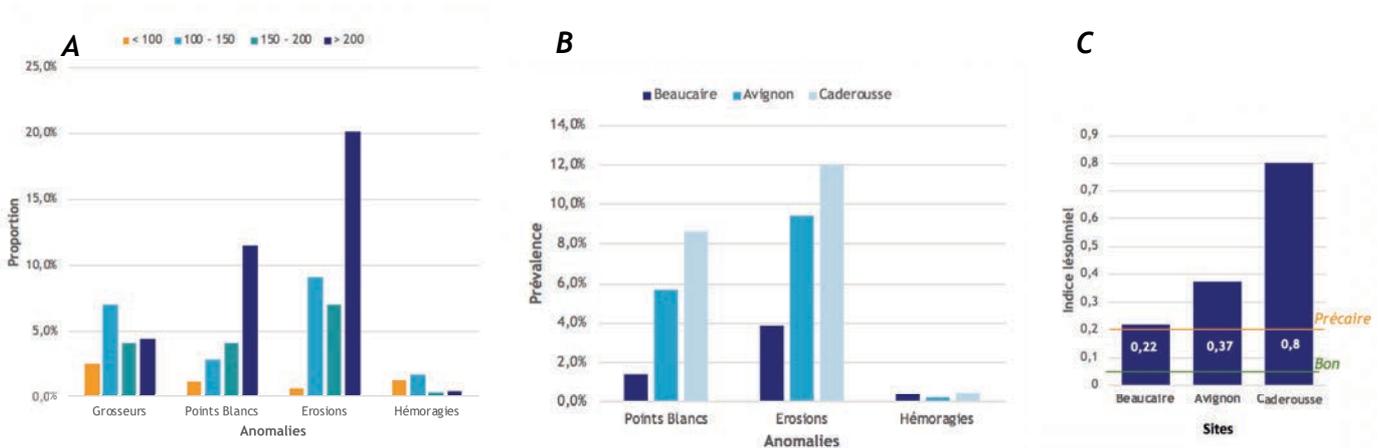


Figure 19 : Caractéristiques des anomalies observées selon la taille (A), l'aménagement (B) et indice lésionnel (C)

Les effectifs comptabilisés en 2020 font partie des plus faibles de la chronique de suivi (37 377 à Beaucaire, 4 507 à Avignon et 5 057 à Caderousse).

La migration 2020 s'est déroulée majoritairement de mi-juin à début octobre sur l'aménagement de Beaucaire avec toutefois deux vagues distinctes de captures ayant étendu la période de migration (91 jours). Les captures sur l'aménagement d'Avignon se concentrent du début du mois de juin à début août (59 jours), relativement tôt en comparaison des premières captures de Beaucaire. Les captures sur l'aménagement de Caderousse sont quant à elles observées de fin juin à début juillet, indiquant une courte période de migration sur cet aménagement (11 jours).

Le débit moyen observé cette saison est peu soutenu et sensiblement plus faible en comparaison des moyennes interannuelles (1 098 m³/s en 2020 contre 1 400 m³/s en moyenne depuis le début du suivi).

Couplé aux températures élevées dès le début du suivi, ces deux facteurs ne peuvent cependant pas expliquer à eux seuls les faibles captures de cette saison. La baisse du recrutement européen en civelles, observée depuis 2014 et particulièrement marquée en 2019, pourrait expliquer les faibles captures sur le Rhône aval en 2020.

En 2020, bien que les individus de moins de 150 mm soient majoritaires à Beaucaire, un déficit en anguilles de l'année est observé (26 % d'individus de tailles < 100 mm contre 39 % en moyenne). Comme observé depuis 2016, les individus de moins de 150 mm sont également déficitaires sur les aménagements amont et ne représentent que 36% à Avignon et 51 % à Caderousse contre respectivement 60 % et 59 % en moyenne. Cette sur-représentativité des individus de plus de 150 mm sur les aménagements amont atteste des captures d'anguilles déjà présentes au droit des ouvrages en 2020. Plusieurs hypothèses ont été avancées dans ce sens et nécessitent des investigations supplémentaires : colonisation des affluents, diversification des voies de passage sur le secteur d'Avignon, distance à la mer ou sélectivité des aménagements, passage préférentiel par les écluses.

Bien que les dysfonctionnements observés en rive gauche de Beaucaire et d'Avignon ne peuvent à eux seuls expliquer les faibles captures de cette saison, ils pourraient néanmoins avoir contraint la migration. Des solutions doivent être pensées face aux problèmes récurrents de mise hors d'eau de la pompe présente en rive gauche de Beaucaire.

En effet, bien que ces arrêts ne soient généralement pas préjudiciables pour les anguilles puisqu'ils témoignent de faibles débits du Rhône, cette saison a montré que des mouvements d'anguilles peuvent être observés même en période de bas débits et que la pompe installée en rive gauche doit être fonctionnelle tout au long du suivi. En rive gauche de l'aménagement d'Avignon, la rampe de reptation devra à nouveau être réparée et une gouttière amenant le débit d'attrait en aval immédiat de la rampe (contrairement à un écoulement direct sur la rampe de reptation comme ce qui a été le cas en 2020) devra être mise en place.

Enfin, l'état sanitaire de la majorité des anguilles piégées cette saison est précaire sur l'ensemble des aménagements d'après les indices pathologiques (0,22 à Beaucaire, 0,37 à Avignon et 0,80 à Caderousse). Les analyses parasitologiques effectuées en 2017 et 2018 révèlent cependant qu'en moyenne, **77%** des anguilles prélevées sont parasitées par le nématode *Anguillicoloides crassus*. Ces données révèlent que les anguilles colonisant le Rhône sont fortement touchées par le parasite, ce qui est observé sur d'autres bassins notamment dans le littoral de Bretagne Sud où il a été montré que les anguilles vivant dans des milieux peu salés au contact de la zone dulçaquicole sont très contaminées (prévalences supérieures à 90%) à l'opposé de celles vivant en conditions estuariennes (prévalences de l'ordre de 15%) (Sauvaget *et al.*, 2003).

1.2 Tendances interannuelles

a) Évolution des flux migratoires

- Captures annuelles

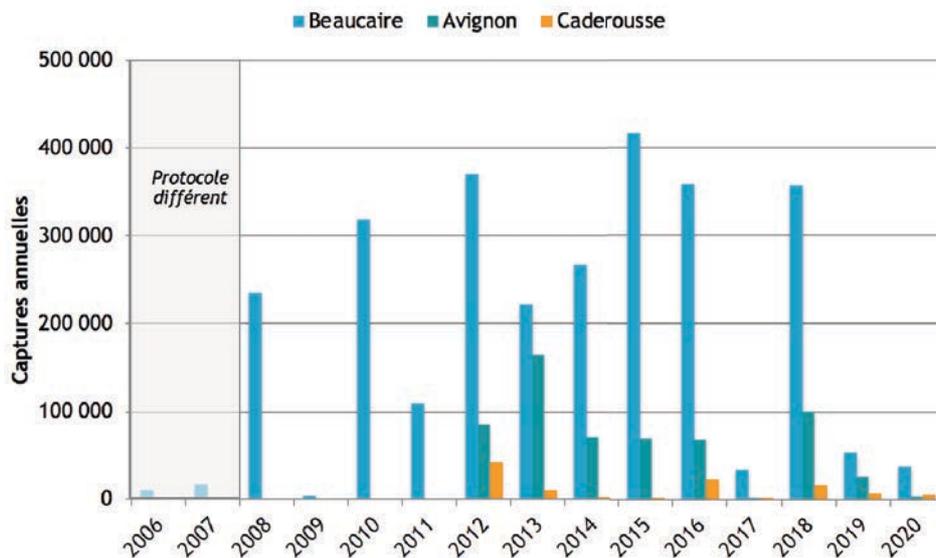


Figure 20 : Évolution des captures annuelles sur les 3 aménagements depuis 2006

Beaucaire

L'installation des passes en 2005 en rive gauche et en 2006 en rive droite s'est effectuée au cours de la saison et a donc conduit à un suivi partiel de ces deux années. De plus, le fonctionnement discontinu des dispositifs (arrêts automatiques des pompes) lors de la saison 2007 est différent du fonctionnement des autres suivis. Par conséquent, ces 3 années ne sont pas comparables aux autres et ont donc été retirées de l'analyse pluriannuelle. Ainsi, seules les saisons de 2008 à 2020 sont comparables de manière pertinente (Figure 20).

Depuis 2008, le nombre moyen de captures annuelles est de 214 270 anguilles sur Beaucaire. Sur cette période, 2009 est la plus mauvaise année en termes de migration puisque seulement 3 600 anguilles ont été capturées, soit 60 fois inférieure à la moyenne interannuelle. Dans une moindre mesure, 2017 (7 fois inférieure à la moyenne), 2020 (6 fois inférieure à la moyenne), 2019 (4 fois inférieure à la moyenne) et 2011 (2 fois inférieure à la moyenne) sont également de mauvaises années. Au contraire, l'année 2015 établit un record à près de 2 fois la moyenne interannuelle (416 000 anguilles).

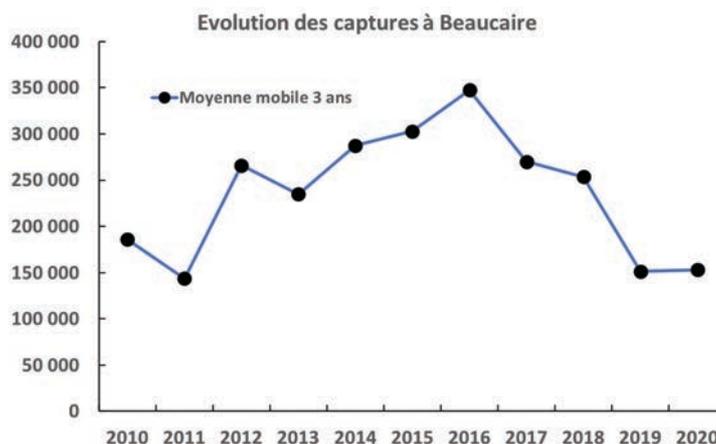


Figure 21 : Tendances des captures d'anguilles à Beaucaire au cours des 10 dernières années (Campton et al, sous presse)

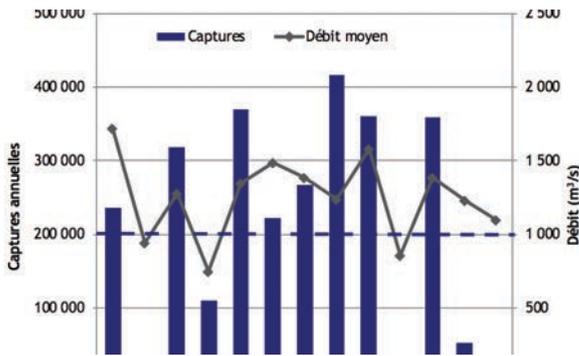
Par ailleurs, en partant du principe que les anguilles capturées ont des tailles correspondant en majorité à des individus âgés jusqu'à 3 ans, les tendances interannuelles de 2008 à 2020 ont été calculées au travers des « moyennes mobiles 3 ans » (i.e. la valeur de 2020 correspond par exemple à la moyenne des effectifs de 2018, 2019, 2020). Sur Beaucaire, une tendance à l'augmentation est ainsi observée jusqu'en 2015 suivi d'une baisse chaque année avec toutefois une tendance stable en 2020 (Figure 21).

Les données pluriannuelles de ce suivi permettent de conclure que ces variations interannuelles sont influencées par le recrutement en civelle de l'année N-1, l'hydrologie du Rhône et le report l'année suivante d'individus qui n'auraient pas migré durant les années non favorables (Georgon et al, 2017).

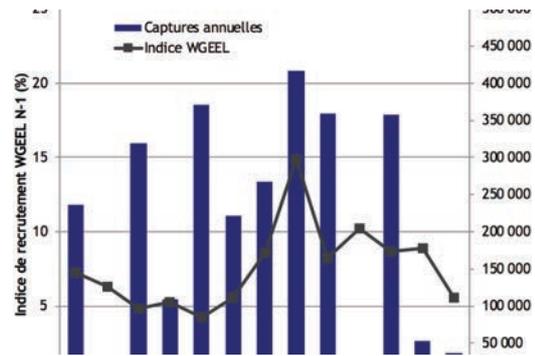
Ainsi, la tendance à l'augmentation observée à Beaucaire de 2013 à 2015 est bien corrélée à celle de l'indice de recrutement du WGEEL. Le record de captures établi en 2015 serait la conséquence du bon recrutement de 2014 (année N-1) (Figure 22).

Les années 2009, 2011 et 2017, parmi les plus faibles en termes de captures annuelles, dénotent par ailleurs des tendances inverses à celles de l'indice de recrutement européen. Ces faibles captures sont associées à des années dites « sèches » dont l'hydrologie du Rhône est largement inférieure à la moyenne observée sur la période de suivi (1 400 m³/s entre avril et novembre) (Figure 23). De plus, la proportion de jours durant lesquels le débit est inférieur à 1 000 m³/s est plus importante que la moyenne (60 % en 2009, 80 % en 2011, 70 % en 2017) reflétant ainsi des conditions non favorables pour la migration des anguilles.

Suivi des passes-pièges à anguilles sur le Rhône aval - 2020 -

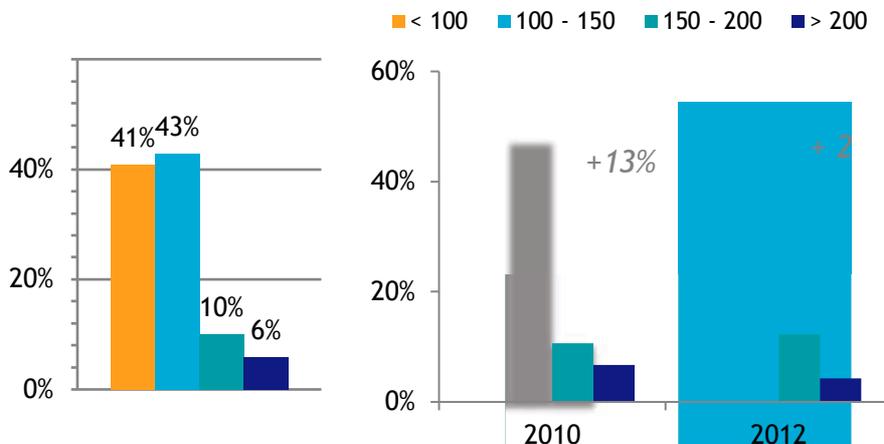


captures annuelles enregistrées à Beaucaire et le débit moyen observé sur la période de suivi (avril à novembre) chaque année



captures annuelles enregistrées à Beaucaire et l'indice de recrutement du WGEEEL de l'année N-1

Les années 2010, 2012 et 2018 sont caractérisées par une diminution de la tendance de l'indice de recrutement européen contrairement aux captures à la hausse sur les passes-pièges. Ces résultats surviennent après les années dites « sèches » supposées non favorables à la migration des anguilles et pourraient ainsi être la conséquence d'un report d'individus qui n'auraient pas migrés l'année précédente. La proportion plus importante de la classe de tailles 100 -150 mm en 2010 et 2012 en comparaison à la répartition des classes de tailles des années « classiques » reflète une part plus importante d'individus plus âgés (de 1 an) et confirmerait ainsi cette hypothèse (Figure 24).



suivant les années sèches à celle des années « classiques »

Ce report d'individus n'a cependant pas été observé en 2018 suite à la sécheresse de 2017 et des pistes complémentaires de réflexion avaient été envisagées compte-tenu du fait qu'une diminution de la proportion des individus < à 150 mm est observée depuis 2016 sur les aménagements amont : accès aux zones amont au travers des écluses à Avignon et Caderousse ? Colonisation des affluents (Durance, Ouvèze, Bras des Armeniers, Aigues, Cèze) ? Passage préférentiel sur le bras de Sauveterre ou celui de Villeneuve impliquant un blocage au barrage de retenue ? Inadéquation des périodes d'éclusées nocturnes impliquant un retard à la migration ?

Avignon

Sur la période 2012-2020, le nombre moyen de captures à Avignon est de 65 751 anguilles (avec un record en 2013 à 164 500 individus).

Le dispositif de captures d'Avignon n'étant en fonctionnement que depuis 2012, les premières moyennes mobiles sont donc affichées à partir de 2014. Les résultats disponibles indiquent toutefois la même tendance qu'à Beaucaire avec une nette diminution des effectifs capturés (Figure 25).

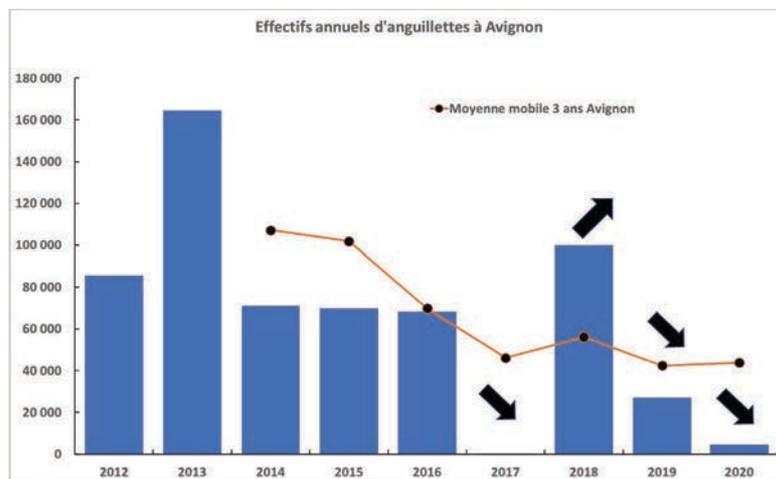


Figure 25 : Tendances des captures d'anguilles à Avignon jusqu'en 2020

Les tendances annuelles sur cet aménagement peuvent néanmoins varier par rapport à ce qui est observé sur Beaucaire, ce qui impliquerait que les facteurs qui influencent les captures soient différents entre les deux aménagements.

Il semblerait en effet que l'hydrologie et en particulier la répartition des débits entre les bras de Villeneuve et d'Avignon, liée à la configuration du Rhône sur cet aménagement, régisse en partie les captures sur Avignon.

Ainsi, le record de captures de 2013 s'explique par des débits dans le bras de Villeneuve nettement plus importants que ceux observés dans le bras d'Avignon et sur un nombre de jours consécutifs plus important que les autres années (Figure 26). Au contraire, l'absence d'attrait dans le canal de fuite de l'usine en 2017 corrélé à l'absence de captures conforterait l'hypothèse d'une influence de la répartition des débits sur les captures.

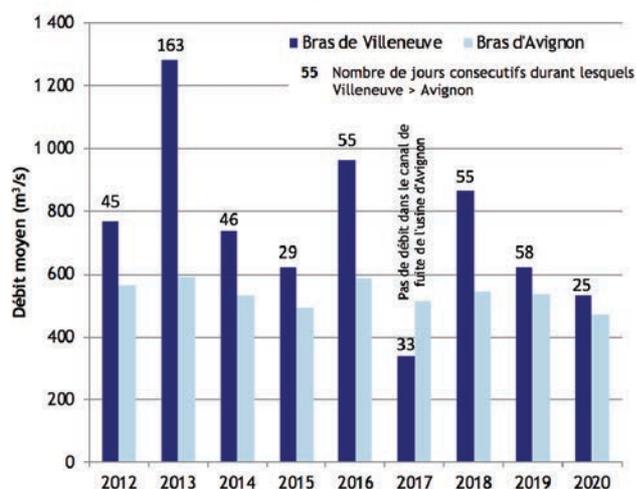


Figure 26 : Comparaison entre les débits moyens sur la saison de suivi des bras de Villeneuve et d'Avignon

Caderousse

À Caderousse, parmi les seules années durant lesquelles les deux passes ont fonctionné durant toute la période de migration (2012 et 2016) sont notées les meilleures captures annuelles (42 000 en 2012 et 22 800 en 2016). Entre 2013 et 2015, période durant laquelle seule la passe installée en rive droite a fonctionné, seulement 4 000 anguilles en moyenne ont été capturées chaque année (entre 200 et 9 600). Ce constat reflète ainsi un potentiel problème d'attractivité et/ou d'efficacité intrinsèque du dispositif installé en rive droite puisque dans le meilleur des cas, les captures de cette passe ne représentent que 10 % (en 2012) des captures totales de cet aménagement (1 % en 2016 et 0,02% en 2020). Les captures enregistrées en 2018 en rive droite sont néanmoins parmi les meilleures observées sur la chronique avec la quasi-totalité des captures de la saison (16 200). La passe-piège installée en rive gauche n'avait cependant fonctionné que 37 % du temps du suivi et il était alors impossible de savoir si les captures en rive droite étaient représentatives du stock migrant. Dès lors, aucune tendance fiable ne peut être établie sur cet aménagement.

- Périodes de migration

La période de migration est identifiée en considérant chaque année le début de migration à 5 % des captures totales de la saison et la fin à 95 % de cet effectif.

Beaucaire

La durée de migration moyenne depuis 2008 sur l'aménagement de Beaucaire est de **97 jours** soit environ **3 mois**. Cette migration débute généralement fin mai / début juin pour se terminer début septembre.

Au regard de la chronique, il apparaît que la saison **2011** a été particulièrement atypique :

- la migration a été **décalée**, avec un début le 4 juillet (soit 1 mois de plus que la moyenne) et une fin de migration le 16 novembre (soit 2 mois de plus que la moyenne) sous l'effet des bas débits du Rhône en début de suivi et des températures restées douces jusqu'en décembre.

- la migration a été très **condensée en fin de saison** (en raison d'un épisode de crue en novembre : 75 % du flux en 10 jours) (*Figure 27*).

A l'inverse, la saison **2012** a été la **plus précoce** du suivi en débutant le 24 avril et est également la plus étalée avec 156 jours de migration. Toutefois, 75 % du flux était passé le 27 juin, constat confortant le caractère précoce de cette saison (température et débit favorables au mouvement des anguilles dès le début du suivi).

Les années **2016**, **2017** et, dans une moindre mesure, **2013** sont les **plus condensées** de la chronique avec seulement 23, 35 et 50 jours de migration (conséquence d'une hydrologie faible en deuxième moitié de suivi). Il ne semble pas y avoir de relation entre la durée de migration et les effectifs capturés chaque année.

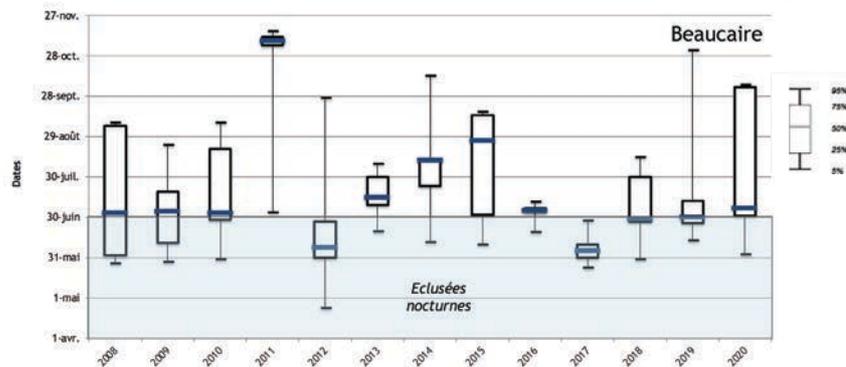


Figure 27 : Comparaison des flux migratoires annuels observés à Beaucaire depuis 2008

Avignon et Caderousse

De manière générale, la migration semble se dérouler de façon similaire entre les deux aménagements amont (Avignon et Caderousse). Le début de migration est observé plus tardivement avec un décalage de 13 jours en moyenne par rapport à Beaucaire. De plus, la durée de migration est beaucoup plus courte avec seulement **48 jours** en moyenne (41 jours de moins) soit environ **1,5 mois** (entre mi-juin et fin juillet). Ainsi, la migration amont semble se caractériser par un seul pic de montaison généralement (*Figure 28*). La migration de 2018 apparaît néanmoins atypique à Caderousse avec deux pics de montaison observés de fin mai à début juillet puis de début août à mi-août. Elle l'est également en 2019 et 2020 à Avignon avec un début de migration plus précoce que celui observé à Beaucaire (majorité d'individus > 100 mm correspondant à des individus âgés de plus d'1 an).

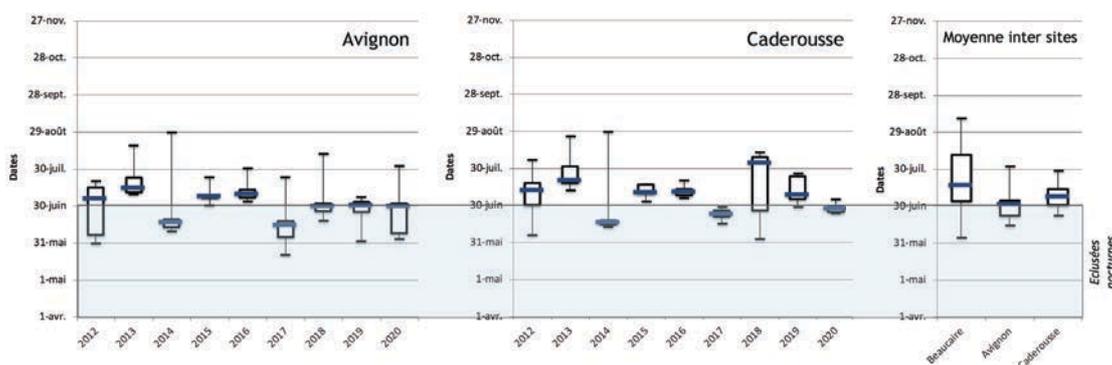


Figure 28 : Comparaison des flux migratoires annuels observés à Avignon et Caderousse depuis 2012 et moyennes inter sites

Adéquation avec la réalisation d'éclusées nocturnes

La confrontation des périodes de migration observées depuis le début du suivi, sur chaque aménagement, avec la période de réalisation des éclusages nocturnes (du 15 mars au 30 juin) fait apparaître un décalage entre ces deux périodes. En effet, en moyenne, moins de 25 % du flux annuel est observé dans les passes pièges pendant la période des éclusages sur les aménagements de Beaucaire et de Caderousse et environ 50 % en moyenne sur celui d'Avignon. Cette période d'éclusages couvre plus de 75 % du flux seulement en 2012 et 2017 sur l'aménagement de Beaucaire, lorsque les périodes de migration sont les plus précoces (*Figure 28*). De même, sur les aménagements amont où les périodes de migration sont plus condensées, les périodes de migration sont soit totalement couvertes par la période de réalisation des éclusées (en 2014 et 2017) soit totalement ou en grande partie en dehors (*Figure 29*).

- Évolution des structures en tailles annuelles

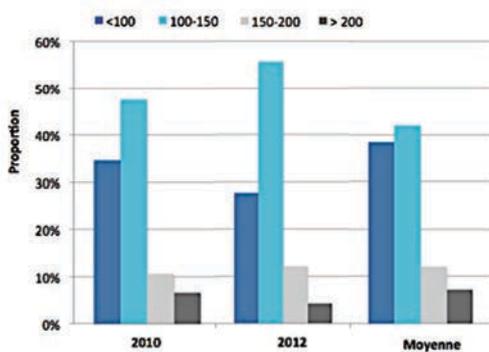


Figure 29 : Répartition des classes de tailles des années 2010 et 2012 sur l'aménagement de Beaucaire

La répartition des classes de tailles est globalement similaire entre les années avec une répartition propre à chaque aménagement (érosion des individus dont la taille est inférieure à 100 mm de l'aval vers l'amont). Toutefois, cette répartition peut varier certaines années en fonction des conditions environnementales (l'hydrologie en particulier), du recrutement en civelles et/ou des conditions de suivi (début de suivi tardif, dysfonctionnements) (*Annexe F*).

Les années 2010 et 2012 sur l'aménagement de Beaucaire sont comparables et se caractérisent par une proportion de la classe 100 - 150 mm plus importante par rapport à la classe < 100 mm en comparaison des moyennes observées jusqu'alors (Figure 29). Comme évoqué précédemment, cette répartition atypique survient les années suivant les années sèches. En supposant ainsi que la classe 100-150 mm corresponde à des anguillettes âgées de 1 an, il est probable qu'il y ait eu en 2010 et 2012 un report des individus qui n'auraient pas migré l'année précédente.

Un tel report d'individus aurait néanmoins dû être observé en 2018 suite à l'absence d'observations d'individus de tailles < à 100 mm en 2017 sur les aménagements amont en lien avec les conditions hydrologiques défavorables. Ce schéma de report d'individus n'a cependant pas été observé en 2018 et il apparaît nécessaire d'envisager d'autres pistes de réflexions complémentaires expliquant la répartition des classes de tailles entre les aménagements.

L'année 2015 se caractérise, sur l'ensemble des aménagements, par une proportion de la classe < à 100 mm supérieure à la moyenne (d'un facteur 0,66, Figure 30). L'analyse pluriannuelle du suivi des passes-pièges (Georgeon *et al.*, 2017) a révélé que les plus gros individus sont les premiers à migrer chaque saison. Ainsi, le début de suivi tardif de cette campagne (près de 2 mois de retard) a probablement déséquilibré la répartition des classes de tailles en sous estimant les plus gros individus (migration probable *via* les écluses).

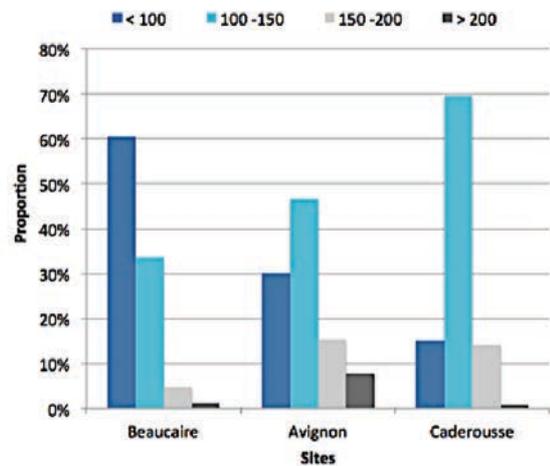


Figure 30 : Répartition des classes de tailles sur les aménagements de Beaucaire, Avignon et Caderousse de l'année 2015

L'année 2016 se démarque par la faible proportion de la classe < 100 mm sur tous les aménagements et la forte proportion de la classe 150 - 200 mm (Figure 31). Les individus de cette classe sont supposés âgés de 2 ans et correspondraient ainsi au recrutement exceptionnel de 2014. De plus, les faibles débits observés à compter du mois d'août 2016 n'ont pas été favorables à la migration des individus de l'année, qui sont très dépendants des variations de débits et qui, habituellement, dominent les captures à compter de ce mois (Georgeon *et al.*, 2017).

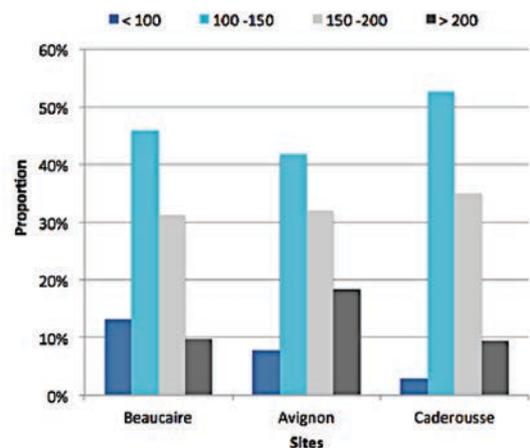


Figure 31 : Répartition des classes de tailles sur les aménagements de Beaucaire, Avignon et Caderousse de l'année 2016

b) Fonctionnement des dispositifs

L'influence des arrêts et des dysfonctionnements des dispositifs sur les captures annuelles dépend conjointement de leur cause, de la période à laquelle ils interviennent et dans une moindre mesure de leur durée (Georgeon *et al*, 2017).

Il semble en effet que les arrêts et dysfonctionnement observés en début (avril/mai) ou en fin de suivi (octobre/novembre), lorsque peu de captures sont enregistrées chaque année, soient moins impactant sur le jeu de données que s'ils s'étaient produit durant la période migratoire.

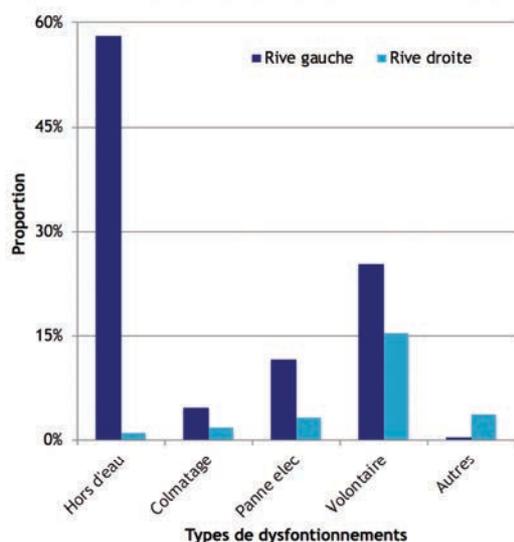
De plus, il s'avère que les mises hors d'eau des pompes étaient les moins impactantes sur les captures. En effet, ces arrêts sont observés lorsque le débit du Rhône est inférieur à 650 m³/s, condition hydrologique qui ne serait pas favorable au mouvement des anguilles (Georgeon *et al*, 2017). La saison 2020 a cependant été marquée par deux épisodes de mortalité dont au moins un peut être lié à l'arrêt de la pompe hors d'eau et l'absence de réamorçage impliquant une absence de renouvellement de l'eau dans le bac. Pour éviter tout épisode de mortalité futur, il conviendrait de trouver des solutions permettant le fonctionnement de la pompe localisée en rive gauche de Beaucaire sur l'ensemble de la période de suivi.

Au contraire, les **problèmes d'écoulements** sont généralement observés lorsque les débits sont élevés et les matières en suspensions plus importantes, conditions qui seraient potentiellement favorables aux pics de montaison.

Les **pannes électriques** sont, quant à elles, totalement indépendantes des conditions environnementales et dépendent ainsi de la période à laquelle elles interviennent et de leur durée.

Les **arrêts volontaires** ont été instaurés depuis 2012 pour éviter les épisodes de mortalité durant le week-end en cas de fortes captures et sont, par conséquent, réalisés en périodes de pics de montaison et généralement en simultané sur les 2 rives. Bien que ces arrêts volontaires soient habituellement de courte durée (2 ou 3 jours), il est toutefois impossible d'estimer leur impact sur le flux migratoire (inhibition de la migration ou report la semaine suivante ?).

De manière générale, une attention accrue doit être portée à la fois du côté de MRM mais également de la CNR concernant tout dysfonctionnement pouvant engendrer une potentielle mortalité. Cette attention accrue doit passer par une maximisation des échanges entre les deux structures ainsi qu'une réactivité optimale.



Beaucaire

La principale cause de dysfonctionnement sur cet aménagement est la **mise hors d'eau de la pompe** installée en rive gauche, représentant ainsi **632 jours d'arrêts** depuis 2008 (soit 59 % des arrêts en rive gauche) (Figure 32).

Les problèmes de colmatage quant à eux ne représentent que **51 jours d'arrêts** en rive gauche (5 %) et **17 jours d'arrêts** en rive droite (2 %), les **pannes électriques** **126 jours** en rive gauche (12%) et **30 jours** en rive droite (3 %) et les **arrêts volontaires** **276 jours** en rive gauche (25 %) et **167 jours** en rive droite (15 %).

Figure 32 : Proportion de chaque type d'arrêt par rive sur l'aménagement de Beaucaire depuis 2008

Avignon

Les principales causes d'arrêt sur la chronique sont la modification du bac de capture du dispositif de rive droite en 2012 et la panne électrique suite à l'incendie de l'usine en 2017 qui ont couvert entièrement le pic de montaison (Figure 33).

Les problèmes d'écoulement (essentiellement observés sur la passe-piège installée en rive gauche) sont récurrents mais ne semblent avoir impacté les captures qu'au cours de la saison 2016. Enfin, les pannes sont une des principales causes de dysfonctionnement (292 jours soit 55 % en rive gauche) mais ne se sont encore jamais produites lors d'un épisode de montaison.

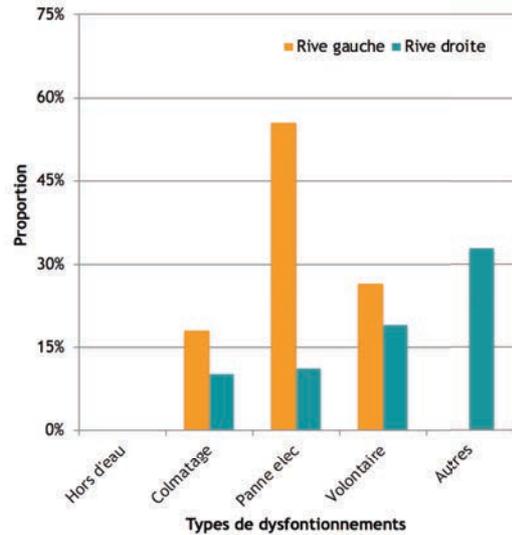


Figure 33 : Proportion de chaque type d'arrêt par rive sur l'aménagement d'Avignon depuis 2012

Caderousse

Sur cet aménagement, les deux dispositifs n'ont fonctionné conjointement qu'en 2012, 2016 et de 2018 à 2020 puisqu'un problème de pompe de la passe installée en rive gauche a perturbé le suivi entre début 2013 et le 25 avril 2016, soit durant 3 saisons complètes. Sur ces 5 années de fonctionnement commun, 2018 est marquée par des dysfonctionnements en rive droite avec des travaux sur site en période de montaison engendrant le déplacement de la pompe.

L'année 2019 est quant à elle marquée par une faible efficacité du dispositif en rive droite (25 % en lien avec le changement de la pompe hydraulique).

La répartition des captures entre les rives semble également déséquilibrée sur cet aménagement, puisque les captures enregistrées en rive gauche représentent 90 % en 2012 et 99 % en 2016.

Les faibles résultats enregistrés sur ce site pourraient s'expliquer par un problème d'efficacité intrinsèque et/ou d'attractivité du dispositif installé en rive droite, seul dispositif en fonctionnement entre 2013 et 2016. Dès lors, la fiabilisation du fonctionnement de la passe installée en rive gauche est nécessaire afin de produire une chronique suffisamment longue pour confirmer ce constat et améliorer la situation.

Cette fiabilisation du dispositif doit s'accompagner d'une réactivité accrue de l'exploitant suite aux dysfonctionnements relevés par MRM.

2 Conclusion et perspectives

Les effectifs comptabilisés en 2020 font partie des plus **faibles de la chronique de suivi** (37 377 à Beaucaire, 4 507 à Avignon et 5 057 à Caderousse). La migration 2020 s'est déroulée **majoritairement de mi-juin à début octobre** sur l'aménagement de **Beaucaire** avec toutefois deux vagues distinctes de captures ayant étendu la période de migration (91 jours). Les captures sur l'aménagement d'**Avignon** se concentrent du début du mois de **juin à début août** (59 jours), relativement **tôt en comparaison des premières captures de Beaucaire**. Les captures sur l'aménagement de **Caderousse** sont quant à elles observées de **fin juin à début juillet**, indiquant une courte période de migration sur cet aménagement (11 jours).

En 2020, bien que les individus de moins de 150 mm sont majoritaires à Beaucaire, un **déficit en anguilles de l'année est observé** (26% d'individus de tailles < 100 mm contre 39% en moyenne).

De plus, une sur-représentativité des individus de plus de 150 mm sur les aménagements amont atteste des captures d'anguilles déjà présentes au droit des ouvrages en 2020. Plusieurs hypothèses ont été avancées dans ce sens et nécessitent des investigations supplémentaires : passage préférentiel par les écluses, débits soutenus impliquant potentiellement une diminution d'attrait pour le canal de fuite de l'usine-écluse d'Avignon, colonisation des affluents, inadéquation des périodes d'éclusées nocturnes, baisse du recrutement observé à l'échelle européenne depuis 2015.

L'évolution mensuelle des classes de tailles est atypique en 2020 avec une sous-représentativité d'individus issus du recrutement de l'année sur Beaucaire. Il semblerait que le **mauvais recrutement observé ces 5 dernières années et particulièrement marqué en 2018-2019** couplé à une **hydrologie peu soutenue** en 2020 se traduiraient d'une part par une baisse des individus de tailles < à 100 mm et de l'autre par une diminution et un déplacement limité de l'ensemble des individus engendrant globalement de faibles captures. Les problèmes de fonctionnement des dispositifs de captures pourraient également avoir joué un rôle dans les faibles captures de 2020.

Enfin, l'**état sanitaire** de la majorité des anguilles piégées cette saison peut être considéré comme précaire sur l'ensemble des aménagements d'après les indices pathologiques. Les analyses parasitologiques effectuées en 2017 et 2018 révèlent cependant qu'en moyenne **77 %** des anguilles prélevées sont parasitées par le nématode *Anguillicoloides crassus*. De plus, les analyses révèlent une absence de corrélation entre la présence du parasite *Anguillicoloides crassus* avec l'observation de grosseurs abdominales. Cet indicateur ne se révèle donc pas fiable afin de déterminer l'état sanitaire des anguilles transitant dans les passes-pièges.

De manière générale, les tendances des dernières années, en termes de captures annuelles, sont à la baisse à Beaucaire et à Avignon et sont malheureusement difficiles à interpréter à Caderousse. En effet, compte tenu des problèmes de fonctionnement survenus (durant 3 ans) sur la passe installée en rive gauche où l'on observe plus de 90 % des captures lorsqu'elle fonctionne, il est impossible d'identifier une tendance fiable.

Les captures annuelles sont dépendantes du recrutement en civelles, des conditions hydroclimatiques et parfois des arrêts et dysfonctionnements des dispositifs.

Dès lors, la mise hors d'eau des pompes est la principale cause d'arrêt à Beaucaire. Bien que ces arrêts ne soient généralement pas préjudiciables pour les anguilles puisqu'ils témoignent de faibles débits du Rhône, la saison 2020 a montré que des mouvements d'anguilles peuvent être observés et que des solutions doivent être apportées pour que la pompe installée en rive gauche soit fonctionnelle tout au long du suivi.

Les problèmes d'écoulement causés par un colmatage des pompes (période de crue) ont quant à eux une incidence généralement plus importante sur les captures annuelles. Enfin, les arrêts week-ends, mis en place pour éviter les mortalités, sont la principale cause d'arrêts en période de pic et bien qu'ils soient de courte durée, il est impossible de connaître leur influence sur le jeu de données.

Le réseau de passes-pièges du bassin du Rhône apporte aujourd'hui de nombreuses informations précieuses à la compréhension de la dynamique de l'espèce, toutefois un certain nombre d'interrogations persistent sur :

- L'impact des arrêts des pompes sur le flux et les résultats annuels. Dans ce sens, afin d'optimiser le fonctionnement et les conditions de stabulation des anguilles dans le bac de capture (donc limiter les arrêts week-end), la CNR a effectué des modifications et un agrandissement des bacs des passes-pièges sur l'aménagement de Beaucaire. Les premiers retours d'expérience ont montré l'efficacité de ces mesures sur la survie des anguilles en période de fortes remontées.

- La représentativité du flux transitant par les passes-pièges *vis à vis* du flux réel du Rhône. En effet, le suivi des passes-pièges ne traduit que partiellement le flux migratoire dans la mesure où le flux transitant par les écluses n'est pas connu, ni l'efficacité des éclusages spécifiques sur les anguilles. La CNR a engagé en 2014, en collaboration avec l'ENSAT de Toulouse, une étude de faisabilité technique et financière d'échantillonnage des écluses. Les premiers résultats, non concluants, ne permettent pas à l'heure actuelle d'apporter des éléments de réponse à cette problématique.

- Les potentialités de colonisation des affluents. Le suivi des passes-pièges traduit partiellement le flux migratoire du Rhône mais les données de colonisation concernant les affluents situés entre les aménagements de Beaucaire et de Caderousse sont insuffisantes. La mise en place d'échantillonnages ciblant les anguilles migrantes (<300 mm) serait complémentaire du suivi des passes-pièges. Des pêches pourraient notamment cibler les affluents positionnés entre les aménagements de Beaucaire et de Caderousse (Gardon, Durance, Ouvèze, Bras des Armeniers, Aigues et Cèze). Les données de pêches RCS/RSA pourraient contribuer à cela. La colonisation des fleuves côtiers méditerranéens par l'Anguille a été étudiée de 2012 à 2014 et le protocole utilisé semble bien adapté puisqu'il a été déployé en Durance en 2015 et 2016 (Campton P. et al, 2015 ; Georgeon et al., 2016). L'objectif final serait de construire des indicateurs de la colonisation active du bassin rhodanien et ainsi mieux comprendre la répartition de l'espèce.

- La dynamique migratoire selon l'âge des individus. Une étude spécifique par lecture d'âge (validation d'âge et échantillonnages complémentaires à ceux réalisés en 2017 et 2018) permettrait de quantifier de manière plus précise l'apport de chaque cohorte à la population d'anguilles du Rhône.

Ces analyses et investigations compléteront avantageusement la poursuite du suivi annuel pour la mise en place d'indicateurs robustes sur le recrutement et la colonisation du Rhône par l'Anguille et une meilleure compréhension de la dynamique de population.

Bibliographie

ACOU A., 2006. Bases biologiques d'un modèle pour estimer la biomasse féconde de l'anguille européenne en fonction des recrues fluviales et du contexte de croissance : approche comparative à l'échelle de petits bassins versants. Thèse Université Rennes 1. 333p.

ADAM G., FEUNTEUN E., PROUZET P., RIGAUD C., 2008, L'Anguille européenne : indicateurs de présence et de colonisation, éditions Quae, 393p.

ALS T., HANSEN M., MAES G., CASTONGUAY M., RIEMANN L., ARESTRUP K., MUNK P., SPARHOLT H., REINHOLD H., BERNATCHEZ L., 2011. All roads lead to home : panmixia of European eel in the Sargasso Sea. *Molecular Ecology* (2011) 20, 1333-1346. 14p.

AMILHAT E., 2007, Etat sanitaire de l'Anguille européenne *Anguilla anguilla* dans le bassin Rhône Méditerranée Corse : synthèse bibliographique. Rapport Pôle lagunes et Cepralmar. CBETM, Université de Perpignan, 88 p.

ANTUNES C., TESCH F-W., 1997, A critical consideration of the metamorphosis zone when identifying daily rings in otoliths of European eels, *Anguilla anguilla* (L.). *Ecology of Freshwater Fish*, 6 : pp 102-107.

AUPHAN N. & DELHOM J., 2006, Suivi des passe-pièges à anguilles de l'usine hydroélectrique de Beaucaire - Campagne d'étude 2006, Rapport M.R.M.

BANNING P., HAENEN O., 1990. Effects of the swimbladder nematode *Anguillicola crassus* in wild and farmed eel, *Anguilla anguilla*. *Pathology in Marine Science. PAMAQ 3 Proceedings*. Virginia, USA, 1988. Academic Press. p 317-330.

BERG T., STEEN J-B., 1965, Physiological mechanisms for aerial respiration in the eel., *Comp Biochem Physiol*, 15(4) : 469-84.

BRUIJS M.C.M. & DURIF C.M.F., 2009, Silver eel migration and behaviour., Van den thillart *et al.*(eds.), *Spawning migration of the European Eel*, Springer Science + Business Media B.V.

BRUSLE J., 1994, L'Anguille Européenne *Anguilla anguilla*, un poisson sensible aux stress environnementaux et vulnérable à diverses atteintes pathogènes., *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 335, 237-260.

CAMPTON P., ABDALLAH Y., LEBEL I., 2016. Colonisation des fleuves côtiers méditerranéens par l'Anguille. Construction d'un réseau opérationnel de suivi. Association Migrateurs Rhône-Méditerranée, 56p.+ annexes

CAMPTON P., VANEL N., BLANC X., FAYAN S., 2008, suivi des passes-pièges à anguilles de l'usine de Beaucaire - Campagne d'étude 2008., rapport MRM 29p.+annexes.

CAMPTON P., LEBEL I., 2009. Suivi des passes pièges à anguilles de l'usine de Beaucaire - Campagne d'étude 2009., rapport MRM 33p.+annexes.

CAMPTON P., LEBEL I., 2010, Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2010., Association Migrateurs Rhône Méditerranée, rapport, 40p.+annexes.

CAMPTON P., LEBEL I., 2012, Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2011., Association Migrateurs Rhône Méditerranée, rapport, 49p.+annexes.

CAMPTON P., LEBEL I., 2013, Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2012., Association Migrateurs Rhône Méditerranée, rapport, 53p.+annexes.

CAMPTON P., LEBEL I., 2014, Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2013., Association Migrateurs Rhône Méditerranée, rapport, 47p.+annexes.

CHANCEREL F., 1994. La répartition de l'Anguille en France. Bull. Fr. Pêche Piscic. 335: 289-294.

CREUTZBERG F., 1961. On the orientation of migrating elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.) in a tidal area, Neth. J. Sea Res. 1, 257-338.

COGEPOMI RMC, 2004, Plan de gestion du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse 2004-2008, 49p.+ annexes.

COGEPOMI RMC, 2011, Plan de Gestion des Poissons Migrateurs du bassin Rhône Méditerranée Corse 2010-2014. DIREN Rhône-Alpes, délégation de bassin RMC.

COGEPOMI 2016, Plan de gestion des poissons migrateurs 2016-2021 du bassin Rhône Méditerranée 85p + annexes, DREAL Auvergne Rhône-Alpes.

CRIVELLI A.J, 1998, L'anguille dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : une synthèse bibliographique. DIREN-DB RMC, publication COGEPOMI RMC, 83p.

DESAUNAY Y., GUERRAULT D., 1997. Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae : a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity. *J. of Fish Biol.*, 51 (supplément A) 317 - 339

DURIF C.M.F., VAN GINNEKEN V., DUFOUR S., MÜLLER T., ELIE P., 2009, Seasonal Evolution and Individual Differences in Silvering Eels from Different locations., Van den Thillart et al., Spawning Migration of the European Eel., Springer Science + Business Media B.V., Chapter 2, pp.13-38.

EDELIN E., 2005, Facteurs de contrôle de la dispersion continentale chez l'anguille, Thèse Université de Toulouse II, 144p.

ELIE P., LECOMTE-FINIGER R., CANTRELLE I., CHARLON N., 1982, Définition des limites des différents stades pigmentaires durant la phase civelle d'*Anguilla anguilla* L. (poisson téléostéen anguilliforme)., Vie et Milieu 32 :149-157.

ELIE P. et GIRARD P., 2014. La santé des poissons sauvages : les Codes pathologie, un outil d'évaluation. *Edit. Association Santé Poissons Sauvages*. 286 p.

ELIE P. & RIGAUD C., 1984, Étude de la population d'anguilles de l'estuaire et du bassin versant de la Vilaine : pêche, biologie, écologie. Examen particulier de l'impact du barrage d'Arzal sur la migration anadrome. Rapport CEMAGREF, 174 p.

FEUNTEUN E., ACOU A., GUILLOUET J., LAFAILLE P. LEGAULT A., 1998, Spatial distribution of an eel population (*Anguilla anguilla*) in a small coastal catchment of northern Brittany (France)., Consequences of hydraulic works. Bulletin Français de Pêche et Pisciculture, 349 : 129-139.

FEUNTEUN E., LAFAILLE P., ROBINET T., BRIAND C., BAISEZ C., OLIVIER J.-M., ACOU A., 2003, A review of upstream migration and movements in inland waters by anguillid eels. Toward a general theory. In Aida K., Tsukamoto K., Yamauchi K., Eel Biology. Tokyo, Springer Verlag, 191-213.

FINIGER, 1976, Contribution à l'étude biologique et écologique des civelles (*Anguilla anguilla* Linné 1758) lors de leur pénétration dans un étang méditerranéen. Vie Milieu, 26, 123-144.

FREYHOF J. & KOTTELAT M., 2008, *Anguilla anguilla*, in IUCN 2008, IUCN 2008 Red List of Threatened Species, www.iucnredlist.org

GIRARDP., 1998. Le poisson sentinelle des milieux aquatiques : pertinence et optimisation des indicateurs sanitaires. Buul. Fr. Pêche Piscic. 350-351, 429-443.

ICES., 2008, Report of the Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL), 354-386.

ICES Advice 2008, Book 9, 9.4.9, European eel. 123-129.

ICES, 2016, Report of the Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL).

IMBERT H., 2008, Stratégie conditionnelle contrôlant la dispersion continentale de l'anguille européenne., Université de Bordeaux 1, 199 p + annexes.

IUCN, 2008, Red List of Threatened Species, www.iucnredlist.org.

KRUEGER W.H., OLIVEIRA K., 1999, Evidence for environmental sex determination in the American eel, *Anguilla rostrata*. Environmental Biology of fishes 55 :381-389.

LAFAILLE P., CARAGUEL J.M., LEGAULT A., 2007. Temporal patterns in the upstream migration of European glass eel (*Anguilla anguilla*) at the Couesnon estuarine dam, Estuarine, coastal and shelf science, 73(1-2) :81-91.

LECOMTE-FINIGER R., 1994, The early life of the European eel. Nature, 370 : 424 p.

LEGAULT A., 1988, Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille, Etude en Sèvre Niortaise., Bull. Fr. Pêche Piscic. 308 : 1-10

GEORGEON M., ABDALLAH Y., LEBEL I., 2015. Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2014. Association Migrateurs Rhône Méditerranée, 56p.+ annexes

GEORGEON M., ABDALLAH Y., LEBEL I., 2016. Suivi des passes à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2015. Association Migrateurs Rhône Méditerranée, 58p.+ annexes

GEORGEON M., CAMPTON P., 2018, Suivi des passes pièges à anguilles sur le Rhône aval, Campagne d'étude 2017 - Tendances 2008- 2017, Association Migrateurs Rhône-Méditerranée, 39p. + Annexes

GEORGEON M., GUILLERMOU J., LEBEL I., 2017. Caractérisation de la migration des anguilles du Rhône aval - Analyse pluriannuelle du suivi des passes à anguilles de Beaucaire et Avignon sur la période 2008-2015.

MCCLEAVE J.D., BRICKLEY P.J., O'BRIEN K.M., KISTNER D.A., WONG M.W., GALLAGHER M., WATSON S.M., 1998, Do leptocephali of the European eel swim to reach continental waters ? Status of the question., J. Mar. Biol. Ass. U. K., 78, 285-306.

MEDAD (Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement Durable), 2008, Circulaire DCE n° 2008/25 du 6 février 2008 relative au classement des cours d'eau au titre de l'article L.214-17-I du code de l'environnement et aux obligations qui en découlent pour les ouvrages., Texte 9/43, 9p.

MEEDAT (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), 2008, Projet de loi relatif à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

MEEDDM, 2010, Mise en œuvre par l'État et ses établissements publics d'un plan d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau., Circulaire du 25 janvier 2010 n° NOR : DEVO0930186C., 6p.

MUCHIUT S., GALLET F., AUBIN D., BARANGER L., LE BIHAN V., PERREAUDEAU Y., 2002, Principaux facteurs à prendre en compte pour une meilleure gestion de l'Anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Rapport Observatoire des pêches et des cultures marines du golfe de Gascogne, Aglia edition, 82p.

MUNDERLE M., SURES B., TARASCHEWSKI H., 2004, Influence of *Anguillicola crassus* (Nematoda) and *Ichtyophthirius multifiliis* (Ciliophora) on swimming activity of European eel *Anguilla anguilla*. Diseases of Aquatic Organisms vol 60, 133-139.

PORSCHER J.P., 1992. Les passes à Anguilles, Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 326-327 : p134-142

SAUVAGET B., FATIN D., BRIAND C., 2003, Contamination par *Anguillicola crassus* de cinq populations d'anguilles (*Anguilla anguilla*) du littoral de Bretagne Sud (France), Bull. Fr. Pêche Piscic. (2003) 368 : 21-26.

TESCH F.W., NIERMANN U., PLAGA A., 1986, Differences in development stage and stock density of larval *Anguilla anguilla* off the west coast of Europe. Vie et Milieu, 36 : pp 255-260.

TESCH F-W., NIERMANN U., 1992, Stock density of eel larvae (*Anguilla anguilla*) on the European continental slope, based on collections made between 1985 and 1989. Ir. Fish. Invest. (Ser. A), 36 : pp 110-113.

TESCH F.W., 1998, Age and growth rates of North Atlantic eel larvae (*Anguilla ssp.*), based on published length data. Helgoländer Meeresunters., 52 : pp 75-83.

TZENG W.N., CHENG P.W., LIN F.Y., 1995, Relative abundance, sex ratio and population structure of the Japanese eel *Anguilla japonica* in the Tanshui River system of northern Taiwan., *Journal of Fish Biology*, 46 : 183-201.

WESTERBERG H., 1979, Counter-current orientation in the migration of the European eel. Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer, 174 : 134-143.

WIRTH T., BERNATCHEZ L., 2001, Genetic evidence against panmixia in the European eel. Nature, Vol.409, 6823, 1037-1040.

WHITE E.M. & KNIGHTS B., 1997, Environmental factors affecting migration of the European eel in the Rivers Severn and Avon, England. J. Fish. Biol., 50, 1104-1116.

XIMENES M.C., LE CORRE G., LECOMTE-FINIGER R., MALLAWA R., SAGLIOCCO M., 1986, L'anguille en Méditerranée française. Aspects écobioécologiques et halieutiques. Rapport CEMAGREF, Secrétariat d'État de la Mer, 99 p + annexes

Table des figures

Figure 1 : Température du Rhône sur les 3 aménagements	11
Figure 2 : Évolution du débit moyen journalier du Rhône à Beaucaire durant la période de suivi.....	11
Figure 3 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement de Beaucaire sur la période de suivi (Le Rhône court-circuité correspond aux déversements du barrage de dérivation ajouté au débit du Gardon)	12
Figure 4 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement d'Avignon sur la période de suivi.....	12
Figure 5 : Attractivité du bras de Villeneuve sur le bras de Sauveterre en 2020	13
Figure 6 : Répartition des débits au niveau de l'aménagement de Caderousse sur la période de suivi (Le Rhône court-circuité correspond aux déversements du barrage de dérivation ajouté au débit de la Cèze)	13
Figure 7 : Anguilles capturées aux passes-pièges de Beaucaire en 2020	14
Figure 8 : Anguilles capturées aux passes-pièges d'Avignon en 2020.....	15
Figure 9 : Anguilles capturées sur les passes-pièges de Caderousse en 2020	15
Figure 10 : Comparaison des périodes de migration sur les 3 aménagements avec les éclusées nocturnes en 2020	16
Figure 11 : Répartition des tailles en fonction de l'âge (Auphan et Delhom, 2006)..	17
Figure 12 : Distribution des âges des anguilles prélevées à Beaucaire, Avignon et Caderousse entre 2017 et 2018	18
Figure 13 : Histogramme des âges par classe de tailles en mm (1 : [100 - 120[; 2 : [120 - 130[; 3 : [130 - 140[; 4 : [140 - 150[; 5 : [150 - 160[) et par site pour les années 2017 et 2018 confondues (Amilhat, 2019).....	18
Figure 14 : Répartition des classes de tailles interannuelles sur les 3 aménagements entre 2008 et 2019	19
Figure 15 : Proportions des classes de taille 2020 sur les 3 aménagements	19
Figure 16 : Tailles moyennes observées sur chaque aménagement en 2020.....	20
Figure 17 : Répartition des classes de tailles mensuelles habituellement observées à Beaucaire	21
Figure 18 : Répartition des classes de tailles mensuelles à Beaucaire en 2020	21
Figure 19 : Caractéristiques des anomalies observées selon la taille (A), l'aménagement (B) et indice lésionnel (C).....	23
Figure 20 : Évolution des captures annuelles sur les 3 aménagements depuis 2006 .	24
Figure 21 : Tendances des captures d'anguilles à Beaucaire au cours des 10 dernières années (Campton et al, sous presse).....	25
Figure 22 : Comparaison entre le nombre de captures annuelles enregistrées à Beaucaire et l'indice de recrutement du WGEEL de l'année N-1.....	26
Figure 23 : Comparaison entre le nombre de captures annuelles enregistrées à Beaucaire et le débit moyen observé sur la période de suivi (avril à novembre) chaque année	26
Figure 24 : Comparaison entre la répartition des classes de tailles les années suivant les années sèches à celle des années « classiques ».....	26
Figure 25 : Tendances des captures d'anguilles à Avignon jusqu'en 2020.....	27
Figure 26 : Comparaison entre les débits moyens sur la saison de suivi des bras de Villeneuve et d'Avignon	27
Figure 27 : Comparaison des flux migratoires annuels observés à Beaucaire depuis 2008	28
Figure 28 : Comparaison des flux migratoires annuels observés à Avignon et Caderousse depuis 2012 et moyennes intersites	29
Figure 29 : Répartition des classes de tailles des années 2010 et 2012 sur l'aménagement de Beaucaire	29

Figure 30 : Répartition des classes de tailles sur les aménagements de Beaucaire, Avignon et Caderousse de l'année 2015	30
Figure 31 : Répartition des classes de tailles sur les aménagements de Beaucaire, Avignon et Caderousse de l'année 2016	30
Figure 32 : Proportion de chaque type d'arrêt par rive sur l'aménagement de Beaucaire depuis 2008.....	31
Figure 33 : Proportion de chaque type d'arrêt par rive sur l'aménagement d'Avignon depuis 2012.....	32

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse de la campagne de suivi 2020 sur les 3 aménagements.....	8
Tableau 2 : Nombre de jours de dysfonctionnements et d'arrêts par dispositif entre le 3 juin et le 30 novembre 2020	9

Table des annexes

Annexe 1 : Contexte et méthodologie associés à l'étude.....	41
Annexe 2 : Origine et importance des apports hydrologiques des affluents du Rhône	50
Annexe 3 : Principe de fonctionnement d'une passe-piège à anguilles	51
Annexe 4 : Grilles de codification et de quantification des anomalies et parasites visibles à l'œil nu	52
Annexe 5 : Tailles moyennes en mm et leur écart-type, tailles minimum et maximum pour chaque âge estimé (années 2017 et 2018 confondues). N = nombre d'anguilles analysées	53
Annexe 6 : Évolution du débit du Rhône et des fenêtres où la température est supérieure à 15°C à Beaucaire confrontées aux captures journalières depuis 2008	54

Annexes

Annexe 1: Contexte et méthodologie associés à l'étude

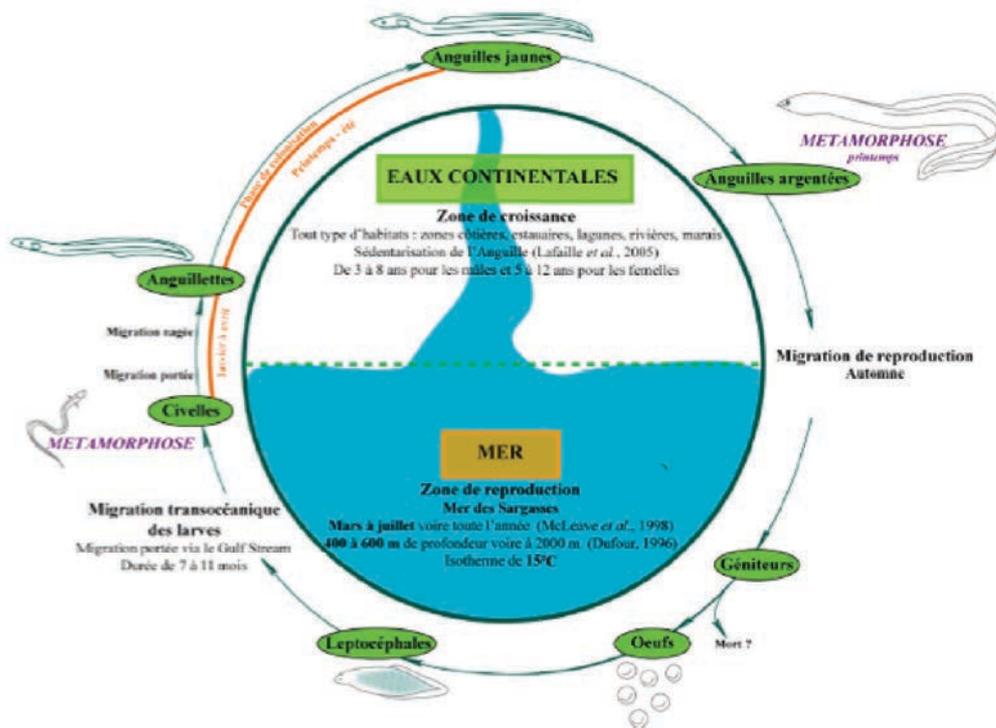
Contexte de l'étude

Contexte biologique

L'Anguille européenne est le seul grand migrateur thalassotoque européen et présente une large distribution géographique, de l'Europe septentrionale (Islande, Îles Féroé) en passant par l'Europe occidentale et méridionale (Açores, Canaries, Maroc) et l'ensemble du bassin méditerranéen (*Annexe B*). C'est une espèce opportuniste et ubiquiste capable de s'adapter à tous les types d'habitats accessibles (Chancerel, 1994 ; Elie & Rigaud, 1984 ; Ximenes *et al.*, 1986, Tzeng *et al.*, 1995, Feunteun *et al.*, 1998).

Cycle biologique

L'Anguille a un cycle de vie unique et encore mystérieux sur de nombreux points comme en atteste la figure ci-dessous.



L'endroit exact de la reproduction n'est pas connu, mais se localiserait dans la mer des Sargasses. Il est communément admis que cette aire de ponte est unique et que l'ensemble des anguilles européennes appartient au même stock, formant ainsi une population panmictique (Wirth & Bernatchez, 2001 ; Als *et al.*, 2011), autrement dit une population où tous les géniteurs sont susceptibles de se croiser et de se reproduire au hasard.

Après éclosion, les larves « leptocéphales » réalisent une migration vers les côtes européennes (voyage de 6 000 km environ), puis se transforment en civelles transparentes à l'abord du plateau continental.



La modification du fonctionnement hormonal au cours de la métamorphose se traduit par une perte hydrique, qui pousse les individus à rechercher des eaux moins salées (Elie *et al.*, 1994 ; de Cassamajor, 1997). Après une courte phase de stabulation dans la zone littorale, les civelles entament alors une migration portée puis nagée dans les estuaires entre janvier et juin sur la façade méditerranéenne (Finiger, 1976).

Les civelles se pigmentent progressivement jusqu'à atteindre le stade **Anguilette** (Elie *et al.*, 1982, *in* Edeline, 2005) durant lequel elles poursuivent leur migration vers l'amont en colonisant les hydrosystèmes continentaux accessibles. S'ensuit le stade **Anguille jaune**, phase de croissance essentiellement sédentaire jusqu'à la maturation sexuelle. Cette phase varie de 4 à 20 ans pour les femelles et de 2 à 15 ans pour les mâles.



Au terme de sa période continentale, l'Anguille subit une dernière métamorphose pour atteindre le stade **Anguille argentée**. La dévalaison des anguilles débute généralement à l'automne et se poursuit jusqu'au début du printemps (Durif *et al.*, 2009).

Comportement migratoire et dispersion continentale

Les arrivées de civelles en estuaire se font toute l'année avec une intensité qui varie selon une ou plusieurs courbes en cloche dont le pic de migration apparaît plus ou moins tôt en fonction de la latitude de l'estuaire (arrivées plus tardives au nord et au sud de l'aire de répartition qu'au centre - en Camargue ce pic est observé entre les mois de janvier et mars), et la variabilité des facteurs océaniques (qui agissent sur les vagues successives de leptocéphales issues d'une période de ponte étalée sur plusieurs mois) (*in Adam et al, 2008*).

Les recrutements fluviaux sont ensuite modulés par l'action de différents facteurs hydroclimatiques continentaux. L'intensité du courant se traduit par des conditions plus ou moins favorables à la migration des civelles. Creutzberg (1961) a montré que les civelles manifestent une rhéotaxie positive pour des courants de 0,2 m/s, mais que pour des courants supérieurs à 0,36 m/s elles nagent près du fond ou bien s'enfouissent. Les débits importants peuvent alors provoquer un blocage hydrodynamique similaire à l'effet de blocage des obstacles physiques, comme les barrages (Lafaille *et al*, 2007). La température de l'eau peut affecter fortement la migration puisque, comme pour toute espèce poïkilotherme, elle agit sur le métabolisme et notamment sur la vitesse de conduction de l'influx nerveux et sur la rapidité de la contraction musculaire, donc sur la nage.

Suite à la transformation en anguilletes, la dispersion non densité-dépendante diminue au profit d'une dispersion densité-dépendante avec sélection de l'habitat. Toutefois, le comportement migratoire peut varier selon l'individu et 4 catégories peuvent ainsi se distinguer (Feunteun *et al.*, 2003) :

- *Les fondateurs* se sédentarisent dès qu'ils trouvent un habitat leur étant favorable ;
- *Les pionniers* effectuent la migration la plus importante vers les zones de croissance amont ;
- *Les résidents* s'installent sur une aire de répartition donnée pendant plusieurs années ;
- *Les nomades* circulent d'un habitat à l'autre pour croître et s'installer de manière transitoire.

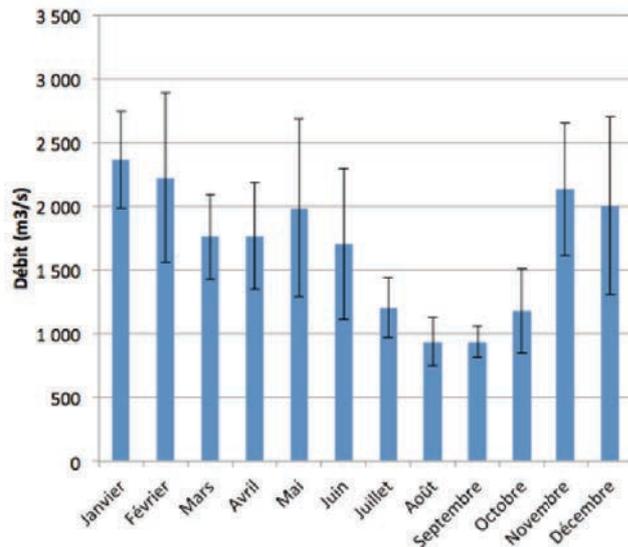
La progression des individus se fait essentiellement de nuit, même si les plus jeunes anguilles peuvent migrer toute la journée (comportement lucifuge moins développé) et la progression en nage active se situe entre 10 et 45 km par an. Cependant, cette vitesse de progression est très variable en fonction des caractéristiques du système fluvial emprunté (cloisonnement et pente retardant la progression) et des individus. Ainsi, Feunteun *et al.* (2003), mettent en évidence l'existence d'individus rapides pouvant parcourir 200 km par an.

La taille des anguilles est un bon indicateur de leur comportement migratoire. Les suivis de migration des anguilles révèlent que les individus migrants sont essentiellement des individus dont la taille excède rarement 30 cm (White et Knights., 1997). Ainsi, plus les individus présentent une taille importante, plus leur caractère migratoire diminue.

Caractéristiques du Rhône aval

Hydrologie

Long de 812 km (dont 522 km en France) le Rhône naît dans les Alpes suisses et son bassin versant couvre 97 800 km². Son régime hydrologique est complexe et se caractérise par la diversité de ses apports (*Annexe B*).



Le premier est de type alpin, issu de la fonte des neiges et des glaciers au printemps (entre mai et juillet avec une forte contribution des affluents de rive gauche : Isère, Drôme, Durance).

Le second, de type océanique d'hiver se caractérise par des crues lentes de la Saône notamment.

Le dernier, de type méditerranéen et cévenol, est à l'origine de violentes crues printanières et automnales (rôle important des affluents de rive droite : Gardon, Cèze, Ardèche).

Ainsi, le Rhône se caractérise par des maxima printaniers (liés à la fonte des neiges) et automnaux (conséquence des pluies méditerranéennes). Par ailleurs, le débit moyen du Rhône (1 700 m³/s e) est le plus élevé des principaux fleuves français.

Aménagements et configuration des sites de suivi

L'aménagement hydroélectrique type du Rhône comprend :

- Un barrage de dérivation construit sur le cours naturel du fleuve, il crée ainsi une retenue contenue par des endiguements latéraux.
- Un canal de dérivation sur lequel sont installées la centrale hydroélectrique et l'écluse.
- Des contre canaux qui longent les endiguements pour drainer les terres agricoles, assurer l'équilibre piézométrique des nappes et collecter les eaux percolant à travers les digues.



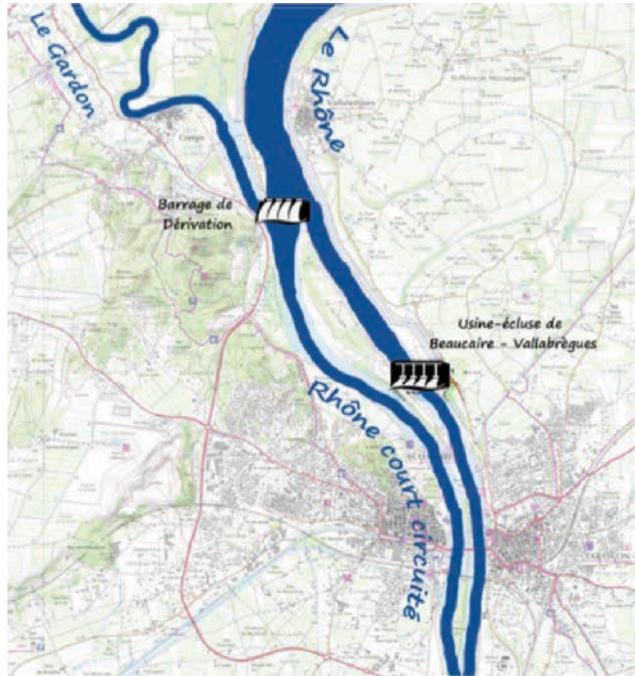
En situation hydrologique normale, le canal d'amenée capte l'essentiel du débit qui est turbiné par la centrale hydroélectrique au fil de l'eau et est restitué au Rhône en aval par le canal de fuite. Le barrage laisse passer, quant à lui, un débit minimal garanti pour alimenter le Rhône court-circuité (ou vieux Rhône). Au-delà du débit d'équipement de la

centrale hydroélectrique, le barrage s'ouvre progressivement pour faire transiter le surplus de débit.

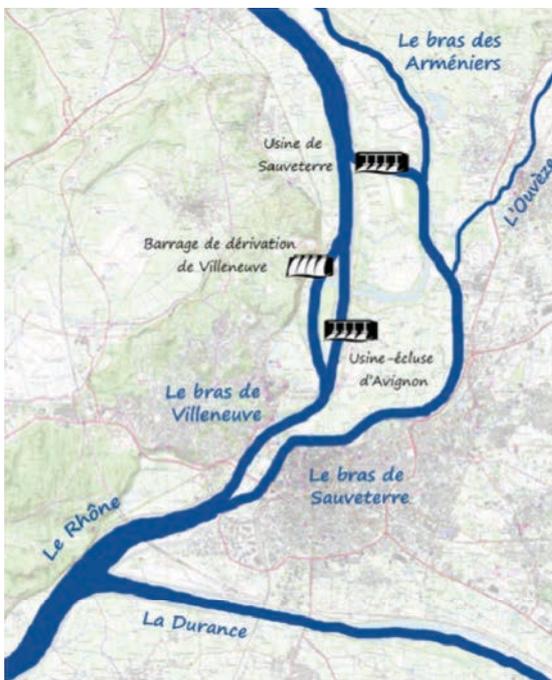
- Aménagement de Beaucaire-Vallabrègues

Le premier obstacle rencontré par les anguilles en phase de migration anadrome sur l'axe Rhône est l'aménagement hydroélectrique de Beaucaire-Vallabrègues situé à 68 km de l'embouchure.

Cette usine-écluse est équipée de 6 groupes de production électrique pouvant turbiner jusqu'à un débit maximum de 2 200 m³/s. Par ailleurs, un débit garanti de 90 m³/s est maintenu en permanence dans le Rhône court-circuité auquel s'ajoute le débit du Gardon (module de 32 m³/s), qui conflue en rive droite du Rhône à l'aval du barrage de retenue. Ainsi, selon l'hydrologie, le Rhône court circuité peut être plus attractif que le canal de fuite offrant alors aux anguilles la possibilité de coloniser le Gardon.



- Aménagement d'Avignon



Au niveau de la ville d'Avignon, le Rhône se sépare en deux bras, le bras de Sauveterre en rive gauche (long de 12 km) et le bras de Villeneuve en rive droite (long de 9 km) chacun aménagé d'usine hydroélectrique. L'usine-écluse d'Avignon, installée sur le bras de Villeneuve, se trouve à une distance de 94 km de l'embouchure et est équipée de 4 groupes de production pouvant turbiner jusqu'à 1 600 m³/s.

L'usine de Sauveterre est équipée de 2 groupes pouvant turbiner chacun 400 m³/s, soit un maximum de 800 m³/s. Pour des raisons de navigation au droit de la ville d'Avignon, un débit minimum de 400 m³/s doit être maintenu en permanence dans ce bras.

En général, pour un débit inférieur au débit d'équipement de l'usine-écluse d'Avignon, la répartition des débits se fait de façon à ce que le débit transitant dans le bras d'Avignon soit de 400 m³/s, que 20 m³/s soient déversés au niveau du barrage de Villeneuve afin de garantir un débit minimal et le débit restant est turbiné par l'usine d'Avignon.

Lorsque le débit du Rhône est supérieur à la capacité de turbinage de l'usine d'Avignon, le second groupe de Sauveterre est démarré. Le potentiel surplus de débit est déversé au barrage de Villeneuve quand le débit du Rhône dépasse 2 400 m³/s.

		Rhone CC	Usine Avignon	Usine Sauveterre	Bras de Villeneuve	Bras d'Avignon
QMNA 5	670	20	250	400	270	400
QMNA 2	795	20	375	400	395	400
Module	1 700	20	1 280	400	1 300	400
Biennale	5 830	3 430	1 600	800	5 030	800

Ainsi, selon l'hydrologie du Rhône, le bras d'Avignon est plus attractif que celui de Villeneuve qui, selon le débit, peut être deux fois inférieur à celui observé à Beaucaire (cas d'un Q20 qui serait de 915 m³/s à Beaucaire et de 495 m³/s à Avignon).

- Aménagement de Caderousse



L'aménagement de Caderousse se situe à 117 km de l'embouchure et présente une configuration semblable à celle de Beaucaire. L'usine-écluse est équipée de 6 groupes de production électrique dont le débit maximum turbinable est de 2 280 m³/s. Les débits supérieurs à la capacité de production de l'usine sont déversés dans le vieux Rhône via le barrage de dérivation et un débit minimal de 80m³/s est assuré le reste du temps ; à ce débit minimum s'ajoute celui de la Cèze (module de 22 m³/s). Selon l'hydrologie de cet affluent, le vieux Rhône peut être plus attractif que le canal de fuite.

Possibilité de franchissement des ouvrages

À l'heure actuelle, les usines-écluses de Beaucaire, Avignon et Caderousse sont franchissables pour les anguilles en migration sur l'axe Rhône. Des projets d'équipement de passes à bassins au niveau des barrages de dérivation sont en cours de réflexion ou de réalisation (Passe à poissons de l'usine de Sauveterre et du Pouzin mise en eau en 2017).

- Réseau de passes-pièges à anguilles du Rhône aval

En septembre 2005 et en juillet 2006, la CNR a fait construire deux passes-pièges à anguilles (Annexe B) respectivement en rive gauche et en rive droite de l'usine-écluse de Beaucaire Vallabrègues. Puis, au cours du mois de septembre 2010, la CNR a également équipé les usines éclusées des deux aménagements situés à l'amont immédiat de ce dernier (un dispositif en rive droite et un dispositif en rive gauche de chaque usine). Ainsi, les usines-éclusées d'Avignon et de Caderousse font depuis le printemps 2012 l'objet d'un suivi similaire à celui réalisé à Beaucaire. Les dispositifs installés sur ces deux aménagements sont équipés d'un système de vidéosurveillance consultable à distance permettant de vérifier à distance l'alimentation en eau de la passe ainsi que la présence d'anguilles dans le bac de captures et donc d'en optimiser le fonctionnement et le suivi. Le suivi de ces 6 dispositifs est effectué par l'Association MRM depuis leur installation.



- Éclusées spécifiques à poissons

Pour l'Anguille, l'efficacité des éclusées à bateaux ou à poissons n'est pas connue. Toutefois, jusqu'en 2011, le caractère nocturne de la migration de l'Anguille limitait certainement leur franchissement car les éclusages à poissons n'avaient lieu qu'en journée (15 mars au 30 juin). Depuis 2011, afin de prendre en compte cette problématique et celle de la Lamproie, des éclusages nocturnes spécifiques pour les poissons ont été mis en place en complément des opérations diurnes. Ils sont également réalisés de mars à juin à raison d'une à deux éclusées spécifiques par nuit en moyenne.

Méthodologie

Acquisition des données de terrain

Période de fonctionnement et fréquence du suivi

Au regard du retour d'expérience des premières années de suivi et de l'absence de captures durant la période hivernale, le suivi des passes-pièges est effectué entre le début du mois d'avril et la fin du mois de novembre.

Les interventions sur les passes-pièges à anguilles sont calées en fonction de l'activité migratoire des anguilles, de l'hydrologie du Rhône et de l'intuition des opérateurs (présomption de l'arrivée d'un pic de captures). Les résultats obtenus lors des précédentes campagnes ont ainsi permis de définir l'organisation du suivi des passes-pièges.

Ainsi, sur le site de Beaucaire-Vallabrègues, les passes-pièges sont visitées à *minima* trois fois par semaine et quotidiennement en période de pic de montaison.

Sur les sites d'Avignon et de Caderousse, la fréquence des relèves est ajustée en fonction notamment des quantités observées à Beaucaire, des quantités observées grâce au système de vidéosurveillance et des conditions hydrologiques. Toutefois, ces dispositifs sont visités à *minima* une fois par semaine.

Protocole de suivi

Les anguilles récoltées lors de la relève d'un dispositif sont pesées globalement puis dénombrées si le nombre total d'individus capturés est inférieur à 100. Dans le cas où le nombre d'anguilles est plus important, trois lots de cinquante à cent anguilles sont aléatoirement sélectionnés, dénombrés et pesés à minima 2 fois par semaine. En supposant qu'il n'y ait pas de biais d'échantillonnage (sélectivité des épuisettes ou de l'intervenant), cette méthode permet d'obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble des anguilles capturées. Ainsi, le nombre total d'anguilles capturées est estimé par une règle de trois en ramenant le poids moyen des échantillons au poids total des captures.

Un lot parmi les trois échantillonnés est utilisé pour la biométrie et l'appréciation de l'état sanitaire. Les individus sont anesthésiés dans une solution d'eugénol (1 ml pour 5 l d'eau) puis mesurés. Après une phase préalable de réveil, les anguilles sont relâchées en amont de l'aménagement à une distance suffisamment importante pour éviter tout phénomène de dévalaison.

Lors de chaque relève, le compteur horaire de l'armoire électrique est relevé afin de connaître le temps exact de fonctionnement des pompes entre chaque visite.

Dans le cadre d'analyses otolithométriques et épidémiologiques, 300 individus ont également été prélevés entre 2017 et 2018 (100 sur chaque aménagement) pour des tailles réparties équitablement entre 100 et 200 mm (10 sur chaque aménagement pour chaque classe de 10 mm).

Analyse des données

Données populationnelles

L'analyse **des captures journalières**, obtenues en ramenant le nombre d'individus piégés par le nombre de jours écoulés entre deux relèves, permet de caractériser le flux migratoire de montaison et son évolution à l'échelle d'un ouvrage (éventuelles différences entre les rives) et à l'échelle du Rhône aval. Des analyses interannuelles sont également réalisées afin de dégager les grandes tendances de la migration sur le Rhône aval.

En parallèle, **les données biométriques** permettent d'apprécier les caractéristiques de la population migrante (structure en taille, tailles moyennes, etc.) et leur éventuelle évolution au cours de la (des) saison(s) et entre les aménagements. Ainsi, la répartition des classes de tailles est définie chaque semaine à partir des anguilles échantillonnées pondérées par le nombre total de captures de la semaine concernée. Les répartitions mensuelles et annuelles sont définies en additionnant les valeurs hebdomadaires.

La même méthode a été utilisée pour élaborer les structures en taille annuelles. Les individus capturés ont été répartis en classes de tailles de 10 mm d'intervalle.

Enfin, **l'état sanitaire** des anguilles piégées est observé au cours des opérations de biométrie et permet ainsi d'identifier les anomalies au cours de la saison afin d'adapter au mieux le protocole pour assurer de bonnes conditions de stabulation aux poissons capturés. Ces mesures ont été mises en place en 2015 pour la première année et sont basées sur la description des anomalies par les intervenants à partir de **codes pathologie** (outil d'observation développé par l'ONEMA et adapté par Elie et Girard (2014), qui repose sur des descripteurs de types pathologiques (lésions) et biologiques (macro parasites externes) visibles à l'œil nu et basé sur un code à 3 lettres et un chiffre) (*Annexe C*).

L'appréciation de la qualité sanitaire des individus capturés dans chaque dispositif puis globalement par aménagement se base sur **l'Indice pathologie (IP)** qui s'exprime de la manière suivante $Ip = P \times Q$ où **P** représente la prévalence de poissons atteints et **Q** la sévérité lésionnelle de chaque lésion observée.

L'**Indice pathologie global (IPG)** observé pour l'ensemble de la population étudiée est alors obtenu en additionnant les I_p relatif à chaque lésion observée et s'exprime donc de la manière suivante $IPG = \sum I_p$; la note maximale pouvant être obtenue étant de 4 (100 % des poissons atteints de sévérité 4). Ainsi, l'état de santé des poissons est interprété selon les classes suivantes :

IPG	0 - 0,04	0,05 - 0,20	0,21 - 0,80	0,81 - 1,40	1,41 - 4
Condition	Excellente	Bonne	Précaire	Dégradée	Mauvaise

La prévalence (P) s'exprime par le ratio entre le nombre de poissons atteints et le nombre de poissons examinés. Ainsi, pour des valeurs supérieures à 5 %, la qualité du peuplement peut être considérée comme précaire et correspond à des milieux plus ou moins fortement dégradés (Girard, 1998).

La sévérité des anomalies donnée par les codes de quantification (1, 2, 3 ou 4) permet de compléter le jugement en modulant le résultat. En effet, des anomalies d'intensité 1 ou 2 atténuent l'appréciation de la qualité contrairement aux cas de présence d'anomalies d'intensité 3 ou 4 pour lesquels la population peut être considérée dans un état précaire avéré.

Données environnementales

Les conditions environnementales pouvant fortement influencer le comportement migratoire des anguilles, l'évolution de certaines variables environnementales ont été comparées aux captures journalières.

La **température de l'eau** étant supposée être le paramètre déclencheur pour la migration des anguillettes (White & Knights, 1997 in Crivelli, 1998), l'analyse de l'évolution de ce paramètre, dont les données sont fournies par la CNR, permet ainsi d'identifier la plage la plus propice au mouvement des anguilles et d'en déduire la fenêtre de migration.

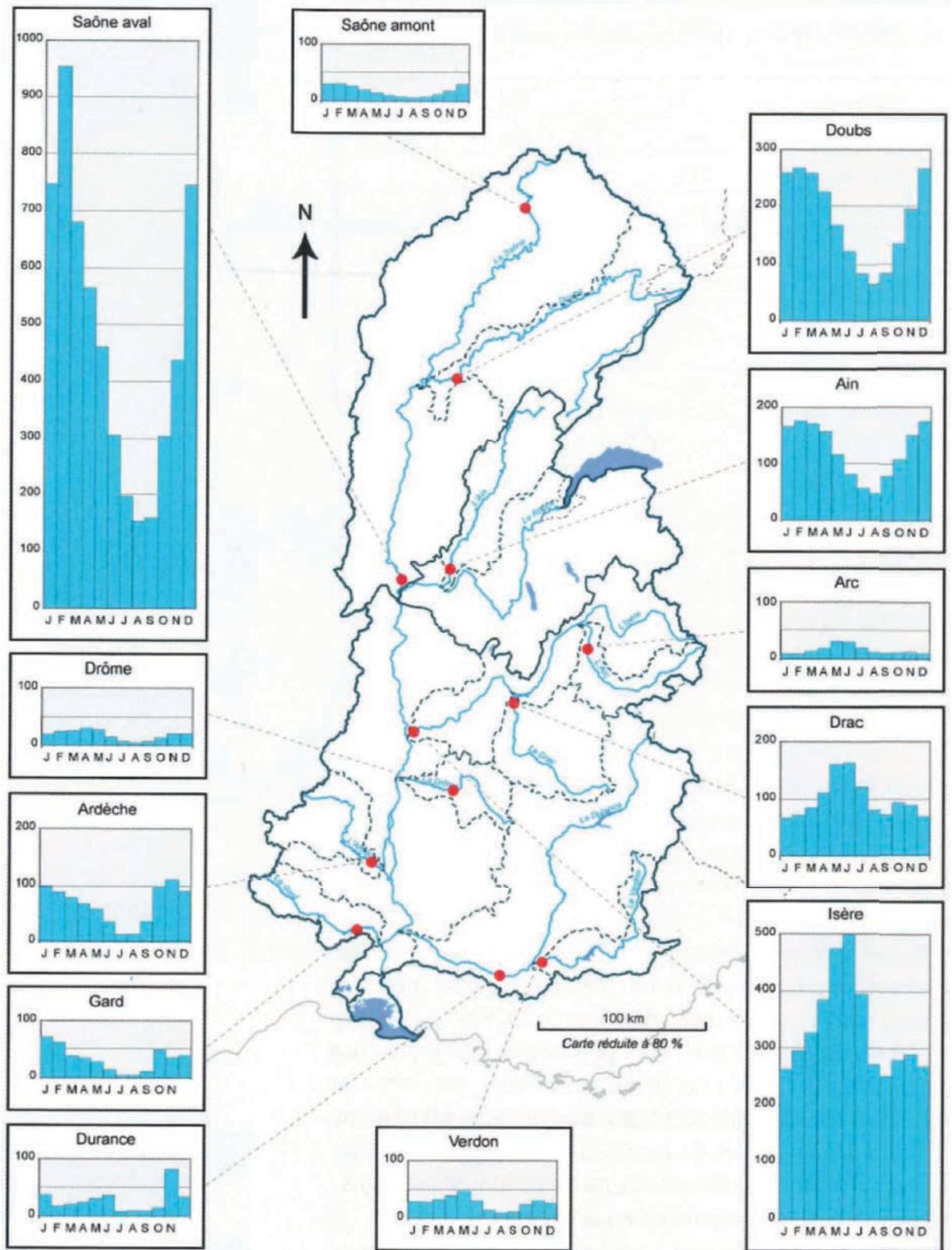
Le **débit** étant un des facteurs susceptibles d'influencer la migration, son évolution au cours de la saison a été confronté aux captures journalières. La répartition des débits entre les différents bras (notamment pour l'aménagement d'Avignon) ainsi que les apports issus des affluents ont été étudiés. L'ensemble des données (débits turbinés, surversés et affluents) ont été communiqués par la CNR.

Enfin, les **écluses** étant une autre voie de passage pour les anguilles, le nombre d'éclusées mensuelles a également été étudié (données CNR).

Prévalence du parasite *Anguillicola crassus*

300 anguillettes comprises entre 100 et 200 mm ont été collectées sur les aménagements de Beaucaire, Avignon et Caderousse en 2017 et 2018 et analysées afin de déterminer le niveau d'infestation des individus par le parasite invasif de la vessie gazeuse *Anguillicola crassus*. L'âge des individus a également été déterminé pour permettre d'évaluer l'importance de ce facteur sur les prévalences du parasite.

Annexe 2 : Origine et importance des apports hydrologiques des affluents du Rhône



Annexe 3 : Principe de fonctionnement d'une passe-piège à anguilles

Les individus sont attirés à proximité du système de capture par un débit d'attrait constant fourni par une pompe immergée. Le flux d'eau est réparti au niveau du système de capture par deux canalisations équipées de vannes. La première canalisation alimente un bac entonnoir qui renouvelle à la fois l'eau du bac de capture et crée une lame d'eau sur la rampe de reptation. La seconde canalisation se déverse dans une goutlotte qui aboutit à l'aval de la rampe de reptation, dans le but de créer le débit d'attrait.

Les rampes de reptation sont constituées de plaques PVC lisses de 40 cm de large sur lesquelles sont implantées des brosses de filaments synthétiques rigides. Le substrat utilisé pour la réalisation des rampes est dit mixte puisque favorisant la reptation des individus de petite taille en son centre (espacement entre les brosses 1,5 cm) et des individus de grande taille sur les bords (espacement de 2,5 cm). Les rampes de reptation sont fixées sur des goutottes en polyester qui canalisent le flux d'eau humidifiant la rampe et orientent les anguilles vers le bac de capture.

Après avoir gravi la rampe, les anguilles tombent dans un bac de capture, d'une capacité de 200 litres. Le flux créant la lame d'eau sur la rampe se déverse en partie dans ce bac et permet le renouvellement de l'eau, et ainsi sa réoxygénation.

Suite à des travaux réalisés sur le barrage d'Arzal dans l'estuaire de la Vilaine (Morbihan), il est apparu que l'eau en contact avec des anguilles "attirait" d'autres individus. Ainsi, le trop plein du vivier de capture se déverse sur la rampe de reptation de la passe-piège (Briand *et al.*, 2002).

Au fond du bac de capture, un système de vidange obturé par une grille permet d'évacuer l'eau tout en conservant les anguilles. Ce système est une sécurité qui évite les débordements. Une fois le bac vidangé, les anguilles sont capturées manuellement par l'intervenant.



Annexe 4 : Grilles de codification et de quantification des anomalies et parasites

Grille de codification des anomalies anatomo-morphologiques externes et des ectoparasites des poissons visibles à l'œil nu

Altérations anatomo-morphologiques	AA	Localisations anatomiques	Code
Absence d'organes	AO	Tout le corps	C
Bulles de gaz	BG	Tête	T
Déformations, difformités et malformations	AD	Mâchoire	M
Erosions	ER	Bouche	G
Nécroses	NE	Barbillon	J
Hypersécrétion de mucus	HM	Narine	N
Hypertrophie et hyperplasie	HY	Œil	Y
Lésions hémorragiques et congestives	HE	Opercule (fente branchiale chez l'anguille)	O
Maigreur	AM	Branchie (sauf pour l'anguille)	B
Plaies et lésions anciennes (cicatrices)	PL	Dos (= face pigmentée ou zénithale)	D
Tumeurs, kystes, nodules et autres grosseurs	TG	Colonne vertébrale	V
Ulcères (hémorragiques) et ulcérations	UH	Flanc	F
Etat pathologique multiforme	ZO	Ligne latérale	L
Altérations de la couleur	AC	Ecaille	E
Opacité	OP	Abdomen (= face aveugle ou nadirale)	A
Coloration sombre (mélanose)	CS	Orifice urogénital (anus)	U
Coloration terne ou pâle, dépigmentation	CT	Nageoire dorsale	H
Parasitisme	PA	Nageoire pectorale	P
Points blancs	PB	Nageoire pelvienne	R
Points noirs	PN	Nageoire anale	S
Crustacés	PC	Nageoire caudale	Q
Hirudiné (sangues)	PH	Nageoire adipeuse (salmonidés seulement)	J
Champignons	PM	Pédoncule caudal	K

Grille de quantification des anomalies et du parasitisme externes

Nombre de lésions (N) et/ou abondance parasitaire (Ab)	Code	Taux (%) de recouvrement corporel (S ²)	Code
N = 0 et/ou absence (Ab)	0	S ² = 0%	0
N < 3 et/ou abondance (Ab) faible	1	S ² < 5%	1
N = 4-6 et/ou abondance (Ab) moyenne	2	S ² = 5-10%	2
N = 7-10 et/ou abondance (Ab) forte	3	S ² = 10-20%	3
N = > 10 et/ou abondance (Ab) très forte	4	S ² = >20%	4

NB : Codification d'un « Individu sain » (i.e. ne présentant aucune lésion ni aucun parasite externe) : 0

visibles à l'œil nu

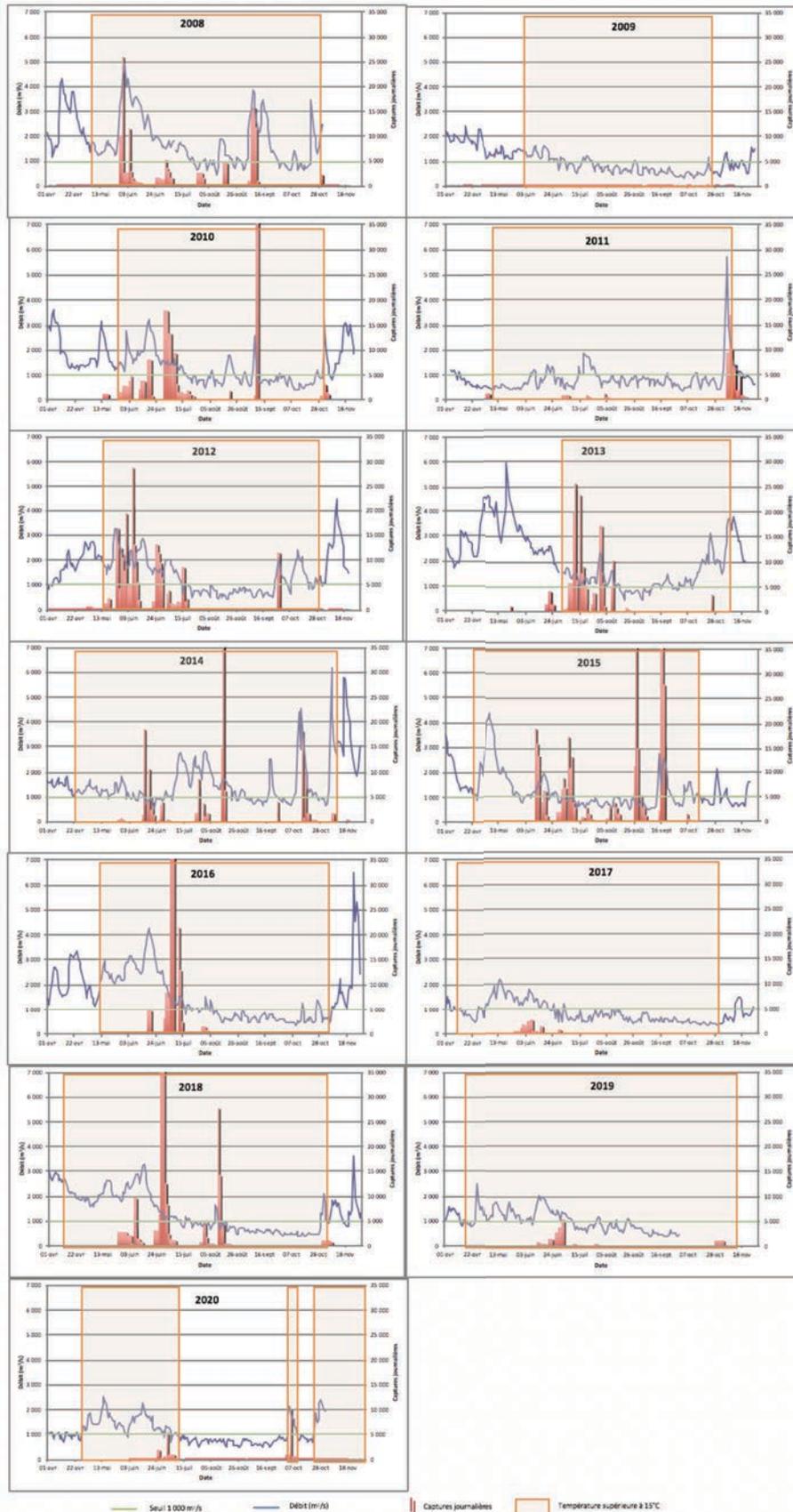
Les 2 premières lettres correspondant à un type de lésion (ou parasite), la troisième à la localisation de l'altération et le chiffre quant à lui renseigne sur la sévérité de l'altération et/ou l'abondance parasitaire. La sévérité est déclinée en 5 classes (0 absence - 4 très forte altération).

Annexe 5 : Tailles moyennes en mm et leur écart-type, tailles minimum et maximum pour chaque âge estimé (années 2017 et 2018 confondues). N = nombre d'anguilles analysées

site	Age	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Avignon	0	2	109	4	106	111
	1	18	118	15	101	154
	2	30	141	23	108	196
	3	24	157	23	118	196
	4	16	172	24	104	199
	5	11	184	10	172	200
	6	1	191		191	191
Beaucaire	0	11	108	4	101	113
	1	27	129	22	103	196
	2	43	158	25	115	198
	3	19	167	19	137	198
	4	5	179	9	169	192
	5	2	160	13	150	169
	6	1	194		194	194
Caderousse	1	4	105	3	102	109
	2	26	138	22	103	189
	3	30	151	29	105	197
	4	13	170	19	138	193
	5	8	184	7	174	196
	6	1	183		183	183



Annexe 6 : Évolution du débit du Rhône et des fenêtres où la température est supérieure à 15°C à Beaucaire confrontées aux captures journalières depuis 2008



Financeurs

L'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée ne pourrait agir sans l'engagement durable de ses partenaires financiers



Membres de l'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée

Fédérations Départementales des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique :

- Ain
- Alpes de Haute-Provence
- Hautes-Alpes
- Alpes-Maritimes
- Ardèche
- Aude
- Bouches-du-Rhône
- Corse
- Drôme
- Gard
- Hérault
- Isère
- Loire
- Pyrénées-Orientales
- Rhône
- Haute-Saône
- Saône et Loire
- Savoie
- Haute-Savoie
- Var
- Vaucluse

Association Régionale des Fédérations de Pêche de PACA (ARFPPMA PACA)

Association Régionale des Fédérations de Pêche Auvergne Rhône-Alpes (ARPARA).

ASSOCIATION MIGRATEURS
RHÔNE-MÉDITERRANÉE

ZI Nord, rue André Chamson, 13200 Arles
contact@migrateursrhonemediterranee.org
Tél. : 04 90 93 39 32
www.migrateursrhonemediterranee.org

