



STATION MARINE
DINARD



VOILET POISSONS MIGRATEURS 2015-2021



Edition :
Janvier 2020

Etude de l'échappement d'une AEP grâce à la
télémétrie acoustique :
Cas des anguilles argentées du Frémur pour la saison
d'avalaison 2018/19 (projet Bois Joli Suite)

DANET V., TRANCART T., ACOU A., CHARRIER F. & FEUNTEUN E.

Soutiennent les actions du volet "poissons migrateurs" :



Le projet est porté par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) et plus particulièrement par la station marine de Dinard. Il est financé par l'Agence de l'eau Loire Bretagne, la Région Bretagne, le Syndicat mixte de production d'eau potable de la côte d'Emeraude et le Muséum National d'Histoire Naturelle et l'UMS PatriNat. L'organisation opérationnelle est effectuée par le MNHN basé à Dinard en étroite collaboration avec le bureau d'étude FISH PASS pour les opérations sur le terrain.

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans l'implication de nombreuses personnes que nous tenons à remercier :

Les techniciens et chargés d'études du bureau d'études FISH PASS (BERTHELOT Y, TROGER F, ALLIGNE M, BONNAIRE F), pour leurs nombreuses interventions sur le terrain au cours de l'étude, ainsi que l'équipe technique du MNHN de Dinard.

Ce document doit être cité comme suit :

Danet V., Trancart T., Acou A., Charrier F., Feunteun E., (2020). Etude de l'échappement d'une AEP grâce à la télémétrie acoustique : Cas des anguilles argentées du Frémur pour la saison d'avalaison 2018/19. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, Station marine de Dinard/CRESCO, 59 p. + annexes.

Sommaire

Sommaire	2
Table des figures	4
Table des tableaux.....	4
Résumé étendu.....	6
1. Introduction.....	10
2. Matériels et méthodes	13
2.1 Présentation du site	13
2.1.1 Le Frémur	13
2.1.2 Les ouvrages structurant	14
2.2 Suivi de la pêcherie et biométrie.....	20
2.2.1 La pêcherie.....	20
2.2.2 Suivi de la pêcherie	21
2.2.3 Biométrie.....	21
2.2.4 Marquage acoustique	23
2.2.5 Le marquage PIT.....	23
2.2.6 La relâche	24
2.3 La télémétrie acoustique	24
2.3.1 Le réseau mis en place.....	24
2.3.2 Transformation des données de détection.....	26
2.3.3 Données environnementales	28
3 Résultats	28
3.1 Suivi de la pêcherie et biométrie	28
3.1.1 Cinétique des captures en lien avec l'environnement	28
3.1.2 Structure de la population capturée.....	30
3.1.3 Taux de croissance et changement de stade des anguilles recapturées	32
3.2 La recapture des individus marqués dans les systèmes de piégeage	33
3.2.1 Le filtre de la station de pompage	33
3.2.2 Le piège de dévalaison du Pont es Omnes	33
3.3 Quantification de l'échappement	33
3.3.1 L'échappement de la retenue AEP du Bois Joli.....	33
2.1.1 L'échappement du reste du réseau	34
3.4 Effets bloquants du barrage du Bois Joli	34
4. Discussion.....	36
4.1 Suivi de la pêcherie et biométrie.....	36
4.1.1 Cinétique des captures en lien avec l'environnement	36

4.1.2	Structure de la population capturée.....	36
4.1.3	Taux de croissance et changement de stade des anguilles recapturées	37
4.1.4	La recapture des individus marqués dans les systèmes de piégeage	38
4.2	Le suivi acoustique : Quantification de l'échappement.....	38
4.2.1	Echappement de la retenue AEP	38
4.2.2	L'échappement de l'ensemble du réseau	39
4.3	L'effet bloquant du barrage	39
5.	Conclusion	40
6.	Bibliographie	42
7.	Annexes	51
	Annexe 1: Reconstruction des positions de chaque anguille au cours du suivi (Point bleu = position moyenne par heure ; Point rouge = dernière position connue)	51
	Annexe 2 : Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (THELMA)	54
	Annexe 3 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones VEMCO)	54
	Annexe 4 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones THELMA).....	55
	Annexe 5 : Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées	55
	Annexe 5 : Systèmes de fixation utilisés pour la mise en place des hydrophones	56
	Annexe 7 : Illustrations.....	57

Table des figures

Figure 1 : Bassin versant du Frémur (source : BD-Carthage-onema-BD-carto, FISH PASS)	13
Figure 2 : Barrage de Bois Joli (vue amont hors surverse) (V.Danet).....	15
Figure 3 : Barrage de Bois Joli en phase de surverse (vue aval) (V.Danet)	16
Figure 4 : Tour de prélèvement d'eau potable avec les 5 prises d'eau (vue amont du barrage du Bois Joli).....	17
Figure 5 : Barrage de Pont es Omnes (vue amont) (V.Danet)	18
Figure 6 : Barrage de Pont es Omnes (vue aval en surverse) et piège de dévalaison à gauche et de montaison à droite (V.Danet)	19
Figure 7 : Barrage de Pont Avet (vue de la zone de surverse) (V.Danet).....	20
Figure 8 : Mesure du diamètre vertical de l'oeil gauche (V.Danet).....	22
Figure 9 : Mesure de la longueur de la nageoire pectorale gauche (V.Danet).....	22
Figure 10 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques	23
Figure 11 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS)	24
Figure 12 : Représentation schématique de l'aire de détection d'un hydrophone	25
Figure 13 : Réseau d'hydrophones mis en place dans le Frémur	26
Figure 14 : Illustration de la première étape de reconstruction des trajectoires	27
Figure 15 : Bilan des captures par les verveux au cours du temps en fonction de la pluviométrie et du niveau d'eau de la retenue AEP du Bois Joli	29
Figure 16 : Nombre d'anguilles capturées en fonction de la pluviométrie journalière	30
Figure 17 : Anguilles jaune et argentée de même taille (V MAZEL)	31
Figure 18 : Histogramme des fréquences de tailles des anguilles capturées (Pointillé gris = moyenne anguilles jaunes ; pointillés noirs = moyenne argentées).....	31
Figure 19 : Reconstruction des positions de l'anguille N°70 (point rouge = dernière position connue).....	34
Figure 20 : Relève des données d'un hydrophone Thelma sur le Bois Joli.....	57
Figure 21 : Relève des données d'un capteur accéléromètre sur le Bois Joli	57
Figure 22 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli.....	58
Figure 23 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli.....	58

Table des tableaux

Tableau 1 : Nombre d'anguilles argentées marquées par jour de marquage.....	32
Tableau 2 : Caractéristiques de la fraction d'anguilles argentées femelles marquées en PIT tag et en acoustique	32
Tableau 3 : Stade de maturation des anguilles argentées marquées en acoustique (méthode de Durif et al., 2005) et mesure des variables morphologiques : longueur totale (LT), poids (Pd), diamètre oculaire moyen (DO) et longueur pectorale moyenne (LP). Moyennes et variables standard des indices.....	32

Tableau 4 : Croissance annuelle des anguilles recapturées par la pêcherie en fonction des années de marquage	33
Tableau 5 : Paramètres calculés pour chaque anguille	35

Résumé étendu

Les retenues artificielles sont nombreuses dans les cours d'eau pour répondre aux besoins croissants en eau potable, hydroélectricité et irrigation. L'Ouest de la France (Région Bretagne et Vendée) est une région particulièrement concernée en raison de l'absence de nappes phréatiques et de la nécessité d'avoir des retenues d'eau superficielle. Ainsi, 30 barrages AEP (Alimentation en Eau Potable) sont recensés dans cette région. A l'échelle mondiale, plusieurs milliers de barrages AEP sont construits (Lehner *et al.*, 2008). Ces retenues et leurs barrages associés impactent directement les poissons migrateurs comme l'anguille européenne en limitant l'accès à l'amont des bassins versants et les possibilités de retour en mer au stade argenté. En France, la plupart des barrages sont équipés pour permettre le passage vers l'amont grâce à la mise en place de passes à anguilles, mais les dispositifs de dévalaison (retour des migrants vers la mer) restent encore très rares. Les études concernant la dévalaison se sont focalisées sur les ouvrages hydroélectriques où des mortalités importantes (entre 20 et 100 %) d'anguilles argentées ont été constatées lors du transit dans les turbines (Trancart T., 2013 ; Trancart T., 2018 ; Travade F., 1992). La problématique de la dévalaison au niveau d'ouvrages non-turbinants est relativement peu documentée, probablement parce qu'il est considéré qu'une surverse lors des crues est suffisante pour favoriser la sortie d'un maximum d'anguilles argentées (Travade F., 1992). Il est donc fondamental d'évaluer l'échappement en anguilles argentées au niveau de ces ouvrages non-turbinants et préciser leurs impacts sur l'état général des anguilles argentées (blessures, mortalités) et sur la dynamique de la migration de dévalaison en général (temps et distance additionnel). A plus long-terme, il est également important d'anticiper l'impact des années sèches sur l'échappement des anguilles argentées dans les sites où des barrages AEP sont présents. En effet, dans le contexte du réchauffement global, la fréquence des années hydrologiques défavorables va augmenter, et des solutions doivent être trouvées pour permettre un échappement en anguilles argentées même quand les surverses sont tardives voire inexistantes.

Depuis 1996, un suivi anguille est réalisé dans le bassin versant du Frémur. Ce suivi permet de recueillir des données à long-terme concernant l'ensemble du cycle biologique continental de l'espèce : de la colonisation du bassin versant au stade juvénile jusqu'à la dévalaison des anguilles argentées (Charrier *et al.*, 2017). Ce suivi met en lumière depuis longtemps une forte problématique de continuité piscicole sur plusieurs ouvrages présents sur le linéaire de ce petit fleuve côtier breton. Le barrage de Bois Joli construit en 1992 est le plus grand des ouvrages du cours d'eau. Il a permis de créer une AEP de près de 3 000 000 de m³ qui permet d'alimenter en eau potable toute la région de Dinard et Saint Malo. Il ne possède pas de système de dévalaison adapté. La migration des anguilles argentées est en effet dépendante de la période et durée de la surverse de la retenue, et des suivis à long-terme par

marquage aux PIT-tags montrent qu'un très faible pourcentage (20 à 30%) des anguilles argentées franchissent la retenue avec succès (Feunteun et al., 2000 ; Acou, 2006), alors que ce pourcentage dépasse les 80% dans les cours d'eau vierges de tout aménagement comme l'Oir (Acou, 2006) ou la Loire (Bultel et al., 2013). De plus, les deux canalisations (de débit réservé et la prise d'eau potable) ne sont pas conçues pour permettre le passage des anguilles migrantes car une grille est sensée en bloquer l'accès. Pourtant, les suivis montrent que de nombreuses anguilles peuvent franchir le barrage par ces deux voies, occasionnant des lésions significatives voire des mortalités. Le suivi à long-terme de la dévalaison réalisé en aval du barrage du Bois Joli grâce à un dispositif de piégeage montre, que le nombre d'anguilles argentées qui s'échappe de la retenue diminue au cours du temps (Charrier F., 2018). Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'urbanisation croissante de la région de Saint Malo, les surverses tardives voire inexistantes risquent de se généraliser selon les simulations réalisées par le syndicat Mixte. Il est donc important d'étudier ces systèmes dans le but de mettre au point des dispositifs de dévalaison qui permettent d'améliorer l'échappement des anguilles argentées au sein de ces retenues AEP, quelles que soient les conditions hydrologiques rencontrées lors des saisons de migration.

Lors de la saison de dévalaison 2017/18, un suivi télémétrique de l'échappement des anguilles argentées de la retenue AEP du Bois Joli a déjà été réalisé. Les résultats ont permis de mettre en évidence les nombreux impacts du barrage de Bois Joli sur la migration des anguilles argentées produites en amont de la retenue AEP. Tout d'abord, près de 19% (3/16) n'ont pas réussi à franchir le barrage du Bois-Joli et sont restées bloquées dans la retenue. Sur les 13 anguilles qui ont franchi le barrage du Bois Joli, une majorité (n = 10, 77 %) a attendu la surverse et utilisé principalement la première crête surversante dont le niveau est situé 10 cm plus bas (28.10 NGF) que les cinq autres. Les autres anguilles (n = 3, 23%) ont emprunté la colonne de prise d'eau potable et sont ressorties par la vanne de débit réservé (n = 2) ou par la conduite de la station de pompage (n =1), toutes deux équipées de dispositif de piégeage.

Le franchissement effectif est intervenu principalement en début de surverse (Décembre 2017) après, dans la plupart des cas, plusieurs essais infructueux. Quand la première détection au pied du barrage, interprétée comme la première tentative de franchissement, est prise comme référence temporelle, le blocage de la migration a engendré une augmentation de la distance parcourue de 39.7 km (9.7 km – 77.2 km) en moyenne, et un temps de résidence supplémentaire de 21 jours environ (4.3 – 65.9 jours). Les conséquences de ce blocage de la migration sont une hausse de la dépense énergétique liée à la distance supplémentaire parcourue, et un retard de la migration. De plus, un timing différé peut également limiter la probabilité des individus à trouver des congénères sur la frayère et réduire ainsi leur succès reproducteur.

Parmi les 13 anguilles ayant franchi le barrage de Bois Joli, deux ont été retrouvées mortes après avoir empruntées la conduite du débit réservé. Trois autres anguilles ont été retrouvées mortes également dans le piège de dévalaison du barrage de Pont es Omnes. Et sur les huit anguilles qui ont atteint la retenue d'eau de Pont Avet, seulement cinq ont été entendues au pied du barrage de Pont Avet mais aucune en aval du réseau.

Finalement, l'échappement global, qui représente la proportion d'individus marqués en amont du Bois Joli qui accède à l'estuaire du Frémur après avoir franchi successivement les trois barrages (Bois Joli, Pont es Omnes et Pont Avet), varie entre 0% et un maximum de 31% (5/16). Cet intervalle est dû à des problèmes de détection au niveau du barrage du Pont Avet qui ne permettent pas d'identifier clairement le devenir des individus marqués. Quel que soit le niveau réel d'échappement, il intervient au cours d'une saison hydrologique favorable (surverse précoce observée en Décembre 2017). Ce résultat constitue donc une fourchette haute d'estimation de l'échappement dans le bassin versant du Frémur.

Une seconde année de suivi a donc été nécessaire afin de vérifier ces résultats et contrôler l'échappement des anguilles argentées de la retenue AEP dans des conditions hydrologiques potentiellement différentes.

L'objectif de cette étude était notamment :

1) d'étudier le(s) comportement(s) d'anguilles argentées au sein de la retenue du Bois Joli. Pour cela, des émetteurs acoustiques ont été implantés dans la cavité générale de 18 anguilles argentées femelles et un dispositif de 9 hydrophones couvrant l'ensemble de la retenue AEP a permis un suivi des détections jusqu'au barrage du Bois Joli

2) Quantifier l'échappement au barrage de Bois Joli mais également jusqu'à l'estuaire du Frémur. 14 hydrophones ont été positionnés entre le barrage de Bois Joli et le moulin de Rochegood afin de s'assurer du franchissement ou non des ouvrages jusqu'à l'estuaire du Frémur.

Au cours de la saison 2018/19, la pluviométrie sur le bassin versant du Frémur a été très faible, ne provoquant pas de surverse du barrage de Bois Joli. Sur les 18 anguilles argentées femelles marquées, seulement une anguille a franchi le barrage de Bois Joli en utilisant la conduite d'eau potable, mais elle n'a pas survécu au transit au sein de la conduite. Toutes les autres anguilles sont restées bloquées dans la retenue AEP au cours du suivi au sein de la retenue AEP allant jusqu'au 25 mars 2019. Les derniers hydrophones présents en aval du Pont Avet et retirés le 17 septembre 2019, n'ont permis la détection d'aucune anguille argentée marquée.

Au final, au 25 mars 2019, les anguilles ont parcourues en moyenne 29,8 km au sein de la retenue et se sont présentées au droit du barrage en moyenne quatre fois pour une durée totale de 22 jours.

L'échappement final de la retenue AEP de Bois Joli lors de cette saison 2018/19 est donc de 0 % au 31 aout 2019.

L'impact du barrage de Bois Joli au cours d'une année pluviométrique défavorable mais probablement représentative dans les années futures, est considérable avec un échappement nul. L'échappement observé ne respecte pas le règlement européen qui fixe à 40% l'échappement de la biomasse pristine. Il est donc fondamental et très urgent de mettre en place des mesures de gestion (exutoire de dévalaison) pour permettre un échappement en anguilles argentées même quand le Bois Joli ne surverse pas.

1. Introduction

Considérée nuisible jusqu'en 1982 (Adam, 1997 ; Durif, 2003), l'anguille européenne *Anguilla anguilla* (L, 1758) a désormais le statut d'espèce menacée selon les experts de la CITES (convention de Washington). Depuis les années 1970, la population d'anguilles est en constante régression (Moriarty & Dekker, 1997 ; Dekker, 2004). Des mesures de gestion ont été mises en œuvre pour diminuer la part de mortalité d'origine anthropique et ainsi permettre une restauration du stock (Adam, 2008). L'Union Européenne a donc mis en place le 18 septembre 2007 un règlement européen (n°1100/2007) instituant une reconstitution du stock d'anguilles européennes. Chaque pays membre a dû proposer un plan de gestion au niveau national. Le plan de gestion français a été accepté par la Commission européenne le 15 février 2010 (Plan de Gestion Anguilles (PGA) - volet national). L'Etat a demandé à chaque organisme responsable du bassin versant considéré, dénommés comme unités de gestion anguille (UGA), de réaliser un plan de gestion propre. Ces UGA au nombre de neuf, ont été déterminées selon les critères validés par le Comité de Gestion des Poissons Migrateurs (CoGePoMi).

L'objectif de chaque plan de gestion est de réduire la mortalité anthropique afin d'assurer, avec une grande probabilité, un taux d'échappement (pourcentage d'individus argentés produits) vers la mer d'au moins 40 % de la biomasse « pristine¹ » d'anguilles argentées. Ceci correspondant à la meilleure estimation possible du taux d'échappement, qui aurait été observé si le stock n'avait subi aucune influence anthropique (N°1100/2007 du PGA). Ainsi, il est nécessaire de rassembler des données précises et fiables sur l'abondance et l'échappement des anguilles argentées.

Ce taux d'échappement dépend de nombreux facteurs qu'ils soient naturels ou anthropiques. En effet, l'anguille est soumise à de nombreuses pressions au cours de son cycle de vie continental telles que la prédation, la modification et réduction de leurs habitats de croissance, la pression de pêche, la détérioration de leur condition de vie et de leur état de sanitaire (pollution, parasitisme...) mais également la rupture de la continuité écologique due à la présence de barrages.

Le plan de gestion « anguille » préconise, dans le but de garantir un taux d'échappement en rapport avec les objectifs à atteindre, d'initier des réductions des différents facteurs de mortalités et d'acquérir des données sur la biologie de l'anguille.

D'autre part, les enjeux autour de la ressource en eau sont de plus en plus importants dans le contexte du réchauffement climatique. Les retenues artificielles sur les cours d'eau se multiplient pour répondre aux besoins en eau potable, hydroélectricité et irrigation.

¹ Pristine : en l'absence de toute activité anthropique. Faute de données de référence, le règlement propose d'utiliser les données historiques d'avant 1980 comme référence.

Dans l'Ouest de la France (Région Bretagne et Vendée), un minimum de 30 barrages AEP (Alimentation en Eau Potable) est recensé, ils sont probablement plusieurs milliers dans le monde (Lehner *et al.*, 2008). Ces retenues impactent directement les poissons migrateurs comme l'anguille européenne en créant des obstacles sur leurs voies de migration. Si la plupart des barrages sont équipés pour la montaison avec la mise en place de passes-pièges, les études concernant la dévalaison se sont focalisées sur les ouvrages hydroélectriques où des mortalités importantes (entre 20 et 100 %) d'anguilles argentées pouvaient être constatées lors du transit dans les turbines. La conception de prises d'eau et turbines « ichtyocompatibles » ou des arrêts de turbinage pendant les pics de migration sont des options envisagées pour limiter ces mortalités. Pour autant, elles ne sont pas applicables au cas des retenues de production d'eau potable qui sont caractérisées par un mode de gestion différent et des problématiques différentes.

Cependant, l'impact des ouvrages dit « passifs » reste encore mal connu (barrage n'ayant pas la vocation de produire de l'électricité et n'ayant donc pas de gestion de vannes ou de turbines), et pourtant l'impact sur la migration d'avalaison des anguilles argentées est loin d'être négligeable. Un suivi télémétrique mené sur le lac de Grand-Lieu en 2015/2016 et 2016/2017 a permis de montrer que seulement 15 à 35 % des anguilles argentées réussissent à franchir le barrage permettant de maintenir le lac en eau (Trancart *et al.* 2017).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, **il est important de mettre en œuvre des mesures de gestion pertinentes et efficaces afin de concilier les usages de l'eau et la préservation d'une espèce migratrice en danger critique d'extinction.**

Il existe un programme de suivi de la restauration des voies de migration de l'anguille depuis 1995 sur le Frémur. L'objectif de ce programme étant de rétablir les voies de migration de l'anguille sur l'ensemble du bassin versant du Frémur et d'estimer les effets du rétablissement de la migration sur la dynamique de la population d'anguilles. Le suivi de la dévalaison des anguilles argentées sur le Frémur est réalisé depuis 20 ans au niveau du barrage de Pont es Omnes. Un piège de dévalaison a été installé couvrant toute la largeur de l'exutoire et permettant ainsi de capturer la quasi-totalité des anguilles dévalantes. Cependant en amont de cet ouvrage, se trouve le barrage de Bois Joli. Il s'agit d'un barrage AEP dit « passif », non turbinant, provoquant une retenue d'eau potable qui peut contenir jusqu'à 3 millions de m³ d'eau. Actuellement il ne possède pas de système de dévalaison adapté. Le seul moyen pour les anguilles argentées de quitter la retenue du Bois Joli est de franchir le barrage par surverse. Il faut donc un cumul de pluie significatif pour que le niveau d'eau atteigne la cote maximale de surverse fixée à 28.20 m NGF.

L'étude BOIS JOLI 3D débutée en 2017 a eu pour objectif d'identifier et de comprendre le ou les comportements des anguilles argentées au sein de la retenue AEP du Bois Joli, mais aussi au droit du barrage AEP, et de les suivre jusqu'à l'exutoire du Frémur lorsqu'elles ont réussi à franchir cet ouvrage. Cette étude a permis de montrer les impacts cumulés des trois barrages seuil principaux du Frémur sur l'échappement en anguilles argentées lors d'une année hydrologique favorable (surverse de la retenue précoce): seul un maximum de 30 % des anguilles produites dans la retenue du Bois Joli a réussi à atteindre l'estuaire du Frémur. Il y a une forte perte en ligne et chaque ouvrage a un impact non négligeable sur l'efficacité de migration des anguilles mais également sur le retard et la dépense énergétique accumulés au niveau de chaque ouvrage.

C'est dans l'objectif de confirmer le faible échappement et l'impact des trois ouvrages majeurs du Frémur sur les anguilles argentées produites en amont de la retenue du Bois Joli qu'a été mise en place cette nouvelle étude.

L'étude s'articule autour de deux axes :

- **Etudier le(s) comportement(s) d'anguilles argentées dans la retenue du Bois Joli en attente de surverse : comment s'orientent-elles dans la masse d'eau pour atteindre le barrage ?** Des émetteurs acoustiques ont été implantés dans la cavité générale de 18 anguilles argentées femelles et suivi grâce à un dispositif de 9 hydrophones couvrant l'ensemble de la retenue AEP.
- **Quantifier l'échappement au barrage de Bois Joli mais également jusqu'à l'estuaire du Frémur et notamment le franchissement du dernier ouvrage avant l'estuaire, le barrage de Pont Avet.** Un total de 14 hydrophones a été installé de la retenue de Pont es Omnes au moulin de Rochegoud.

En complément, les données de captures d'une pêcherie mise en place pour collecter les anguilles argentées en amont de la retenue de Bois Joli ont également été intégrées à ce rapport. Elles permettent d'observer la réaction aux facteurs environnementaux (notamment la pluviométrie) mais également d'estimer le taux de croissance, des anguilles produites en amont de la retenues AEP.

2. Matériels et méthodes

2.1 Présentation du site

2.1.1 Le Frémur

Le Frémur est un petit fleuve côtier du nord de la Bretagne (Côtes d'Armor) débouchant dans la Manche à Lancieux (10 km à l'Ouest de Saint Malo) (Figure 1). La superficie de son bassin versant est d'environ 60 km² pour un linéaire de cours d'eau atteignant près de 45 km, dont 17 km pour le cours principal.

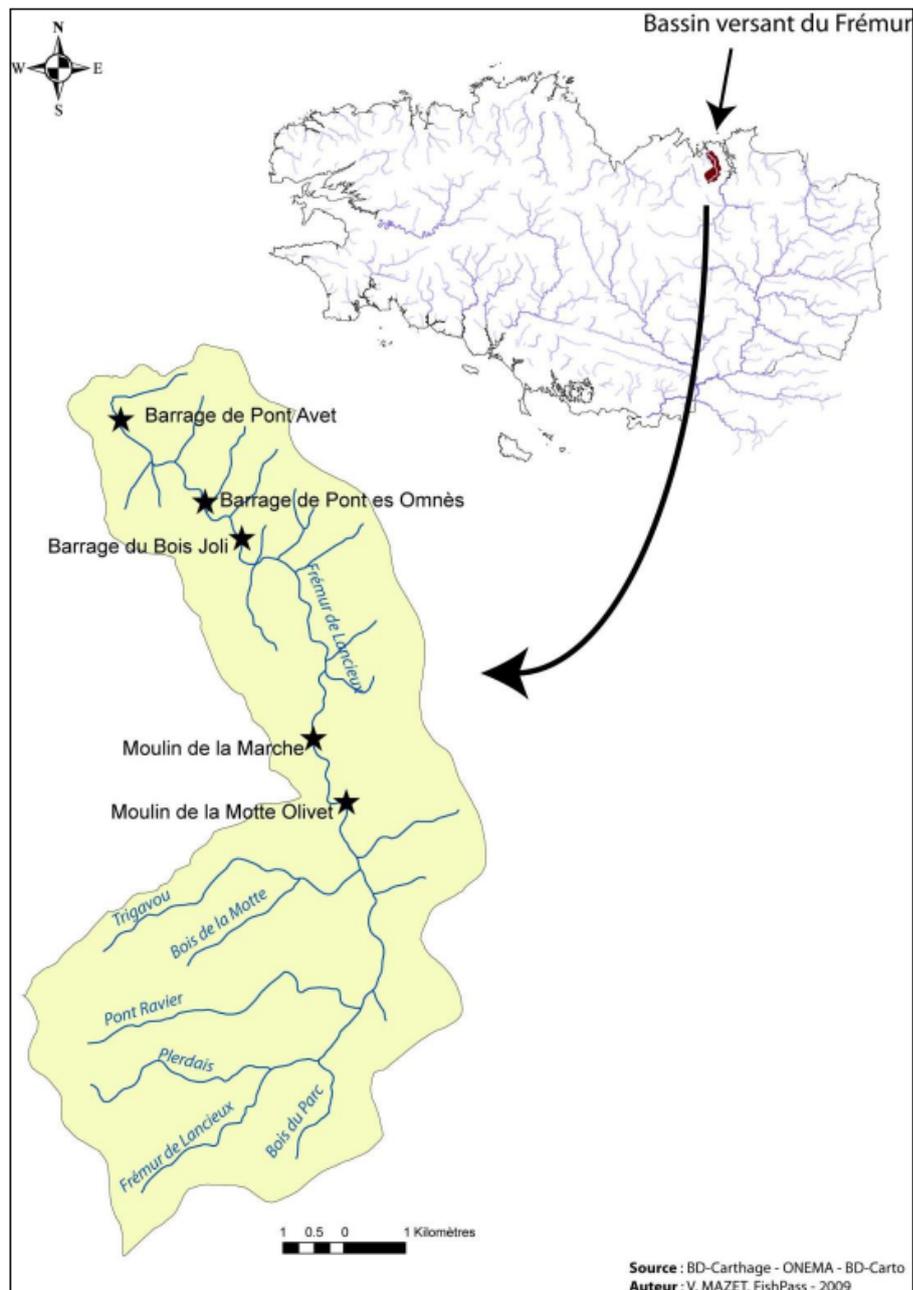


Figure 1 : Bassin versant du Frémur (source : BD-Carthage-onema-BD-carto, FISH PASS)

2.1.2 Les ouvrages structurant

2.1.2.1 Bois Joli

Le barrage de Bois Joli (Figure 2 et Figure 3) situé à 5.5 km de la mer et construit en 1992, est un ouvrage AEP permettant de retenir l'eau et ainsi créer une retenue d'eau potable. Il mesure 150 m de long pour 15 m de haut créant un réservoir de 0.4 km² pour un volume maximal de 3 000 000 m³. Il est connecté à l'aval à une station de pompage, permettant de traiter et alimenter le réseau d'eau potable de la région de Dinard. Il existe 3 voies potentielles d'échappement pour les anguilles argentées au niveau de cet ouvrage :

- Par surverse lorsque les niveaux d'eau atteignent la cote maximale de 28,20 m NGF
- Par la conduite de pompage d'eau
- Par la conduite de débit réservé, assurant un écoulement permanent entre l'amont et l'aval du barrage lorsqu'il n'y pas de surverse



Figure 2 : Barrage de Bois Joli (vue amont hors surverse) (V.Danet)



Figure 3 : Barrage de Bois Joli en phase de surverse (vue aval) (V.Danet)

La surverse est possible au niveau de 6 fenêtres de 6.90 m de large. La première fenêtre rive gauche possède une partie de 3 m de large plus basse de 10 cm par rapport aux autres. La surverse y est alors plus précoce et plus longue. Sa côte de surverse est alors de 28.10 m côte NGF contre 28.20 m pour les autres fenêtres (Legault et al., 2003; Acou et al., 2008).

Le prélèvement d'eau de la retenue est réalisé grâce à 5 prises d'eau situées en partie amont du barrage à cinq hauteurs différentes, dans une tour en béton au milieu du barrage. Elles permettent de pomper l'eau de la retenue quel que soit le niveau d'eau (Figure 4) et d'alimenter 3 conduites :

- une vanne de fond de 800 mm de diamètre,
- une conduite de débit réservé d'un diamètre de 200 mm avec de nombreux coudes générant un débit minimum de $0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- et une conduite de prélèvement d'eau potable d'un diamètre de 400 mm avec un débit moyen de $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Bien que cette conduite ait été équipée d'une grille métallique fine (maille de 15 mm) pour empêcher le passage des anguilles et leur mortalité, cette grille s'est révélée inefficace, et de nombreuses anguilles sont retrouvées mortes dans le filtre situé en aval du barrage (Charrier et al., 2018).

La première étude de télémétrie acoustique menée par le MNHN en 2017/2018, a montré une mortalité de 30 % des anguilles ayant utilisée la conduite de débit réservé pour franchir le barrage (Danet et al, 2019).



Figure 4 : Tour de prélèvement d'eau potable avec les 5 prises d'eau (vue amont du barrage du Bois Joli)

2.1.2.2 *Pont es Omnès*

Situé à 1 km en aval du barrage de Bois Joli et édifié par les allemands lors de la seconde guerre mondiale, le barrage de Pont es Omnès (Figure 5 et Figure 6) est une digue créant une retenue d'eau. Une ouverture dans cette digue de 2.80 m de large permet un écoulement de l'eau vers l'aval. C'est dans le prolongement de cette ouverture qu'a été installé il y a 20 ans le piège de dévalaison.

Un suivi régulier (tous les 3 jours en moyenne) du piège de dévalaison est réalisé par le bureau d'étude Fish-Pass et l'association Cœur-Emeraude dans le cadre du suivi du Frémur depuis 20 ans. Une biométrie complète est réalisée sur chaque anguille capturée (Longueur, poids, stade, état de santé et lecture PIT tags). Ce suivi permet de recapter potentiellement des anguilles marquées en acoustique ou par PIT tag). Le piège de dévalaison du Pont es Omnès est donc utilisé comme point de contrôle des anguilles marquées en acoustique dans cette étude.



Figure 5 : Barrage de Pont es Omnes (vue amont) (V.Danet)



Figure 6 : Barrage de Pont es Omnes (vue aval en surverse) et piège de dévalaison à gauche et de montaison à droite (V.Danet)

2.1.2.3 Pont Avet

Situé à 2km de la mer, cet ouvrage (Figure 7) permet de créer une retenue de 15.8 ha pouvant contenir 500 000 m³ d'eau. Ce réservoir a été utilisé pour le fonctionnement de l'ancienne usine d'eau potable qui n'est plus opérationnelle depuis 2012. Cet ouvrage forme un arc de cercle de 96 m de long sur 11.7 m de haut. Le seul écoulement possible vers l'aval est la surverse sur la partie Est de l'ouvrage.

Il n'y a aucun dispositif de dévalaison sur cet ouvrage, uniquement une passe de montaison qui n'est plus en fonctionnement. La dévalaison des anguilles est possible uniquement par surverse.



Figure 7 : Barrage de Pont Avet (vue de la zone de surverse) (V.Danet)

2.2 Suivi de la pêche et biométrie

2.2.1 La pêche

Au sein de la retenue d'eau potable de Bois Joli, il n'existe pas de pêche professionnelle. Seule une pêche de loisir est acceptée et contrôlée sur les rives de la retenue, la navigation étant interdite.

Une pêche a donc été mise en place en amont de la retenue AEP pour:

- D'une part collecter des anguilles argentées migrantes pour le marquage acoustique. La mise en place d'une pêche en amont de la retenue a permis la capture d'anguilles argentées

produites dans les zones amont du bassin. Cela permet de limiter d'éventuels biais comportementaux, notamment en marquant des anguilles en début de migration d'avalaison.

- D'autre part, de réaliser un suivi des captures et donc une CMR (Capture-Marquage-Recapture) des anguilles jaunes et argentées au sein de la retenue.

Six verveux composés d'une paradière de 12 m et de deux ailes de 6 m ont été installés en amont de la retenue de Bois Joli. Ils ont été disposés en épi en alternance entre rive gauche et rive droite dans une zone de faible profondeur permettant de couvrir au maximum le couloir de passage des anguilles argentées dévalantes.

2.2.2 Suivi de la pêche

Afin d'obtenir des données précises sur la cinétique des déplacements en amont de la retenue, les verveux ont été relevés dans leur intégralité une fois par semaine.

Les verveux étant trop endommagés (ragondin, vison d'Amérique, écrevisses...) pour être réparés sur place ont été systématiquement remplacés par des verveux neufs.

En raison des très faibles niveaux d'eau rencontrés sur la période d'étude, les verveux ont été déplacés plusieurs fois au cours du suivi afin d'être constamment immergés.

Les verveux ont été en place du 18/09/2018 au 11/02/2019.

2.2.3 Biométrie

Le premier objectif de la pêche étant de capturer des anguilles argentées d'un poids suffisant pour pouvoir être équipées d'un émetteur acoustique. Lors de chaque relève, toutes les anguilles ont été mesurées et pesées (Figure 8 et Figure 9). Le diamètre des yeux et la taille des nageoires pectorales ont de plus été mesurés pour déterminer le degré d'argenture selon la méthode de Durif et al. (2003). La proportion des sexes a été estimée en se basant sur la taille des anguilles argentées, en assumant 100% des mâles pour les individus < 450 mm et 100 % de femelles au-delà comme cela est généralement décrit dans la littérature (DeLeo & Gatto, 1995).



Figure 8 : Mesure du diamètre vertical de l'oeil gauche (V.Danet)

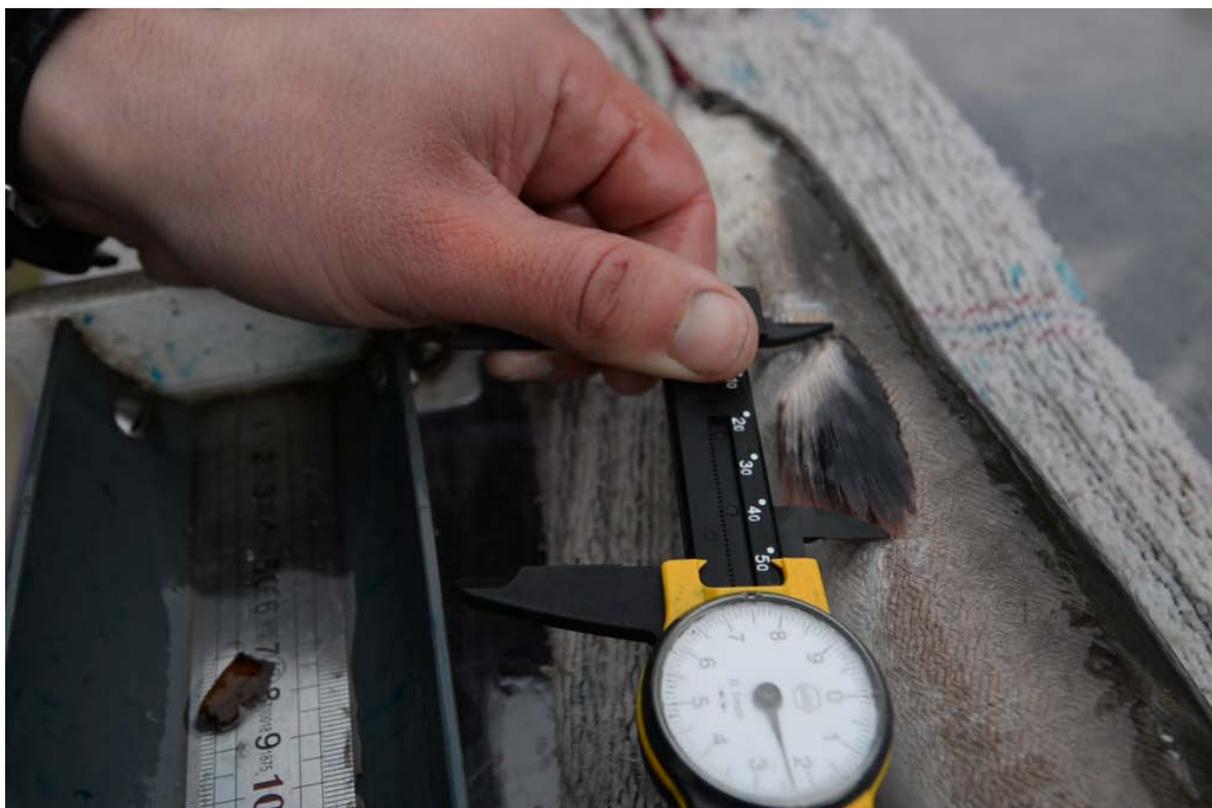


Figure 9 : Mesure de la longueur de la nageoire pectorale gauche (V.Danet)

2.2.4 Marquage acoustique

Un émetteur acoustique Thelma de type ID9 (Annexe 2) a été implanté, le jour de la capture, dans la cavité générale de chaque anguille argentée femelle de plus de 250 g (l'émetteur acoustique implanté ne pouvant pas dépasser 2 % du poids de l'animal, avec les émetteurs utilisés, la limite inférieure du poids de l'animal implanté à ne pas dépasser est de 250 grammes). Seules 18 anguilles argentées femelles > 250 g ont été capturées et marquées avec un émetteur acoustique entre le 24/09/2018 et le 04/02/2019.

Chaque émetteur acoustique implanté dans la cavité générale par chirurgie (voir Trancart et al. (2017) pour le protocole opératoire) émet un signal sonore (Figure 10), composé de sept impulsions, toutes les 30 à 90 secondes de manière aléatoire. Chaque émetteur possède sa propre signature acoustique, ce qui permet le suivi simultané et individualisé de plusieurs anguilles.

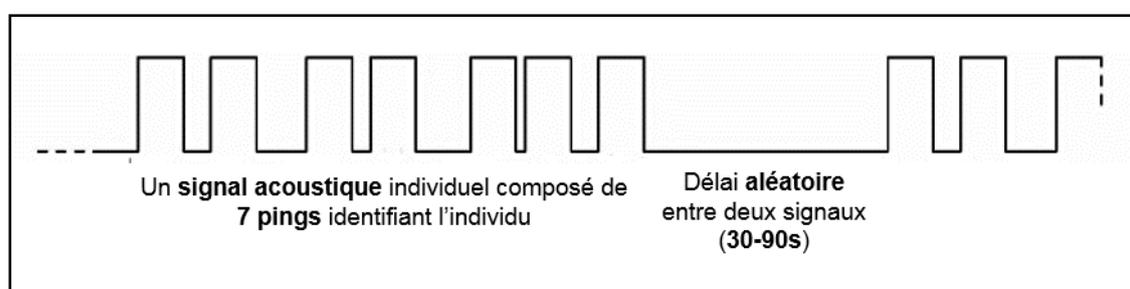


Figure 10 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques

Aucun suivi post-opératoire n'a été réalisé cette année en raison du faible nombre d'anguilles argentées femelles capturé.

Cependant lors d'une précédente étude menée en 2015 sur le lac de Grand Lieu, un test post-opératoire conduit avec l'eau du Frémur a montré que le marquage réalisé sur les anguilles n'affectait pas leur survie (Mazel et al., 2016).

2.2.5 Le marquage PIT

De plus, un PIT tag a été inséré dans la cavité générale de toute les anguilles jaunes et argentées capturées. Ce marquage par PIT-tag permet d'estimer un taux de recapture et d'alimenter le suivi PIT-tags réalisé par Fish-Pass. Le PIT (Passive Integrated Transponder, Figure 11) est un petit transpondeur radio qui contient un code spécifique permettant d'allouer un code alphanumérique unique d'identification à chaque animal marqué. Ils sont « passifs » et donc ne nécessitent pas de batterie, ce qui implique une durée de vie quasi illimitée (dans le Frémur une anguille ainsi marquée a été recapturée 16 ans plus tard (Charrier et al., 2010. Rapport Frémur) et une taille réduite. Ces marques sont inactives tant qu'elles ne sont pas stimulées par le champ magnétique d'un lecteur. Lorsqu'elles sont activées, elles envoient un signal radio codé et normalisé de 13 caractères. Ce type de marquage

a été utilisé sur de nombreuses espèces de poissons comme le saumon atlantique (*Salmo salar* ; Roussel et al., 2004), la truite commune (*Salmo trutta* ; Cucherousset et al., 2005), le brochet (*Esox lucius* ; Cucherousset et al., 2007) ou encore l'anguille (*Anguilla anguilla* ; Charrier et al., 2010). L'avantage de ce type de marque est qu'il permet d'individualiser et d'automatiser les recaptures grâce à un lecteur de marque. De plus, le fait que les individus marqués ne soient pas identifiables à un examen visuel permet de limiter des biais quant aux taux de recapture.



Figure 11 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS)

2.2.6 La relâche

Toutes les anguilles capturées ont été relâchées en aval de la pêcherie, pour limiter la recapture et ainsi améliorer la survie des anguilles (Figure 13).

2.3 La télémétrie acoustique

2.3.1 Le réseau mis en place

Au total 23 hydrophones ont été déployés de la retenue AEP de Bois Joli à l'estuaire du Frémur du 04/09/2018 au 25/03/2019 (Figure 13). Ils permettent d'enregistrer en continu les signaux acoustiques émis par un individu marqué à une position et un temps donnés (les caractéristiques techniques des hydrophones sont présentées en annexe).

L'aire de détection d'un hydrophone varie en fonction des conditions environnementales. La profondeur, la pluie, le vent, l'activité sur l'eau... sont autant de facteurs qui vont impacter la détection des émissions sonores par les hydrophones. Les hydrophones possèdent plusieurs aires de détection avec des probabilités de détections variables en fonction de la distance à l'hydrophone et des conditions environnementales. La multiplication des hydrophones permet d'assurer une meilleure couverture de la zone et ainsi de capter un maximum de signaux émis.

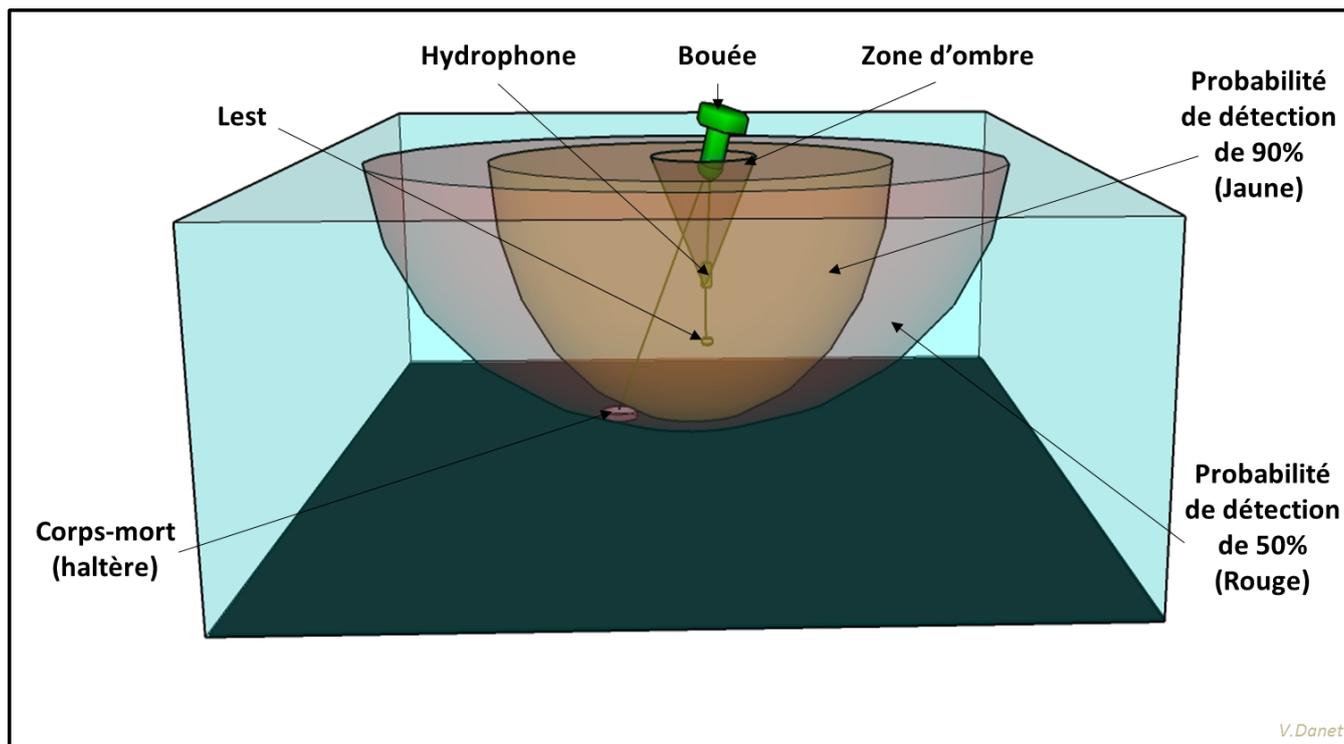


Figure 12 : Représentation schématique de l'aire de détection d'un hydrophone

2.3.1.1 La retenue de Bois Joli

Pour déterminer le mouvement des anguilles argentées au sein de la retenue, 9 hydrophones ont été installés le long d'une « colonne vertébrale » allant de l'aval de la zone de pêche au barrage de Bois Joli. Pour cela chaque hydrophone est positionné sous une bouée (exemple de fixation en annexe).

2.3.1.2 L'aval

Plus en aval, cinq hydrophones ont d'abord été installés dans la retenue de Pont es Omnes, puis trois hydrophones dans la retenue de Pont Avet (à noter qu'une baisse du niveau d'eau de la retenue de Pont Avet par décision préfectorale pour réaliser des travaux sur le barrage de Pont Avet n'a pas permis d'élargir le dispositif dans la retenue de Pont Avet). Ces huit hydrophones Vemco ont été installés de la même manière que la colonne vertébrale de la retenue. Enfin quatre hydrophones ont été installés en aval immédiat du barrage de Pont Avet afin de s'assurer de l'échappement ou non de la retenue, puis deux hydrophones supplémentaires en amont de l'estuaire du Frémur (moulin de Rochegoud) afin de confirmer l'échappement des anguilles argentées du Frémur. Ces 6 hydrophones sont fixés au fond grâce à un poids (exemple de fixation en annexe).

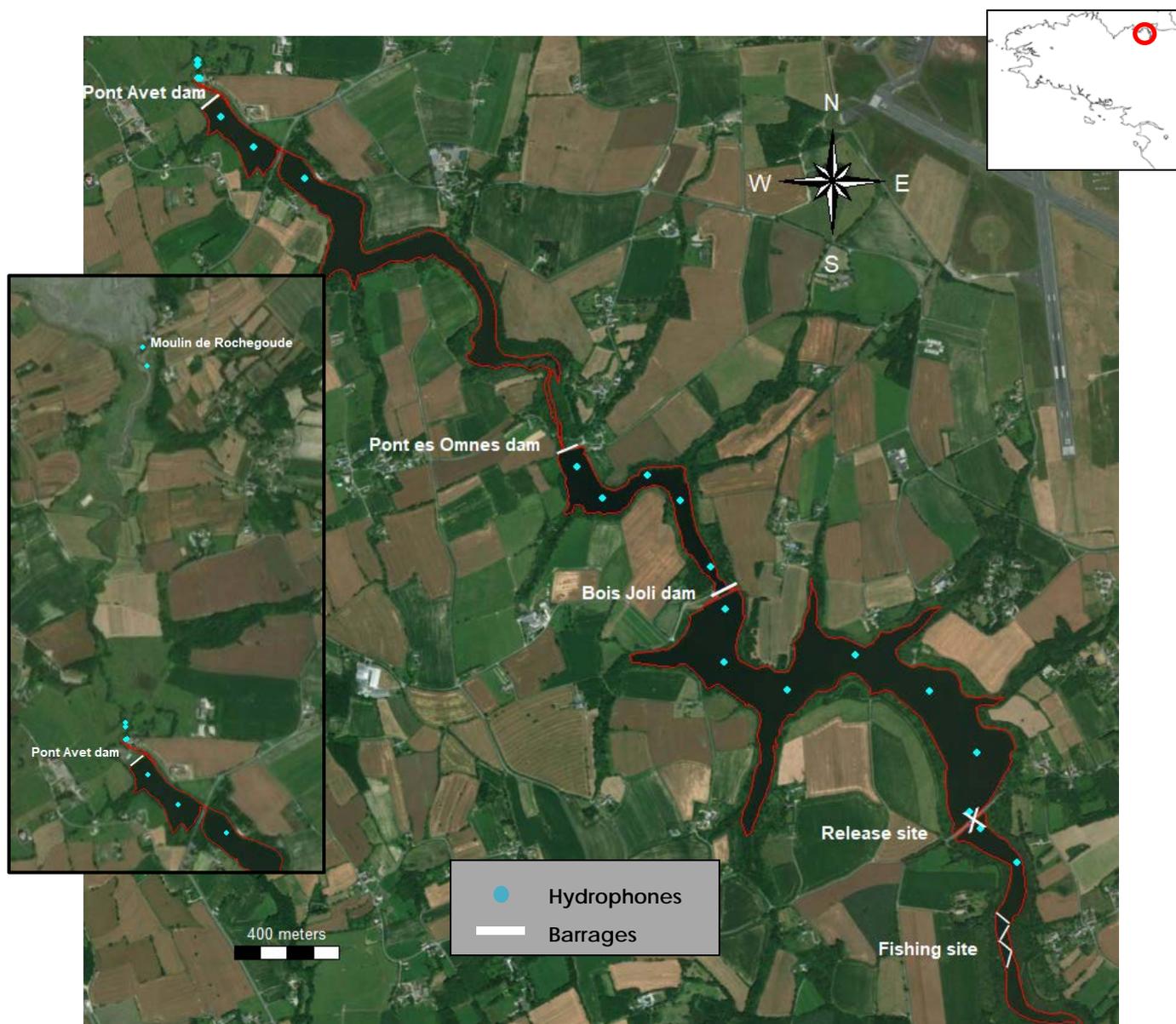


Figure 13 : Réseau d'hydrophones mis en place dans le Frémur

Le réseau acoustique complet sur le Frémur est composé d'un total de 23 hydrophones. Ce réseau a été installé le 04 septembre 2018 et retiré dans sa totalité le 25 mars 2019. Il a donc été opérationnel pendant près de 7 mois au cours de la saison d'avalaison 2018/19.

2.3.2 Transformation des données de détection

Le réseau d'hydrophones a enregistré au total 1 140 550 détections au cours des sept mois de mise en place.

2.3.2.1 La retenue de Bois Joli

Les données collectées sont des données discrètes : pour chaque anguille, la liste des hydrophones l'ayant détectée avec la date et l'heure de chaque détection a été obtenue après la relève des données des hydrophones.

Ensuite, la trajectoire de chaque anguille argentée de l'étude a été reconstruite selon la méthode suivante à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2005) : chaque anguille marquée a été positionnée dans l'espace toutes les 60 minutes en moyennant la position des hydrophones l'ayant détecté pendant ce laps de temps. Cette moyenne est pondérée par le nombre de fois où chaque hydrophone a détecté le signal émis par l'anguille (Figure 14). En effet, on part de l'hypothèse que « plus une anguille est proche d'un hydrophone, plus les signaux émis par son émetteur sont détectés un grand nombre de fois par celui-ci pendant un laps de temps donné ».

Cette méthode de reconstruction n'a pu être utilisée que sur la retenue AEP, car le réseau d'hydrophones était suffisamment dense.

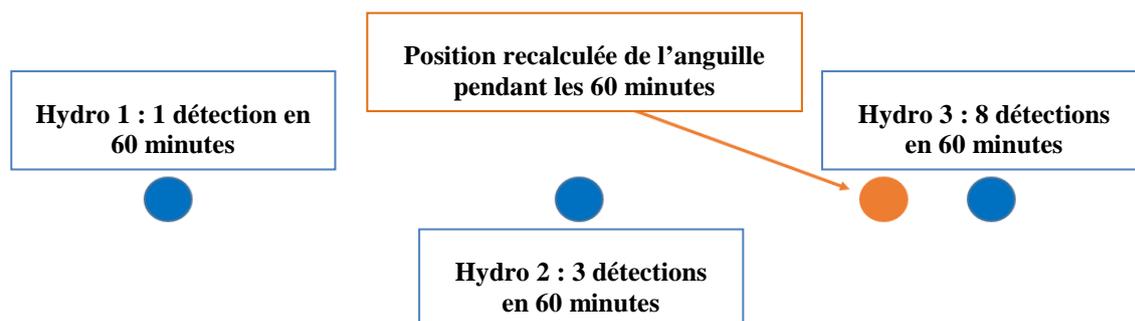


Figure 14 : Illustration de la première étape de reconstruction des trajectoires

2.3.2.2 L'aval

Le réseau mis en place à l'aval de la retenue de Bois Joli permet d'identifier le passage ou non des anguilles marquées au droit de chaque ouvrage. La donnée brute est utilisable directement pour ce réseau d'hydrophones afin d'obtenir une donnée de présence/absence.

De plus, il permet de connaître le temps de résidence de chaque anguille, ayant franchi le barrage du Bois Joli, dans les différentes retenues du Pont es Omnes et Pont Avet.

2.3.3 Données environnementales

2.3.3.1 Les données météorologiques

De nombreuses données environnementales ont été récupérées afin de mieux comprendre le comportement des anguilles argentées. Les variables climatiques journalières considérées (hauteur cumulée des précipitations, température moyenne, pression atmosphérique moyenne en mer, vitesse et orientation du vent) ont été fournies par la Station Météo-France de Pleurtuit.

2.3.3.2 Les niveaux d'eau

Le niveau d'eau de la retenue de Bois Joli a été mesurée toute les 30 minutes grâce à une sonde de niveau d'eau installée sur le barrage.

2.3.3.3 La température de l'eau

Les hydrophones Thelma sont munis d'un capteur de température. La température de l'eau a donc été mesurée toutes les heures grâce aux 7 hydrophones Thelma installés dans la retenue du Bois Joli.

3 Résultats

3.1 Suivi de la pêche et biométrie

3.1.1 Cinétique des captures en lien avec l'environnement

Le suivi de la pêche a été effectué du 24/09/2018 au 11/02/2019, soit sur une période de 6 mois, durant laquelle, 24 relèves des verveux ont été réalisées.

Un total de 479 anguilles a été capturé dont 39 anguilles argentées (8 %).

Sur les 479 anguilles, 73 sont des recaptures dont :

- 7 anguilles marquées entre 2009 et 2014 dans le cadre du programme Anguilles Frémur
- 34 anguilles marquées en 2017/2018 lors de l'étude BJ3D
- 32 anguilles marquées lors de cette session de marquage 2018/2019.

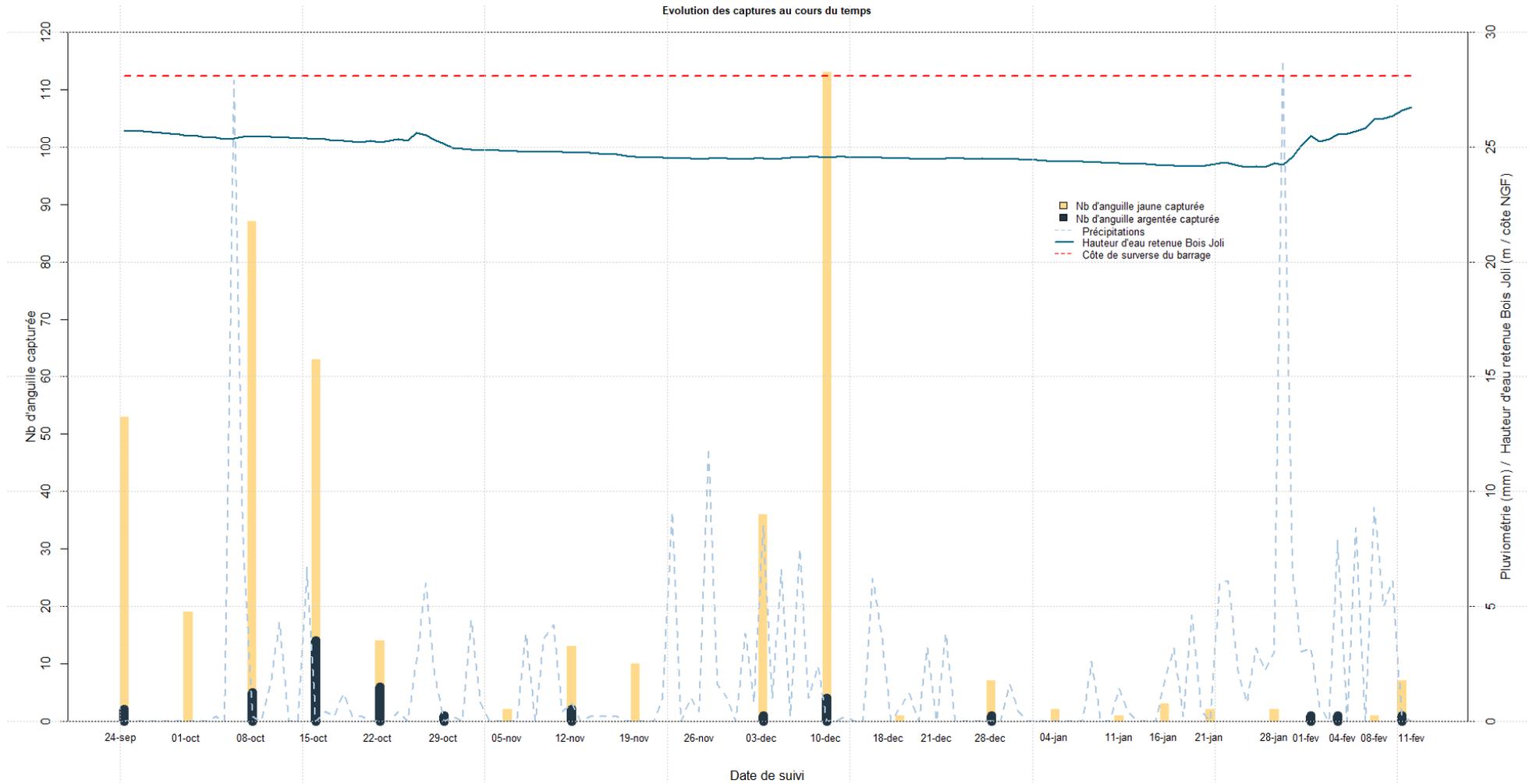


Figure 15 : Bilan des captures par les verveux au cours du temps en fonction de la pluviométrie et du niveau d'eau de la retenue AEP du Bois Joli

La Figure 15 montre bien que le niveau d'eau de la retenue du Bois Joli est resté sous la cote de surverse du barrage. Il n'y a donc pas eu de surverse au cours du suivi.

Malgré une augmentation des précipitations et donc du niveau d'eau de la retenue à partir de la fin janvier, les captures d'anguilles n'ont pas augmenté.

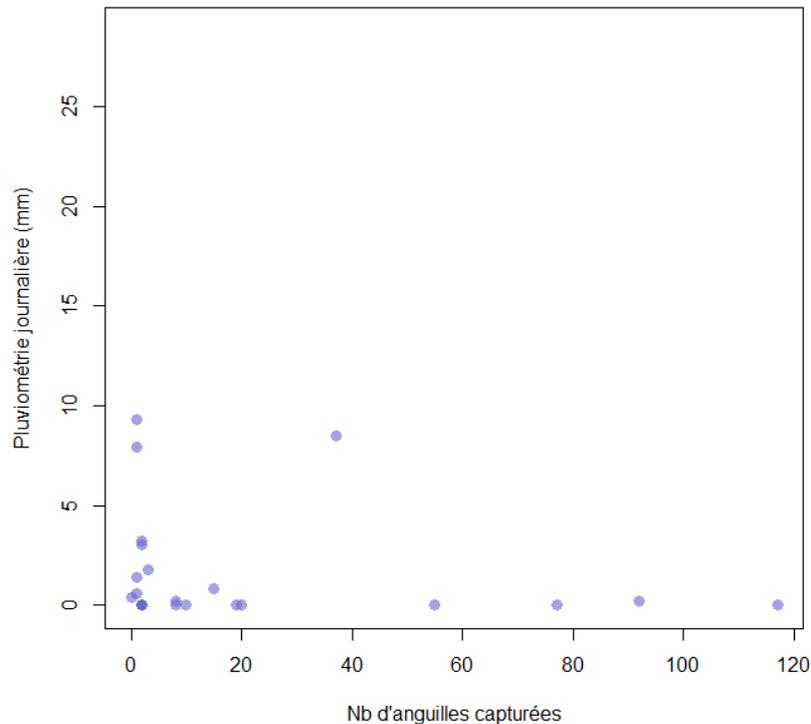


Figure 16 : Nombre d'anguilles capturées en fonction de la pluviométrie journalière

La Figure 16 quant à elle montre qu'il n'y a aucune relation significative entre le nombre d'anguilles capturées, jaunes et argentées cumulées, en fonction de la pluviométrie journalière ($R^2 = 0.02$). Les pics de captures ne sont pas significativement corrélés au pics de précipitations. Lorsque l'on regarde la relation entre les captures et la pluviométrie avec un, deux, trois ou quatre jours de décalage, le résultat est le même.

3.1.2 Structure de la population capturée

La biométrie a été réalisée sur chaque anguille pêchée afin d'identifier la structure de la population capturée. Au total, la longueur, le poids, le stade, la différenciation, le contraste et le numéro de tag ont été répertoriés sur 476 individus. Il y a eu 39 biométries réalisées sur des anguilles argentées dont 33 femelles (85 %). La Figure 17 montre la différence visuelle entre une anguille argentée et une anguille jaune.



Figure 17 : Anguilles jaune et argentée de même taille (V MAZEL)

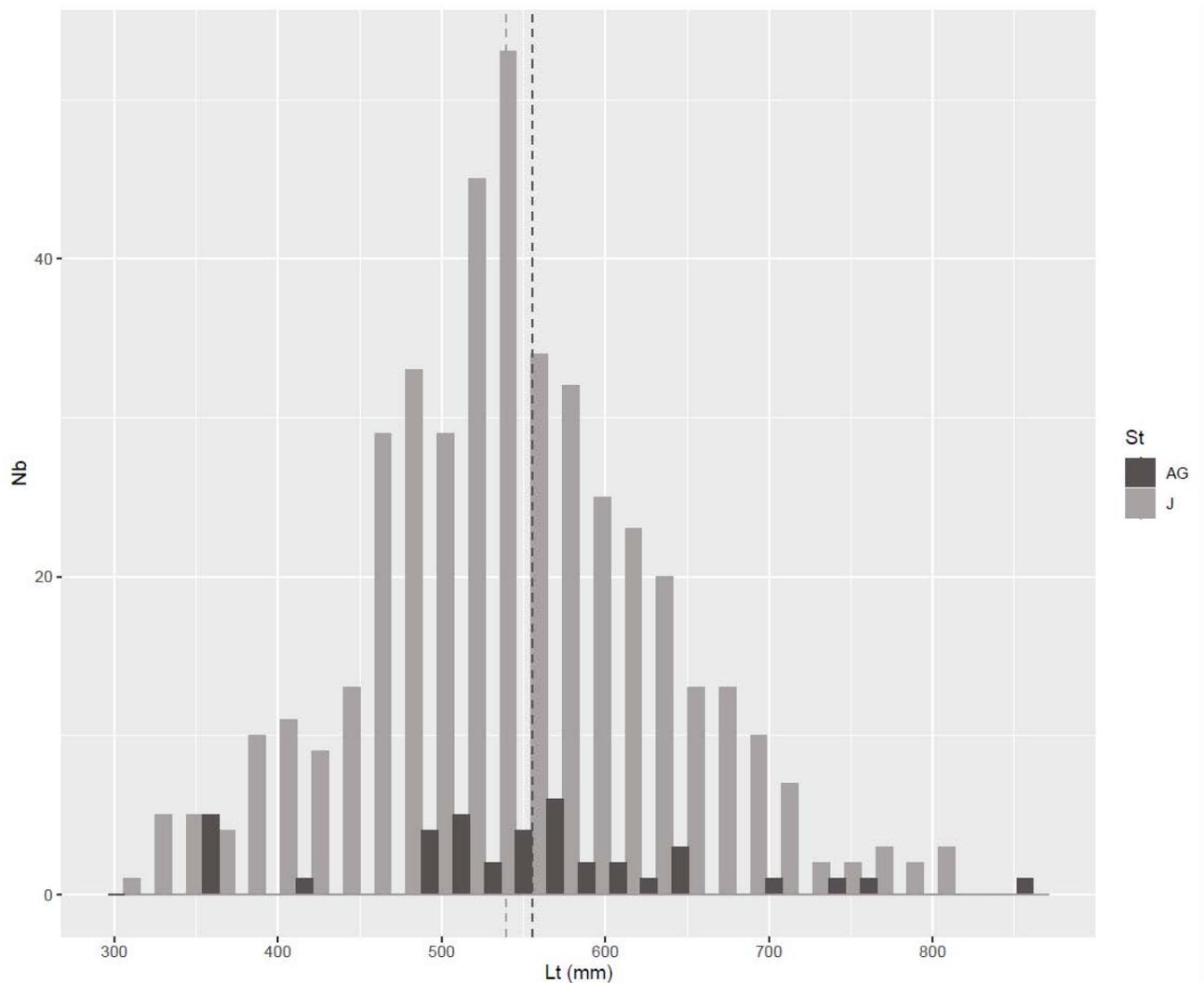


Figure 18 : Histogramme des fréquences de tailles des anguilles capturées (Pointillé gris = moyenne anguilles jaunes ; pointillés noirs = moyenne argentées)

La Figure 18 représente l’histogramme des fréquences de tailles des anguilles capturées dans la pêcherie. Aucune anguille < 300 mm n’a été capturée. Cela est dû à la sélectivité des engins de pêche, qui laisse passer les plus petits individus.

Les moyennes des tailles d’anguilles capturées au stade jaune et au stade argentée sont très proches (539.5 mm pour les jaunes contre 555.5 mm pour les argentées).

Le Tableau 2 représente les caractéristiques de la fraction d’anguilles argentées femelles capturées. Au total, 18 anguilles argentées femelles ont été marquées avec une marque acoustique, le jour de leur capture : Tableau 1 et Tableau 3

Tableau 1 : Nombre d’anguilles argentées marquées par jour de marquage

Date de marquage	24 sep	08 oct	15 oct	22 oct	10 dec	28 dec	04 fev
Nb d’anguilles argentées marquées	1	2	8	3	2	1	1

Tableau 2 : Caractéristiques de la fraction d’anguilles argentées femelles marquées en PIT tag et en acoustique

Sexe	n	LT (mm)	Pd (g)	DO (mm)	LP (mm)
Femelle	33	588 (491-862)	395 (223-961)	7.7 (5.6-11.3)	35 (27.3-49.6)

Tableau 3 : Stade de maturation des anguilles argentées marquées en acoustique (méthode de Durif et al., 2005) et mesure des variables morphologiques : longueur totale (LT), poids (Pd), diamètre oculaire moyen (DO) et longueur pectorale moyenne (LP). Moyennes et variables standard des indices

Sexe	Stade	Degré d’argenture	n	LT (mm)	Pd (g)	DO (mm)	LP (mm)
Femelle	Pré-migrante	FIII	8	597 ± 18	378 ± 76	6.6 ± 0.5	30.4 ± 2.0
	Migrante	FV	10	655 ± 108	555 ± 266	8.6 ± 1.4	37.8 ± 6.5
	Total		18	629 ± 86	476 ± 219	7.7 ± 1.5	34.5 ± 6.1

Parmi les anguilles argentées marquées en acoustique, dix d’entre elles sont considérées comme migrante (FV) grâce à la méthode de Durif contre huit pré-migrantes (FIII).

3.1.3 Taux de croissance et changement de stade des anguilles recapturées

Parmi les 73 anguilles recapturées, 34 ont été marquées au cours de l’année 2017 et 7 sur la période 2009 à 2014 dans le cadre du suivi Frémur. La croissance annuelle moyenne est de 27 mm

pour un taux de croissance de 6 %. Pour les 7 recaptures plus anciennes, la croissance annuelle moyenne est de 26 mm pour un taux de croissance annuel de 8 %.

Tableau 4 : Croissance annuelle des anguilles recapturées par la pêche en fonction des années de marquage

Année de marquage	n	croissance (mm)	Taux de croissance (%)
2017	34	28 ± 18	5 ± 4.4
2009/2014	7	26 ± 11	8 ± 5.3
	41	27 ± 17	6 ± 4.7

Parmi ces anguilles, deux anguilles capturées en 2017 au stade jaune ont été recapturées en 2018 au stade argenté.

3.2 La recapture des individus marqués dans les systèmes de piégeage

3.2.1 Le filtre de la station de pompage

Sur un total de 46 anguilles capturées (43 anguilles argentées) dans le filtre de la station de pompage entre le 18 septembre 2018 et le 25 mars 2019, une seule anguille marquée en acoustique dans la retenue AEP a été capturée. Cette anguille a été retrouvée morte dans le filtre de la station de pompage. Une anguille argentée marquée le 03 décembre 2018 avec seulement un PIT tag a également été capturée dans le filtre de la station de pompage le 18 juillet 2019.

3.2.2 Le piège de dévalaison du Pont es Omnes

Au 25 mars 2019, un total de seulement 27 anguilles (contre 403 en 2018) a été capturé dans le piège (23 argentées). Les 27 anguilles étaient vivantes au moment de leur capture dans le piège de dévalaison. Aucune anguille marquée dans la retenue AEP n'a été capturée dans le piège de dévalaison, que ce soit en acoustique ou uniquement en PIT tags.

3.3 Quantification de l'échappement

3.3.1 L'échappement de la retenue AEP du Bois Joli

Au cours du suivi 2018/2019, aucune anguille n'a quitté la retenue AEP vivante. Une seule anguille (anguille n° 70) a franchi le barrage par le filtre de la station de pompage le 01/02/2019, mais elle n'a pas survécu au franchissement. Le taux d'échappement est donc considéré comme nul.

Cette anguille a été marquée et relâchée le 10/12/2018. Elle s'est présentée la première fois devant le barrage le 29/01/2019 à 23h22' pour une dernière détection le 30/01/2019 à 2h52'. Elle a donc mis seulement 3h30' pour franchir le barrage par la prise d'eau potable en une seule tentative.

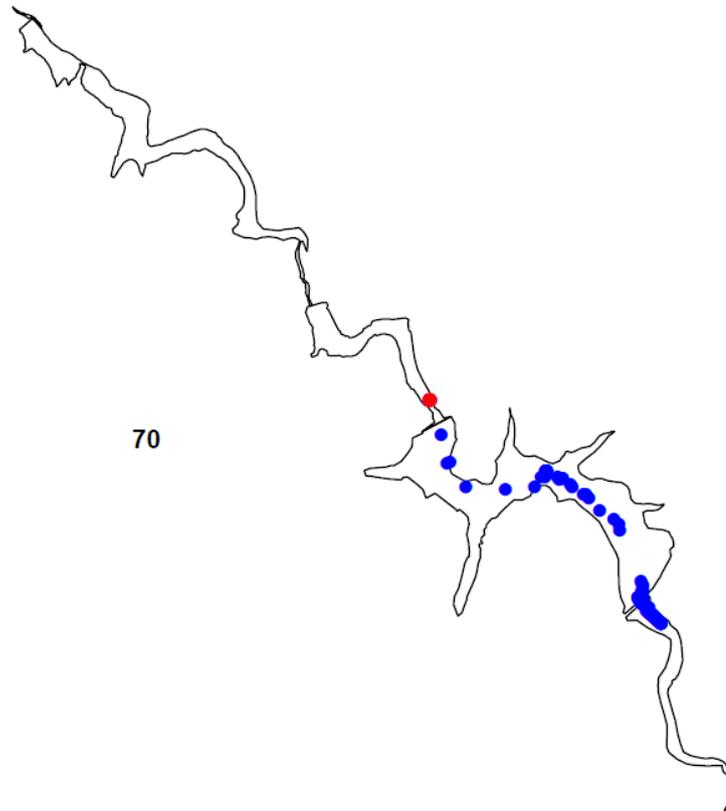


Figure 19 : Reconstruction des positions de l'anguille N°70 (point rouge = dernière position connue)

Le taux d'échappement de la retenue AEP lors du suivi est alors de 5 % mais avec un succès de 0 %

2.1.1 L'échappement du reste du réseau

Aucune anguille n'ayant franchi le barrage de Bois Joli en vie, aucune anguille marquée n'a été détectée dans le reste du réseau.

3.4 Effets bloquants du barrage du Bois Joli

La reconstruction des trajectoires de chaque individu (Annexe) en continu dans le temps (pas de temps de 60 minutes) a permis d'obtenir plusieurs métriques précises :

- Distances parcourues (journalières)
- Périodes de déplacements
- Tentatives de franchissement (nombre, durée)

- Réussite ou échec de franchissement
- Zones exploitées

L'effet bloquant du barrage est directement visible avec 17 individus sur 18 qui n'ont pas réussi à franchir le barrage de Bois Joli avant le 25/03/2019, soit 95 % des anguilles bloquées. Mais il existe également des impacts moins visibles mais non négligeables sur les individus :

- **Les distances longitudinales parcourues journalières:** En moyenne les anguilles ont parcourue 219,7 m par jours ($\pm 263,9$ m) pendant une moyenne de 139 jours.
- **Les distances totales parcourues :** En moyenne, les anguilles ont parcourue 29,8 km au sein de la retenue AEP (min = 0,1 km ; max = 102,4 km).
- **Le temps de résidence :** En moyenne les anguilles ont été suivies dans la retenue pendant 139 jours avec un minimum de 49 jours et un maximum de 175 jours.
- **Le temps de présence devant le barrage :** En moyenne les anguilles ont passé 22 jours cumulées au pieds du barrage (min = 0 jours : max = 125 jours). Elles se sont présentées en moyenne 4 fois devant la barrage (min = 0 ; max = 15).

Tableau 5 : Paramètres calculés pour chaque anguille

Anguille N°	Nb de jours de présence dans la retenue	Distance moyenne parcourue par jours (m)	Distance maximum parcourue par jours (m)	Distance totale parcourue (km)	Nb de jours de présence au pied du barrage	Nb de présentations au pied du barrage
33	153	320,1 \pm 592	4463,6 \pm 591,8	48,9	61	14
34	162	267 \pm 522	3000,3 \pm 521,8	43,3	15	10
35	175	144,9 \pm 318	2097,8 \pm 318,2	25,4	10	4
36	167	235,8 \pm 560	2849,5 \pm 560,1	39,4	15	5
37	169	291,2 \pm 415	3930,3 \pm 415,4	49,2	1	1
38	161	635,9 \pm 898	5271,8 \pm 898	102,4	125	15
39	137	0,8 \pm 6,3	73,3 \pm 6,3	0,1	0	0
40	161	144,3 \pm 352	2144,3 \pm 352,1	23,2	3	1
41	157	158 \pm 357	1800,2 \pm 356,6	24,8	10	6
42	139	7,4 \pm 31	238,0 \pm 30,8	1,0	0	0

65	151	37,2 ± 92	828,4 ± 91,9	5,6	0	0
66	153	220 ± 516	4063,9 ± 516,1	33,7	21	8
67	155	381,6 ± 537	3364,5 ± 537	59,2	113	3
68	145	84,4 ± 113	553,3 ± 113,4	12,2	1	1
69	98	115,5 ± 265	1669,8 ± 265,3	11,3	3	2
70	85	112,2 ± 356	2718,5 ± 355,9	9,5	2	1
71	85	204,6 ± 484	2997,5 ± 484,4	17,4	2	2
72	49	592,8 ± 967	4232,5 ± 967,1	29,1	16	5

4. Discussion

4.1 Suivi de la pêche et biométrie

4.1.1 Cinétique des captures en lien avec l'environnement

Au total, 479 anguilles ont été capturées dont 39 anguilles argentées, soit 8 %. Ce pourcentage d'anguilles argentées est caractéristique de la fraction d'anguilles argentées au sein du Frémur, de 1 à 12 % de la population total (d'après Charrier.F, 2016).

La pluviométrie sur le bassin versant, représentée sur la Figure 15, est restée très faible tout au long de la période de suivi (261 mm cumulés entre le 1^{er} septembre 2018 et le 31 janvier 2019 contre 412.1 mm entre le 1^{er} janvier 2017 et le 31 janvier 2018). Le niveau d'eau de la retenue AEP est donc lui aussi resté très bas, ne dépassant à aucun moment la côte de surverse du barrage. Cette faible pluviométrie a donc empêché les anguilles argentées migrantes de franchir le barrage du Bois Joli sur cette saison de dévalaison 2018/2019.

Il n'existe aucune relation entre les pics de captures et les pics de précipitations, comme le montre la Figure 16. Parmi les facteurs environnementaux associés à la migration d'avalaison, l'influence des crues est prédominante dans la littérature. Les crues orientent et aident mécaniquement les anguilles à dévaler (Lowe 1952 ; Vollestad et al. 1986). Ce résultat montre que les anguilles produites en amont de la retenue AEP ne réagissent pas comme en milieu ouvert et sont donc perturbées par l'effet tampon provoqué par le barrage du Bois Joli. On ne peut pas exclure non plus, des problèmes d'efficacité des verveux en raison du faible niveau d'eau lors de cette saison 2018-2019.

Ce sont probablement d'autres facteurs qui poussent les anguilles argentées à migrer en amont de la retenue AEP, comme la turbidité, la conductivité, des stimuli olfactifs (odeurs) ou des baisses de pression atmosphérique, plutôt que la crue elle-même (Haro 2003).

4.1.2 Structure de la population capturée

Sur l'ensemble des individus sur lesquels il y a eu une biométrie de réalisée lors de ce suivi, la fraction d'anguilles femelles est très élevée, 85 % (estimation faite par la taille (>450 mm)). Ce résultat peut s'expliquer par l'engin de pêche utilisé pour la capture des anguilles. La maille de la paradière et des ailes est de 12mm. Les mâles étant beaucoup plus petits et plus fins que les femelles (Longueur entre 200 et 350 mm en moyenne), ils ont une plus grande probabilité de passer au travers des mailles par rapport aux femelles (> 450 mm). Les caractéristiques de l'habitat du Bois Joli (zone lenticule profonde) favorise également la production d'anguilles femelles puisqu'un lien entre profondeur de l'habitat et taille des anguilles est généralement observé (Laffaille et al., 2003).

On retrouve cette absence de petits individus capturés dans l'histogramme des fréquences de tailles des anguilles capturées (jaunes et argentées). Aucune anguille de moins de 300 mm n'a été capturée. Les tailles moyennes des anguilles jaunes et des anguilles argentées, représentées sur la figure 16, sont similaires. Cela signifie que les anguilles jaunes capturées dans la pêcherie sont au même stade de croissance que les anguilles argentées migratrices. Ce sont donc des anguilles probablement proches de leur métamorphose en anguille argentée.

Les anguilles argentées femelles capturées en amont de la retenue AEP, représentées sur le Tableau 2, sont en moyenne plus petites que la moyenne européenne, 588 mm (min=491 ; max=862) pour le Frémur contre 632.3 mm en Europe (min-max : 450-863, Acou et al., 2010) ou 662 mm (451-857) par exemple dans le lac de Grand Lieu. La fécondité augmentant avec la taille, il semblerait que les femelles produites en amont de la retenue AEP soient moins fécondes que la moyenne européenne.

Les anguilles argentées utilisées pour le marquage acoustique sont les anguilles femelles les plus grandes et les plus grosses qui ont été capturées avec une moyenne de 629 mm (± 86 mm) et 476 g (± 219 g). Seulement 18 anguilles argentées femelles capturées qui possédaient le poids minimal (250 g) nécessaire à l'implantation d'un émetteur acoustique, ont été marquées.

4.1.3 Taux de croissance et changement de stade des anguilles recapturées

Les biométries et marquages aux PIT tags de l'année 2017-2018 ont permis de recapturer en 2018-2019 des anguilles déjà marquées et de définir une croissance annuelle de 28 mm / an. De plus, des anguilles marquées entre 2009 et 2014 par le suivi Frémur ont été recapturées avec une croissance moyenne annuelle de 26 mm / an.

Cette croissance annuelle est proche des résultats de Boulanger *et al.*, 2014, sur le Frémur entre 1996 et 2003 (20.9 mm an⁻¹) et sur l'Oir entre 2000 et 2012 (19.1 mm an⁻¹). Les travaux de Moriarty et al., 1982 sur la rivière Barrow en Irlande montre des taux de croissance similaires (entre 22.5 mm et 32.5 mm an⁻¹), tout comme ceux de Rosell et al., 2005 (26.5 mm an⁻¹).

Les anguilles du Frémur ont donc un taux de croissance similaires aux autres milieux européens.

Entre les deux années, deux anguilles ont changé de stade pour passer du stade jaune au stade argenté. Cela signifie que les anguilles produites au sein de la retenue AEP produisent des anguilles argentées migrantes.

4.1.4 La recapture des individus marqués dans les systèmes de piégeage

4.1.4.1 Le filtre de la station de pompage

Une anguille argentée marquée a utilisé la conduite de la station de pompage d'eau potable pour quitter la retenue AEP et franchir le barrage de Bois Joli. Cela signifie que la prise d'eau de la station de pompage est une voie de franchissement du barrage de Bois Joli pour les anguilles argentées migrantes. Cependant l'anguille était morte au moment de sa capture, ce qui signifie que le transit par la conduite peut être mortel pour l'anguille. Il est donc indispensable pour la préservation de l'espèce de contrôler et de limiter l'accès à cette conduite par un système de filtre efficace à l'entrée.

4.1.4.2 Le piège de dévalaison de Pont es Omnes

Sur la saison de dévalaison 2018/19, seulement 27 anguilles ont été capturées dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes, contre 403 lors de la saison 2017/18. La dévalaison en amont du barrage de Pont es Omnes a donc été très faible.

Ce résultat est lié à l'absence de surverse au niveau du barrage de Bois Joli. Les anguilles capturées dans le piège de dévalaison proviennent donc soit de la retenue de Pont es Omnes, soit du passage par le filtre de la station de pompage du barrage de Bois Joli.

La surverse du barrage de Bois Joli est la condition indispensable à la dévalaison des anguilles argentées produites en amont de la retenue AEP mais également au sein de la retenue de Pont es Omnes.

Le barrage de Bois Joli est le facteur déclencheur et limitant de la dévalaison des anguilles argentées produites en amont des barrages de Pont es Omnes et du Bois Joli

4.2 Le suivi acoustique : Quantification de l'échappement

4.2.1 Echappement de la retenue AEP

Le taux d'échappement de la retenue AEP lors de cette année 2018/19 est de 5 % (1/18). Mais le taux de réussite est de 0 %. Ce taux d'échappement nul s'explique principalement par l'absence de surverse au niveau du barrage de Bois Joli, dû au manque de précipitation et au prélèvement d'eau par la station de pompage d'eau potable.

Cette absence de surverse à un impact considérable sur la migration des anguilles empêchant les anguilles argentées migrantes produites en amont de la retenue AEP d'atteindre les zones aval et débiter leur migration océanique de reproduction.

Au vu des modifications climatiques, ce phénomène peut être amené à se répéter plus fréquemment dans les années à venir. Il est alors indispensable et urgent de mettre un place un système de dévalaison indépendant de la surverse du barrage, afin de permettre la migration des anguilles argentées et donc leur reproduction.

4.2.2 *L'échappement de l'ensemble du réseau*

Comme l'unique anguille ayant franchi le barrage de Bois Joli n'a pas survécu au passage dans la conduite d'eau potable, aucune anguille marquée dans la retenue AEP du Bois Joli n'a été détectée sur le réseau d'hydrophone situé en aval de la retenue.

Malgré l'effort mis en place pour connaître le taux de franchissement du barrage de Pont Avet par les anguilles argentées produites en amont du Frémur, aucune réponse ne peut donc être apportée sur cette saison 2018/19.

Aucune anguille marquée dans la retenue AEP n'a pu atteindre l'estuaire du Frémur lors de cette saison d'avalaison 2018-2019

4.3 L'effet bloquant du barrage

Le barrage de Bois Joli à un effet bloquant sur la population d'anguille argentée migrante produite dans la retenue AEP. 95 % des anguilles (17/18) n'ont pas du tout réussi à franchir le barrage, et la dernière est morte en utilisant la conduite de prélèvement d'eau pour franchir le barrage. La perte de reproducteur potentiel est donc totale sur cette année 2018/19.

Tel que mentionné précédemment, la présence du barrage de Bois-Joli pourrait réduire ou supprimer la perception des déclencheurs environnementaux de la migration en aval de l'anguille argentée. De plus, l'effet bloquant du barrage sur cette année 2018/19 pourrait avoir des conséquences considérables à long terme sur le potentiel reproducteur des anguilles produites dans la retenue AEP :

- Les anguilles marquées se sont présentés en moyenne quatre fois et ont passé en moyenne 22 jours au pied du barrage.
- Elles ont parcouru en moyenne 29.8 km, de manière longitudinal, au sein de la retenue afin de trouver une voie d'échappement, avec un maximum de 102.4 km pour l'une d'entre elle. Ce

mode de calcul imposé par le dispositif mis en place sous-estime fortement les distances réellement parcourues.

La hausse de dépense énergétique peut compromettre le potentiel reproducteur voire même la survie de l'anguille à long terme.

Les barrages dit « passif » ne sont pas sans conséquences dans le succès de migration et dans la capacité reproductrice des anguilles argentées.

Les barrages dit « passifs » ne sont pas sans conséquences dans le succès de migration et dans la capacité reproductrice des anguilles argentées

5. Conclusion

Cette étude a clairement montré que les barrages, bien que dépourvus de turbines et équipés de grands déversoirs ou de surverse, peuvent avoir un impact négatif important sur la migration de l'anguille argentée.

Premièrement, la présence du barrage a un réel impact négatif, empêchant toute migration des anguilles lorsqu'il n'y a pas de surverse. Aucune anguille argentée produite en amont de la retenue AEP du Bois Joli n'a pu atteindre l'estuaire du Frémur au cours de cette saison 2018-2019.

Deuxièmement, l'effet bloquant sur une année a un impact non négligeable à long terme sur la migration des anguilles en augmentant le temps et la distance pour s'échapper du milieu de croissance. L'augmentation de la distance parcourue a un impact sur la forme physique, entraînant une réduction de la part d'énergie allouée à la reproduction. Il est possible que les anguilles, n'ayant pas réussi à migrer cette année, n'aient pas l'énergie nécessaire pour attendre la prochaine fenêtre de migration.

Troisièmement, une mortalité directe causée par la conduite de prélèvement d'eau, peut fortement affecter la migration de l'anguille argentée.

Afin d'améliorer la dévalaison des anguilles argentées, il est indispensable à ce jour de mettre en place un dispositif de dévalaison au niveau du barrage de Bois Joli. Ce projet est en cours d'évaluation et de réalisation, mais au vu des résultats de cette saison de dévalaison 2018-2019, il paraît urgent de mettre en place ce dispositif.

Il s'agit d'une saison très défavorable avec de faible précipitation, mais dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'urbanisation croissante de la région de Saint Malo, les surverses tardives voire inexistantes risquent de se généraliser selon les simulations réalisées par le syndicat

Mixte. Il est donc important d'étudier ces systèmes dans le but de mettre au point des dispositifs de dévalaison qui permettent d'améliorer l'échappement des anguilles argentées au sein de ces retenues AEP, quelles que soient les conditions hydrologiques rencontrées lors des saisons de migration.

6. Bibliographie

- Acou, a, Lefebvre, F., Contournet, P., Poizat, G., Panfili, J., & Crivelli, A. (2003). Silvering of Female Eels (*Anguilla anguilla*) in Two Sub-Populations of the Rhone Delta. *Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture*, 368, 55–68.
- Acou, A., Boury, P., Laffaille, P., Crivelli, A. J., & Feunteun, E. (2005). Towards a standardized characterization of the potentially migrating silver European eel (<I>Anguilla anguilla</I>, L.). *Archiv Für Hydrobiologie*, 164(2), 237–255.
- Acou, A., Laffaille, P., Legault, A., & Feunteun, E. (2008). Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(3), 432–442.
- Acou, a., & Gabriel, G. (2009). Differential production and condition indices of premigrant eels in two small Atlantic coastal catchments of France. *Eels at the Edge: ...*, 33(0), 250–281.
- Acou A., Boury P., Boisneau C., Bodin M., Feunteun E., (2010). Estimation du potentiel reproducteur en anguilles argentées de la Loire amont : saisons de migration 2001-05 à 2008- 09. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, CRESCO, Dinard. 40 p
- Acou A., Boisneau C., Bodin M., Bultel E., Boury P et Feunteun E, 2015. Evaluation du flux annuel d'anguilles argentées produit en Loire fluviale (amont d'Ancenis) pour 6 saisons d'avalaison (de 2001/02 à 2004/05, 2008/09 et 2012/13) et étude du comportement d'avalaison jusqu'à l'estuaire par télémétrie acoustique (saison 2011/12). Rapport final. Station Marine de Dinard. Muséum National d'Histoire Naturelle
- Adam G. et Elie P., (1994). Mise en évidence des déplacements d'anguilles sédentaires (*Anguilla anguilla* L.) en relation avec le cycle lunaire dans le lac de Grand-Lieu (Loire-Atlantique). *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (1994) 335 : 123-132.
- Adam G., (1997). L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) : dynamique de la sous-population du lac de Grand-Lieu en relation avec les facteurs environnementaux et anthropiques. Université Paul Sabatier, Toulouse II, spécialité hydrobiologie, thèse de doctorat, 353 p.
- Adam G., Feunteun E., Prouzet P., Rigaud C., coordinateurs, (2008). L'anguille européenne. Indicateurs d'abondance et de colonisation. Quae Editions. 393 p.
- Amilhat E., (2007). Etat sanitaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* dans le bassin Rhône Méditerranée et Corse : synthèse bibliographique. Rapport Pôle lagunes et Cépralmar. CBETM, Université de Perpignan. 88p.
- Amilhat, E., Lorenzen, K., Morales, E. J., Yakupitiyage, A., & Little, D. C. (2009). Fisheries production in Southeast Asian farmer managed aquatic systems (FMAS): I. Characterisation of systems. *Aquaculture*, 296(3), 219-226.
- Aprahamian M. W., (1988). Age structure of eel, *Anguilla anguilla* (L.), populations in the River Severn, England, and the River Dee, Wales. *Aquaculture and fisheries management*. 19: 365-376.
- Arnason, A. N., Kirby C. W., Schwarz C. J., and Irvine J. R., (1996). Computer analysis of data from stratified mark-recovery experiments for estimation of salmon escapements and other populations. *Can. Tech. Rep. Fish.Aquat. Sci.* 2106: 37 p.

- Ashworth, S.T. et Blanc, G., (1997). *Anguillicola crassus*, un colonisateur agressif récemment introduit dans les stocks européens d'anguilles. Bull. Fr. Pêche Piscic. 344/345 : 335-342.
- Bagliniere J.L., Castanet J., Conand F., Meunier F.J., 1992. Terminologie en sclérochronologie chez les vertébrés, in Baglinière J.L., Castanet J., Conand F., Meunier F.J. ed., Tissus dur et âge individuel des vertébrés, INRA ORSTOM, Bondy, 443-447.
- Baisez A. et Laffaille P., (2005). Un outil d'aide à la gestion de l'anguille : le tableau de bord anguille du bassin Loire. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture. 378-379 : 115-130.
- Baisez A., (2006). INDICANG : Rapport d'Etape - Bassin Loire – LOGRAMI. 26 p.
- Beaulaton, L. and Pénil, C., 2009. Protocoles spécifiques anguille pour l'ONEMA. ONEMA, 48.
- Belpaire C., De Charleroy D., Thomas K., Damme Van P. et Ollevier E., (1989). Effects of eel restocking on the distribution of the swimbladder nematode *Anguillicola crassus* in Flanders. Belgium. J. Appl. Ichthyol. 5 : 151-153.
- Berge, J., Biondi, A., Machi, P., Brunel, H., Pierot, L., Gabrillargues, J., ... & Bonafé, A. (2012). Flow-diverter silk stent for the treatment of intracranial aneurysms: 1-year follow-up in a multicenter study. *American Journal of Neuroradiology*, 33(6), 1150-1155.
- Bertin L., (1951). Les Anguilles. Variation, Croissance, Euryhalinité, Toxicité, Hermaphrodisme juvénile et Sexualité, Migrations, Métamorphoses. Paris : Payot. 188 p.
- Beullens K., Eding E.H., Gilson P., Ollevier F. And Richter C.J.J., 1997 b. Gonadal differentiation inter-sexuality and sex-ratios of European eel (*anguilla anguilla*L.) maintained in captivity. *Aquaculture*, 153: 135-150
- Beullens K., Eding E.H., Ollevier F., Komen J. And Richter C.J.J., 1997a. Sex differentiation, changes in length, weight and eye size before and after metamorphosis of European eel (*Anguilla anguilla*L.) maintained in captivity. *Aquaculture*, 153: 151-162
- Bevacqua D., Melia P., Crivelli A. J., Gatto M., De Leo G., (2007). Multi-objective assessment of conservation measures for the European eel (*Anguilla anguilla*): an application to the Camargue lagoons. *ICES Journal of Marine Science*. 64: 483-1490.
- Boëtius I., (1989). Preliminary report on the occurrence of *Anguillicola* in the some Danish fresh and seawater areas. EIFAC FAO Working Party on eel. Porto. Portugal. 5p.
- Boubée J., Mitchell C.P., Chisnall B.L., West D.W., Bowman E.J., Haro A., (2001). Factors regulating the downstream migration of mature eels (*Anguilla spp.*) at Aniwhenua. Dam, Bay of Plenty. New Zealand. *New Z. J. Mar. Freshw. Res.* 35 : 121-134.
- Boulenger, C. 2014. Ajustements dynamiques des sous-populations d'anguilles européennes et traits d'histoire de vie : apport du marquage individuel par PIT-tag pour la conservation. Thèse doctorat : Physiologie et biologie des Organismes - Populations - Interactions : Muséum national d'histoire naturelle (2014) 264p.
- Boulenger, C. Acou, A. Trancart, T., Crivelli, A.-j. Feunteun, E., 2015. Length–weight relationships of the silver European eel, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758), across its geographic rang. *Journal of Applied Ichthyology* , 427-430

- Boulenger C., Acou A., Gimenez O., Charrier F., Tremblay J. & Feunteun E. (2016). Factors determining survival of European eels in two unexploited sub-populations. *Freshwater Biology*. doi: 10.1111/fwb.12759.
- Briand C., Bardonnnet A., Rigaud C., coordonnateurs, (2008). Connaissances et recommandations scientifiques du GRISAM pour la mise en œuvre française du règlement européen visant à restaurer le stock d'anguille. GRISAM / Cemagref / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 52 p.
- Brothers E.B., 1987. Methodological approaches to the examination of otoliths in ageing studies, in R.C. Summerfelt and G.E. Hall ed., *Age and Growth of Fish*, Iowa State University Press, Ames, 544p.
- Bruslé 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.
- Bush A, Kevin D. Lafferty, Jeffrey M. Lotz and Allen W. Shostak, (1997). *Parasitology Meets Ecology on Its Own Terms: Margolis et al. Revisited*
- Buston M, Elith J, (2011). Determinants of reproductive success in dominant pairs of clownfish: a boosted regression tree analysis
- Campana S.E., Neilson J.D., 1985. Microstructure of Fish otoliths, *Canadian Journal of Fisheries and Aquacultures Science*, 42, 1014-1032.
- Can Estri-Trotti G., (1987). Occurrence of the Nematode *Anguillicola crassa* Kuwahara, Niimi et Itagaki, 1974 in eels from the Po delta. Italy. *Bull. Eur. Ass. Fish Pathol.*, 7: 109- 111.
- Caron F., Verrault G. et Rochard E., (2003). Estimation of the population size, exploitation rate, and escapement of silver-phase American eels in the St. Lawrence watershed. *Biology, Management and Protection of Catadromous Eels*. DIXON D.A. (ed.). American Fisheries Society Symposium. Bethesda.Maryland. USA. 33: 235-242.
- Carpentier A., Marion L., Paillisson J. -M., Acou A., Feunteun E., 2009. Effects of commercial fishing and predation by cormorants on the *Anguilla* stock of a shallow eutrophic lake. *Journal of Fish Biology* 74, 2132-2138.
- Carss D. N. and Ekins G. R., (2002). Further European integration: mixed sub-species colonies of great cormorants *Phalacrocorax carbo* in Britain - colony establishment, diet, and implications for fisheriesmanagement. *Ardea*. 90 : 23-41.
- Charrier F, Mazel V, Caraguel J-M, Abdallah Y, Le Gurun LL, Legault A, Laffaille P. 2012. Escapement of silver-phase European eels, *Anguilla anguilla*, determined from fishing activities in a Mediterranean lagoon (Or, France) *ICES J. Mar. Sci.* 69(1): 30-33
- Charrier F., Le Gurun L., Abdallah Y., Legault A., Caraguel J.-M., Blanck A., Lebel I., (2010). Contribution à l'amélioration des connaissances et à la gestion de l'Anguille européenne, *Anguilla anguilla*, dans les lagunes méditerranéennes - Cas de l'Etang de l'Or. Rapport CEPRALMAR. Groupement MRM/FISH PASS. 135 p.
- Charrier F., Mazel V., Caraguel J.M., Abdallah Y., Le Gurun L., Legault A., Lafaille P., (2011) Escapement of silver-phase European eels, *Anguilla anguilla*, determined from fishing activities in a Mediterranean lagoon (Or, France)

- Cucherousset J., Paillisson J. M., Roussel J. M., (2007). Using PIT-telemetry to study the fate of hatchery-reared YOY northern pike released into shallow vegetated areas. *Fisheries Research*. 85: 159-164.
- Cucherousset J., Roussel J. M., Keeler R., Cunjak R.A., Stump R., (2005). The use of two new portable 12-mm PIT-tag detectors to track small fish in shallow streams. *North American Journal of Fisheries Management*. 25: 270-274.
- Dahl J., 1967. Some recent observations on the age and growth of eels, *Proc. Br. Coarse Fish. Conf.*, 3, 48-52.
- Dannewitz J., Maes G.E., Johansson L., Wickström H., Volckaert F., Järvi T., (2005). Panmixia in the European eel: a matter of time ?. *Proc. R. Soc. B*. 272: 1129-1137.
- De Bonviller A., (2014). Mise en place d'un protocole expérimental de gestion de niveaux d'eau du lac de Grand Lieu. *Rapp. relatif à la mission A. ISL*. 172p.
- De Charleroy D., Thomas K., Belpaire C. et Ollevier F., (1989). The viability of the free-living larvae of *Anguillicola crassus*. *J. Appl. Ichthyol.* 5 : 154-156.
- Deelder C.L., (1984). Exposé synoptique des données biologiques sur l'anguille, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758). *FAO Fisheries Synopsis* 80. 1 : 73 p.
- Dekker W., (2000). Impact of eel exploitation on spawner production in Lake IJsselmeer. *The Netherlands. Dana* 12 : 17-32.
- Dekker W., 1987. Further results on age reading of European eel using tetracycline labelled otoliths, EIFAC, Working Group on Eel, Bristol, Grande Bretagne, Sp.
- Dekker, W. (2004). Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*?, *Fisheries Management and Ecology*. 10: 365-376.
- Domingos I., Costa J. L. and Costa M. J., (2006). Factors determining length distribution and abundance of the European eel, *Anguilla anguilla*, in the River Mondego. *Portugal. Freshwater Biology*. 51 : 2265-2281.
- Dufland J.F., Marion L. et Pourreau J., (2006). Grands échassiers et cormorans nicheurs en 2000 en Loire-Atlantique. *Spatule*. 12 : 47 p.
- Durif C., (2003). La migration d'avalaison de l'anguille européenne *anguilla anguilla* : caractérisation des fractions dévalantes, phénomène de migration et franchissement d'obstacles. *Université de Toulouse III. Thèse de doctorat*. 350 p.
- Egusa S., (1979). Notes on the culture of the European eel (*Anguilla anguilla* L.) in Japanese eel-farming ponds. *Rapp. P-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*. 174: 51-58.
- Elie, P., Girard, P. - 2014. La santé des poissons sauvages : les codes pathologie, un outil d'évaluation. *Peyney : Association Santé Poissons Sauvages*, 286 p.
- Elith J., Leathwick J.R., Hastie T., (2008). A working guide to boosted regression trees
- Engström H., (2001). Effects of great cormorant predation on fish populations and fishery. PhD Thesis, University of Uppsala. 39 p.

- Fonteneau F., Le Gentil J., Paillisson J.M., Carpentier A., et Marion L., (2004). Etude de la prédation des grands cormorans (*Phalacrocorax carbo*) hivernant dans l'ouest de la France. Eco Bio Université Rennes 1. CNRS : 52 p.
- Gauldie R.W., Nelson D.G. A., 1990. Otolith growth in fish, Comparative of Biochemistry and Physiology, 97, 119-135.
- Gibbons JW, Andrews KM (2004) PIT tagging: simple technology at its best. Bioscience 54:447–454
- Gibrat B. et Nielsen T. (1985). Recherches sur la nutrition des juvéniles de l'anguille (*Anguilla anguilla*, 1758). Conditionnement alimentaire et croissance en circuit fermé. Thèse de 3e cycle. Institut national polytechnique de Toulouse. 323 p.
- Girard P. et Elie P., (2007). Manuel d'identification des principales lésions anatomomorphologiques et des principaux parasites externes des anguilles. CEMAGREF / Asso. « Santé Poissons Sauvages ». Etude Cemagref n°110. Groupement de Bordeaux. 81 p.
- Gosset C., Travade F., Durif C., Rives J., Garaicoechea C., (2000). Etude des dispositifs de dévalaison pour l'anguille argentée – Test de deux exutoires de dévalaison à la centrale hydroélectrique de Halsou (Nive, 64). INRA/EDF. Rapport de contrat. 35 p.
- Haro A. J., (1991). Thermal preferenda and behavior of Atlantic eels (genus *Anguilla*) in relation to their spawning migration. Environ. Biol. Fish. 31: 171-184.
- Haro A 2003. Downstream Migration of Silver-Phase Anguillid Eels. In Aida, K., K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Eds). Eel Biology, Springer Verlag (Tokyo), 215-222.
- Hedger, R. D., Martin, F., Dodson, J. J., Hatin, D., Caron, F., & Whoriskey, F. G. (2008). The optimized interpolation of fish positions and speeds in an array of fixed acoustic receivers. *ICES Journal of Marine Science*, 65(7), 1248-1259.
- Höglund J., Andersson J., Wickström H., Reizenstein M., (1993). The distribution of *Anguillicola* in Sweden and its association with thermal discharge areas. Irish Fisheries Investigations. series A (Freshwater). 36: 143-150.
- Holmgren K., (1996). Effect of water temperature and growth variation on the sex ration of experimentally reared eels, Ecology of Freshwater Fish. 5: 203-212.
- ICES, (2008). Report of the 2008 session of the Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels. FAO / ICES. Rome / Copenhagen. 646 p.
- ISL. 2014 Mise en place d'un protocole expérimental de gestion de niveaux d'eau du lac de grand lieu Rapport relatif à la mission A, 172p
- Keller T., (1995). Food of Cormorants *Phalacrocorax carbo* sinensis wintering in Bavaria, Southern Germany. Ardea. 83: 185-192.
- Kennedy C. R. et Fitch D. J., (1990). Colonization, larval survival and epidemiology of the nematode *Anguillicola crassus*, parasitic in the eel, *Anguilla anguilla*, in Britain. J. Fish Biol. 36 :117-131.
- Klein Breteler J., Vriese T., Borcharding J., Breukelaar A., Jörgensen L., Staas S., De Laak G., and Igendahl D.,(2007). Assessment of population size and migration routes of silver eel in

- the River Rhine based on a 2-year combined mark-recapture and telemetry study. *ICES Journal of Marine Science*. 64: 1450–1456.
- Knopf K., Wiirtz J., Sures B., Taraschewski H., (1998). Impact of low water temperature on the development of *Anguillicola crassus* in the final host *A. anguilla*. *Dis Aquat Org*. 33 :143-149.
- Koie M., (1991). Swimbladder nematodes (*Anguillicola spp.*) and gill monogeneans (*Pseudodactylogyruis spp.*) parasitic on the European eel (*Anguilla anguilla*). *J. Cons. Int. Explor.* 47: 391-398.
- Koops H. et Hartmann F., (1989). *Anguillicola* infestations in Germany and in German eel imports. *J. Appl. Ichthyol.* 1 : 41-45.
- Laffaille P., Feunteun E., Baisez A., Robinet T., Acou A., Legault A., Lek S., (2003). Spatial organization of European eel (*A. anguilla*) in a small catchment. *Ecology of freshwater fish*. 12: 254-264.
- Laffaille, P., Acou, A., Guillouet, J., Mounaix, B., and Legault, A. 2006. Patterns of silver eel (*Anguilla Anguilla* L.) sex ratio in a catchment. *Ecology of Freshwater Fish*, 15: 583–588.
- Larsson P., (1984). Uptake of sediment released PCBs by the eel *Anguilla anguilla* in static model systems. *Ecol. Bull.* 36: 62-67.
- Legault, A. (1988). "Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille. Etude en Sèvre niortaise." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 308. 1-10. [dx.doi.org/10.1051/kmae:1988010](https://doi.org/10.1051/kmae:1988010).
- Legault, A. (1992). "Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 325. 83-91. [dx.doi.org/10.1051/kmae:1992016](https://doi.org/10.1051/kmae:1992016).
- Le Louarn, H., (2003). Qualitative and quantitative estimation of the Great Cormorant *Phalacrocorax carbo* diet. *Cormorant Research Group Bulletin*. 5: 26-30.
- Lefebvre F., Acou A., Lecomte Finiger R. et Crivelli A. J., (2003). Anguillicolosis among silver eels: a 4-year survey in 4 habitats from Camargue (Rhône delta, south of France). *Bull. Fr. Pêch. Piscic.* 368: 97-108.
- Lefebvre F., Contournet P. Et Crivelli A. J., 2002b. The health state of the eel swimbladder as a measure of parasite pressure by *Anguillicola crassus*. *Parasitology*, 124, 457-463.
- Legault, A. (1988). "Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille. Etude en Sèvre niortaise." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 308. 1-10. [dx.doi.org/10.1051/kmae:1988010](https://doi.org/10.1051/kmae:1988010).
- Legault, A. (1992). "Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 325. 83-91. [dx.doi.org/10.1051/kmae:1992016](https://doi.org/10.1051/kmae:1992016).
- Leo, G. D., & Gatto, M. (1995). A size and age-structured model of the European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(7), 1351-1367.
- Lowe R.H. 1952. The influence of light and other factors on the seaward migration of the silver eel (*Anguilla Anguilla* L.). *Journal of Animal Ecology*, 21: 275-309.

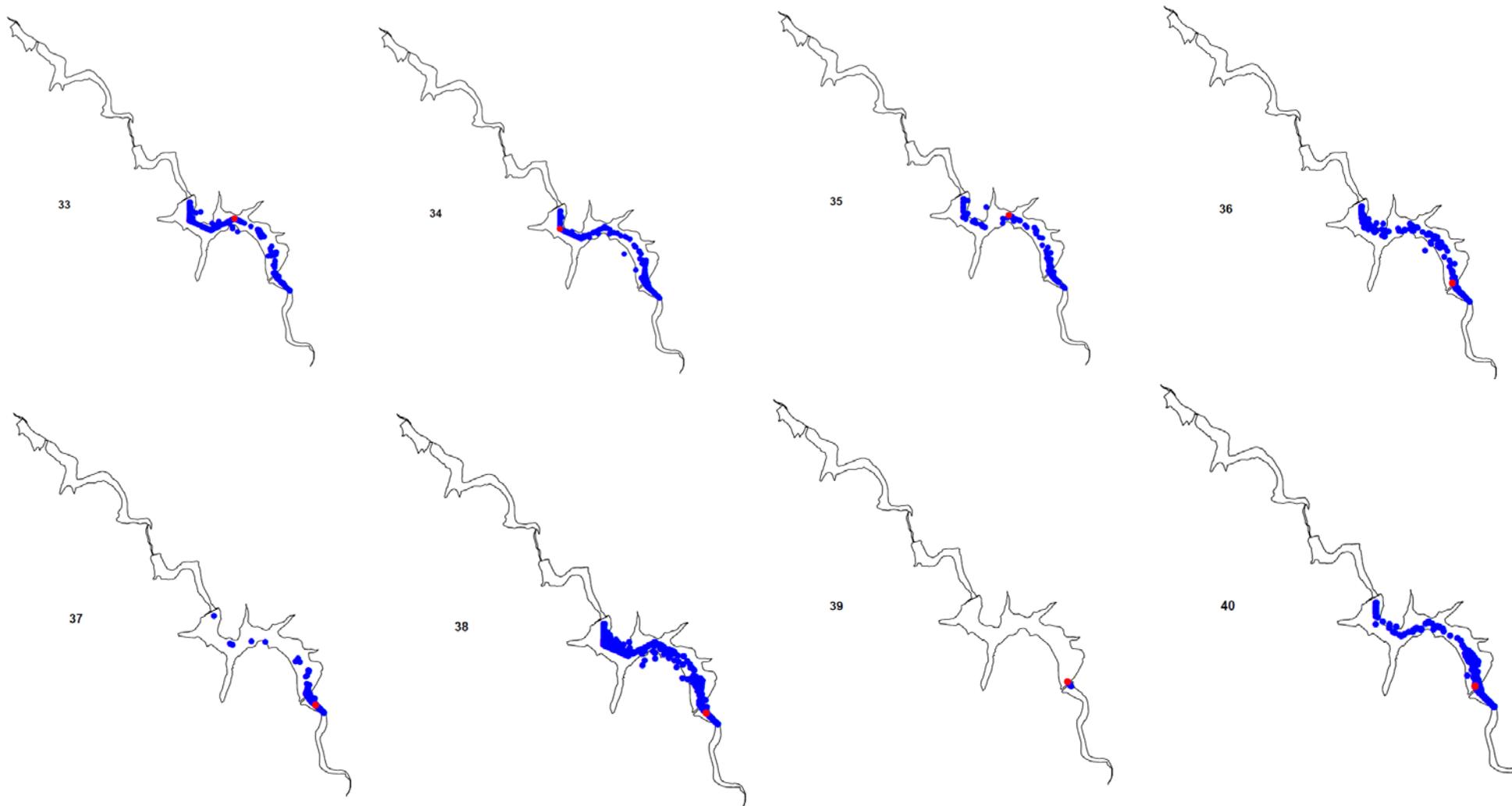
- Machut L., Limburg K., Schmidt R. et Dittman D., (2007). Anthropogenic impacts on American eel demographics in Hudson River tributaries, New York. *Trans. Am. Fish. Soc.* 136: 1699-1713.
- Maréchal C., (2004). Rapport technique du Groupe d'Intérêt pour les poissons, la pêche et l'aquaculture ; Rapport technique région Wallone. 119 p.
- Marion L., (1990). Les oiseaux piscivores et les activités piscicoles. Impact et protection. Ed. Ministère Environnement & Ministère Agriculture. Paris. 28 p
- Marion L., (2014). Recensement national des grands cormorans nicheurs en France en 2012. MEDDE-SESLG Université Rennes1-CNRS. 21 p.
- Melià P., Bevacqua D., Crivelli A.J., Panfili J., De Leo G.A. and Gatto M., (2006). Sex differentiation of the European eel in brackish and freshwater environments: a comparative analysis. *Journal of Fish Biology.* 69: 1228–1235.
- Moriarty C. et Dekker W., (1997). Management of European eel fisheries. Second report of EC concerted action AIR A94-1939. Dublin, Ireland. Fisheries Bulletin Marine Institute. 15: 110 p.
- Moriarty C., 1983. Age determination and growth rate of eels, *Anguilla anguilla* (L.), *Journal of Fish Biology*, 23, 257-264.
- Neumann W., (1985). Schwimmblasen parasit *Anguillicola* bei Aalen. *Fischer und Teichwirt.* 11 : 322 p.
- Nilo P. et Fortin. R. (2001). Synthèse des connaissances et établissement d'une programmation de recherche sur l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*). Université du Québec à Montréal. Département des Sciences biologiques pour la Société de la faune et des parcs du Québec. Direction de la recherche sur la faune : Québec. 298 p.
- Pankhurst N. W., (1982). Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel, *Anguilla anguilla* L.. *J. Fish Biol.* 21 : 417-428.
- Papon P., (2007). Les plans d'eau superficiels : définition, fonctionnement et aménagements Etude du lac Balaton, du lac de Grand-Lieu et de l'étang de Cieux. Université de Limoges. Ecole Doctorale 375 « Sciences de l'Homme et de la Société (S.H.S) ». Faculté des Lettres et des Sciences Humaines. U.M.R. CNRS 6042 Géolab. Discipline : Géographie. 316 p.
- Parsons, J., Vickers, K. U. et Warden, Y., (1977). Relationship between elver recruitment and changes in the sex ratio of silver eels *Anguilla anguilla* L. migrating from Lough Neagh, Northern Ireland. *J. Fish. Biol.* 10 : 211-229.
- Plan de Gestion Anguille (PGA) - Rapport de mise en œuvre. Juin 2015. Règlement (CE) n°1100/2007. 89
- Plan de Gestion Anguille (PGA) – Volet Local : Loire. Règlement (CE) n°1100/2007. 49 p.
- Plan de Gestion Anguille (PGA) – Volet National : France. Février 2010. Règlement (CE) n°1100/2007. 116 p.
- Porcher J.P, Travade F, (1992). Les dispositifs de franchissement : bases biologiques, limites et rappels réglementaires. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 326-327 : 5-14.

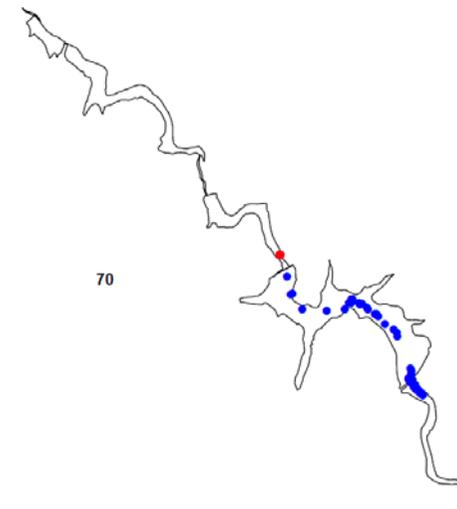
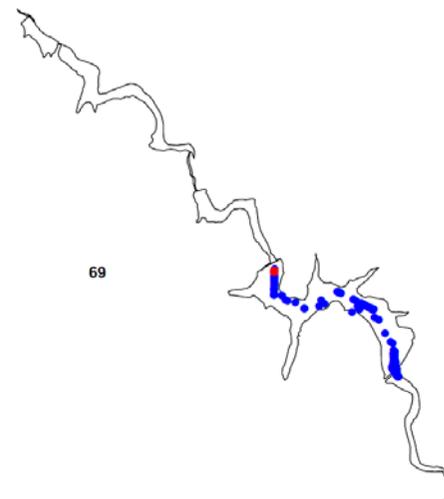
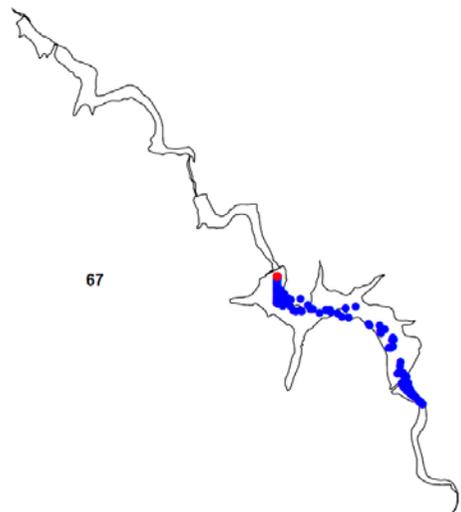
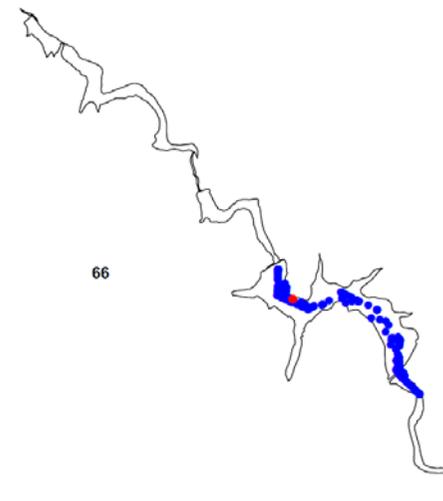
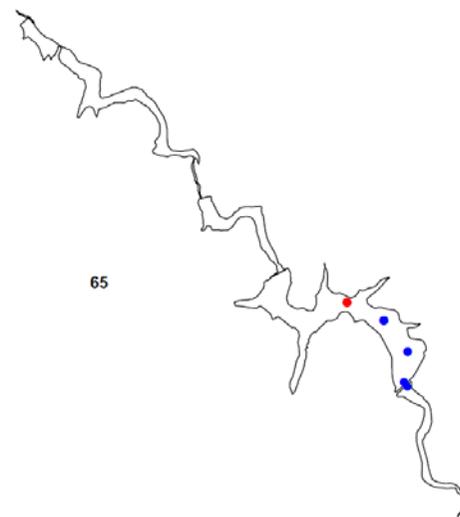
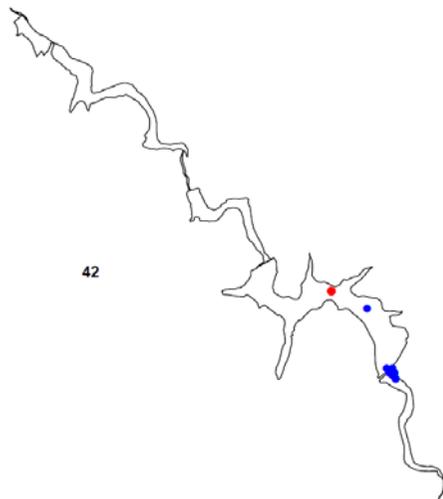
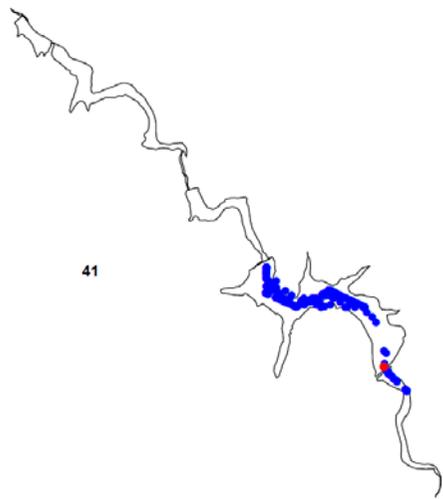
- Righton D., Westerberg H., Feunteun E., Okland F., Gargan P., Amilhat E., Metcalfe J., Lobon-Cervia J., Sjoberg N., Simon J., Acou A., Vedor M., Walker A., Trancart T., Bramick U. and Aarestrup K. (2016). Empirical observations of the spawning migration of European eels: The long and dangerous road to the Sargasso Sea. *Science Advances*, vol. 2, n°10.
- Robins C.R., Cohen D.M and Robins C.H., (1979). The eels, *Anguilla* and *Histobranchus*, photographed on the floor of the deep Atlantic in the Bahamas. *Bulletin of Marine Science*. 29 : 401-45.
- Roussel J.M., Cunjak R.A., Newbury R., Caissie D., Haro A. (2004). Movements and habitat use by PIT-tagged Atlantic salmon parr in early winter: the influence of anchor ice. *Freshwater Biology*. 49 : 1026-1035.
- Sauvaget B., Fatin D. et Briand C., (2003). Contamination par *Anguillicola crassus* de cinq populations d'anguilles (*Anguilla anguilla*) du littoral de Bretagne Sud (France). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 368 : 21-26.
- Schippers C., Booms G.H.R. and Boon J.H., (1991). Susceptibility of *Anguillicola crassus* in the swimbladder of European Eel (*Anguilla anguilla*) to high water temperatures. *Bull. Europ. Ass. Fish Pathol.* 11 : 92-95.
- Schmidt J., (1925). The breeding places of the eel, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, series B, 385 : 179-208.
- Simkiss, K., (1974). Calcium metabolism of fish in relation to ageing. In : Bagenal, T.B. (Eds.) *Ageing of Fish. Proceedings of an International Symposium*. Old Working Survey England Unwin Brothers. 1 : 12 p.
- Sinha V.R.P. and Jones J.W., (1975). The European freshwater eel. *Liverpool Univ. Pr.* 146 p.
- Smogor R.A., Angermeier P.L. et Gaylord C.K., (1995). Distribution and abundance of American eels in Virginia streams : tests of null models across spatial scales. *Trans. Am. Fish. Soc.* 124 : 789-803.
- Sprengel G. et Lüchtenberg H., (1991). Infection by endoparasites reduces maximum swimming speed of European smelt *Osmerus eperlanus* and European eel *Anguilla anguilla*. *Dis. Aqu. Org.* 11 : 31-35.
- Székely C., (1994). Paratenic hosts for the parasitic nematode *Anguillicola crassus* in lake Balaton, Hungary. *Dis. aquat. Org.* 18 : 11-20.
- Tapie N., (2006). Contamination des écosystèmes aquatiques par les PCB et PBDE : Application à l'estuaire de la Gironde. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I*, 230 p.
- Tesch F.W., (1977). *The eel. Biology and Management of Anguillid eels*. Londres. Chapman and Hal. 434 p.
- Thomas K. et Ollevier F., (1992). Paratenic hosts of the swimbladder nematode *Anguillicola crassus*. *Diseases of Aquatic Organisms*. 13 : 165-174.
- Todd P.R., (1981). Timing and periodicity of migrating New Zealand freshwater eels (*Anguilla spp.*). *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 15 : 225-235

- Trancart, T. (2011). Analyse comparative des tactiques déployées lors de la migration de colonisation des bassins versants par les poissons migrateurs amphihalins thalassotoques (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- Trancart, T., Acou, A., De Oliveira, E. & Feunteun, E. (2013) Forecasting animal migration using SARIMAX: an efficient means of reducing silver eel mortality caused by turbines. *Endangered Species Research*, **21**, 181–190.
- Trancart, T., Feunteun, E., Danet, V., Carpentier, A., Mazel, V., Charrier, F., ... Acou, A. (2017). Migration behaviour and escapement of European silver eels from a large lake and wetland system subject to water level management (Grand-Lieu Lake, France): New insights from regulated acoustic telemetry data. *Ecology of Freshwater Fish*, (June)
- Tsukamoto K, Nakai I, Tesch WV (1998) Do all freshwater eels migrate? *Nature* 396:635
- Tsukamoto K., Kajihara T., 1987. Age determination of ayu with otolith, in R.C. Summerfelt and G.E. Hall ed., *Age and Growth of Fish*, Iowa State University Press, Ames, 544p.
- Van Willigen J. et Dekker W., (1989). Update on *Anguillicola* in Dutch waters. EIFAC Working Party on Eel, Porto, Portugal. 8 p.
- Vollestad L. A., Jonsson B., Hvidsten N. A. et Naesje T. F., (1994). Experimental test of environmental factors influencing the seaward migration of European silver eels. *J. Fish. Biol.* 45 : 641-651.
- Vollestad L.A., Jonsson B., Hvidsten A.A., Naeste T.F., Haraldstad O., Ruud-Hansen J., (1986). Environmental factors regulating the seaward migration of European silver eels (*Anguilla anguilla*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43 : 1909-1916.
- Vollestad L.A., Lecompte-Finiger R., Steinmetz B., 1987. Age determination of *Anguilla anguilla* and related species, EIFAC, Working Party on Eel, Bristol, Grande Bretagne, 27 p.
- Wiley D., Morgan II R., Hilderbrand R., Raesly R. et Shumway D., (2004). Relations between physical habitat and American eel abundance in five river basins in Maryland. *Trans. Am. Fish. Soc.* 133 : 515-526.
- Winter, J.D., 1996. Underwater biotelemetry, in: L. A. Nielsen, and D.L.J. (Ed.), *Fisheries Techniques*. American fisheries Society, Bethesda, MD., pp. 555–590.

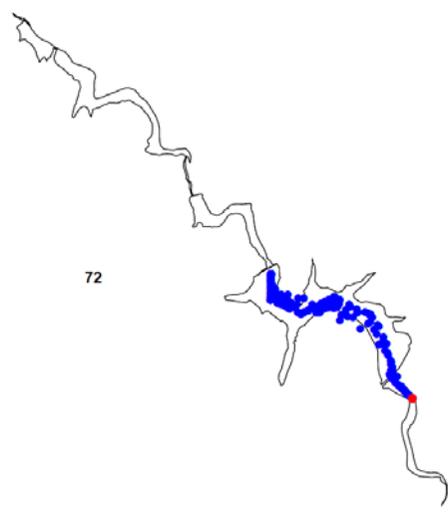
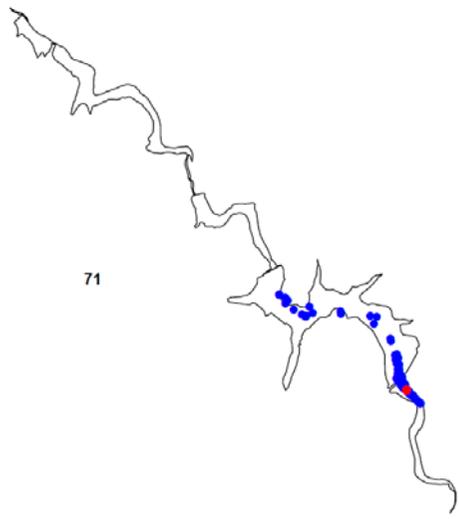
7. Annexes

Annexe 1: Reconstruction des positions de chaque anguille au cours du suivi (Point bleu = position moyenne par heure ; Point rouge = dernière position connue)





Bois Joli suite 2018-2019



Annexe 2 : Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (THELMA)

Photographie	
	ID LP 9
Longueur (mm)	23
Diamètre (mm)	9
Poids dans l'air (g)	4
Délai minimal (s)	30
Délai maximal (s)	90
Autonomie estimée (mois)	14
Fréquence d'émission (kHz)	69
Nombre de pulse codant	7

Annexe 3 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones VEMCO)

Photographie	
	VR2W
Longueur (mm)	308
Diamètre (mm)	73
Fréquence de réception (kHz)	69
Autonomie (mois)	15
Capacité de stockage (millions de détection)	1.6
Système de téléchargement	Bluetooth

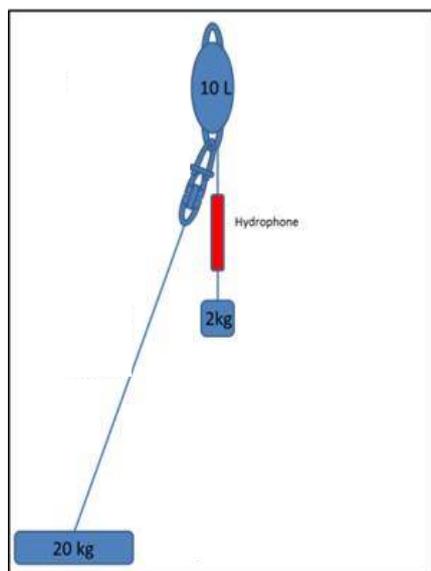
Annexe 4 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones THELMA)

Photographie	
	TBR 700
Longueur (mm)	230
Diamètre (mm)	75
Fréquence de réception (kHz)	69
Autonomie (mois)	9
Capacité de stockage (millions de détection)	1.5
Capteur de Température (°C)	OUI
Système de téléchargement	Bluetooth

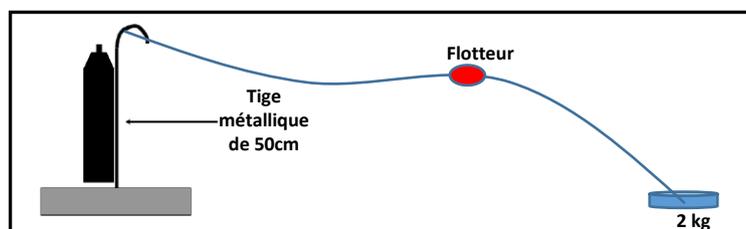
Annexe 5 : Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées

Date du marquage	Nombre d'anguilles marquées
24 Septembre 2018	1
08 Octobre 2018	2
15 Octobre 2018	8
22 Octobre 2018	3
10 Décembre 2018	2
28 Décembre 2018	1
04 Février 2019	1

Annexe 6 : Systèmes de fixation utilisés pour la mise en place des hydrophones



- Système utilisé pour tous les hydrophones en amont de Pont Avet



- Système furtif utilisé en aval de Pont Avet

Annexe 7 : Illustrations



Figure 20 : Relève des données d'un hydrophone Thelma sur le Bois Joli



Figure 21 : Relève des données d'un capteur accéléromètre sur le Bois Joli



Figure 22 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli

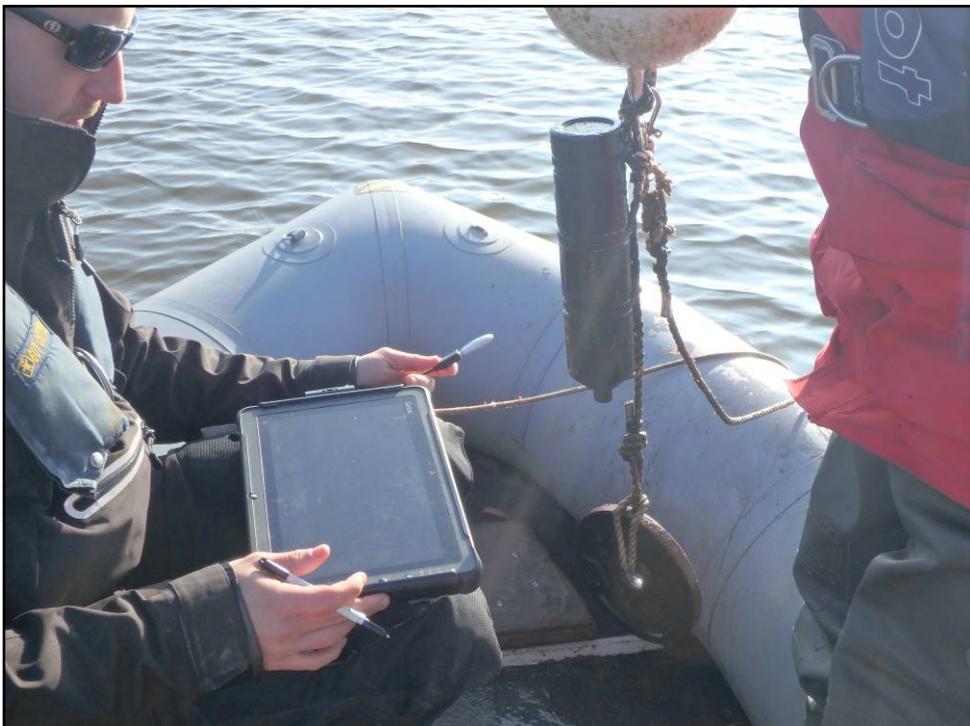


Figure 23 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli

