

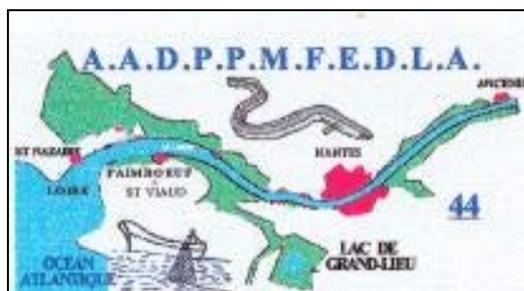
Echappement Des Anguilles Argentées du lac de Grand Lieu (EDAAGL) sur la saison d'avalaison 2015/16

Estimations de la production, du taux d'exploitation par la pêche et de l'échappement jusqu'à l'estuaire de la Loire par suivis PIT-tags et acoustiques

AUTEURS

MAZEL Virgile, DANET Valentin, ACOU Anthony, CHARRIER Fabien, SIMON Denis, TRANCART Thomas, FEUNTEUN Eric

NOVEMBRE 2016



- Sommaire -

Ce projet est porté par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) et plus particulièrement par la station marine de Dinard. Il est financé par la Région des Pays de la Loire et l'Agence de l'eau Loire Bretagne dans la cadre de l'appel à projet annuel Pêche et Aquaculture de la collectivité régionale. L'organisation opérationnelle est effectuée par le bureau d'étude FISH PASS responsable de la coordination des opérations sur le terrain en collaboration avec les pêcheurs professionnels de la société coopérative de Grand-Lieu, l'Association Agréée Départementale des Pêcheurs Professionnels Maritimes et Fluviaux en Eau Douce de Loire Atlantique (AADPPMFEDLA), l'équipe technique du MNHN basé à Dinard et le SMIDAP.

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. Les techniciens et chargés d'études du MNHN de Dinard (DRUET Morgan, GUILLAUDEAU Julien). LE FLOC'H Erwann du SMIDAP pour la coordination entre les différents intervenants du projet. Les 7 pêcheurs professionnels en activité sur le lac de Grand Lieu pour leur participation active et leur collaboration tout au long de l'étude. La réserve naturelle de Grand Lieu pour la mise en place des hydrophones sur le plan d'eau (GILLIER Jean-Marc et GALLAIS Philippe). Le SAH Sud Loire pour la mise en place des hydrophones sur le canal de la Martinière et la fourniture des données de gestion des vannes et les données de hauteur d'eau. Les pêcheurs professionnels de la Loire pour la mise à disposition de leurs corps morts à l'aval des vannages du canal de la Martinière. Les phares et balises de Saint Nazaire pour la mise en place des hydrophones en Loire.

Sommaire

Sommaire	3
Table des figures	6
Table des tableaux.....	9
Table des annexes.....	9
1 Introduction	10
2 Matériels et méthodes	15
2.1 Présentation de l'espèce étudiée : l'Anguille européenne (<i>Anguilla anguilla</i>).....	15
2.1.1 Présentation	15
2.1.2 Aire de répartition.....	16
2.1.3 Cycle de vie.....	16
2.1.4 L'anguille européenne une espèce « plastique »	17
2.1.5 Stade anguille jaune	18
2.1.6 Stade anguille argentée	18
2.2 Pressions qui s'exercent sur les anguilles.....	19
2.2.1 Principales pressions d'origine naturelle.....	20
2.2.2 Principales pressions d'origine anthropique.....	23
2.3 Situation géographique de l'étude	25
2.3.1 La Loire.....	25
2.3.2 Le bassin versant du lac de Grand-Lieu.....	26
2.3.3 Le lac de Grand-Lieu	27
2.3.4 Un hydrosystème anthropisé et complexe	30
2.3.5 Historique de l'anthropisation du site.....	32
2.3.6 Une gestion complexe de l'eau	34
2.3.7 Présentation de l'ouvrage de régulation du niveau d'eau du lac de Grand Lieu (vannage de Bouaye)	35
2.4 La pêcherie du lac de Grand-Lieu.....	37
2.4.1 Historique	37
2.4.2 Engin de pêche.....	37
2.4.3 Pratiques de pêche.....	38
2.4.4 Législation de la pêche sur le lac de Grand-Lieu	39
2.5 Suivi de la pêcherie et biométrie.....	41
2.5.1 Suivi de la pêcherie.....	41
2.5.2 Biométrie (caractérisation de la fraction exploitée)	42
2.5.3 Biométrie spécialisée (qualité des géniteurs produits)	42
2.6 Méthode CMR PIT-Tag	50
2.6.1 La technique de marquage aux PIT-Tags.....	50

- Sommaire -

2.6.2	CMR (Capture Marquage Recapture)	52
2.6.3	Estimation des taux d'échappement et d'exploitation sur les anguilles du lac de Grand-Lieu.....	56
2.7	Suivi acoustique.....	58
2.7.1	Principe de la méthode.....	58
	Le réseau acoustique déployé	59
2.7.2	.....	59
	Protocole de marquage des anguilles argentées	62
2.7.3	.....	62
	Suivi post-opératoire.....	64
2.7.4	.....	64
	Transformation des données de détection	65
2.7.5	.....	65
	Analyses statistiques.....	65
2.7.6	.....	65
2.7.7	Etude de l'impact de la gestion des ouvrages (vannes) sur la migration d'avalaison.....	66
3	Résultats	67
3.1	Suivi de la pêcherie et biométrie.....	67
3.1.1	Suivi de la pêcherie.....	67
3.1.2	Biométrie : Caractéristiques de la fraction exploitée	73
3.1.3	Biométrie spécialisée : qualité des géniteurs produits.....	79
3.1.4	Sexage	86
3.2	Capture Marquage Recapture aux PIT-Tag.....	87
3.2.1	Caractéristiques des individus marqués.....	87
3.2.2	Test de perte de marque et de mortalité.....	88
3.2.3	Partie recapture.....	90
3.2.4	Estimation des taux d'échappement et d'exploitation sur les anguilles du lac de Grand-Lieu.....	91
3.3	Suivi acoustique.....	92
	Bilan des détections de télémétrie acoustique.....	92
3.3.1	.....	92
3.3.2	Comportements migratoires des 18 anguilles ayant quittées le lac	93
	• Au sein du lac.....	93
	• Du lac à la Loire	97
4	Discussion	99
4.1	Suivi de la pêcherie	99
4.1.1	La pêcherie.....	99
4.1.2	Biométrie : caractéristiques de la fraction exploitée.....	100

- Sommaire -

4.1.3	Biométrie spécialisée : Qualité des géniteurs.....	102
4.2	CMR (Capture – Marquage – Recapture).....	104
4.2.1	Taux d'échappement à la pêche des anguilles argentées du lac de Grand-Lieu 105	
4.3	Echappement en anguilles argentées de Grand Lieu : les apports du suivi acoustique	106
4.3.1	Un faible taux d'exploitation dans le Lac	106
4.3.2	Un échappement en anguilles argentées limité par le vannage de Bouaye	106
4.3.3	Le devenir d'une majorité d'anguilles argentées n'est pas connu	107
5	Conclusion.....	109
6	Perspectives	111
	▪ Une gestion de l'ouvrage de Bouaye pour favoriser l'échappement des anguilles argentées est-elle possible ?	111
	▪ Quel est le devenir des anguilles non-détectées ?.....	111
7	Bibliographie	114
8	Annexes.....	125

Table des figures

Figure 1 : Carte représentant les différentes UGA, l'UGA concerné lors de cette étude est matérialisée par une bordure rouge. (EauFrance, modifié par D.SIMON)	110
Figure 2 : Carte représentant la zone ayant déjà subie une prospection (rouge) et les quatre zones, dont le lac de Grand-Lieu où il manque des données (jaune). (A Acou, MNHN de Dinard, modifié par D.SIMON).....	12
Figure 3 : Aire de répartition continentale et océanique de l'anguille européenne (<i>Anguilla anguilla</i>) (Adam, 1997)	15
Figure 4 : Cycle biologique de l'anguille européenne (<i>Anguilla anguilla</i>). (Adam, 1997)	17
Figure 5 : Localisation géographique du lac de Grand-Lieu (D.SIMON)	26
Figure 6 : Cartographie du bassin versant du lac de Grand-Lieu. (Papon, 2004)	27
Figure 7 : Zonation des différents milieux (SNPN).....	28
Figure 8 : Localisation des zones de protection sur le lac de Grand Lieu (SNPN)	29
Figure 9 : Schématisation du réseau hydraulique entre le lac de Grand-Lieu et la Loire (sans échelle ni proportion). (SAH Sud-Loire).	31
Figure 10 : Scéma de l'évolution du niveau d'anthropisation du site (CARAGUEL JM).....	33
Figure 11 : Gestion d'été du réseau situé à l'aval du lac de Grand Lieu (SAH)	34
Figure 12 : Gestion d'hiver du réseau situé à l'aval du lac de Grand Lieu (SAH).....	34
Figure 13 : Vue de coté de l'ouvrage de Bouaye (FISH PASS)	35
Figure 14 : Vue aval de l'ouvrage de Bouaye (FISH PASS)	35
Figure 15 : Vue aérienne du vannage de Bouaye (IGN)	36
Figure 16 : Débit de sortie des vannes de Bouaye- Modélisation hydraulique (ISL).....	36
Figure 17 : A gauche, représentation d'un engin (verveux utilisé sur le lac de Grand-Lieu. Les chiffres 1,2 et 2a représentent respectivement, la paradière ou nappe, la poche principale et les deux poches de refus. (G. Adam, modifié par D. SIMON). A droite, photographie d'un verveux en pêche sur le lac de Grand-Lieu. (V. MAZEL)	38
Figure 18 : Localisation des réserves de pêche sur le lac de grand Lieu (D SIMON)	40
Figure 19 : Paradière en place sur le lac de Grand Lieu (V MAZEL).....	41
Figure 20 : Tri des anguilles jaunes sur le bateau lors d'une relève de verveux (V MAZEL)	41
Figure 21 : Extrait du guide pathologies sur l'anguille (Beaulaton et Penil., 2009).....	44
Figure 22 : Extraction de la vessie natatoire, dissection puis comptage des parasites dans la vessie natatoire sur une anguille argentée du lac de Grand Lieu (FISH PASS)	45
Figure 23 : Notation des indices d'altération de la vessie natatoire (Lefebvre et Al., 2002).	46
Figure 24 : Observation macroscopique des gonades d'anguilles européennes (Beullens et al., 1997 in Beaulaton et Penil 2009).....	47
Figure 25 : Photo d'otolithe d'une anguille argentée du lac de Grand Lieu (FISH PASS).....	49
Figure 26 : Présentation schématique du principe de la méthode CMR (quizlet.com).....	50
Figure 27 : Schéma de principe de communication électromagnétique entre le TAG et le lecteur (electronics.stackexchange.com).....	51
Figure 28 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS)	51

- Table des figures -

Figure 29 : Création d'une trémie sur mesure pour la lecture automatisée des anguilles marquées au PIT TAG (FISH PASS).....	51
Figure 30 : Photographies représentant, à gauche le lecteur PIT-tag et à droite le dispositif mise en place sur les bateaux pour cette étude. (FISH PASS).....	52
Figure 31 : Séance de marquage au PIT TAG dans le cadre de la CMR (FISH PASS).....	53
Figure 32 : Viviers de stockage des anguilles destinées au marquage (FISH PASS).....	53
Figure 33 : Relâche des individus marqués sur le plan d'eau avec un bateau mis à disposition par un pêcheur professionnel (FISH PASS).....	54
Figure 34 : Localisation des sites de remise à l'eau des individus marqués au PIT TAG (FISH PASS).....	54
Figure 35 : Vivier et côme sur les bateaux des pêcheurs du lac (FISH PASS).....	56
Figure 36 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques.....	59
Figure 37 : Répartition des différents compartiments créés en fonction du positionnement des hydrophones.....	62
Figure 38 : Exemple du résultat des tests de buffer sur les 3 hydrophones directement en aval du vannage de Bouaye.....	63
Figure 39 : Sonde de température étanche pour mesure en continue dans le plan d'eau (FISH PASS).....	63
Figure 40 : Suture d'une anguille après insertion du TAG acoustique (FISH PASS).....	65
Figure 41 : Evolution des cicatrisations lors du suivi post-opératoire (basée sur la disparition des points, l'infection et la fermeture de la plaie).....	66
Figure 42 : Suivi embarqué lors de la relève des engins sur le lac de Grand Lieu (FISH PASS) ...	67
Figure 43 : Cinétique des captures cumulées d'anguilles argentées par la pêcherie professionnelle. D'après les données récoltées via les fiches de suivi et les suivis terrain.....	69
Figure 44 : Evolution des captures d'anguilles argentées par semaine. D'après les données récoltées via les fiches de suivi et les suivis terrain.	69
Figure 45 : Localisation spatiale des verveux en fonction de la période (données récoltées lors du suivi des pêcheurs professionnels. Les cercles représentent les verveux posés lors du début de saison alors que les triangles correspondent aux verveux posés en fin de saison. Les lettres de A à G représentent les 7 pêcheurs du lac de Grand-Lieu.....	70
Figure 46 : Evolution des efforts de pêche par semaine sur la durée de la saison de pêche à l'anguille argentée. D'après les données issues des fiches de suivi et des suivis terrain.....	71
Figure 47 : Evolution des CPUE (moyennes) par semaine. D'après les données issues des fiches de suivi et des suivis terrain.	72
Figure 48 : Relève d'un verveux sur le lac de Grand Lieu (V MAZEL).....	72
Figure 49 : Evolution du taux d'argenture moyen par semaine au cours de la période d'étude. D'après les données récoltées lors des biométries.....	73
Figure 50 : Anguilles jaune et argentée de même taille (V MAZEL).....	74
Figure 51 : Evolution des proportions des deux sexes au cours du temps. D'après les données récoltées lors des biométries.	74
Figure 52 : Evolution de la taille moyenne des anguilles argentées.....	75
Figure 53 : Répartition des anguilles étudiées en classes de taille en fonction de leur stade. D'après les données récoltées lors des biométries.	76

- Table des figures -

Figure 54 : Répartition des quantités d'anguilles argentées pêchées en fonction des classes de taille.....	77
Figure 55 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les anguilles argentées.....	77
Figure 56 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les femelles.....	78
Figure 57 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les mâles.....	78
Figure 58 : Qualité des géniteurs vis-à-vis des lésions externes.....	79
Figure 59 : Répartition des types de lésions externes.....	80
Figure 60 : Répartition des niveaux d'importance des lésions externes.....	80
Figure 61 : Photo de « kystes » dans les nageoires (CODAGE AGNX) (FISH PASS).....	80
Figure 62 : Vessie natatoire en cours de dissection contenant des parasites (FISH PASS).....	81
Figure 63 : Qualité des géniteurs vis-à-vis du parasitisme par <i>A. crassus</i>	82
Figure 64 : Evaluation de la charge parasitaire des individus actuellement parasités (sacrifiés en janvier 2016).....	82
Figure 65 : Proportion des individus parasités ou ayant été parasités par <i>A. crassus</i> et présentant des lésions internes.....	83
Figure 66 : Répartition des anguilles argentées en fonction de l'âge (sans rétro-calcul).....	84
Figure 67 : Relation longueur total de l'individu-rayon total de l'otolithe pour les 102 individus.....	85
Figure 68 : Otolithe d'une anguille argentée de Grand Lieu (FISH PASS).....	85
Figure 69 : Répartition des individus sexés (N=102).....	86
Figure 70 : Gonade d'anguille femelle (FISH PASS).....	86
Figure 71 : Répartition des individus marqués en classes de taille.....	87
Figure 72 : Couve utilisée par les pêcheurs professionnels pour stocker les anguilles sur le lac de Grand Lieu (FISH PASS).....	89
Figure 73 : Photographies des anguilles morte durant le test de rétention de marque (A gauche : présence d'une infection, A droite présence d'une nécrose au point d'insertion) (FISH PASS).....	89
Figure 74 : Représentation de la cinétique des recaptures des anguilles marquées aux PIT-tag lors des quatre séances de marquage (M1 à M4).....	90
Figure 75 : Bilan des détections par box des 51 anguilles marquées. Bilan arrêté au 01/05/2016.....	94
Figure 76 : Résultat des BRT pour le comportement du passage de Box0 à Box1/Box2.....	95
Figure 77 : Résultat des BRT pour le comportement du passage de Box1/Box2 à Box3.....	96
Figure 78 : Synchronisation entre l'échappement des anguilles et la gestion des vannes de Bouaye.....	96
Figure 79 : Période de migration potentielle des anguilles argentées par le passage de « Maison Blanche ».	
Figure 80 : Vue aval du vannage de Buzay à marée basse (FISH PASS).....	98
Figure 81 : Vue des bouées des corps morts sur lesquels sont fixés les hydrophones à marée basse (FISH PASS).....	98
Figure 82 : Captures totales mensuelles d'anguilles au verveux de la pêcherie professionnelle du lac de Grand Lieu en 1995 (Adam, 1997).....	100

- Table des tableaux -

Figure 83 : Données de pluviométrie à proximité du lac de Grand Lieu (SAH).....	105
Figure 84 : Position des 80 hydrophones installés sur le lac de Grand Lieu et des 3 hydrophones directement en aval du lac.....	112

Table des tableaux

Tableau 1 : Historique de la législation instaurant les périodes légales de pêche à l'anguille sur le lac de Grand-Lieu (Source : PGA + Arrêtés, données compilées par D. SIMON).....	39
Tableau 2 : Classes de qualité à partir de l'indice pathologique général (Elie et Girard 2014).....	43
Tableau 3 : Stade de maturation des anguilles marquées (méthode de Durif et al., 2003) et mesure des variables morphologiques : longueur totale (LT), poids (Pd), diamètre oculaire (DO) et longueur pectorale moyenne (LP). Moyennes et variables standard des indices.....	63
Tableau 4 : Récapitulatif des jours de suivi, de biométrie et du nombre d'individus passés en biométrie. Les différentes couleurs sont chacune assignées à un pêcheur professionnel du lac de Grand-Lieu.	68
Tableau 5 : Caractéristiques des individus passés en biométrie. Les semaines 48, 52 ,53 et 2 correspondent aux semaines sans biométrie. D'après les données récoltées lors des biométries.....	75
Tableau 6 : Tableau des correspondances des abréviations utilisées lors de l'étude des lésions externes.	79
Tableau 7 : Caractéristiques des individus conservés pour la parasitologie (N=102).....	81
Tableau 8 : Fréquence des SDI sur les individus analysés.....	83
Tableau 9 : clé taille / âge.....	85
Tableau 10 : Caractéristiques des individus marqués aux PIT-tags et relâchés (les individus vivant à l'issu du test de mortalité et perte de marque ont également été relâchés (N=27)....	87
Tableau 11 : Comparaisons des caractéristiques morphologiques des individus issus du lot « marqué » et du lot « témoin ».	88
Tableau 12 : Tableau de synthèse des captures par sexe sur la saison de pêche 2015-2016 ...	91
Tableau 13 : Récapitulatif des recaptures hebdomadaires d'individus marqués aux PIT-tag selon leurs lots de marquage. Table d'entrée du logiciel SPAS calculant une estimation de l'abondance en anguille argentée et le taux d'exploitation.....	91
Tableau 14 : Synthèse des résultats obtenus grâce au logiciel SPAS.....	92

Table des annexes

Annexe 1a : Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (VEMCO).....	124
Annexe 1b : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones) (VEMCO, 2010).....	124
Annexe 1c : Photos du matériel utilisé pour le marquage des anguilles argentées.....	125
Annexe 1d : Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées.....	126
Annexe 2 : Systèmes de fixations utilisées pour la mise en place des hydrophones.....	126

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'anguille 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 un règlement européen, décliné en plan de gestion pour chaque état membre (règlement n°1100/2007) du 18 septembre 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'étude présentée s'est déroulée au sein de l'UGA Loire, côtiers vendéens (LCV) (Figure 1).

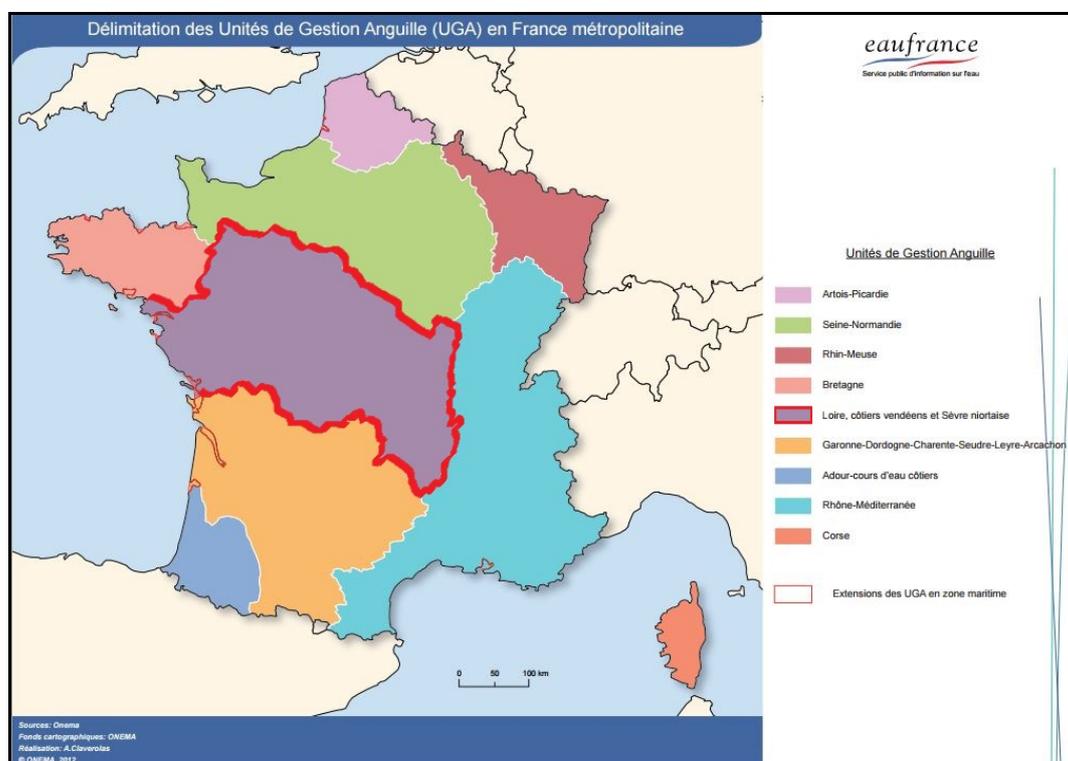


Figure 1 : Carte représentant les différentes UGA, l'UGA concerné lors de cette étude est matérialisée par une bordure rouge. (EauFrance, modifié par D.SIMON)

- Introduction -

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 rupture de continuité écologique (obstacles), la détérioration de leur condition de vie et de leur état de sanitaire (pollution, parasitisme...) mais également les pressions de pêche qui interviennent exercées à tous les stades de vie (civelles, anguilles jaunes, anguilles argentées).

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. Pour la réduction des facteurs de mortalité, il a été demandé, à la pêche professionnelle, une réduction de 30 % des mortalités, à tous les stades. Dans cette optique, une mise en place de quota de capture pour la civelle, une réduction de la durée de la période d'exploitation de l'anguille jaune (passant de 7 à 5 mois entre 2009 et 2011) et une mise en place de période de pêche à l'anguille argentée (du 1er octobre au 15 janvier), réservée aux professionnels a été imposée (Plan de Gestion Anguilles - volet national). A l'heure actuelle, la mortalité par la pêche au stade « civelle » a été réduite de 72.7 % (par rapport à la période de référence 2004/2008) (Rapport de mise en œuvre du PGA, juin 2015). Pour la mortalité, par la pêche, des stades « jaune » et « argenté » l'absence de données fiables sur le stock d'anguille sur le territoire national ne permet pas, à l'heure actuelle, d'estimer l'évolution de la mortalité des anguilles à ces stades. Afin de résoudre ce problème, le PGA demande d'approfondir les connaissances sur l'anguille et sur le niveau de production d'anguilles des grands hydrosystèmes français en lien avec le taux de prélèvement des pêcheries en place sur ces derniers.

Afin de répondre aux exigences du PGA, différents projets ont été menés sur la Loire. Il existe notamment une étude sur l'échappement des anguilles argentées en Loire moyenne (en amont de la zone de marée dynamique). Cette étude a débuté en 2001 en association avec les pêcheurs

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.

- Introduction -

professionnels de Loire (AAIPPBLB²), le MNHN et l'Université de Tours, elle a pu couvrir 7 saisons de pêche d'avalaison³ (Acou et al. , 2010). L'ensemble du « système Loire » n'est pas couvert par cette étude et ces données ne peuvent pas être extrapolées à l'ensemble de la masse d'eau présente à l'aval de la zone d'étude. En effet, comme le montre la Figure 2, il existe, au sein du bassin versant de la Loire, 4 zones supposées à fort potentiel de production d'anguilles argentées non étudiées : la Sèvre nantaise, la Brière, l'Erdre et le lac de Grand-Lieu. Il n'existe pas à l'heure actuelle de données de productions d'anguilles argentées sur ces 4 zones.



Figure 2 : Carte représentant la zone ayant déjà subi une prospection (rouge) et les quatre zones, dont le lac de Grand-Lieu où il manque des données (jaune). (A Acou, MNHN de Dinard, modifié par D.SIMON)

Les travaux de thèse de Gilles Adam soutenue en 1997 : « L'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L. 1758) : dynamique de la sous-population du lac de Grand-Lieu en relation avec les facteurs environnementaux et anthropiques » apportent de nombreux éléments sur la pêcherie (nombre de pêcheurs, effort de pêche, stratégie de pêche, engins utilisés, évolution des captures au cours de la saison, synthèse historique des captures, exploitation halieutique...), sur la biologie et la dynamique de la sous population d'anguilles (âge, croissance, relation taille-âge, captures aux âges, structure de la population, estimation de la population...). L'ensemble des données sur la biologie traitées dans le cadre de la thèse reposent sur les données d'âge obtenues par otolithométrie et les caractéristiques d'argenture des individus ne sont pas abordées.

² AAIPPBLB : Association Agréée Interdépartementale des Pêcheurs Professionnels en eau douce du Bassin de la Loire et des cours d'eau Bretons

³ Avalaison : Descente des anguilles de la rivière vers la mer.

- Introduction -

Concernant la thématique de la production d'anguille argentées et de l'échappement de celles-ci il n'y a pas d'éléments de réponse disponibles. Dans le cadre de sa thèse il était initialement prévu d'étudier et caractériser le flux migrant d'anguilles argentées sortant du système lacustre, cependant cette thématique n'a pu être traitée à cette période. Comme il le souligne lui-même : « Les départs des anguilles argentées vers leur lieu de reproduction n'ont pu être observés durant la période d'étude, nous pensons que les anguilles prêtes à migrer ont été bloquées par la fermeture du vannage durant la phase propice à la migration », « Une autre étude complémentaire doit être envisagée pour déterminer les caractéristiques du flux migrant d'anguilles argentées sortant du système lacustre. Prévu à l'origine dans le cadre de nos travaux, le suivi des départs d'anguilles argentées vers l'exutoire du lac n'a pas permis l'observation du flux. Les anguilles cherchant à quitter le lac sont en partie capturées par les pêcheurs professionnels, mais une fraction parvient généralement à rejoindre l'exutoire constituant ainsi un potentiel reproducteur supplémentaire pour l'espèce, à condition que ces anguilles échappent à la pêcherie située en aval du lac (estuaire de la Loire). Le protocole d'échantillonnage que nous avons utilisé semble opérationnel pour quantifier sur une période de temps déterminée les départs d'anguilles argentées vers l'exutoire, il semble que ce soit les conditions environnementales particulières de l'année d'étude qui aient conduit à un blocage de la migration. Le suivi d'une autre saison de migration pourrait préciser nos observations. ».

Cette étude propose donc d'obtenir des données de production d'anguilles argentées et d'échappement sur le lac de Grand-Lieu. Ce territoire sera par la suite plus précisément présenté. Cette étendue d'eau fait partie des « zones humides d'importance majeure pour le bassin de la Loire » (PGA Loire) avec une surface en eau variant de 3900 ha en été à plus de 6000 ha en hiver, ce lac est considéré comme étant le plus grand lac naturel de plaine français. De plus, il possède une grande diversité d'habitats ainsi qu'une faible profondeur, ce qui contribue à faire de ce site un lieu privilégié pour la production d'anguilles. L'étude sur la production et l'échappement des anguilles argentées sur ce plan d'eau a pu être réalisée avec l'appui des pêcheurs professionnels exerçant sur ce plan d'eau. Cette activité de pêche professionnelle, est présente sur le lac depuis de très nombreuses années.

L'acquisition de données par cette étude doit permettre ainsi d'apporter des éléments pour répondre aux objectifs du PGA vis-à-vis du lac de Grand-Lieu et de consolider les informations acquises sur les pratiques de pêches sur ce plan d'eau.

Le projet s'articule autour de trois axes :

Estimation du taux d'exploitation des anguilles argentées et du taux d'échappement associé à la pêche professionnelle sur le lac de Grand-Lieu, uniquement pendant la période de pêche légale et sur la zone autorisée à la pêche professionnelle. De plus, une estimation de la qualité des géniteurs produits dans la zone d'étude sera proposée. L'estimation du taux d'exploitation est réalisée par la mise en œuvre d'une opération de CMR (Capture-Marquage-Recapture) avec un marquage par PIT-Tag (Passive Intergratied Transponder-Tag), en collaboration avec les pêcheurs professionnels du lac de Grand-Lieu (participation des 7 pêcheurs professionnels du plan d'eau). L'utilisation des PIT-Tags à des fins d'identification des animaux sauvages date du milieu des années 1980 (Gibbons et Al, 2004) et a permis de développement de nouvelles méthodes d'investigation pour l'étude de la biologie des espèces (croissance, mouvements, survie..).

Estimation du taux d'échappement des anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu, incluant les périodes et les zones interdites à la pêche (échappement du plan d'eau). Cette partie nécessite une approche différente. En effet, dans les zones et périodes interdites à la pêche professionnelle, il faut mettre en œuvre une méthode complémentaire (en plus des individus marqués au PIT-Tag) de suivi afin d'acquérir des informations sur les déplacements des anguilles en dehors de la zone de pêche et du plan d'eau. La méthode retenue est le suivi acoustique de 50 individus *via* des marques soniques et des récepteurs (hydrophones) répartis à des endroits stratégiques dans le plan d'eau et à l'aval immédiat. Cette approche permet aussi de prendre en compte l'impact potentiel de l'ouvrage de régulation du niveau d'eau du lac (vannage de Bouaye) sur la migration d'avalaison.

Estimation du taux d'échappement entre la sortie du lac de Grand-Lieu et la Loire. Cette partie est une extension de la thématique précédente jusqu'à la Loire. Le but est de suivre les anguilles, de la sortie du lac de Grand-Lieu, jusqu'à la Loire. Il permet d'obtenir un grand nombre d'informations sur le comportement et les déplacements des anguilles : proportion d'anguilles qui arrivent à la Loire (évaluation des pertes en ligne), temps de transit entre les différentes zones du réseau hydrographique à l'aval du plan d'eau et impact des ouvrages et de leur gestion sur la migration d'avalaison.

2 Matériels et méthodes

2.1 Présentation de l'espèce étudiée : l'Anguille européenne (*Anguilla anguilla*)

2.1.1 Présentation

L'Anguille européenne, *Anguilla anguilla* (L, 1758) est un poisson migrateur amphihalín thalassotoque ou catadrome⁴. Cette espèce effectue ainsi une partie de son cycle de vie biologique en milieu marin et l'autre en eau douce ou saumâtre. En effet, les anguilles européennes effectuent leur croissance en milieu continental avant de rejoindre la mer des Sargasses pour se reproduire (Schmidt, 1925) comme le montre son aire de répartition (Figure 3). Il semblerait que la catadromie soit facultative et qu'une part des individus effectue leur phase de croissance en mer (Tsukamoto 1998). L'anguille européenne est actuellement considérée comme une espèce menacée, elle est inscrite depuis 2007 en annexe II de la « Convention on International Trade in Endangered Species » (CITES). (Acou et al., 2010)

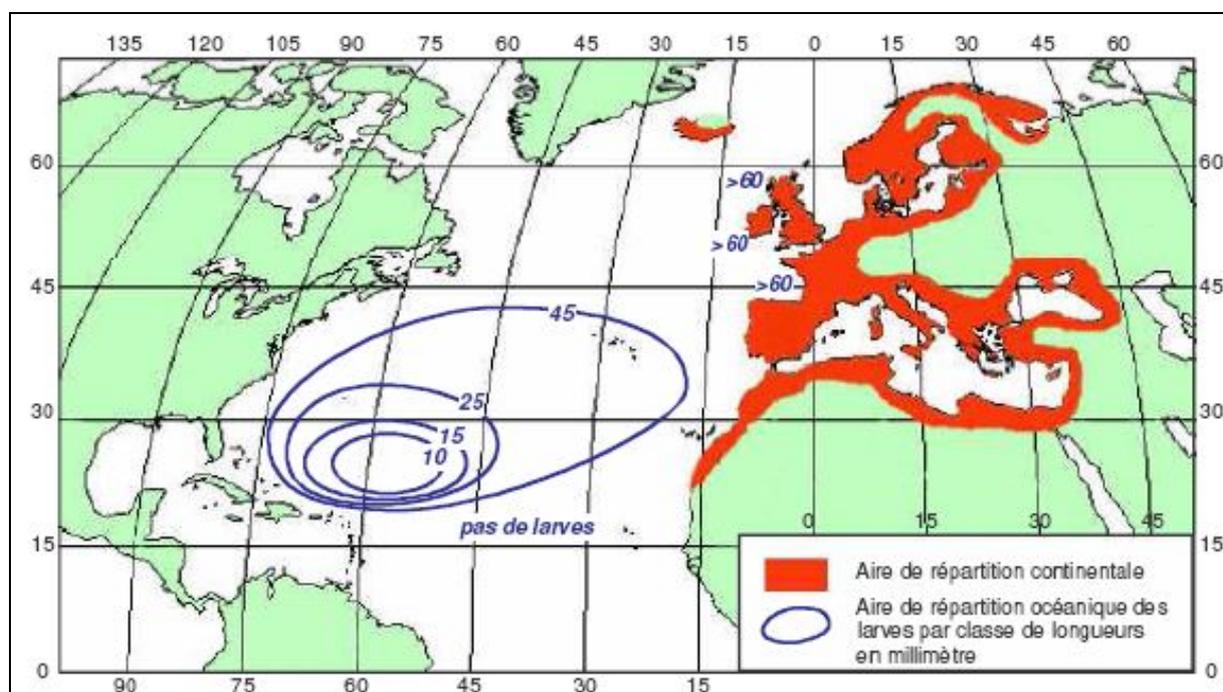


Figure 3 : Aire de répartition continentale et océanique de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) (Adam, 1997)

⁴ Catadrome : se dit d'un poisson qui vit et se développe en eau douce mais qui naît et se reproduit en mer.

2.1.2 Aire de répartition

Dans la famille des Anguillidae, l'anguille européenne *Anguilla anguilla* est l'espèce qui présente l'aire de répartition la plus vaste. En zone continentale, l'aire s'étale dans la majorité des pays côtiers d'Europe et d'Afrique du Nord. L'anguille peut coloniser l'ensemble des milieux connectés à la mer : eaux saumâtres (baies, fjords, lagunes, estuaires), milieux dulcicoles lotiques (fleuves, rivières, torrents), et lentiques (lacs, étangs, canaux), seules les limites physiques (obstacles à la migration) semblent restreindre l'aire de répartition vers l'amont (Adam, 1997). La partie marine de l'aire de répartition de l'espèce n'a été découverte que tardivement, elle a révélé la présence d'un chevauchement des aires de répartitions des larves d'anguilles européennes avec celles de l'anguille américaine, *Anguilla rostrata* (L, 1758) (Schmidt, 1925). Ainsi, une cartographie de la distribution des larves des deux espèces a pu être dressée et permet, compte tenu des gradients de longueurs totales des individus capturés, de localiser les aires de pontes hypothétiques des anguilles européennes et américaines en mer des Sargasses. Malgré la proximité supposée des aires de ponte et la ressemblance physiologique et morphologique des deux espèces, les aires de répartition se distinguent nettement (Schmidt, 1925). A noter qu'aucun œuf ou adulte n'a jamais été capturé dans l'aire de frai présumée (Nilo & Fortin, 2001). La population d'anguilles européennes est considérée comme panmictique c'est-à-dire, qu'il n'existe qu'une seule aire de reproduction et que la population est homogène du point de vue génétique. (Dannewitz et al., 2005)

2.1.3 Cycle de vie

Le cycle de vie (Figure 4) complexe de l'anguille est longtemps resté mystérieux jusqu'à l'étude de Schmidt, 1925. En effet, nombres d'hypothèses ont auparavant été proposées. Par exemple, selon Linnaeus, les anguilles étaient vivipares (Sinha et Jones, 1975). Il faut attendre 1654 pour que Redi émette l'hypothèse d'une reproduction marine. Et c'est en 1896, lors des travaux de Grassi et al que le lien entre la larve leptocéphale et l'anguille a pu être démontré. (Bertin, 1951). Malgré tout, des zones d'ombre restent présentes. En effet, le cycle biologique de l'anguille reste complexe et nécessite encore des recherches scientifiques (Adam et al., 2008).

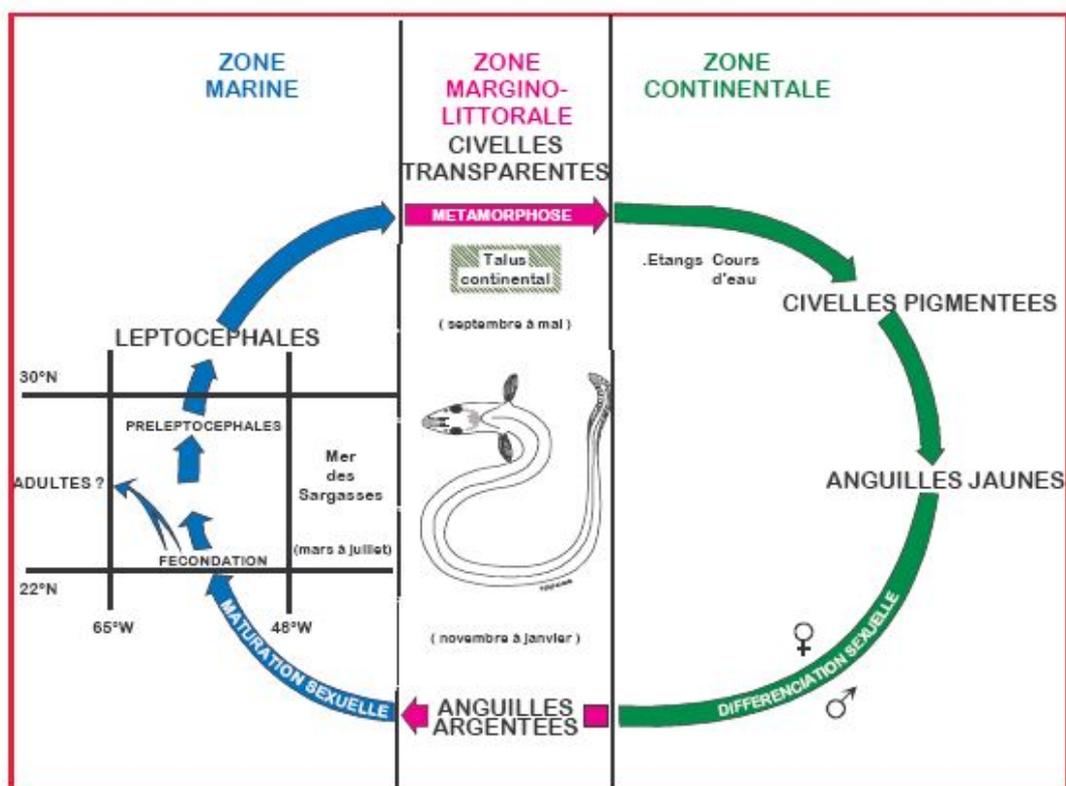


Figure 4 : Cycle biologique de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*). (Adam, 1997)

Dans ce rapport, les stades embryon, larve leptocéphale, civelle et anguilllette ne seront pas développés, une attention particulière sera portée sur les stades « anguilles jaunes » et « anguilles argentées », seuls stades exploités par la pêche professionnelle présente sur le lac de Grand-Lieu.

2.1.4 L'anguille européenne une espèce « plastique »

L'anguille Européenne est une espèce avec une importante variabilité des traits d'histoire de vie à l'échelle de l'aire de distribution mais aussi au sein d'un milieu de croissance. C'est une espèce plastique qui s'adapte à de nombreux environnements et qui au cours de sa longue période de croissance peut subir de nombreuses variations environnementales et perturbations anthropiques (Boulenger 2014). En fonction du milieu colonisé et de sa localisation, les individus vont interagir avec leur environnement ce qui va influencer la dynamique de population (mortalité, migration, croissance) et la définition de leurs traits d'histoire de vie (sexe, âge à maturité, fécondité,...). Ainsi en fonction du milieu colonisé, une lagune méditerranéenne hypereutrophe ou un lac irlandais oligotrophe, cela modifie considérablement la dynamique de la sous population : principalement des

mâles qui sont matures très tôt (3-5 ans) dans le premier cas, et des femelles âgées (> 25 ans) mais très fécondes dans le second.

De ce point de vue, le lac de Grand Lieu semble très intéressant, car c'est un milieu reconnu pour être productif (beaucoup de ressource trophique). Il semblerait donc que la croissance y soit rapide. Ceci en fait un site d'étude particulièrement intéressant pour le stock (turn over important, ce qui signifie que le milieu produit vite et en grande quantité des anguilles argentées). Cet aspect doit être pris en compte dans la gestion car il faut peu d'années pour avoir un retour sur investissement (une augmentation du recrutement par gestion et ou des manœuvres d'ouvrages pourraient rapidement augmenter la production de géniteurs).

2.1.5 Stade anguille jaune

Le stade « anguille jaune » est caractérisé par une phase de croissance des anguilles en milieu continental ou côtier. Elles adoptent un comportement autonome et se sédentarisent dans les zones saumâtres, marais, cours d'eau et lacs. Il faut noter que le sex-ratio est densité dépendant : dans les zones à fortes densités d'individus, la prédominance des mâles sur les femelles est observée. (Parsons et *al.*, 1977 ; Aprahamian, 1988 ; Acou et *al.*, 2009). Au niveau du développement sexuel, l'ovogénèse et la spermatogénèse ont lieu dans la même gonade à des stades de croissance différents. En effet, l'ovogénèse se déroule vers 14 cm alors que la spermatogénèse plutôt vers 18 cm. Il s'agit donc d'une phase hermaphrodite suivi d'une phase de différenciation sexuelle définitive. (Bertin, 1951). L'environnement et les pressions de compétitions intra et interspécifiques jouent un rôle dans cette différenciation. Ainsi dans un milieu où les pressions sont fortes (densité élevée, fortes compétitions ...), la proportion de mâles est significativement plus élevée. Ce constat est validé dans les populations d'élevage où les sex-ratios sont très déséquilibrés en faveur des individus de sexe masculin (Egusa, 1979 ; Holmgren, 1996).

2.1.6 Stade anguille argentée

Au stade « anguille argentée » les individus vont évoluer tant physiquement qu'au niveau de leur comportement. En effet, ce stade est caractérisé par d'importantes modifications morpho-anatomiques des anguilles qui vont leur permettre d'entreprendre la traversée de l'océan Atlantique vers la mer des Sargasses (Durif, 2003 ; Acou et *al.*, 2005). Ces modifications consistent en un changement de coloration (teinte argentée de la partie ventrale), une pigmentation de la ligne latérale (Tesch, 1977), un accroissement de la taille de l'œil (Pankhurst, 1982) et de la nageoire pectorale (Klein Breteler et *al.*, 2007 ; Acou et *al.*, 2005). La technique utilisée pour identifier un individu comme « argenté » est le diamètre de l'œil, avec un calcul de l'index oculaire (IO). Ce paramètre reste difficile à relever avec précision (Acou et *al.*, 2005). Il existe d'autres protocoles plus simples d'exécution, pour caractériser l'argenteure et qui incluent les trois paramètres suivants : une

différenciation de la ligne latérale, un œil de grande taille ainsi qu'un net contraste entre le dos et le ventre de l'animal. Ainsi si l'une des trois conditions n'est pas remplie alors l'individu est considéré comme étant une anguille jaune ou en cours d'argenture (si seulement deux de ces critères sont réunis).

Le passage du stade d'anguille jaune à argentée est également marqué par un changement en termes de nutrition, l'anguille argentée cesse de s'alimenter et vie sur ses réserves (Bertin, 1951 ; Sinha et Jones, 1975 ; Tesch, 1977). De plus, la vessie gazeuse des individus argentés se modifie afin de pouvoir supporter des profondeurs élevées pouvant atteindre 2000 mètres lors de leur migration (Robins et *al.*, 1979).

La période de dévalaison en France se situe principalement en automne / hiver mais elle peut s'effectuer toute l'année (Adam et *al.*, 2008). Il faut noter que les mâles (plus jeunes et de plus petites tailles que les femelles (male < 40 cm)) sont les premiers à dévaler (Acou et *al.*, 2005, Melia et *al.*, 2006 ; Acou et *al.*, 2003). De nombreux paramètres jouent un rôle sur le déclenchement de la dévalaison : la température, le débit, la conductivité, la pression atmosphérique et les rythmes lunaires influencent grandement l'apparition de cette migration (Gosset et *al.*, 2000 ; Durif, 2003). En effet, une température de l'eau qui diminue (Haro, 1991 ; Boubée et *al.*, 2001), une période lunaire comprise entre le dernier quartier et la nouvelle lune, un temps couvert, une forte turbidité (Todd, 1981 ; Deelder, 1984), des faibles luminosités (Durif, 2003), un fort débit d'eau (Vollestad et *al.*, 1994), avec de faibles pressions atmosphériques (Acou et *al.*, 2008), sont autant de conditions favorables à la migration des anguilles.

La réussite de la migration nécessite des conditions environnementales particulières et un développement physiologique adapté des individus. Les multiples altérations que peuvent subir les anguilles pendant leur phase de vie continentale sont autant de risques d'échec de la migration : les mécanismes d'orientation servant au retour vers la mer des Sargasses dépendent eux-mêmes de mécanismes physiologiques complexes qui doivent absolument s'exprimer (Adam et *al.*, 2008).

2.2 Pressions qui s'exercent sur les anguilles

De nombreuses pressions s'exercent sur les anguilles et ceci à tous les stades de leur cycle de vie. C'est-à-dire, de l'œuf en mer à l'anguille argentée (géniteur prêt à pondre), en eau douce ou saumâtre puis en mer. Ces pressions sont de deux types, naturelles (prédation, parasitisme...) et

d'origines anthropiques (altération de la continuité écologique et des habitats, pollution, exploitation par la pêche légale et illégale...).

2.2.1 Principales pressions d'origine naturelle

2.2.1.1 La prédation aviaire (*Grand cormoran et Héron cendré*)

L'avifaune et plus particulièrement les populations de grands cormorans (*Phalacrocorax carbo*), espèce piscivore migratrice présente en France durant la période hivernale et sédentaire sur certaines zones, jouent un rôle significatif dans la prédation naturelle des populations d'anguilles. Les populations hivernantes de cormorans ont grandement augmentées en France depuis les années 80. Loïc Marion relève une augmentation de 600 % en 22 ans, passant de 14000 individus en 1981 à plus de 89 000 en 2003 au niveau national (Fonteneau et al., 2004). L'augmentation persiste puisque plus de 99 000 individus sont recensés en 2007 au niveau national (Marion, 2014).

Des études montrent que les individus les plus prédatés, par les cormorans, sont généralement de taille inférieure à 20 cm mais pouvant aller jusqu'à 60 cm (Le Louarn, 2003 ; Marechal, 2004 et Carss et Ekins, 2002). L'alimentation journalière moyenne d'un cormoran s'élève 340g par jour, avec un prélèvement compris entre 200g et 15 Kg par jour et par hectare d'après la littérature (Keller, 1995 ; Engström, 2001).

Autre piscivore, le héron cendré (*Ardea cinerea*) bien que 6 fois moins habile que le cormoran, il aurait besoin de 240 à 300 g de poisson par jour (Marion, 1990). Même si la part en anguille semble faible par rapport à celle du cormoran, de l'ordre de 1 pour 10, son prélèvement peut être, dans des zones où sa densité est élevée, significatif (Baisez et Laffaille, 2005).

Le lac de Grand-Lieu fait partie des zones où les populations de cormorans et d'hérons sont les plus importantes d'Europe avec 505 couples en 2000 (Dufland et al., 2006) et 683 couples en 2012 respectivement (Carpentier et al., 2009, Marion, 2014).

2.2.1.2 Le parasitisme (*Anguillicoloides crassus*)

Le parasite *A crassus* est un nématode originaire du Sud-Est asiatique et endémique de l'anguille japonaise (*Anguilla japonica*). Il a été introduit en Europe, dans les années 1980, avec des civelles destinées à l'élevage. Les premiers cas d'infections d'*A crassus* en Europe furent observés par Neumann en 1985 sur des anguilles de l'Ems et de la Weser en Allemagne (Neumann, 1985). De nos jours, ce parasite est présent dans l'ensemble de l'aire de répartition de l'anguille européenne. En effet, de nombreuses études en font référence, en Allemagne (Koops et Hartmann, 1989), en Suède

- Matériels et méthodes -

(Hoglund et *al.*, 1993), en Grande Bretagne (Kennedy et Fitch, 1990), en Italie (Can Estri-Trotti, 1987), en Espagne (Belpaire et *al.*, 1989) et en France (Baisez, 2006).

Cet endoparasite de l'anguille se développe dans la paroi de la vessie natatoire gazeuse de l'anguille. L'infestation naturelle a lieu par voie trophique. En effet, lors de l'ingestion d'hôtes paraténiques⁵ tels que la carpe commune (*Cyprinus carpio*) ou la brème commune (*Abramis brama*) (Székely, 1994) ou d'intermédiaires tel que certains copépodes (*Eucyclops serrulatus*) (Ashworth et Blanc, 1997) les larves *A. crassus* se retrouvent transférés dans l'intestin de l'anguille. Une fois dans l'anguille, les larves traversent la paroi du tube digestif et migrent vers la vessie gazeuse. Ces larves hématophages sont à l'origine d'une inflammation de la paroi de la vessie natatoire. En effet, elles se nourrissent des hématocytes de cette paroi. De ce fait, la vessie natatoire est endommagée (Ashworth et Blanc, 1997), il est constaté une fibrose de la paroi (épaississement) accompagnée d'une perte de gaz (Boetius, 1989 ; Van Willigen et Dekker, 1989). Les individus infestés sont donc moins aptes à la nage, leur endurance ainsi que leur vitesse de nage sont réduites (Sprengel et Luchtenberg, 1991). De plus, de nombreux auteurs ont montré que, les anguilles atteintes d'anguillicolose étaient plus réceptives aux pathologies classiques, que leurs défenses immunitaires étaient réduites. Ils ont constaté également une perte d'appétit, une diminution de la vitalité et un amaigrissement des sujets atteints (Lefebvre et *al.*, 2003).

Il semble que sa propagation soit rapide du fait qu'il possède de nombreux avantages. En effet, il possède une faible spécificité vis-à-vis de ces hôtes intermédiaires, il ne compte pas moins de 16 espèces de Téléostéens pouvant faire offices d'hôtes paraténiques (Thomas et Ollevier, 1992). De plus, il dispose d'une grande fécondité (150 000 œufs par femelle, Amilhat, 2007) et d'une grande capacité de survie (2 semaines en eau de mer, milieu le plus contraignant pour ce dernier, Koie, 1991)

Dans plusieurs études, il est montré que le taux de prévalence du parasite est lié la salinité. En effet, plus le milieu est salé plus le taux est faible. Une étude sur le Rhône signale ainsi des taux d'infestation par *A. crassus* de 52 % dans le delta du Rhône, résultats bien inférieurs à ceux relevés en eau douce qui sont estimés à 77 %. (Lefebvre et *al.*, 2003). De nombreux travaux ont montré l'impact de la salinité et de la température sur la longévité des larves de *A. crassus* (De Charleroy et *al.*, 1989, Kennedy et Fitch 1990, Schippers et *al.*, 1991). Ces auteurs rapportent qu'en eau douce, les larves libres peuvent vivre jusqu'à 3 à 4 semaines, mais leur durée de vie se réduit à 3-4 jours si la salinité du milieu est élevée. D'autres auteurs ont pu montrer que les taux d'infestation par *A. crassus* diminuent en fonction du gradient de salinité ; ils rapportent des taux d'infestation de 90 %

⁵ Hôte paraténique : hôte intermédiaire non nécessaire au cycle de développement du parasite.

- Matériels et méthodes -

et 15 % dans les eaux à faible salinité ($< 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) et à salinité élevée ($> 25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) respectivement. (Sauvaget et *al.*, 2003). La contamination serait plus importante en été qu'en hiver. Plusieurs études expliquent ce phénomène en montrant que d'une part, de très basses températures empêchent le développement du cycle du parasite (Amilhat, 2007 ; Knopf et *al.*, 1998) et d'autre part, les anguilles cessant de se nourrir en hiver diminueraient les risques d'infection. (Amilhat, 2007) De plus, la période durant laquelle l'anguille se nourrit le plus serait d'avril à juin (Gibrat et Nielsen, 1985). Puisque le fait d'ingérer des copépodes ou des poissons étant potentiellement des hôtes intermédiaires est plus susceptible d'arriver durant cette période, il est aisé de comprendre pourquoi le taux de prévalence est plus important en été qu'en hiver.

P. Boury et E. Feunteun ont montré, lors de l'étude en Loire, lors de la campagne 2002/2005 que moins de 6 % des anguilles de Loire étaient indemnes du parasite *A. crassus* (Baisez, 2006). Ces études montraient également que plus de 20 % des anguilles étudiées possédaient un fort niveau de parasitisme (> 7 individus/anguille). Compte tenu de ces résultats, il est légitimement possible de conclure que ces anguilles ont très peu de chance d'arriver à leur lieu de ponte.

Une analyse vis à vis de ce parasite a été réalisée lors de ce projet

2.2.2 Principales pressions d'origine anthropique

2.2.2.1 Altération de la continuité écologique, (ouvrages)

L'altération de la continuité écologique pose un réel problème pour les anguilles. En effet, l'anguille étant catadrome, elle est contrainte de réaliser deux longues migrations durant son cycle de vie. Les ouvrages pouvant perturber sa libre circulation sont susceptibles d'engendrer un retard voire un blocage de la migration (Laffaille et al., 2003). Ainsi, une limitation des habitats à coloniser est observée, si bien que l'aire de répartition de l'anguille européenne aurait ainsi été réduite depuis les années 80, de 7 à 25 %, suivant les zones considérées (Moriarty et Dekker, 1997). Cette perte d'habitat, entraînant une réduction de l'espace et de la nourriture disponible aurait un impact sur la croissance et l'état de santé des anguilles européennes (Machut et al., 2007), ainsi que sur leur survie (Domingos et al., 2006). Les capacités de franchissement de l'anguille étant limitées par rapport aux autres poissons migrateurs, un retard (Boubée et al., 2001) et même un blocage (Smogor et al., 1995) de la migration peuvent être observés lors de la présence d'une succession d'ouvrages. Ce retard ou ce blocage à plusieurs conséquences sur l'anguille. En effet, cela entraîne une densification qui augmente les risques de prédation, de compétition alimentaire (intra et inter spécifique), de modification du sex-ratio (Wiley et al., 2004), de transmissions épidémiologiques et parasitaires, de surpêche... Il faut toutefois rappeler qu'il existe des dispositifs spécifiques adaptés qui tirent profit des capacités d'escalade de cette espèce (Porcher et al., 1992, Legault, A. 1992, Legault, A. 1988). Une gestion adaptée et optimisée des ouvrages est donc très importante pour cette espèce, afin de lui permettre une colonisation optimale du réseau hydrographique disponible à l'amont de ces ouvrages ainsi qu'une migration sans retard. La migration d'avalaison est également à prendre en compte dans le cadre de l'étude de l'impact des ouvrages, car même sans turbine, les ouvrages peuvent poser des problèmes importants (orientation affectée, absence de solution de franchissement, retard de migration...).

Cet aspect sera traité dans cette étude pour essayer de caractériser l'impact potentiel de l'ouvrage de régulation du niveau d'eau du lac de Grand-Lieu sur la migration d'avalaison des anguilles argentées.

2.2.2.2 Altération de la qualité de l'eau (pollutions récurrentes)

Outre les altérations de continuité écologique, il faut rappeler les altérations de la qualité de l'eau telles que les contaminations des milieux par de nombreux polluants récurrents (métaux lourds, hydrocarbures, HAP, hormones, produits phytosanitaires...). Les polluants récurrents de types PCB (Polychlorobiphényle) apparaissent comme des produits lipophiles rémanents, particulièrement abondants dans les sédiments. Les anguilles étant en contact étroit avec ces derniers, elles seraient particulièrement exposées (Larsson, 1984). Les PCB ont également un impact sanitaire sur les populations, en effet, la contamination induit des stress, des déséquilibres hormonaux ainsi que des augmentations de sensibilité aux pathologies (Bruslé, 1994). Mais c'est sur la partie de la population d'anguilles migrantes, notamment lors de la dévalaison puis de la migration que les effets sont les plus importants. En effet, les anguilles en voie de maturation vont remobiliser leurs graisses et donc les PCB piégés dans ces dernières, ce qui va permettre l'expression de la toxicité des composés de types PCB et autres polluants lipophiles. Ainsi, les PCB à des doses sub-létales contribueraient à diminuer le potentiel reproducteur de l'espèce en perturbant le cycle biologique à différents niveaux, comme la migration de reproduction et la reproduction elle-même, en agissant sur la qualité des œufs et les larves ainsi produites. (Tapie, 2006)

2.2.2.3 Altération de l'habitat (chenalisation, rectification du tracé des cours d'eau ...)

De nombreuses altérations peuvent être citées. Ainsi, la chenalisation, des grands fleuves, opérée depuis le 19^{ème} siècle afin d'assurer le transit fluvial des marchandises et de réduire le risque d'inondation est une des causes qui impacte les habitats potentiels. Le canal de la Martinière, situé en bordure du lac de Grand-Lieu, en est un bon exemple : édifié en 1892, il permettait le transit des bateaux marchands de l'estuaire à Nantes en évitant les fonds accidentés de la Loire (bancs de sable...). La chenalisation des cours d'eau, notamment sur les berges, est préjudiciable aux habitats (abris, végétations aquatiques...) et aux espèces piscicoles, dont l'anguille. Il est possible de citer également, la rectification du tracé (linéarisation des cours d'eau, recalibrage) qui pose des problèmes de réductions d'habitats. L'Acheneau, affluent de la Loire, a subi de nombreuses modifications de son tracé (Figure 9 et Figure 10). Ainsi, en 1754, la construction du canal de Buzay est achevée. En 1882, construction du canal de la Martinière. En 1960, recalibrage de l'Acheneau et construction du canal de Guerlain (De Bonviller, 2014). Globalement l'altération de l'habitat consiste en un phénomène artificiel d'homogénéisation des surfaces accessibles aux espèces qui se traduit par une perte de diversité, de production et d'abris dans le milieu.

2.2.2.4 Prélèvement par pêche (professionnelle, amateur et braconnage)

La pêche professionnelle, très réglementée, est autorisée en France sur tous les stades de l'anguille. Ainsi la pêche à la civelle, réservée aux professionnels, représentait un prélèvement de plus de 2000 tonnes avant les années 80 d'après le rapport du CIEM/WGEEL de 2008 alors que les quotas pour 2015/2016 autorisent le prélèvement de 57,5 tonnes dont 60 % destiné au repeuplement (ICES, 2008). Une réduction de plus de 50 % du nombre d'ayants droits de pêche à la civelle a été observée sur la période 2006/2015 (PGA - Rapport de mise en œuvre, Juin 2015). Pour ce qui est des anguilles jaunes et argentées, les prélèvements nationaux s'élevaient à 3500 tonnes dans les années 80 à moins de 1500 tonnes après 1990 (ICES, 2008). Pour l'anguille argentée, la pêche n'est autorisée que pour les professionnels depuis 2007 (PGA – Volet National : France). Pour ce qui est de la pêche amateur, il est impossible d'obtenir des données sur le nombre de pêcheurs ciblant l'anguille. Le GRISAM a tenté de faire une estimation du nombre de pêcheurs amateurs ciblant ou pêchant l'anguille. Cette dernière est évaluée à 147 000 pêcheurs de loisir et leurs captures représenteraient entre 500 et 2000 tonnes. En tenant compte de l'incertitude qui existe sur les estimations, le nombre total « d'équivalents anguilles argentées » prélevées se situerait entre 15 et 43 millions d'individus (Briand et *al.*, 2008). Pour ce qui est du braconnage, il cible essentiellement le stade civelle dans la zone tidale des rivières pour l'exportation. Leur nombre et le niveau de leurs captures ne sont pas connus.

2.3 Situation géographique de l'étude

2.3.1 La Loire

La Loire est le plus grand fleuve français, avec une longueur de plus de 1000 Km (1 006 Km exactement). Il trouve sa source au sud-est du Massif Central, au niveau du mont Gerbier-de-Jonc en Ardèche. La Loire traverse ensuite 12 départements. Elle finit par déboucher vers l'océan Atlantique au niveau de St Nazaire en Loire-Atlantique (44), dans l'ouest de la région des Pays de la Loire. Son bassin versant de 117 000 km² occupe plus d'un cinquième du territoire français. Son débit moyen annuel de 931 m³/s (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2012) est supérieur à celui de la Seine (563 m³/s) (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2012) mais inférieur à celui du Rhône (1710 m³/s) (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2012).

2.3.2 Le bassin versant du lac de Grand-Lieu

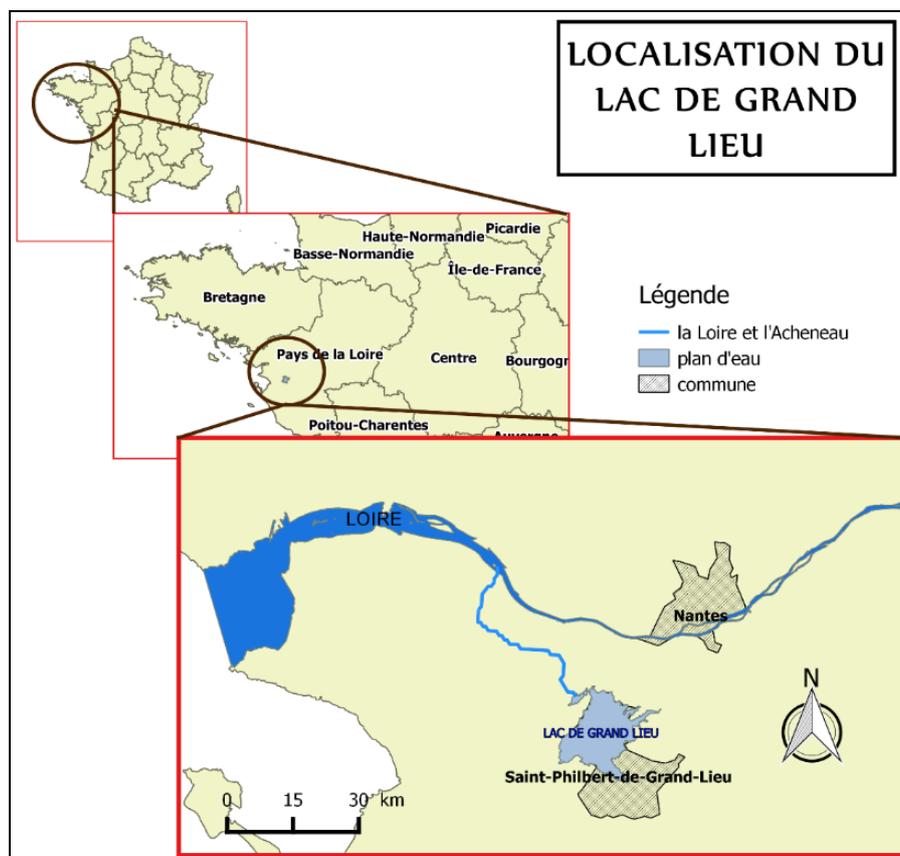


Figure 5 : Localisation géographique du lac de Grand-Lieu (D.SIMON)

Le Lac de Grand-Lieu via l'Acheneau est un affluent de la Loire en rive gauche, son bassin versant est drainé par deux cours d'eau que sont la Boulogne et l'Ognon. La Boulogne avec un linéaire de 90 Km et une largeur moyenne de 7 m possède une surface en eau de 63 ha. L'Ognon possède une surface en eau de 21.6 ha avec des dimensions plus réduites, 48 km de linéaire pour 4.5 m de largeur moyenne. Il faut également ajouter à cela les deux affluents de la Boulogne, la Logne et Issoire qui occupent à eux deux une surface en eau de près de 22 ha. Le cumul des surfaces de ces affluents représente une surface en eau d'environ 106 ha. Ainsi le lac de Grand-Lieu représente à lui seul près de 97 % (3900 ha en été) de la surface en eau de cet hydrosystème. (Figure 6)

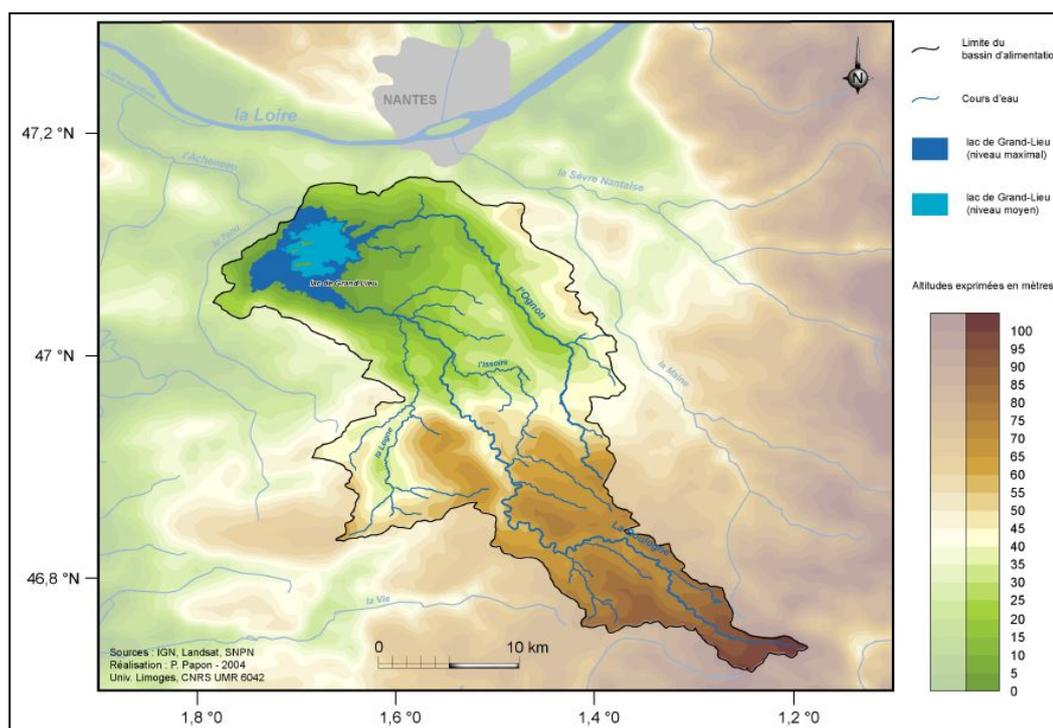


Figure 6 : Cartographie du bassin versant du lac de Grand-Lieu. (Papon, 2004)

2.3.3 Le lac de Grand-Lieu

Le lac de Grand-Lieu, situé à une vingtaine de kilomètres de Nantes (Figure 5), occupe une surface de 6500 ha en hiver, ce qui en fait le plus grand lac naturel de plaine français. Il est alimenté par un bassin versant de 830 km². Il possède deux caractéristiques notables : une grande variabilité de sa surface en eau selon la période de l'année de 39 km² (soit 3900 ha) en été à environ 65 km² (soit 6500 ha) en hiver, ainsi qu'une faible profondeur (de 0,7 à 1,2 m en été et de 3 à 3,5 m en hiver) (Adam, 1997). Sa surface en eau, de 3900 ha minimum ne représente pas moins de 97 % celle de l'ensemble des cours d'eau de son bassin versant, **ce qui laisse supposer que l'essentiel de la production d'anguille de ce bassin versant se fait sur le plan d'eau**. Gilles Adam estime suite à des échantillonnages que l'essentiel de la production est effectivement réalisé dans le plan d'eau (Adam, 1997).

Le lac de Grand-Lieu est reconnu au niveau mondial pour sa richesse biologique en étant notamment classé comme site Ramsar en 1995, en partie comme Réserve Naturelle Nationale (RNN) depuis le 10 septembre 1980 et Réserve Naturelle Régionale (RNR, Figure 8). Cet ensemble lacustre est constitué de différents milieux : forêts flottantes, roselières, prairies inondables, eau libre (Figure 7). Ce site constitue un habitat remarquable pour l'anguille sur l'entièreté de sa surface. Sa formation est la conséquence d'une série d'effondrements durant le quaternaire et du tertiaire. Le fond est composé, à l'ouest d'alluvions, à l'est de roche et de sable.

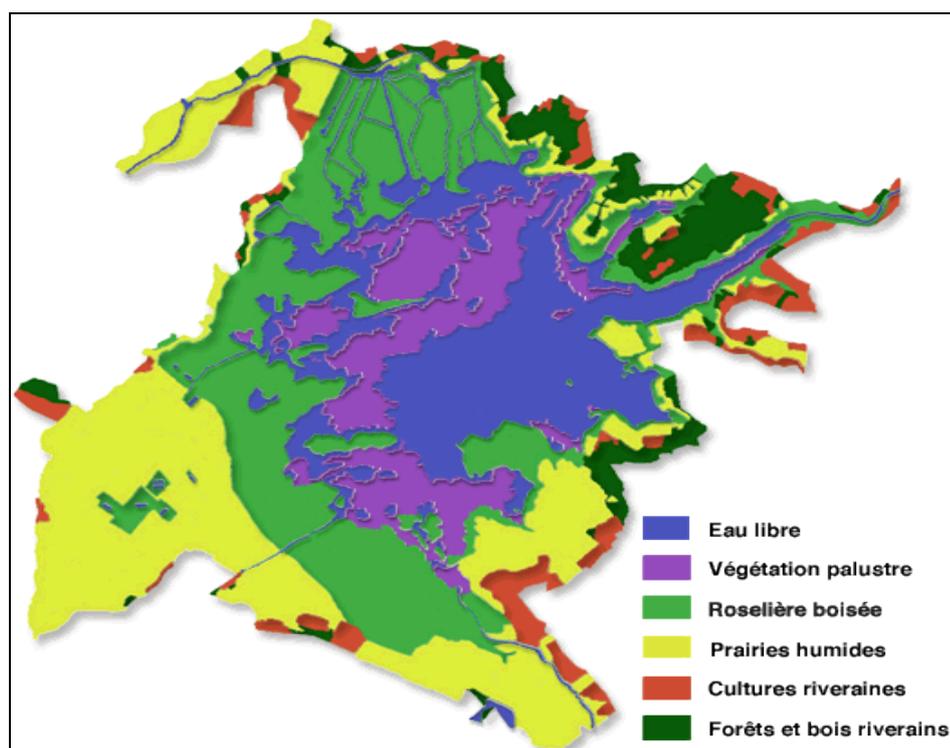


Figure 7 : Zonation des différents milieux (SNPN)

Depuis 1947, le lac appartenait à la Société Civile Immobilière de Grand-Lieu. Une grande partie du plan d'eau et ses alentours furent rachetés en 1960 par Jean-Pierre Guerlain. Ce dernier entreprit la conservation de la zone humide en stoppant son assèchement entrepris par la SCI. C'est en 1977 qu'il céda le lac à l'Etat, sous la condition de la création d'une réserve naturelle et d'en confier la gestion à la SNPN (Société Nationale de Protection de la Nature, également gestionnaire de la réserve Camarguaise). La réserve naturelle nationale fut créée en 1980 et la gestion confiée à la SNPN en 1985. En plus de la création d'une réserve naturelle nationale, la zone bénéficie d'un classement en Z.I.C.O (Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux) et ZNIEFF de type 1 (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique, en O.N.Z.H. (Observatoire National des Zones Humides). L'ensemble des statuts de protection a pu être cartographié et est présenté en Figure 8.

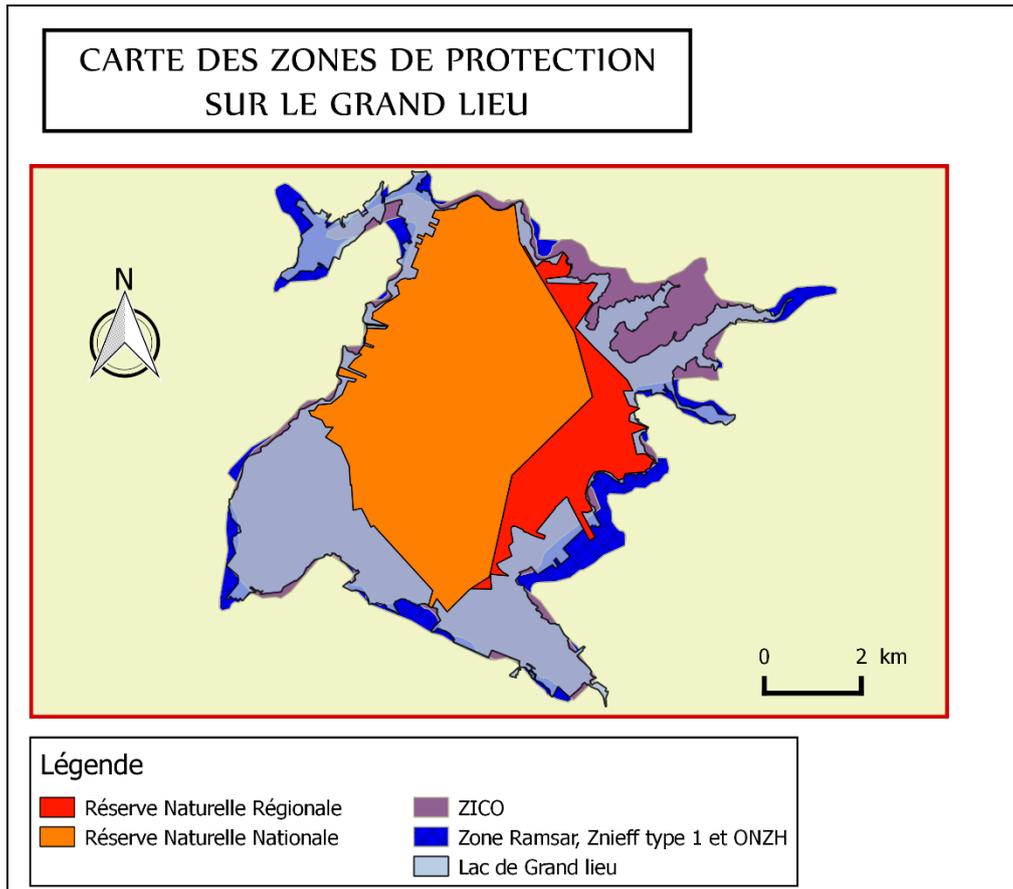


Figure 8 : Localisation des zones de protection sur le lac de Grand Lieu (SNPN)

2.3.4 Un hydrosystème anthropisé et complexe

Via l'Acheneau, les eaux du lac rejoignent l'estuaire de la Loire quelques 25 km en aval sur un très faible dénivelé. La mise en place d'une écluse permet sa régulation. Les eaux de l'Acheneau sont conduites à la Loire via le canal de la Martinière. Le canal de la Martinière est un canal latéral à la Loire situé en rive sud, s'étendant de la commune du Pellerin en amont à la commune du Carnet en aval. Sa construction débuta en 1862 et s'acheva 30 ans plus tard en 1892. Sa création fut entreprise à cause des problèmes de navigation, qui régnaient sur la Loire, liés aux importants mouvements de sédiments du fleuve. Long de 15 kilomètres, il permit de doubler le trafic maritime, ce qui a permis au port de Nantes de se développer. La création de nombreuses écluses au sein du canal entrava la remontée des bateaux. C'est ainsi que 10 ans après sa création, le canal de la Martinière fut abandonné dans sa fonction de canal de navigation. Il devint un cimetière à bateaux, tout d'abord des grands voiliers puis des bateaux à vapeur qui étaient désarmés sur place après la seconde guerre mondiale. Le canal fut ensuite déclassé comme voie maritime en 1959.

Le canal possède aujourd'hui de nombreux usages :

- Contrôle les débits entre le fleuve et le lac de Grand-Lieu
- Empêche l'entrée d'eau saumâtre à l'intérieur de l'hydrosystème
- Permet d'évacuer d'importantes quantités d'eau
- Alimente les zones humides du Pays-de-Retz en eau douce, lors des étés secs,

Il possède 4 écluses (Figure 9) :

- L'écluse du Carnet qui empêche les eaux saumâtres en provenance de l'estuaire de rentrer dans le canal
- Le vannage de la Martinière qui fait entrer l'eau de la Loire par surverse, évitant ainsi aux sédiments vaseux de rentrer et sédimenter dans le canal. De plus, il permet de dévaser le canal.
- Les ouvrages des Champs-Neufs dotés d'un siphon, permettent une régulation différenciée des eaux entre les marais de Vue et celles du canal
- Le vannage de Buzay qui permet l'entrée et la sortie d'eau vers la Loire via la percée de Buzay.

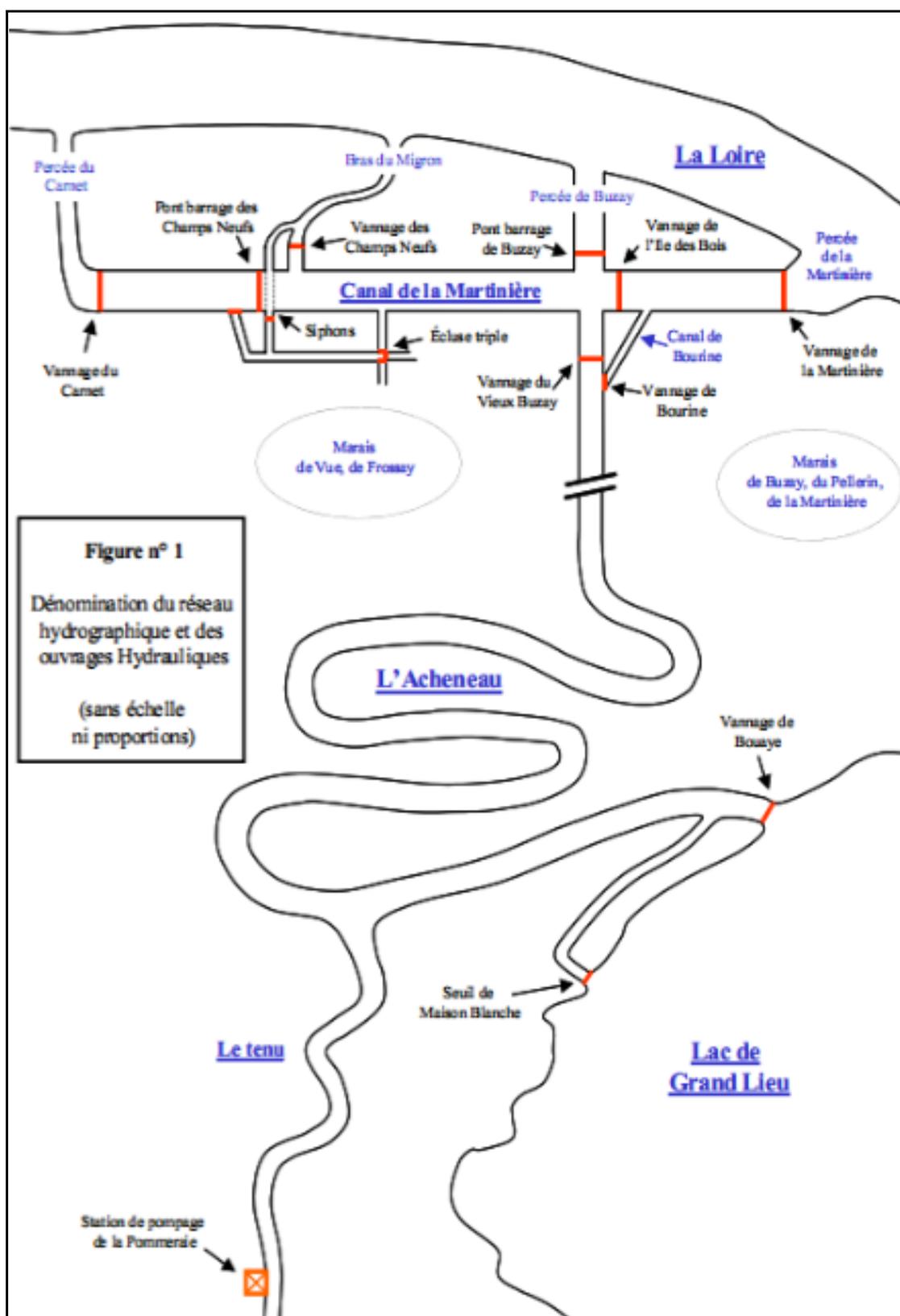


Figure 9 : Schématisation du réseau hydraulique entre le lac de Grand-Lieu et la Loire (sans échelle ni proportion). (SAH Sud-Loire).

2.3.5 *Historique de l'anthropisation du site*

Depuis plus de 2 siècles, le fonctionnement hydraulique du lac de Grand-lieu a été fortement modifié par de nombreux aménagements, dont les principaux sont cités ci-dessous :

- creusement du canal du Buzay à la fin du XVIIIe siècle, avec construction du vannage du même nom; l'objectif était de stopper les remontées dues à la marée vers le lac ;
- construction, en 1840, de la digue reliant les villages de Bouaye et de Saint-Mars-de-Coutais (actuelle RD 264) : le lac perd ainsi une partie de sa superficie et son troisième affluent, le Tenu, qui rejoint alors directement l'Acheneau, en aval du lac.
- suppression des seuils rocheux situés sous l'Acheneau, entre 1954 et 1962 ; et construction du vannage de Bouaye ; ces travaux signent le début de l'artificialisation du fonctionnement hydraulique du lac en permettant notamment la maîtrise des niveaux ;
- creusement du canal Guerlain en 1962, qui devient alors le principal exutoire du lac, au détriment du canal de l'Etier ;
- de 1984 à 1986, la société du canal de Buzay rectifie et agrandit la douve de ceinture du lac, ce qui accélère l'écoulement des prairies humides du Sud-Ouest.

La gestion des niveaux d'eau du lac de Grand-Lieu est donc artificielle depuis le début des années 60.

Cette gestion est régie par la réglementation, et notamment par un arrêté préfectoral, qui définit la gestion et les côtes du plan d'eau au cours de l'année au droit du barrage de Bouaye. C'est le Syndicat d'Aménagement Hydraulique Sud Loire (SAH) qui gère les côtes du lac et applique la réglementation. A titre d'information, les premières prescriptions de gestion hydraulique du lac datent d'un arrêté de 1996. Dans les grandes lignes, l'hydrologie artificielle actuelle du lac de Grand lieu se caractérise par :

- une baisse des niveaux au printemps moins rapide que celle due à l'hydrologie naturelle,
- une augmentation des cotes estivales (plus élevées que ce qui serait « la normale »),
- de moindres variations intra annuelles (au printemps et en été notamment) et interannuelles.

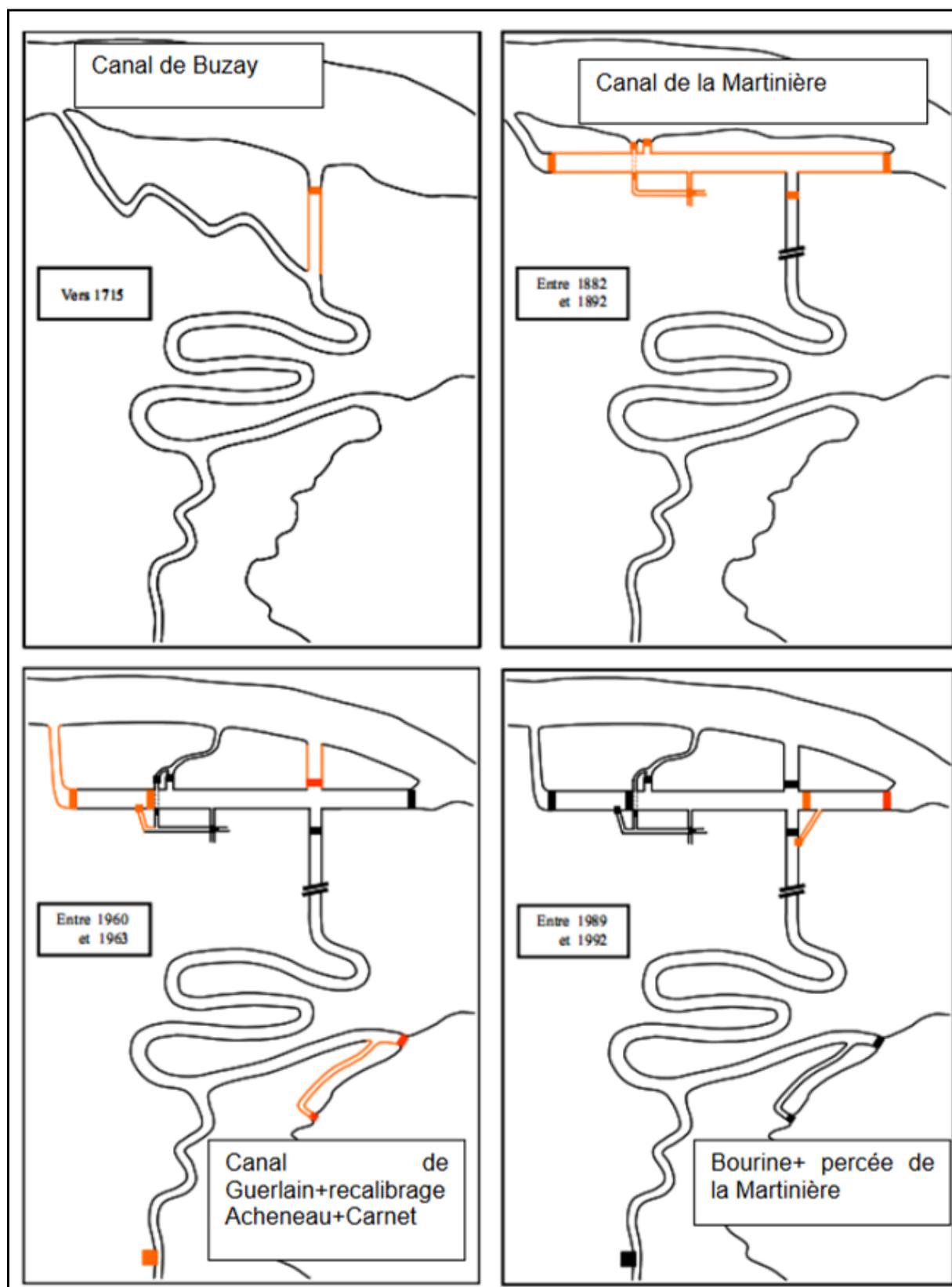


Figure 10 : Schéma de l'évolution du niveau d'anthropisation du site (CARAGUEL JM)

- Matériels et méthodes -

2.3.6 Une gestion complexe de l'eau

La présence de nombreux ouvrages offre la possibilité d'une gestion fine du réseau hydraulique permettant de concilier les nombreux usages.



Figure 11 : Gestion d'été du reseau situé à l'aval du lac de Grand Lieu (SAH)



Figure 12 : Gestion d'hiver du reseau situé à l'aval du lac de Grand Lieu (SAH)

- Matériels et méthodes -

2.3.7 Présentation de l'ouvrage de régulation du niveau d'eau du lac de Grand Lieu (vannage de Bouaye)

Cet ouvrage signe la sortie du plan d'eau. Dans le cadre de la migration d'avalaison il est presque impératif que les anguilles passent par ce point pour rejoindre la Loire (une solution d'échappement est également possible via le seuil de « Maison Blanche » sous certaines condition de niveau d'eau). La gestion de cet ouvrage devient dès lors primordiale pour assurer la transparence migratoire.



Figure 13 : Vue de coté de l'ouvrage de Bouaye (FISH PASS)



Figure 14 : Vue aval de l'ouvrage de Bouaye (FISH PASS)

L'ouvrage est constitué de 5 vannes levantes (4 vannes de 4 mètres et une vanne central de 5.2 m) qui régulent le niveau d'eau du lac de Grand Lieu et permettent une gestion du débit sortant

- Matériels et méthodes -

du plan d'eau sur la période de dévalaison. Les cotes de gestion ainsi que la manière de gérer l'ouvrage sont imposées par le règlement d'eau en vigueur et appliquées par le gestionnaire : le SAH sud Loire.



Figure 15 : Vue aérienne du vannage de Bouaye (IGN)

La cote du lac est gérée par le vannage de Bouaye tandis que le seuil de Maison Blanche permet d'augmenter la capacité d'évacuation à partir de la cote 1.35 IGN69 (1.80 CB). Le débit évacué par le seuil correspond à une proportion inférieure à 10 % du débit total (ISL).

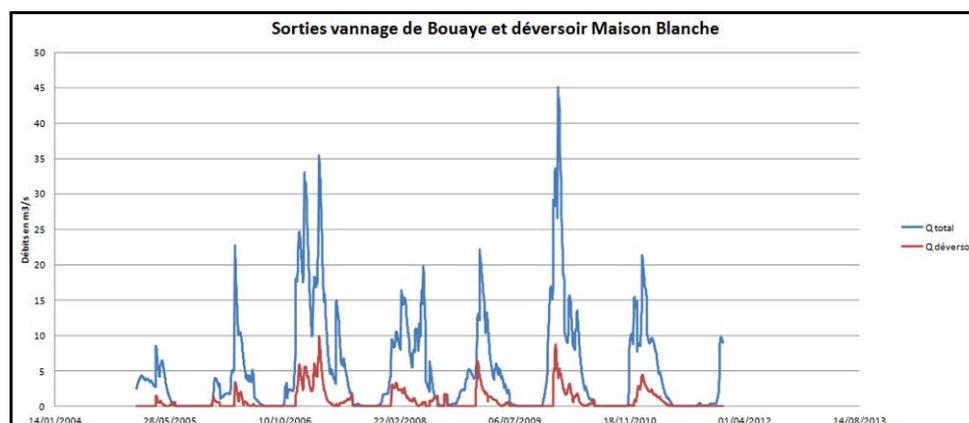


Figure 16 : Débit de sortie des vannes de Bouaye- Modélisation hydraulique (ISL)

2.4 La pêcherie du lac de Grand-Lieu

2.4.1 *Historique*

La pêche sur le lac de Grand-Lieu est une activité ancestrale, il est rapporté des traces de pêcherie formalisée datant de 1143 (Adam, 1997). La pêche à l'anguille y est pratiquée depuis des siècles et constitue encore aujourd'hui, 80 % à 90 % du chiffre d'affaires des entreprises de pêche de Grand-Lieu. Les effectifs de pêcheurs n'ont cessé de décroître depuis le début du siècle. En effet, 120 hommes pratiquaient la pêche en 1920 (Adam, 1997), 15 en 1994 (Adam et Elie, 1994), 8 de 1997 à 2007 (com pers) et 7 pêcheurs sont actuellement membres de la Société Coopérative des Pêcheurs du lac de Grand-Lieu et exercent sur le plan d'eau depuis 2007.

2.4.2 *Engin de pêche*

Actuellement les pêcheurs utilisent exclusivement le verveux pour cibler l'anguille. Communément appelé verveux, cet engin est l'équivalent de la capétchade méditerranéenne. Il fut introduit sur le lac de Grand-Lieu à la fin des années 70 par un pêcheur et celui-ci est rapidement devenu l'engin principal de la pêcherie. Il s'agit d'un engin passif constitué d'une paradière (généralement de 100 mètres de long mais de longueur variable en fonction des besoins et des contraintes) guidant le poisson vers un enclos triangulaire dont les angles se terminent en pièges (poches, Figure 17). Chaque piège est constitué de 3 goulets de différentes mailles afin de sélectionner la taille des individus recherchés. En effet, la première partie des poches est constituée de filets en mailles 17, la seconde partie en maille de 15 et la partie terminale en maille de 10. Les pièges sont en filets souples maintenus en formes cylindriques par des arceaux.

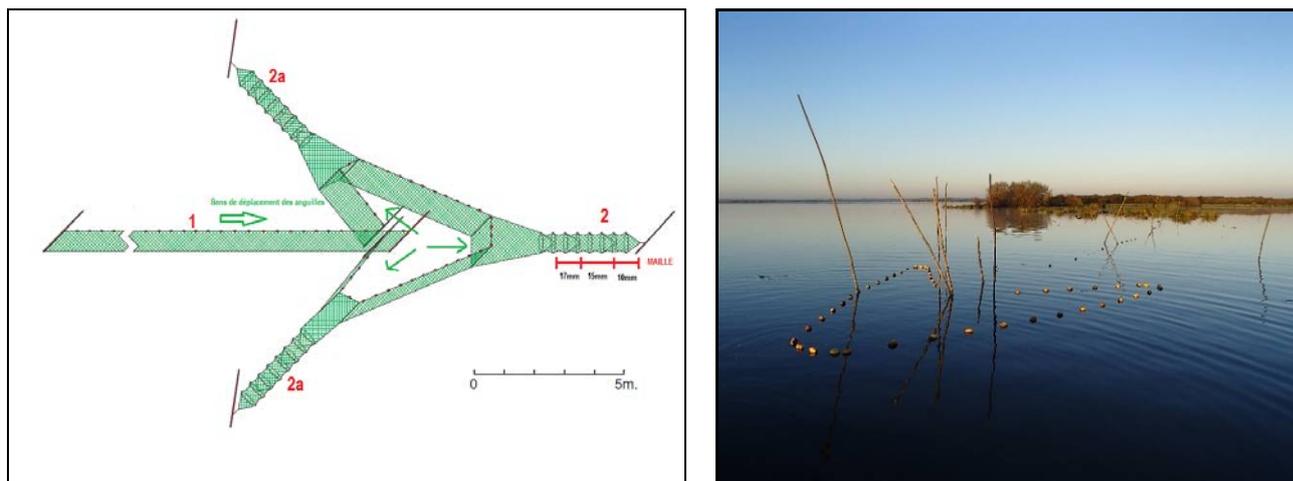


Figure 17 : A gauche, représentation d'un verveux utilisé sur le lac de Grand-Lieu. Les chiffres 1,2 et 2a représentent respectivement, la paradière ou nappe, la poche principale et les deux poches de refus. (G. Adam, modifié par D. SIMON). A droite, photographie d'un verveux en pêche sur le lac de Grand-Lieu. (V. MAZEL)

2.4.3 Pratiques de pêche

Très apprécié des pêcheurs professionnels pour ses qualités de rendement et le bon état des poissons capturés, le verveux demande un certain temps de travail pour la pose et la dépose complète. De plus, l'engin subit de manière récurrente les méfaits des rats musqués, causant ainsi la fuite du poisson piégé. Les verveux sont placés dans des zones comprises entre 60 et 200 cm de profondeur c'est-à-dire que son utilisation est possible sur l'ensemble des parties en eau du lac (voir descriptif des milieux du lac). Depuis l'instauration du verveux comme outil de l'exploitation halieutique, les habitudes ont changé, la nouvelle stratégie a modifié la prospection géographique du lac et la fréquentation des zones en eaux. Les verveux sont installés par les pêcheurs sur un site donné, demeurent en état de pêche durant un certain nombre de jours puis sont déposés ou simplement vidés de leurs captures. Ce nombre de jours de pêche peut varier pour les verveux entre deux extrêmes, 1 et 25 jours selon les périodes annuelles (été ou hiver) et les habitudes de chacun. Généralement, les verveux sont relevés plus souvent en périodes estivales lorsque les eaux sont chaudes ou lorsque les biomasses capturées sont importantes. En moyenne, sur les saisons d'exploitation, les verveux sont levés tous les 4 jours. A la période à laquelle l'étude s'est déroulée, de fin septembre 2015 à mi-janvier 2016, les professionnels ont relevé leurs engins de 2 à 3 fois par semaine. Ce chiffre varie d'une semaine à l'autre mais aussi d'un pêcheur à l'autre. Les 7 pêcheurs du lac se partagent la zone de pêche. Il faut noter que les emplacements (zones) sont propres à chaque pêcheur. Ils doivent, selon la législation de la réserve, indiquer l'emplacement de leurs engins par un drapeau, à fanions à couleurs, propre à chacun. Ces emplacements sont légués au successeur du

- Matériels et méthodes -

pêcheur partant. Il faut noter que la vente d'anguilles est la principale source de revenu des pêcheurs du lac de Grand-Lieu. La pêche à l'écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*) est également pratiquée en complément d'activité. Certains professionnels pratiquent la pêche à l'araignée (filet droit maillant ciblant des espèces comme la brème commune (*Abramis brama*), le sandre (*Sander lucioperca*) ou le brochet (*Esox lucius*)).

2.4.4 Législation de la pêche sur le lac de Grand-Lieu

2.4.4.1 Périodes légales de pêche

La réglementation de l'exercice de la pêche professionnelle sur le lac de Grand-Lieu a évolué, surtout au niveau des périodes d'ouverture de la pêche à l'anguille sédentaire (« jaune »). En effet, comme le montre de Tableau 1 ci-dessous, avant l'instauration du PGA il était possible pour les pêcheurs d'exploiter les deux stades « argenté » et « jaune » toute l'année. Après la mise en place de la législation instaurée par le PGA, la durée de la période de pêche à l'anguille au stade « argenté » a connu une réduction de 71 %. Pour la durée légale de la pêche à l'anguille au stade « jaune » elle a connu une réduction de 42 % en 2009, 50 % en 2010 et 58 % après 2011 par rapport à celle retrouvée avant 2008. La pêche de l'anguille est actuellement fermée 107 jours par an soit 30 % du temps ce qui correspond à une réduction de l'effort de pêche de 30 % sur la période de mise en œuvre du PGA.

Tableau 1 : Historique de la législation instaurant les périodes légales de pêche à l'anguille sur le lac de Grand-Lieu (Source : PGA + Arrêtés, données compilées par D. SIMON)

Année	Période anguille «jaunes»	nombres de jours	Période anguille «argentées»	nombres de jours	Arrêtés
2016	01/04 au 31/08	152	01/10 au 15/01	106	4 Février 2015 (NAT)
2015	01/04 au 31/08	152		106	27 Janvier 2014 (NAT)
2014 à 2011	01/04 au 31/05 puis 01/07 au 30/09	151		106	1 Mars 2013 (NAT)
	106			Règlement CE/1100/2007	
2010	01/04 au 30/09	182			106
2009	01/04 au 30/10	212			106
Avant 2008	Pas de limitation	365	Pas de limitation	365	/

2.4.4.2 Zones légales de pêche

Pour ce qui est des zones de pêches, il existe des restrictions temporaires. En effet, le lac de Grand-Lieu est soumis à la mise en place de réserves durant de courtes périodes. Notamment la mise en réserve de pêche par arrêté préfectoral de la Boulogne et l'Ognon entre le 1^{er} Octobre et le 8 Mai. De plus, plusieurs zones (bassin Petiot, en tant que zone de non-dérangement des oiseaux, le canal de Guerlain et l'Acheneau) sont interdites aux professionnels depuis 2008. (Figure 18)

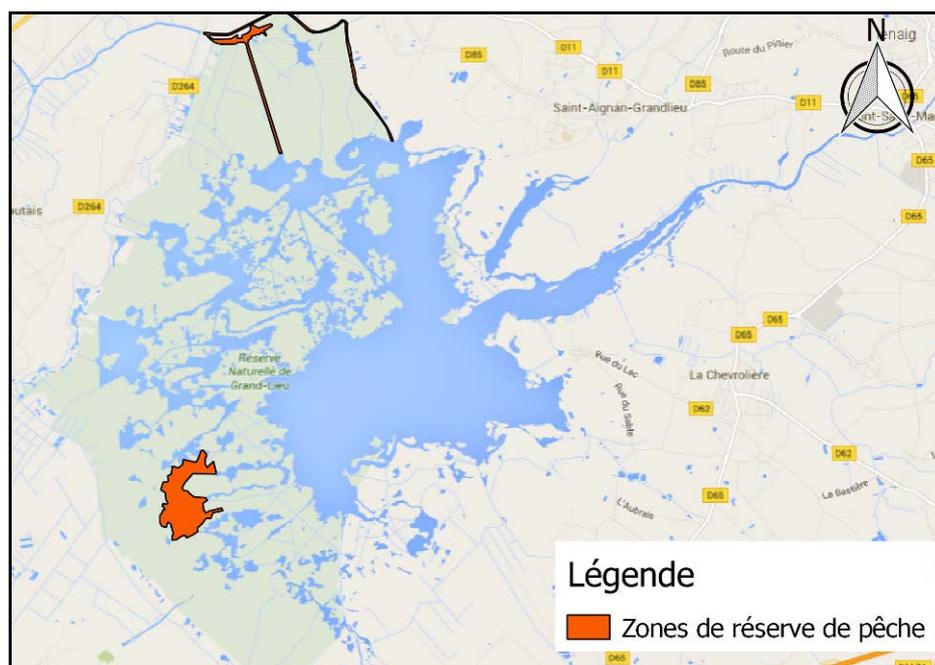


Figure 18 : Localisation des réserves de pêche sur le lac de grand Lieu (D SIMON)

2.4.4.3 Autres réglementations en vigueur

Il faut noter que seuls les pêcheurs membres de la Société des Pêcheurs aux Engins du Lac de Grand-Lieu sont autorisés à pêcher aux engins et filets. Réglementairement, les queues des verveux utilisés par les professionnels doivent avoir une maille minimale de 10 millimètres (arrêté préfectoral du 9 Janvier 2004). Le nombre d'engins autorisé par pêcheur est de 13, la longueur des paradières ne doit pas excéder 100 mètres et ces derniers doivent être séparés par une distance égale à au moins trois fois la longueur du plus long de ces engins » (arrêté préfectoral n°2015/SEE/587).



Figure 19 : Paradière en place sur le lac de Grand Lieu (V MAZEL)

2.5 Suivi de la pêcherie et biométrie

2.5.1 Suivi de la pêcherie

Afin d'obtenir des données précises sur la pêcherie, il a fallu accompagner les pêcheurs lors de leurs sorties. Lors des sorties « terrain », les poids par engin, les localisations précises de ces derniers mais également des échantillonnages de l'eau du lac ont pu être réalisés (conductivité, pH, turbidité). Pour tous les jours de pêche, en l'absence de membres de l'équipe technique, une fiche dite de « pêche » (date de pose et de relève de l'engin, nombre d'engins relevés, nombre de poches relevées (Poches principales, Poches de refus), le poids total de la pêche du jour (Estimé et ou Pesé)) a été proposée et acceptée par les professionnels. Cette dernière a permis de collecter des données avec lesquelles il a été possible de calculer des efforts de pêche et des tonnages permettant d'obtenir des rendements et des CPUE (capture par unité d'effort).



Figure 20 : Tri des anguilles jaunes sur le bateau lors d'une relève de verveux (V MAZEL)

2.5.2 Biométrie (caractérisation de la fraction exploitée)

Lors de certaines sorties de pêche (1 à 2 fois par semaine), une biométrie a pu être faite sur une partie des captures (environ 50 anguilles). Cette biométrie a permis de relever des paramètres morphologiques (taille, poids et stade) qui ont servi à connaître le taux d'argenture, le sex-ratio, le poids moyen par sexe et l'évolution de ces paramètres au cours de la saison de pêche. Ces données, leurs évolutions et leurs utilisations, seront présentées dans la partie résultat. Il faut noter qu'aucune biométrie n'a pu être faite aux semaines 48, 52, 53 et 2. Ceci pour plusieurs raisons : par manque d'individus pêchés durant la semaine 48 (inférieur à 10 anguilles), les semaines 52 et 53 correspondent à des semaines où aucun suivi de pêcheurs n'a pu être réalisé et la semaine 2 correspond à la dernière semaine de la pêche légale. Cette semaine était consacrée au rangement des engins, les pêcheurs estimant qu'il n'y aurait plus beaucoup de capture. Concernant les semaines où aucune biométrie n'a pu être faite (semaines 48, 52, 53 et 2) des moyennes entre les valeurs précédentes et suivantes ont été réalisées pour chaque paramètre (taux d'argenture, poids moyen pour chaque stade, sex-ratio).

Le stade de maturité de l'anguille (argenture) est estimé sur les critères de coloration externe, diamètre oculaire et présence d'une ligne latérale différenciée (Acou et Al., 2005).

Pour évaluer le sexe sans sacrifice, c'est la structure en classes de tailles des individus argentés qui suit une répartition bimodale qui est utilisée. Le premier mode est composé essentiellement de mâles (90 %) et le deuxième exclusivement de femelles (Laffaille et al., 2006). La limite utilisée est fixée préalablement à 450 mm celle-ci sera vérifiée par la suite par observation macroscopique des gonades d'un échantillon d'individus argentés issus des captures par la pêcherie en place sur le lac de Grand Lieu.

2.5.3 Biométrie spécialisée (qualité des géniteurs produits)

Des données de biométrie spécialisée ont également été collectées. Cette biométrie consiste aux relevés de plusieurs paramètres physiques (taille, poids, index oculaire, sexe, présence de lésions externe, parasitisme (vis-à-vis d'*A. crassus*) et âge (par otolithométrie) sur 102 individus achetés aux pêcheurs professionnels.

- Matériels et méthodes -

2.5.3.1 Pathologies externes des géniteurs

L'étude des lésions externes selon le guide de Beaulaton et Penil., 2009 (Figure 21) permet de rendre compte de l'état de santé des anguilles argentées du lac de Grand-Lieu ; un indice pathologique général (Ipg) a été calculé (Elie et Girard 2014) (Tableau 2) :

Tableau 2 : Classes de qualité à partir de l'indice pathologique général (Elie et Girard 2014)

Classes de qualité : Ipg	0 ⇨ 0,04	0,05 ⇨ 0,20	0,21 ⇨ 0,80	0,81 ⇨ 1,40	1,41 ⇨ 4,00
Condition des poissons	Excellente	Bonne	Précaire	Dégradée	Mauvaise

$$Ipg = \sum (P \times Q) \text{ avec } P : \% \text{ de poissons atteints par la lésion considéré et } Q : \text{ sévérité de la lésion.}$$



code lésion ou parasitisme (Tableau 1), d'une lettre pour la localisation (Tableau 2 et Figure 5) et d'un chiffre pour l'importance (Tableau 3), soit quatre caractères.

Code lésion et parasitisme ⁽¹⁾		
Absence de lésion ou de parasite		
Lésions anatomo-morphologiques		C_imp Code
Absence d'organe ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	S	AO
Altération de la couleur	S	AC
Anus rouge ou saillant	S	US
Bulle de gaz	S	BG
Déformation difformité	D	AD
Hypersécrétion de mucus	S	SM
Exophtalmie	D	EX
Opacification oculaire	S	CO
Maigreur	D	AM
Erosion	S	ER
Hémorragie	S	HE
Ulcère (dont hémorragique) ⁽⁶⁾	N/S	UL
Nécrose	S	NE
Masses et grosseurs (dont kyste) ⁽⁶⁾	N/S	AG
Parasitisme externe		C_imp Code
Point blanc	S	PB
Mycose (« mousse »)	S	PC
Crustacés ⁽⁷⁾	N/S	CR
Hirudinés	N	HH
Autres parasites que les 4 précédents ⁽⁷⁾	N/S	PX
Parasites (une des 5 catégories au-dessus) ⁽⁷⁾	N/S	PT

Tableau 1 : code lésion et parasitisme. Voir le texte pour les renvois.

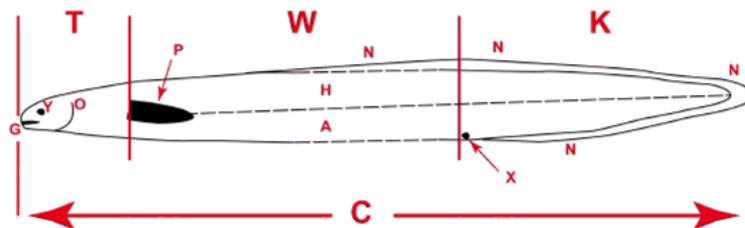


Figure 5 : schéma représentant les localisations (voir Tableau 2)

- Matériels et méthodes -

Code localisation anatomique ⁽²⁾	
Localisation	Code
Corps	C
Colonne vertébrale	V
Tête	T
Bouche	G
Œil	Y
Opércule / Branchies	O
Tronc	W
Abdomen	A
Dos	H
Nageoire pectorale	P
Nageoire principale	N
Pédoncule caudal	K
Orifice anal	U

Tableau 2 : code localisation anatomique. Voir le texte pour les renvois.

Code importance (C_imp) ⁽³⁾	
Nombre (N)	Code
N= 0	0
N< 3	1
N= 4 à 6	2
N= 7 à 10	3
N >10	4
Surface atteinte (S)	Code
S = 0%	0
S < 5%	1
S = 5 à 10%	2
S = 10 à 20%	3
S > 20%	4
Degré d'altération (D)	Code
Nul	0
Faible	1
Moyen	2
Fort	3
Très fort	4

Tableau 3 : code importance. Voir le texte pour les renvois.

Toutes les anguilles qui ont subi le protocole guide sanitaire reçoivent au moins un code pathologique. Ainsi, en l'absence de toute lésion ou parasite, le code pathologique attribué sera OOC0. Le principe de la manipulation est de coder ce que l'on voit et de s'abstenir de faire du diagnostic. Le codage repose sur l'application de 9 principes ou conventions décrits ci après.

(1) Lorsque le poisson présente plusieurs types de lésions ou de parasites, ils doivent tous être codés sans hiérarchie. Ainsi, on codera les observations même les plus petites ou les plus simples. Il

- n'y a pas de limite dans le nombre.
- (2) Lorsqu'un type de lésion ou de parasite se manifeste par plusieurs lésions sur différentes parties du corps, la localisation codée sera celle du niveau supérieur (ex : G+Y=T)
- (3) L'importance s'apprécie sur la base de la localisation codée (ex : N sur la tête). Pour faciliter l'opération, les méthodes de qualification de l'importance sont précisées dans la grille de codage au regard de chaque type de lésion ou de parasite.
- (4) Convention de notation pour absence d'yeux (et pour cette lésion uniquement) : AOY2 il manque un œil, AOY4, il manque les deux yeux.
- (5) Chaque type d'absence d'organe est codé individuellement (ex : AOY2 et AOP4 pour absence d'un œil et de tout ou partie des pectorales - plus de 20 %)
- (6) Pour les lésions lorsque deux méthodes de codification de l'importance sont possibles, on codera la plus déclassante.
- (7) Pour les parasites les plus gros, types hirudinés ou Argulus, la codification de l'importance utilisera le nombre (N).
- (8) Pour les parasites les plus petits, types point blanc ou Paragnathia, la codification de l'importance utilisera la surface atteinte (S).
- (9) Le code Tête (T) s'utilise depuis le bout du museau jusqu'à l'insertion de la nageoire pectorale. Le pédoncule caudal (K) s'utilise depuis l'extrémité terminale de l'anguille jusqu'à l'anus (anus compris). Entre les deux (T et K), on utilise le code tronc (W).

Figure 21 : Extrait du guide pathologies sur l'anguille (Beaulaton et Penil., 2009)

2.5.3.2 Parasitologie vis-à-vis d'*Anguillicoloides crassus*

L'étude parasitologique vis-à-vis d'*Anguillicoloides crassus* des anguilles du lac de Grand-Lieu a été réalisée sur les 102 individus. Des indices épidémiologiques (prévalence, intensité moyenne, abondance moyenne) ont été calculés selon Bush *et al.*, 1997 in Charrier *et al.*, 2010.

Prévalence = nombre d'hôtes infestés x 100 / nombre d'hôtes examinés.

Intensité moyenne = nombre total de parasites trouvés dans l'échantillon / nombre d'hôtes infestés.

Abondance moyenne = nombre total de parasites trouvés dans l'échantillon / nombre total d'hôtes examinés

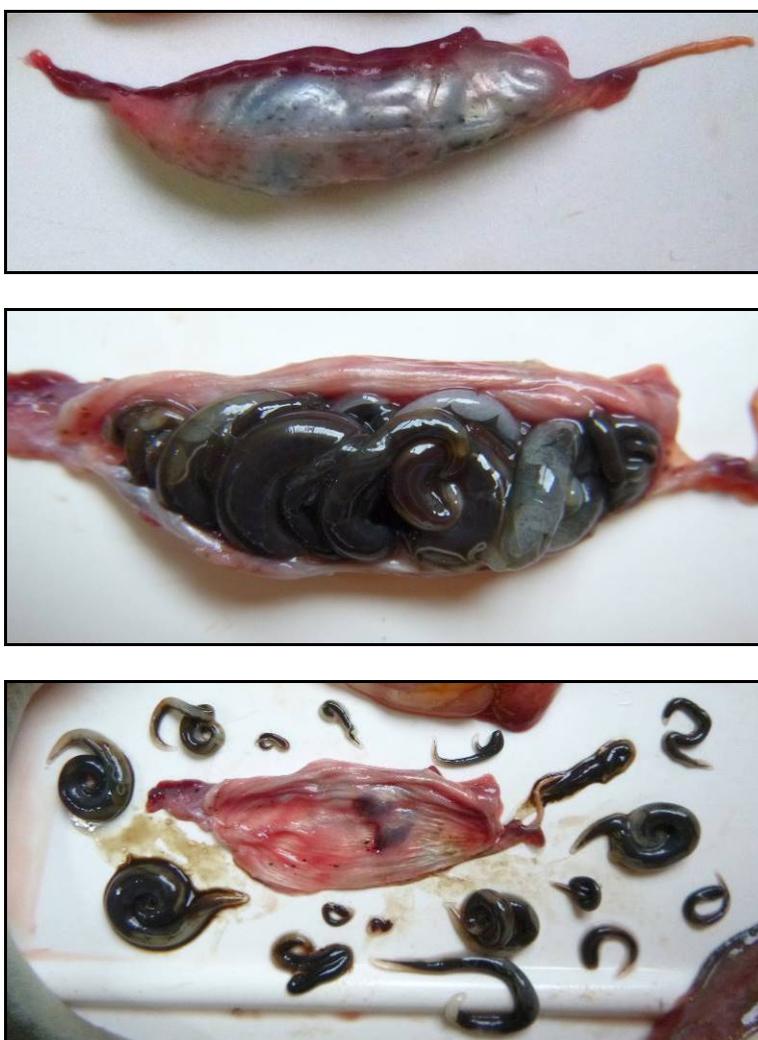


Figure 22 : Extraction de la vessie natatoire, dissection puis comptage des parasites dans la vessie natatoire sur une anguille argentée du lac de Grand Lieu (FISH PASS)

- Matériels et méthodes -

En absence de parasite durant l'autopsie, il est possible d'observer des « traces » de parasitose passée. En effet, une vessie natatoire dégradée est signe d'un épisode passé de parasitose à *A. crassus*. (Lefebvre et Al., 2002).

Les indices d'altération de la vessie		
L'opacité / transparence	Vessie transparente	0
	Vessie nacrée	1
	Vessie opaque	2
La pigmentation et les débris	Vessie dépourvue d'exudat et de pigmentation des tissus conjonctifs	0
	Vessie présentant soit un exudat soit une pigmentation	1
	Vessie présentant à la fois un exudat et une pigmentation	2
L'épaisseur de la vessie natatoire	Epaisseur inférieure à 1mm	0
	Epaisseur comprise entre 1 et 3 mm	1
	Epaisseur supérieure à 3 mm	2

Figure 23 : Notation des indices d'altération de la vessie natatoire (Lefebvre et Al., 2002).

En effet ces trois critères, une fois cumulés, permettent d'attribuer une note à chacune des vessies disséquées allant de 0 à 6. On considère qu'une note de 0 équivaut à une vessie parfaitement intacte, n'ayant pas subi de pression parasitaire, une note comprise entre 1 et 3 indique que la vessie reste modérément dégradée, et enfin au-delà de la note de 4 la vessie est alors considérée comme sévèrement dégradée, remettant en doute ses capacités de fonctionnement au cours de la migration de l'anguille (GRISAM, 2006 in Amilhat, 2007)

Sur la base de cette méthode il est possible de hiérarchiser le niveau de dégradation de la vessie par un indice : **le SDI (Swimblader Dégénérative Index)**.

$$\text{SDI} = \sum \text{des scores des 3 métriques}$$

La prévalence du SDI (PSDI) est calculée en prenant en compte des individus avec un indice de dégénérescence de la vessie (SDI) supérieur ou égale à 2 (Amilhat, 2007)

$$\text{PSDI} = (\text{nombre d'hôtes avec SDI} > \text{ ou } = 2) * 100 / \text{nombre d'hôtes examinés}$$

2.5.3.3 Sexage

Le sexage et le stade de développement des gonades des individus argentés conservés pour analyse des otolithes et de la parasitologie interne sont réalisés par observation macroscopique des gonades selon les critères décrits par Beullens et al et repris dans le guide « PROTOCOLES SPÉCIFIQUES ANGUILE POUR L'ONEMA » (Beaulaton et Penil 2009).

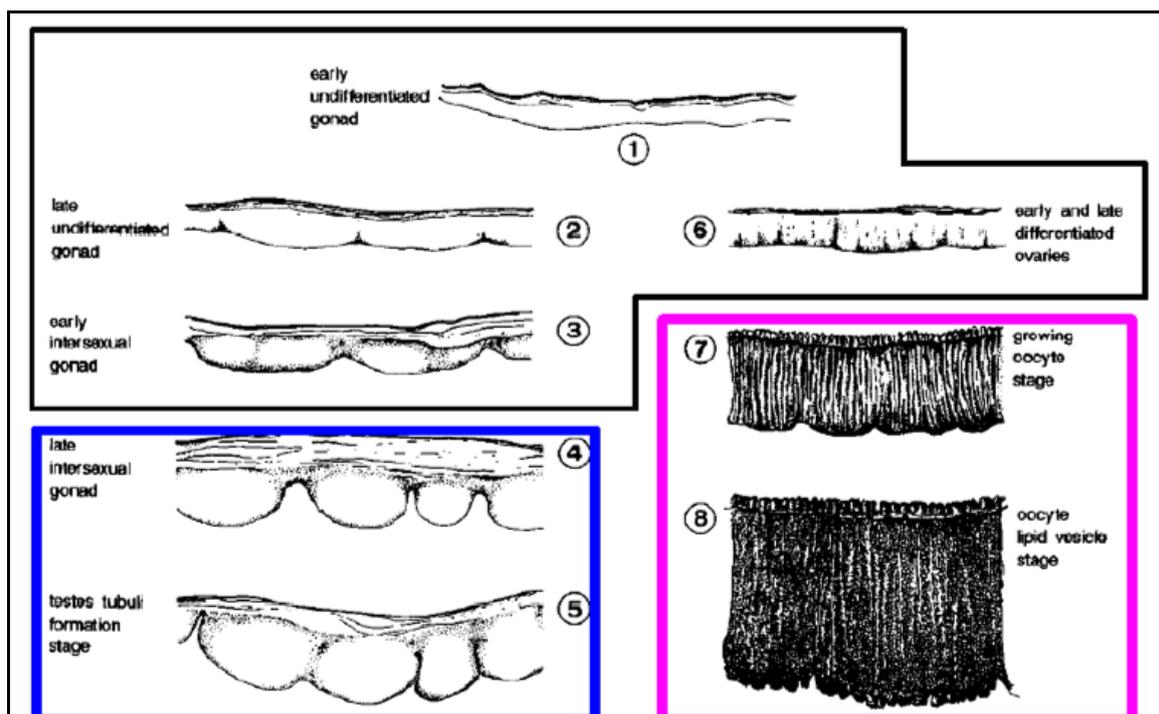


Figure 9 : observation macroscopique des gonades d'anguilles européennes (Beullens et al., 1997).

- 1 – gonade indifférenciée précoce : fil fin (environ 0,8 mm) et transparent
- 2 – gonade indifférenciée tardive : fil transparent (1 à 1,25 mm d'épaisseur) avec de petites encoches
- 3 – organe de Syrski précoce : fil transparent (1,4 à 1,7 mm d'épaisseur) avec des encoches plus prononcées, séparant la gonade en lobe.
- 4 – organe de Syrski tardif : gonade blanche et lobée (1,8 à 2,1 mm d'épaisseur). Les encoches ont quasiment atteintes la partie dorsale de la gonade
- 5 – testes tubuli : gonade allongée (1,9 à 2,2 mm d'épaisseur), constituée de lobes individualisés, même s'ils peuvent se chevaucher.
- 6 – ovaire différencié : gonade transparente rectiligne (1,9 à 2,8 mm d'épaisseur) avec de petits feuillets transversaux.
- 7 – stade ovocyte en développement : gonade transparente rosée (4,4 à 9,7 mm d'épaisseur), avec de nombreux feuillets transversaux qui atteignent quasiment le milieu de la gonade.
- 8 – stade vésicule lipidique de l'ovocyte : gonade transparente blanche (10,9 à 15,10 mm d'épaisseur), avec des feuillets transversaux qui la divise en de nombreux petits compartiments allongés.

Figure 24 : Observation macroscopique des gonades d'anguilles européennes (Beullens et al., 1997 in Beaulaton et Penil 2009)

2.5.3.4 Ageage des géniteurs

L'otolithométrie permet l'acquisition de données essentielles pour analyser la dynamique des populations. La connaissance des paramètres d'âge et de croissance permet de comprendre l'évolution de la population et par la suite de modéliser son fonctionnement. Un rétro-calcul a été réalisé dans le but d'obtenir une clé Taille-Age permettant d'obtenir l'âge en connaissant de la taille de l'individu considéré.

Les otolithes :

Les otolithes sont des concrétions calcaires situées dans l'oreille interne des poissons. Ils participent d'une part à la transition des sons, d'autre part à l'équilibration et à la perception de la profondeur (Morris et Kittleman, 1967, in Gauldie et Nelson, 1990). On distingue trois paires d'otolithes, logées dans les capsules otiques de chaque côté du crâne. Les sagitta sont les plus grandes ; elles sont contenues dans le sac endolymphatique, de même que les asterici, plus petites et parfois situées dans un diverticule externe de la matrice. Les lapilli, très petites, se trouvent dans l'atrium des canaux semi circulaires (Dahl, 1967). Généralement, l'estimation de l'âge et de la croissance des poissons est basée sur l'interprétation des sagitta, en raison de leur grande taille (Tsukamoto et Kajihara, 1987). La position des sagitta dans le sac endolymphatique varie selon les espèces : les otolithes sont soit posés en contact avec l'os crânien, et leur axe est alors décentré vers le bas, soit libres et leur axe de symétrie est alors centré (Gauldie et Nelson, 1990). L'Anguille appartient à la première catégorie.

L'extraction des otolithes :

Après section du transverse du crâne aux ciseaux à dissection, l'encéphale est enlevé et les sagitta prélevées directement dans les capsules otiques à l'aide de pinces fines. Elles sont ensuite placées dans un bain d'eau de Javel diluée (50 %) durant 5 à 10 minutes pour dissoudre les membranes sacculaires. Un rinçage à l'eau distillée d'une dizaine de minutes précède le séchage par immersion dans un bain d'alcool à 70° durant 10 minutes. Ce protocole de préparation suit la procédure de Brothers (1987) et se conforme aux recommandations de Vollestad *et al.* (1987). Les otolithes sont ensuite stockés à sec dans des boîtes à micro puits de type « ELISA », à température ambiante.

Inclusion des otolithes :

L'une des sagitta est ensuite incluse dans de la résine époxy; cette résine présente de nombreux avantages : très bonne adhérence, transparence, absence de retrait. La face convexe de l'otolithe est déposée sur une lame de verre à l'intérieur de moules formés par des capsules de tube

à essai découpées ; ces « moules » forment des plots aisément manipulables et sont réutilisables. L'inclusion des otolithes est une étape indispensable à leur manipulation.

Ponçage des otolithes :

Après démoulage, les plots sont poncés pour dégager la surface sagittale de l'otolithe. Le ponçage de la face convexe est effectué manuellement sur des feuilles de papier abrasif à l'eau, de finesse croissante de 280 à 1200 grains par centimètre carré. Lorsque le centre de l'otolithe est atteint, la surface est polie à la poudre d'alumine pour affiner la préparation.

Lecture des otolithes :

L'alternance des zones opaques et hyalines (ou transparentes) observées sur un otolithe entier ou sur sa surface poncée correspond à des différences de structure. En lumière réfléchie (éclairage par-dessus), les zones hypercalcifiées renvoient la lumière : elles apparaissent blanches, lumineuses et opaques ; les zones où la calcification est moins dense sont transparentes à la lumière et l'absorbent : elles sont donc plus sombres que les précédentes. On considère généralement que l'alternance zone opaque/zone hyaline correspond respectivement aux phases de croissance rapide et de croissance ralentie de l'anguille (Moriarty, 1983 ; Dekker, 1987). La zone opaque, ou zone de croissance est dénommée « zone » selon la terminologie adoptée lors du colloque « Tissus durs et âge individuel des vertébrés » de Blondy (Baglinière *et al.*, 1992). La zone hyaline, ou zone de croissance ralentie, recevra l'appellation d' « annulus ». En règle générale, on considère que l'ensemble formé par une zone et un annulus représente un cycle annuel. Généralement, on admet la présence d'une LAC par annulus, en rapport avec l'arrêt annuel de croissance du poisson ; leur dénombrement est utilisé pour estimer l'âge individuel du poisson.

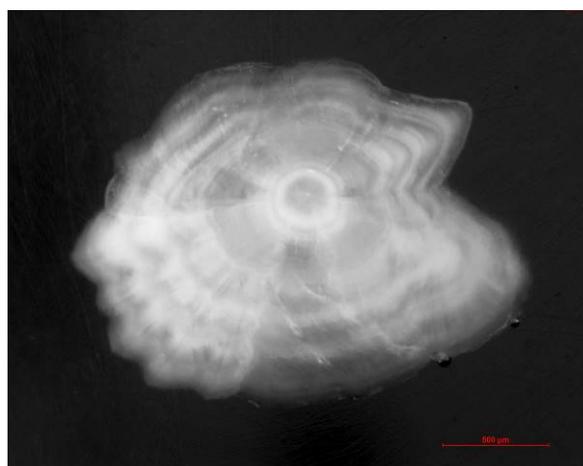


Figure 25 : Photo d'otolithe d'une anguille argentée du lac de Grand Lieu (FISH PASS)

2.6 Méthode CMR PIT-Tag

La méthode de capture-marquage-recapture (CMR) est une méthode d'inférence statistique, méthode qui consiste à déduire les caractéristiques générales inconnues d'une population à partir de celles d'un échantillon, supposé représentatif, issu de cette population (Figure 26). Les caractéristiques de l'échantillon, une fois connues, reflètent avec une certaine marge d'erreur celles de la population. Ainsi elle permet, par exemple, d'estimer la taille d'une population animale. C'est pour ces raisons que ce type de méthode est mise en œuvre compte tenu de la présence de la pêche et donc des possibilités de captures offertes par celle-ci.

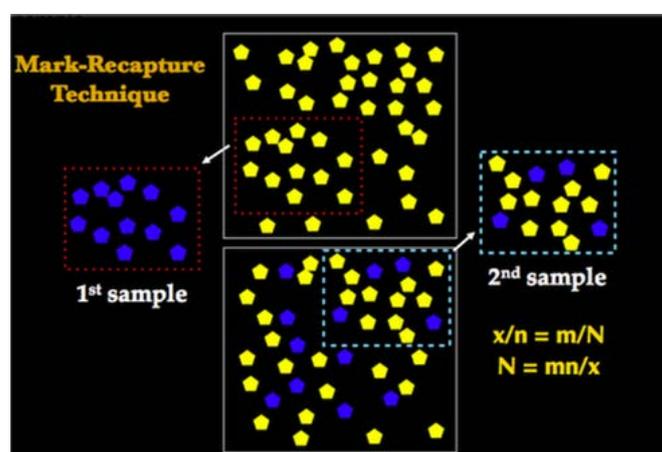


Figure 26 : Présentation schématique du principe de la méthode CMR (quizlet.com)

2.6.1 La technique de marquage aux PIT-Tags

Le PIT (Passive Integrated Transponder, Figure 28) 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 (Figure 30). 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

- Matériels et méthodes -

(lecture 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.

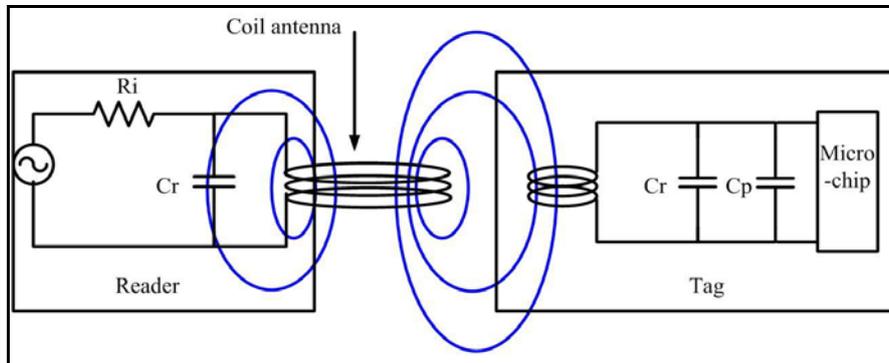


Figure 27 : Schéma de principe de communication électromagnétique entre le TAG et le lecteur (electronics.stackexchange.com)



Figure 28 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS)

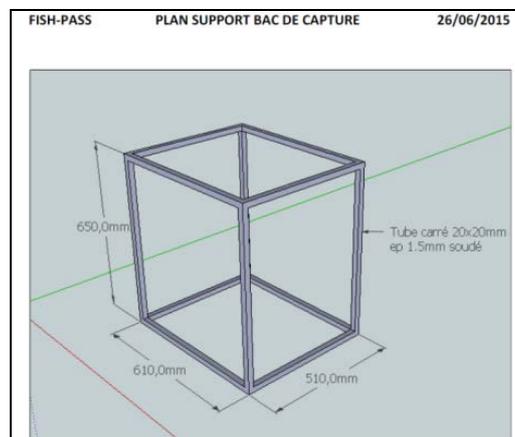


Figure 29 : Création d'une trémie sur mesure pour la lecture automatisée des anguilles marquées au PIT TAG (FISH PASS)



Figure 30 : Photographies représentant, à gauche le lecteur PIT-tag et à droite le dispositif mise en place sur les bateaux pour cette étude. (FISH PASS)

2.6.2 CMR (Capture Marquage Recapture)

2.6.2.1 Protocole de marquage

Le marquage des anguilles a été réalisé en quatre sessions pour des aspects logistiques d'une part (disposer de suffisamment de poissons en une fois aurait été compliqué) mais surtout pour suivre la dynamique migratoire sur toute la saison qui peut varier en fonction des conditions environnementales. La première avant l'ouverture de la pêche, le 25 septembre, la deuxième le 02 octobre, la troisième le 16 octobre et la dernière le 20 novembre 2015. Pour le premier marquage (avant l'ouverture de la pêche le 1^{er} Octobre 2015), une pêche dite scientifique a été mise en place afin de récolter des individus pour le marquage. Quatre professionnels ont participé à cette dernière, il faut rappeler que les pêcheurs n'avaient pas le droit de conserver leur capture puisqu'il s'agissait d'une période durant laquelle la pêche n'était pas autorisée. En revanche, leur participation et l'utilisation de leurs engins furent rémunérées. Pour les trois autres sessions de marquage, les individus subissant le marquage étaient issus des captures de la pêcherie.

Le 25 septembre, premier marquage, 180 individus ont été marqués. Pour le second 120, le troisième 117 et pour le dernier 107. Ce qui représente un total de 524 individus marqués pour cette étude. Cet échantillon a été conçu de manière à ce que sa répartition des classes de taille soit la plus représentative possible par rapport à celle de la population du lac de Grand-Lieu échantillonnée par la pêcherie. Ces individus sont des anguilles considérées comme argentées. La sélection des anguilles argentées a été réalisée selon quatre critères évalués visuellement : robe argentée, diamètre de l'œil, allongement de la nageoire pectorale et pigmentation de la ligne latérale. Une biométrie précise a également été effectuée pour chaque individu marqué. Ainsi les mesures du poids, de la

- Matériels et méthodes -

taille de l'anguille, du diamètre de l'œil et des longueurs des nageoires pectorales ont été relevées. Il faut également rappeler qu'une analyse des pathologies externes fût réalisée. Ceci dans le but d'analyser l'état sanitaire externe des anguilles argentées destinées à dévaler.

Chaque anguille a été marquée par un PIT-Tag de 12mm, diamètre 2mm, normé ISO 24631 (biocompatible). Les PIT-Tags ont été administrés à l'aide d'un trocart, à usage unique, dans la cavité viscérale des anguilles après avoir été endormies avec de l'eugénol. Après la pose de chaque marque, les individus sont testés au moyen d'un lecteur (Figure 30), du même type que celui des 7 pêcheurs.

Une fois marquées, les anguilles ont été relâchées dans le lac par lot. Pour chaque lot relâché, la date et les coordonnées GPS ont été notée, permettant ainsi d'évaluer le temps de résidence des individus recapturés.



Figure 31 : Séance de marquage au PIT TAG dans le cadre de la CMR (FISH PASS)



Figure 32 : Viviers de stockage des anguilles destinées au marquage (FISH PASS)

2.6.2.2 Relâche des individus



Figure 33 : Relâche des individus marqués sur le plan d'eau avec un bateau mis à disposition par un pêcheur professionnel (FISH PASS)

Lors des trois premières relâches, les individus ont été répartis équitablement sur les trois points centraux du plan d'eau et lors de la quatrième remise à l'eau les conditions de navigations n'ont pas permis d'atteindre ces mêmes zones de déversement dans des conditions de sécurité satisfaisantes et les individus ont été relâchés sur le point le plus à l'est de la carte (Figure 34).

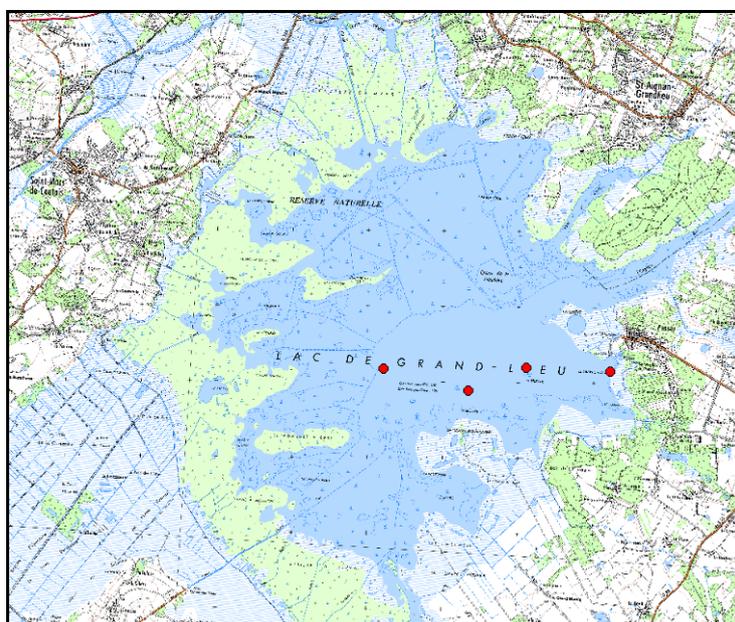


Figure 34 : Localisation des sites de remise à l'eau des individus marqués au PIT TAG (FISH PASS)

Le déversement des individus marqués est intervenu immédiatement après le marquage.

2.6.2.3 Test de perte de marque et de mortalité

Afin de valider cette méthode, différents tests ont été réalisés. Ainsi un test de mortalité a été mis en œuvre afin de tester l'effet du marquage sur la survie des individus. Ce même test a également permis d'analyser les possibles pertes de marque. Pour mener à bien ce test, 2 lots de 30 individus chacun ont été construits, 1 lot composé d'individus marqués, 1 autre d'individus non-marqués composant le lot témoin. Chaque lot est composé de 25 mâles et 5 femelles, ces valeurs sont censées être représentatives du sex-ratio (observé lors des captures expérimentales). Ces deux lots ont été placés dans des conditions de vie les plus proches possibles de celles des anguilles relâchées (température, qualité d'eau ...). En effet, ces dernières ont été stockées dans un vivier sur le lac durant 15 jours. Après cette durée, une biométrie a été effectuée sur l'ensemble des anguilles composant les deux lots : le but étant de comparer les résultats de mortalité entre les deux lots.

2.6.2.4 La recapture

Pour comptabiliser les recaptures de l'ensemble de la pêcherie, c'est-à-dire les 7 pêcheurs actifs sur le lac de Grand-Lieu, chaque professionnel a été équipé d'un dispositif de lecture des marques (PIT-tag, Figure 30). Dans un souci de respect des conditions et des habitudes de travail de chacun, ces lecteurs ont pu être adaptés. En effet, certains pêcheurs, disposant de viviers à leur domicile, préféraient avoir leur lecteur directement sur leurs viviers, (l'objectif étant de limiter au maximum les manutentions propres à la mise en place de l'étude). Pour les autres, différentes modifications (pieds, traverses ...) ont pu être ajoutées afin de s'adapter à la « côme » de leur bateau (Figure 35). La « côme » étant un vivier faisant partie intégrante de la structure du bateau, qui communique avec l'eau du lac par un système de trous percés dans le fond de l'embarcation. Ce qui en fait un système ingénieux permettant de conserver le poisson capturé dans de bonnes conditions.

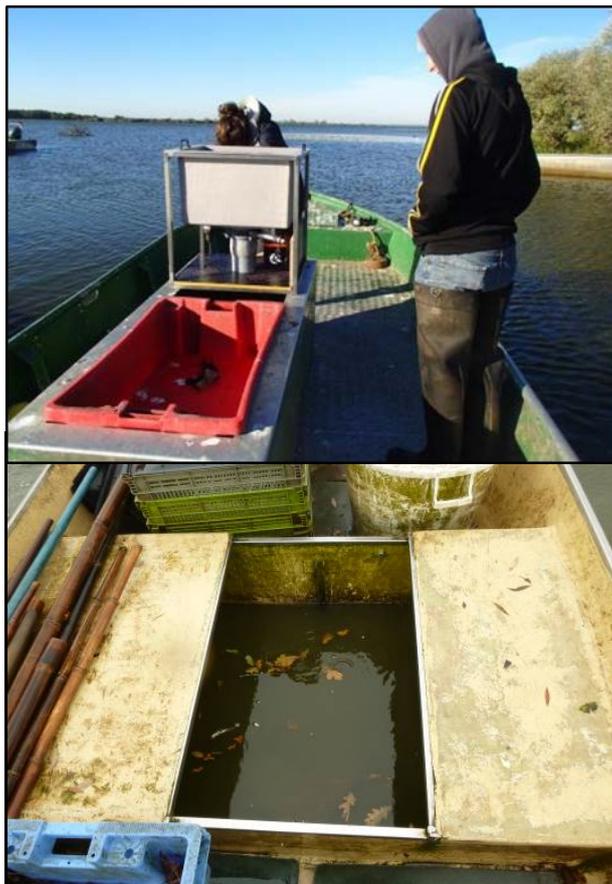


Figure 35 : Vivier et côme sur les bateaux des pêcheurs du lac (FISH PASS)

Les parties « capture » et « recapture » ont été réalisées, pour des raisons techniques et logistiques, par la pêche en place sur le lac de Grand-Lieu. En effet, le savoir-faire (connaissance du placement des engins, techniques liées à la pêche à l'anguille ...) ainsi que les moyens techniques et humains des professionnels (nombre important de relèves, d'engins, de pêcheurs impliqués, entretien des engins, moyens nautiques pour mettre en œuvre la pose, la relève et le déplacement des engins) furent nécessaire au bon déroulement de cette étude.

Une telle étude n'est pas envisageable sans la présence d'une pêcherie sur le site. Une telle pêcherie « scientifique » aurait eu un cout démesuré à mettre en place et à assurer sur l'ensemble de la saison.

2.6.3 Estimation des taux d'échappement et d'exploitation sur les anguilles du lac de Grand-Lieu

Dans cette étude, l'opération de marquage/recapture s'est déroulée en plusieurs strates temporelles. Afin d'analyser ce type de données, le logiciel SPAS (Stratified Population Analysis System) (Arnason *et al.*, 1996) a été utilisé comme pour l'étude réalisée sur Bages-Sigean (Amilhat *et al.*, 2008), sur la Loire (Acou *et al.*, 2010) et sur l'étang de l'Or (Charrier *et al.*, 2010, Charrier *et al.*, 2012). La taille de la population peut ainsi être déterminée par l'estimateur groupé de Petersen sous

- Matériels et méthodes -

certaines hypothèses : pas de perte de marques pendant la durée de l'étude (voir résultats des tests), probabilité de capture indépendante du marquage, probabilité de recapture des anguilles marquées supérieure à 0, population fermée. Cette dernière hypothèse est partiellement respectée, le vannage du lac étant resté fermé, dans la majeure partie de la durée de l'étude. Les captures totales de la pêcherie ont pu être obtenues par l'intermédiaire des fiches de pêche pour toute la durée de l'étude (d'octobre à mi-janvier). Afin d'évaluer la part d'anguilles argentées dans les captures totales, un pourcentage d'anguilles argentées (en biomasse) dans les captures des pêcheurs (avant tri des anguilles jaunes) a été mesuré lors de chaque biométrie. Une moyenne des pourcentages de chaque semaine a ainsi permis d'évaluer la biomasse d'anguilles argentées capturées chaque semaine. Ces captures en biomasse ont été converties « en nombre d'anguilles » en utilisant les poids moyens individuels calculés via les données de biométrie pour chaque semaine.

Le taux d'exploitation par la pêcherie a été calculé selon la formule :

Le taux d'exploitation = nombre d'individus capturés / nombre d'individus estimés dans la population.

Le taux d'échappement à la pêcherie, quant à lui, a été calculé selon la formule :

Taux d'échappement = 100 - Taux d'exploitation.

2.7 Suivi acoustique

Le contexte règlementaire avec la présence de dates d'ouverture de la pêche **du 1er Octobre au 15 Janvier implique qu'un échappement est possible avant et après cette période. Il est donc important de quantifier l'échappement hors période au droit de la pêcherie, mais également au droit de l'exutoire du lac et jusqu'à l'estuaire de la Loire.** Pour cela, un suivi par télémétrie acoustique a été mis en place. Ce suivi acoustique a pour objectif de consolider la valeur du taux d'échappement mesuré par la pêcherie *via* les PIT-tags, et est en ce sens complémentaire. Il a également pour but de mieux comprendre le comportement migratoire des anguilles argentées du Lac jusqu'à l'estuaire de la Loire en estimant les paramètres suivants :

- proportion d'anguilles qui quittent la zone de pêche
- proportion d'anguilles qui arrivent et franchissent le vannage de Bouaye
- temps de transit des anguilles entre la zone de pêche et le vannage, temps pour franchir le vannage
- période de franchissement du vannage (qui sera mis en relation avec les paramètres environnementaux)
- facteurs anthropiques et/ou environnementaux qui favorisent la sortie du lac

2.7.1 Principe de la méthode

La télémétrie acoustique est une technique basée sur la transmission d'un signal acoustique entre un émetteur acoustique (ou tag) implanté sur un organisme vivant et un ou plusieurs récepteurs (ou hydrophones) installés dans la zone étudiée.

Le signal acoustique peut être codé, ce qui permet le suivi simultané de plusieurs poissons utilisant une même fréquence d'émission. Les émetteurs produisent des séquences (« pings ») de 7 impulsions sonores (« pulses ») à intervalles irréguliers et séparés par un délai aléatoire, compris, dans notre cas, entre 30 et 90 secondes (Annexe 1). L'intervalle entre les 7 pulses permet de définir un code identifiant spécifiquement le poisson marqué (Figure 36).

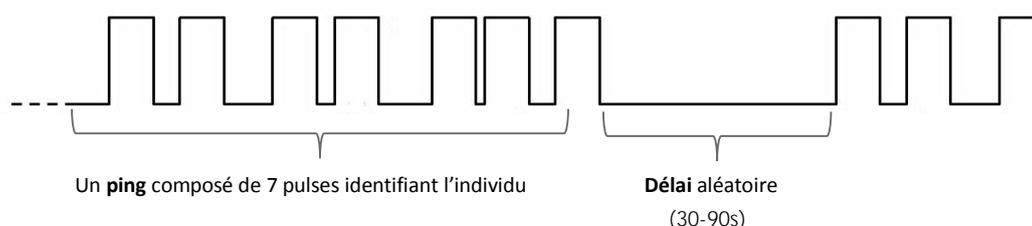


Figure 36 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques

La durée de vie de la batterie de l'émetteur est variable. Dans le cas présent, le modèle sélectionné (V9-2L de VEMCO © ; Annexe 1) possède une autonomie d'environ 400 jours. L'émetteur peut, par conséquent, émettre pendant une période maximale d'environ 13,3 mois post-marquage (les tags implantés étant activés le jour même du marquage) que le poisson soit vivant ou non si tant est que ce dernier soit présent dans l'aire de détection des hydrophones.

2.7.2 Le réseau acoustique déployé

Un total de 45 récepteurs acoustiques (ou hydrophones) a été positionné entre le lac et la Loire (Figure 37) en Septembre 2015. Ils permettent d'enregistrer les signaux acoustiques émis par un individu marqué à une position et un temps donnés. Les caractéristiques techniques des hydrophones, qui offrent une autonomie de 15 mois, sont présentées en Annexe 1. Trois systèmes de fixation des hydrophones ont été utilisés (Annexe 2) en fonction du risque de vandalisme (dans ce cas, un système invisible ou 'furtif' a été privilégié) et des conditions environnementales. Dans tous les cas, les systèmes permettaient aux hydrophones de rester en position verticale et donc d'assurer un maximum de détections quelles que soient les conditions (fort courant ou vent) rencontrées. En Loire, les hydrophones ont été installés sur des balises avec l'aide de Phares et Balises.

Ces hydrophones ont été positionnés de manière à délimiter 6 compartiments (appelé Box de Box 0 à Box 6, de l'amont vers l'aval ; Figure 37), dont les limites sont principalement définies par la présence d'obstacles susceptibles d'influencer la migration d'avalaison du lac jusqu'à l'estuaire de la Loire :

- **Box 0** correspond à la zone centrale du lac où les anguilles marquées sont relâchées.
- **Box 1** aux canaux reliant la partie centrale du lac vers la sortie.
- **Box 2** à la zone de retenue d'eau en amont du vannage de Bouaye.
- **Box 3** à l'Acheneau et au Tenu
- **Box 4** au canal de la Martinière
- **Box 5** (1, 2, 3 et 4) aux 4 exutoires reliant le canal de la Martinière à la Loire
- **Box 6** à la Loire et donc au milieu ouvert

Après avoir été marquées, les anguilles ont été libérées dans la Box0, où le courant est extrêmement faible toute l'année. Dix récepteurs acoustiques ont été déployés à la limite entre Box0 et Box1. Cinq hydrophones supplémentaires ont été ajoutés entre Box1 et Box2 pour détecter le sens de déplacement des anguilles. Trois récepteurs ont été déployés dans Box2 juste avant la sortie. Trois récepteurs ont été placés dans Box3 juste en aval du vannage de Bouaye afin de capter toutes anguilles quittant le lac. Y compris les individus susceptibles de dévaler par la sortie de maison blanche. Cette voie de migration possible permettrait aux anguilles de sortir du plan d'eau sans

- Matériels et méthodes -

passer par le vannage de Bouaye. Cependant cette voie n'est possible qu'à partir d'une certaine côte du lac (1.80m à la côte de Buzay). Deux autres ont été placés dans le Tenu (affluent de l'Acheneau pouvant avoir un courant inversé par le pompage d'eau de la station de la Pommeraie pour alimenter les marais de la baie de Bourgneuf) afin de s'assurer qu'aucune anguille ne remontait cet affluent. Deux hydrophones supplémentaires ont été installés en aval de l'Acheneau afin de s'assurer que toutes les anguilles ayant quittées le lac réussissent à traverser l'Acheneau. Puis quatre hydrophones ont été placés en amont des quatre exutoires du canal de la Martinière (Box4) pour identifier les principales voies de migration avant passage dans l'estuaire. Pour confirmer l'arrivée des anguilles dans l'estuaire, des hydrophones ont également été placés en aval des vannes d'évacuation, dans chaque sortie (5 au total, dans les cases Box 5-1, 5-2, 5-3 [2 récepteurs], 5-4). Enfin, 11 récepteurs ont été installés dans l'estuaire de la Loire (Box 6) pour valider ou confirmer le passage à l'estuaire.

Un préalable important pour les études acoustiques est de vérifier **qu'une absence de détection sur un hydrophone correspond réellement à une absence de passage au niveau de cet hydrophone**. Pour cela, des tests de 'buffer' ont été réalisés. Ils consistent à immerger un émetteur continu (1 émission par 10 secondes) pendant 3 minutes à plusieurs distances de l'hydrophone (jusqu'à 500 m par incrément de 50 m, vers l'aval et l'amont). Le nombre de signaux captés par rapport à ceux émis théoriquement sur la période test de 3 minutes permet ainsi de déterminer l'aire de détection maximale (90 % du signal) de l'hydrophone. Les probabilités de détection étaient très élevées en amont du site d'étude (> 80 % ; Figure 38) et plus faible en aval (canal de la Martinière et ses exutoires et Loire) principalement raison de la marée (échappement possible d'individus quand l'hydrophone est hors d'eau à marée basse), d'un bruit acoustique plus important dû à la présence d'ouvrages et de bateaux, et de l'intensité du courant et de la profondeur (particulièrement en Loire). Pour autant, les données acquises ont révélé que **toutes les anguilles détectées dans un compartiment donné avaient été entendues dans le compartiment situé à proximité amont. Ce résultat confirme que les compartiments définis étaient 'étanches' ce qui valide l'hypothèse initiale (absence de détection = absence de passage).**

- Matériels et méthodes -

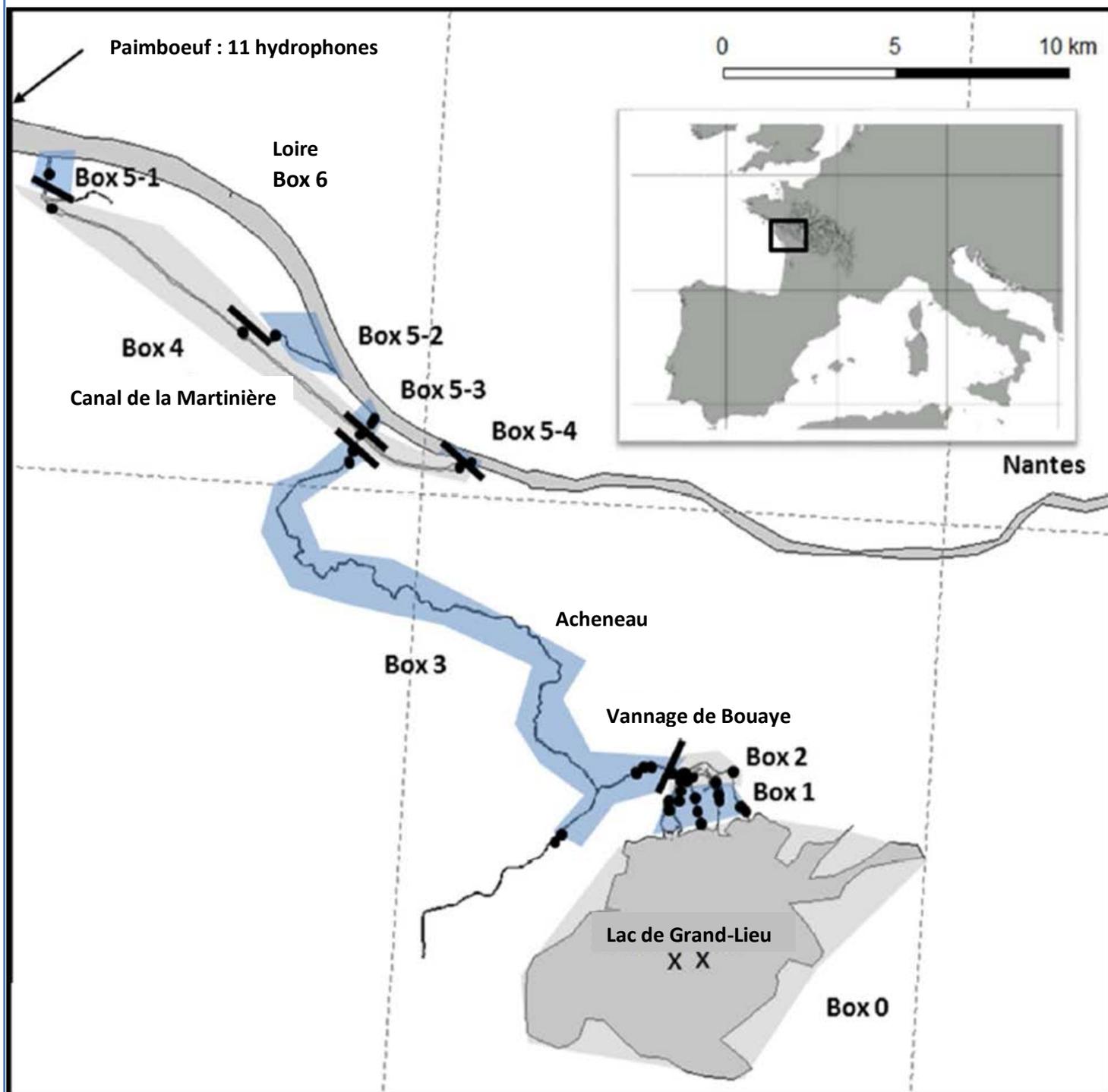


Figure 37 : Répartition des différents compartiments créés en fonction du positionnement des hydrophones (point noir) (BOX 0= zone de relâche ; BOX 1=canaux de sortie du lac ; BOX 2= porte de sortie du lac ; BOX 3= Acheneau ; BOX 4= Canal de la Martinière ; BOX 5= Exutoires ; BOX 6= Loire) (Source : Trancart Thomas et Danet Valentin)

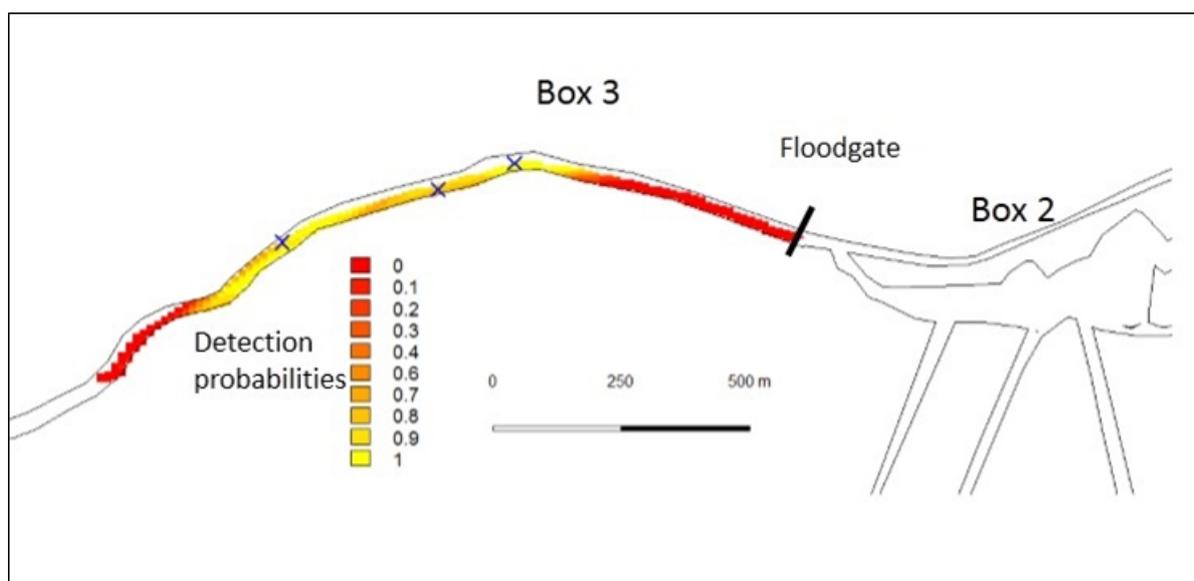


Figure 38 : Exemple du résultat des tests de buffer sur les 3 hydrophones directement en aval du vannage de Bouaye

Afin d'obtenir des variables environnementales pour comprendre le comportement de migration des anguilles, 11 capteurs de température ont été installés sur l'ensemble du réseau (5 dans les canaux Box 1, 1 en amont de vannage de Bouaye Box 2, 1 directement en aval Box 3 et 4 en amont des exutoires du canal de la Martinière Box 4) et 1 accéléromètre a été placé en amont du vannage de Bouaye dans la Box 2 (Figure 39).



Figure 39 : Sonde de température étanche pour mesure en continue dans le plan d'eau (FISH PASS)

2.7.3 Protocole de marquage des anguilles argentées

Pour éviter que le rapport poids de l'émetteur sur poids de l'anguille ne dépasse la valeur seuil des 2 % et ne perturbe le comportement migratoire des individus marqués (Winter, 1996), les anguilles argentées présentant un poids supérieur à 235 g (femelles argentées exclusivement) ont été sélectionnées. Trois sessions de marquage ont été réalisées les 25/09/2015 (N =18 ind. marqués),

- Matériels et méthodes -

16/10/2015 (N = 16 ind.) et 20/11/2015 (N = 17 ind.), permettant ainsi de marquer 51 anguilles argentées femelles. Trois sessions ont été nécessaires car les captures d'anguilles femelles étaient faibles au cours de la saison. De plus, il était important de réduire au maximum la durée de la stabulation (3-4 jrs) afin de limiter l'impact sur le comportement migratoire des individus. Une autre raison d'ordre technique cette fois était qu'un marquage étalé dans le temps limitait le risque de collisions de données acoustiques au niveau des hydrophones, et par conséquent la perte de données.

Avant chaque marquage, les anguilles ont été anesthésiées à la benzocaïne (150 mg/L). La longueur totale (LT au mm près) et le poids (au g près) de chaque anguille ont été mesurés, ainsi que les diamètres oculaires verticaux et horizontaux des 2 yeux (au mm près) et la longueur de la nageoire pectorale afin de déterminer le stade de maturité défini par Durif et al. (2003) (Tableau 3). Sur cette base, 51 anguilles argentées ont été classées 'potentiellement migrantes' (FIII, n = 29), 'migrantes' (FIV et FV, n = 21) et 'anguille jaune' (FII, n = 1). La taille moyenne était 727 mm et le poids moyen 782 g. Sur la base de longueurs observées et compte tenu du dimorphisme sexuel observé chez les anguilles (Tesch, 2003), toutes les anguilles argentées marquées étaient des femelles.

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

Stade	Degré d'argenture	n	LT(mm)	Pd (g)	DO (mm)	LP (mm)
Jaune	FII	1	747	801	6.0	32
Pré-migrante	FIII	29	722 ± 38	756 ± 137	8.6 ± 0.5	34.8 ± 2.5
Migrante	FIV	8	770 ± 72	1041 ± 300	9.6 ± 0.5	38.0 ± 3.1
	FV	13	708 ± 45	672 ± 99	9.3 ± 0.6	36.9 ± 3.2
Total		51	727 ± 49	782 ± 201	8.8 ± 0.8	35.8 ± 3.0

Les anguilles ont été ensuite opérées sous anesthésie sur une table d'opération équipée d'un circuit d'eau fermé contenant de l'anesthésiant (benzocaïne à 150 mg/L). Une incision d'environ 1.5 cm au niveau de la cavité générale a été réalisée de manière à permettre l'implantation de l'émetteur acoustique (V9, VEMCO). Entre 2 et 3 points de suture (nœuds de chirurgien) ont ensuite été réalisés avec un fil résorbable (Figure 40). La plaie a été désinfectée à la Chlorhexidine (0.05 %) et l'anguille a ensuite été placée dans un bac de réveil oxygéné. Tout le matériel de chirurgie utilisé a été préalablement stérilisé. A noter que chaque anguille a également été marquée au PIT-tag afin d'être

- Matériels et méthodes -

identifiée dans la pêcherie dans l'éventualité d'une capture aux verveux. Les anguilles ont été relâchées dans 4 endroits différents du lac, au milieu de la zone de pêcherie.



Figure 40 : Suture d'une anguille après insertion du TAG acoustique (FISH PASS)

2.7.4 *Suivi post-opératoire*

Un suivi post-opératoire a été réalisé afin de vérifier une éventuelle mortalité liée à l'opération. Mais également pour s'assurer qu'il n'y avait pas de pertes de marques et surveiller la vitesse de cicatrisation. Sur 10 anguilles, représentatives de l'échantillon marqué (moyenne de 707 mm et 695 g), opérées dans les mêmes conditions que pour le marquage réalisé le 20/11/15, et maintenue en stabulation (dans 750 L d'eau du Frémur) au laboratoire de Dinard, aucune mortalité ou perte de marque n'a été observée pendant les 12 semaines de suivis. Au bout des 10 semaines, 90 % des anguilles avaient totalement cicatrisées. Une seule anguille n'avait pas totalement cicatrisée car ses fils n'étaient pas résorbés. Une fois les fils retirés, elle a cicatrisé en 7 jours (Figure 41). Cependant avec un maintien en stabulation en milieu contrôlé, la mortalité en milieu naturel post-opératoire est peut-être sous-estimée.

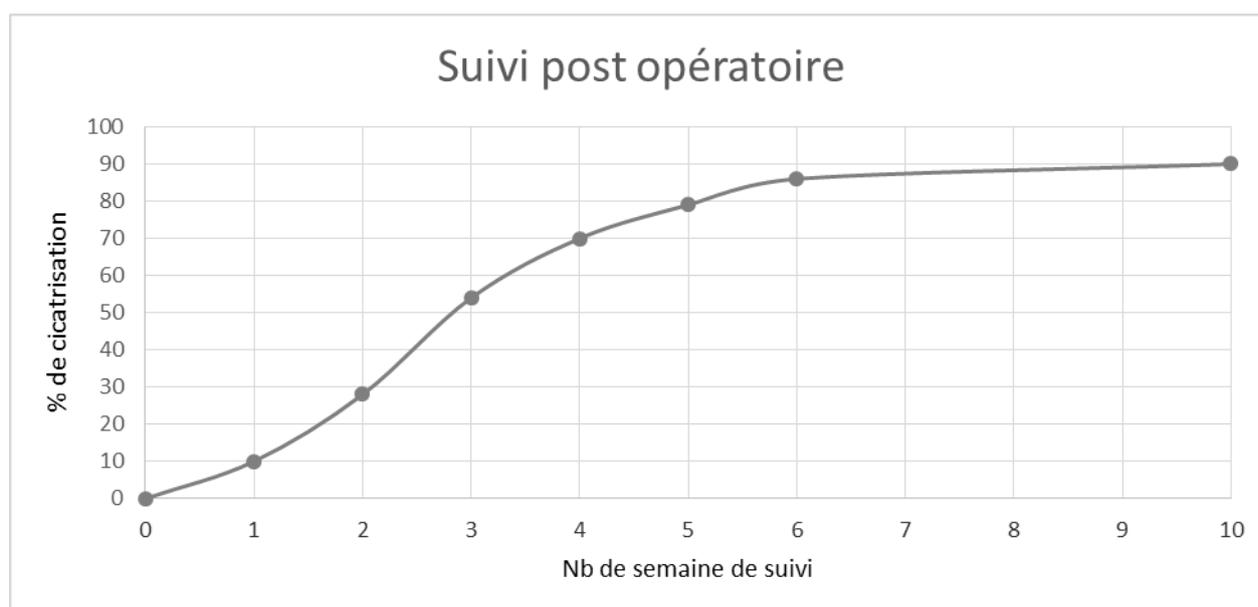


Figure 41 : Evolution des cicatrisations lors du suivi post-opératoire (basée sur la disparition des points, l'infection et la fermeture de la plaie)

2.7.5 Transformation des données de détection

Comme présenté précédemment, les tests de buffer ont confirmé l'étanchéité du réseau. Une anguille entendue par un hydrophone au sein d'un compartiment est alors considérée comme présente dans ce dernier jusqu'au passage dans le suivant. Ainsi, il a été possible de reconstruire *a posteriori* la présence (ou absence) des individus dans un compartiment donné par jour. Cette transformation, qui permet le passage de données discrètes (présence seulement) en données régulières (présence/absence), a été appliquée à l'ensemble des individus, et a permis de définir la variable dépendante : **le nombre d'individus qui passent d'un compartiment à un autre au cours du temps.**

2.7.6 Analyses statistiques

Afin d'étudier l'influence des ouvrages et des facteurs environnementaux sur la dynamique migratoire, les données de passage ont été modélisées en utilisant la méthode des BRT (Boosted Regression Trees ; Buston and Elith, 2011; Elith et al., 2008) pour les passages des trois premiers compartiments (Box0 à Box1, Box1 à Box2 et Box2 à Box3). Cette méthode statistique permet de coupler les données d'occurrence à de nombreuses variables environnementales. Les variables journalières considérées sont : la pluviométrie (mm), la température de l'air (°C), la pression atmosphérique (HPA), direction (°) et vitesse du vent (m/s) obtenues grâce aux stations météo France de Nantes-Bouguenais, Saint Mème le Tenu et Saint Philibert de Grand Lieu, les phases lunaires (IMCCE, Observatoire de Paris), accélération du courant (en g) par l'intermédiaire de capteurs installés près des hydrophones, les niveaux d'eau (m) et ouvertures cumulées des vannes

- Matériels et méthodes -

(données SAH). Les données ont été traitées en valeurs absolues, valeurs relatives (%), moyennes mobiles, et avec et sans effet retard (1 à 3 jours).

2.7.7 *Etude de l'impact de la gestion des ouvrages (vannes) sur la migration d'avalaison*

- Le vannage de Bouaye

Sur l'ensemble de la saison le vannage de Bouaye a conservé une vanne ouverte de 10 cm à 5 cm du 17/09/2015 au 06/01/2016. Une seconde vanne a été ouverte de 40 cm le 07/01. Puis du 08/01 au 10/01 il y a eu l'ouverture de 3 vannes de 50 cm. Du 11/01 au 15/01 les 5 vannes étaient ouvertes de 60 cm. Du 16/01 au 20/01, seulement 3 vannes de 60 cm, puis 2 de 60 cm du 21/01 au 31/01.

Le 01/02 les 5 vannes sont ouvertes de 50 cm puis de 80 cm le 12/02 et enfin de 160 cm (ouverture maximal) du 14/02 au 16/03. Le 17/03 il ne reste que 3 vannes de 160 cm puis de 80 cm le 23/03. Les vannes ont ensuite été refermées petit à petit pour être totalement fermées le 28/06.

Le vannage de Bouaye est depuis ce jour encore fermé au moment de la rédaction de ce rapport.

La fermeture (complète) du barrage n'offre pas de possibilité de dévalaison pour les anguilles argentées lorsque le niveau du plan d'eau est en dessous de la cote d'utilisation de la sortie de « Maison Blancheé ».

- Les autres vannages

Lorsque le vannage de Bouaye est ouvert les vannages en aval sont également ouverts. Les eaux du lac s'écoulent de l'Acheneau vers le canal de la Martinière par le vannage de vieux Buzay puis soit directement par le barrage de Buzay ou alors par l'écluse du Carnet. Le vannage de vieux Buzay est parfois fermé pour permettre un écoulement vers l'écluse de la Martinière par le canal de Bourrine. La continuité écologique à la dévalaison est donc entièrement dépendante de la gestion du vannage de Bouaye.

3 Résultats

3.1 Suivi de la pêche et biométrie

Lors des suivis de la pêche, plusieurs données ont pu être récoltées : la durée de pose, la géolocalisation des engins et les quantités capturées par engins d'une part. Les données de taille, de poids et de stade de chaque individu du lot échantillonné lors de la sortie avec les professionnels d'autre part.

3.1.1 Suivi de la pêche

Le suivi de la pêche s'est effectué sur une durée de 3 mois et demi (ensemble de la période de la pêche légale), ce qui a permis de suivre l'activité des 7 professionnels du lac de Grand-Lieu. Durant cette période, 31 jours de suivi de la pêche dont 21 jours avec une biométrie après la pêche ont pu être comptabilisés. Cette biométrie a permis d'analyser 1342 individus issus des captures de la pêche. (Tableau 4)

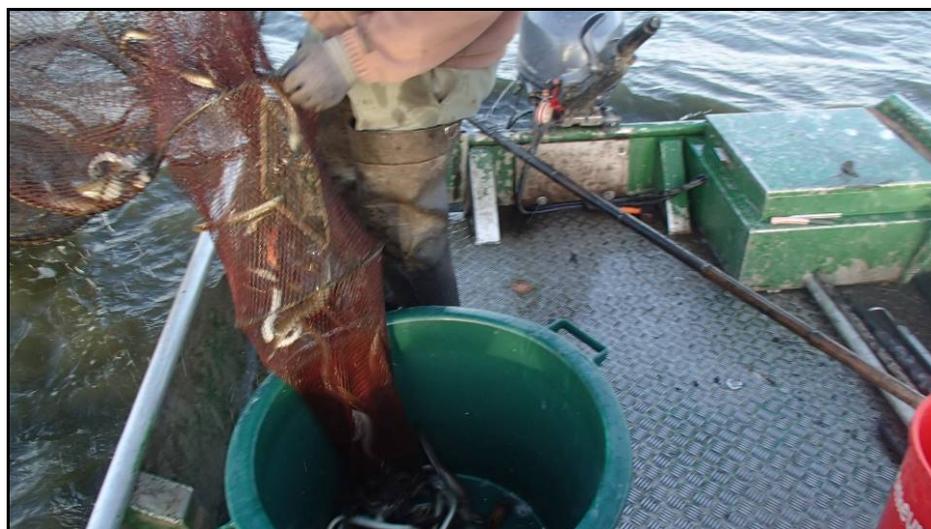


Figure 42 : Suivi embarqué lors de la relève des engins sur le lac de Grand Lieu (FISH PASS)

- Résultats -

Tableau 4 : Récapitulatif des jours de suivi, de biométrie et du nombre d'individus passés en biométrie. Les différentes couleurs sont chacune assignées à un pêcheur professionnel du lac de Grand-Lieu.

	jours de suivis	Semaine	biométrie total	nombre de Jaunes	nombre d'argentées	nombre de jours
Partie expérimentale	14/09/2015	38	50	26	24	6 jours
	18/09/2015		50	19	31	
	21/09/2015	39	50	25	25	
	25/09/2015		50	29	21	
	28/09/2015	40	50	27	23	
	30/09/2015		42	26	16	
Partie suivis de la pêche	02/10/2015	40	44	17	27	31 jours de suivis dont 21 jours de biométrie
	05/10/2015	41				
	07/10/2015		50	22	28	
	09/10/2015		50	23	27	
	13/10/2015	42	50	19	31	
	14/10/2015		50	20	30	
	15/10/2015					
	19/10/2015	43	50	23	27	
	21/10/2015		50	23	27	
	23/10/2015					
	27/10/2015	44	48	31	17	
	28/10/2015		52	32	20	
	30/10/2015					
	02/11/2015	45	52	13	39	
	04/11/2015		50	19	31	
	06/11/2015					
	09/11/2015	46				
	12/11/2015		50	4	46	
	13/11/2015		50	15	35	
	16/11/2015	47	50	33	17	
	18/11/2015		52	13	39	
	20/11/2015					
	23/11/2015	48				
	27/11/2015		< 20	< 20	< 20	
	30/11/2015		46	13	33	
	04/12/2015	49	45	10	35	
	07/12/2015		52	35	17	
	11/12/2015		< 20	< 20	< 20	
	18/12/2015	51	55	19	36	
	06/01/2016	1	55	0	55	
	08/01/2016		49	10	39	
Nombre total d'individus passé en biométrie			1342	546	796	

3.1.1.1 Le tonnage

En considérant l'ensemble des données récoltées via les suivis et les fiches de « pêche », il est possible d'obtenir le tonnage de capture en anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu pour la période considérée (du 1^{er} octobre 2015 au 15 janvier 2016). Le graphique ci-dessous (Figure 43) montre l'évolution du tonnage capturé de l'ensemble de la pêche du lac. L'évolution de ce tonnage semble progressive, même si elle est marquée par trois nettes augmentations correspondant aux 3 périodes où les conditions climatiques étaient plus favorables aux mouvements des anguilles (pluviométrie et vent plus importants...). Ces périodes correspondent aux semaines 41, 45-46 de 2015 et à la 1^{ère} semaine de 2016.

- Résultats -

Le tonnage d'anguilles argentées capturés par la pêche professionnelle, sur le lac de Grand-Lieu, pour la saison 2015/2016 atteint 7012 Kg.

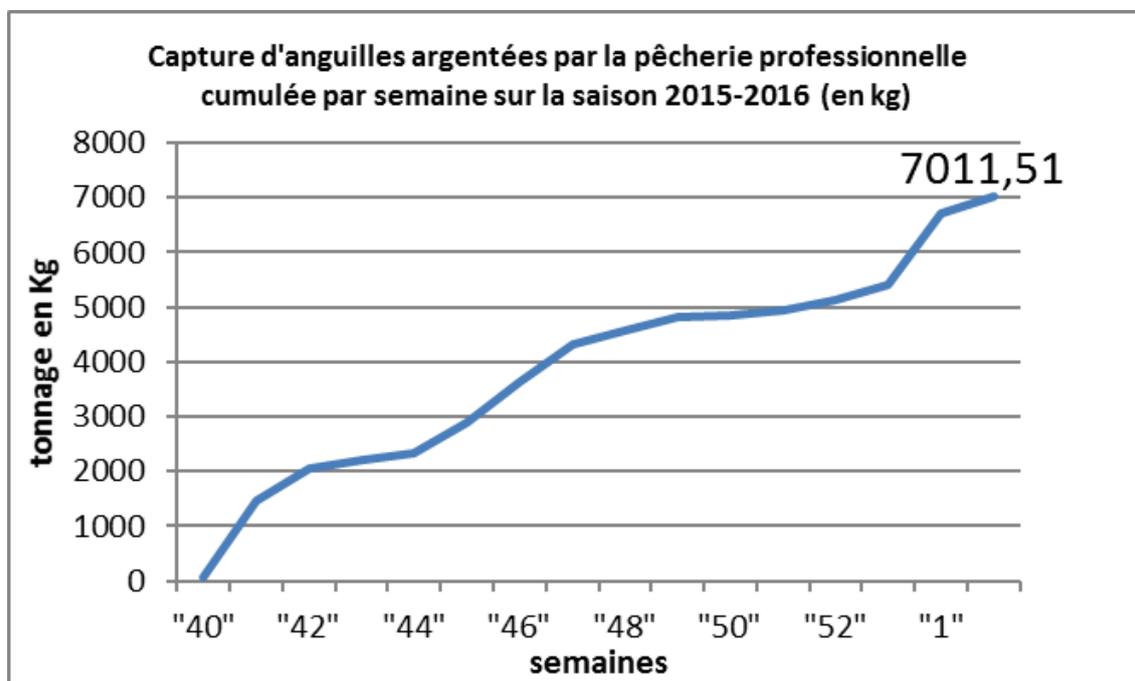


Figure 43 : Cinétique des captures cumulées d'anguilles argentées par la pêche professionnelle. D'après les données récoltées via les fiches de suivi et les suivis terrain.

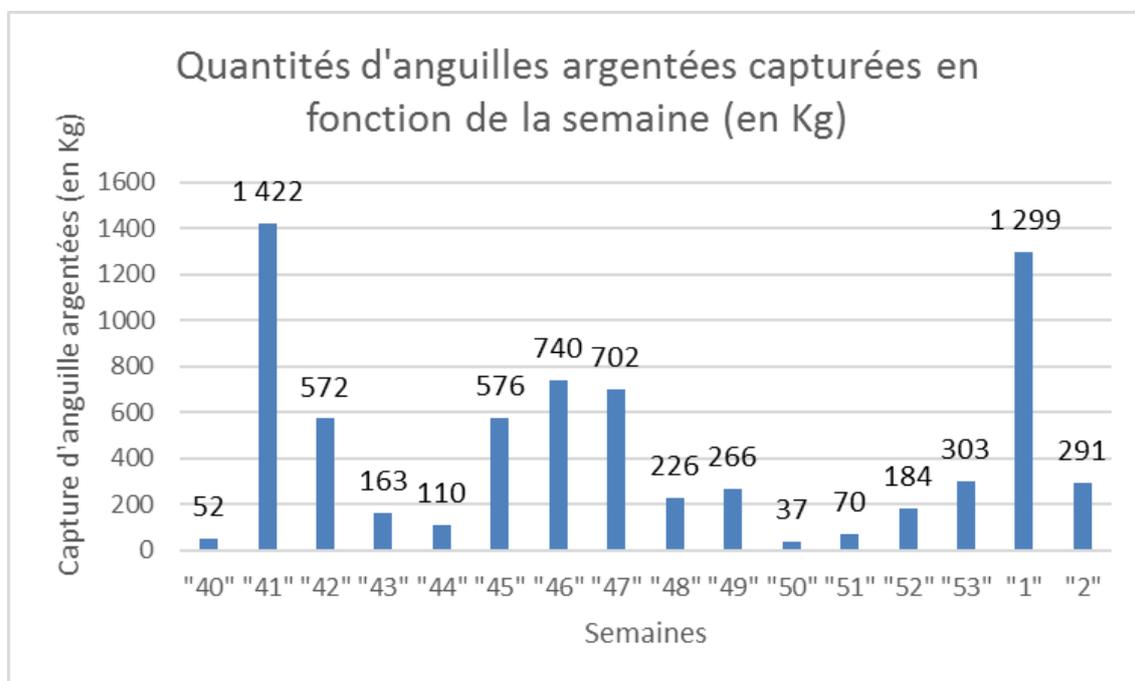


Figure 44 : Evolution des captures d'anguilles argentées par semaine. D'après les données récoltées via les fiches de suivi et les suivis terrain.

- Résultats -

3.1.1.2 Localisation des engins au cours de la saison de pêche (données récoltées lors des suivis terrain uniquement)

Comme le montre la Figure 45, la structuration spatiale des pièges évoluent au cours de la saison de pêche. En effet, il faut remarquer un changement dans la position géographique des engins pour la plupart des professionnels. En début de période (engins matérialisés par des cercles), les pêcheurs du lac de Grand-Lieu privilégient les zones centrales du lac (niveaux d'eau bas). Alors que plus tard dans la saison (engins matérialisés par des triangles), en attente de la crue, ils se réorientent vers les bords et les zones où les anguilles sont susceptibles de transiter lors de la dévalaison.

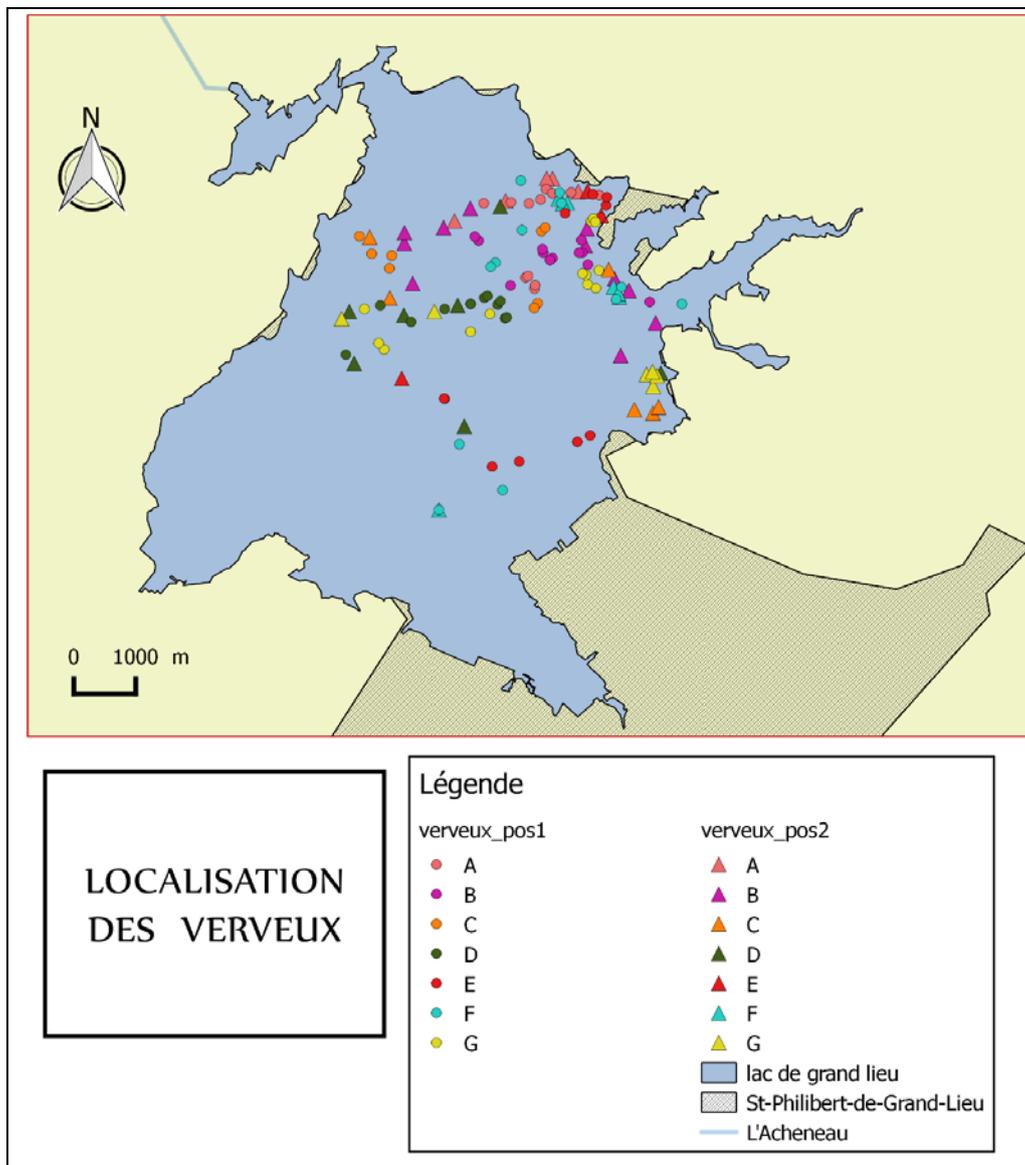


Figure 45 : Localisation spatiale des verveux en fonction de la période (données récoltées lors du suivi des pêcheurs professionnels). Les cercles représentent les verveux posés lors du début de saison alors que les triangles correspondent aux verveux posés en fin de saison. Les lettres de A à G représentent les 7 pêcheurs du lac de Grand-Lieu.

3.1.1.3 Effort de pêche

L'effort de pêche, c'est-à-dire le nombre d'engin en pêche sur une période donnée, quant à lui est relativement constant avec une légère baisse observable au cours de la deuxième moitié de la saison, mise à part les semaines de début (semaine 40) et de fin (semaine 2) de la période de pêche. En effet, comme le montre la Figure 46, il reste compris entre 83 et 68 engins en pêche sur le plan d'eau.

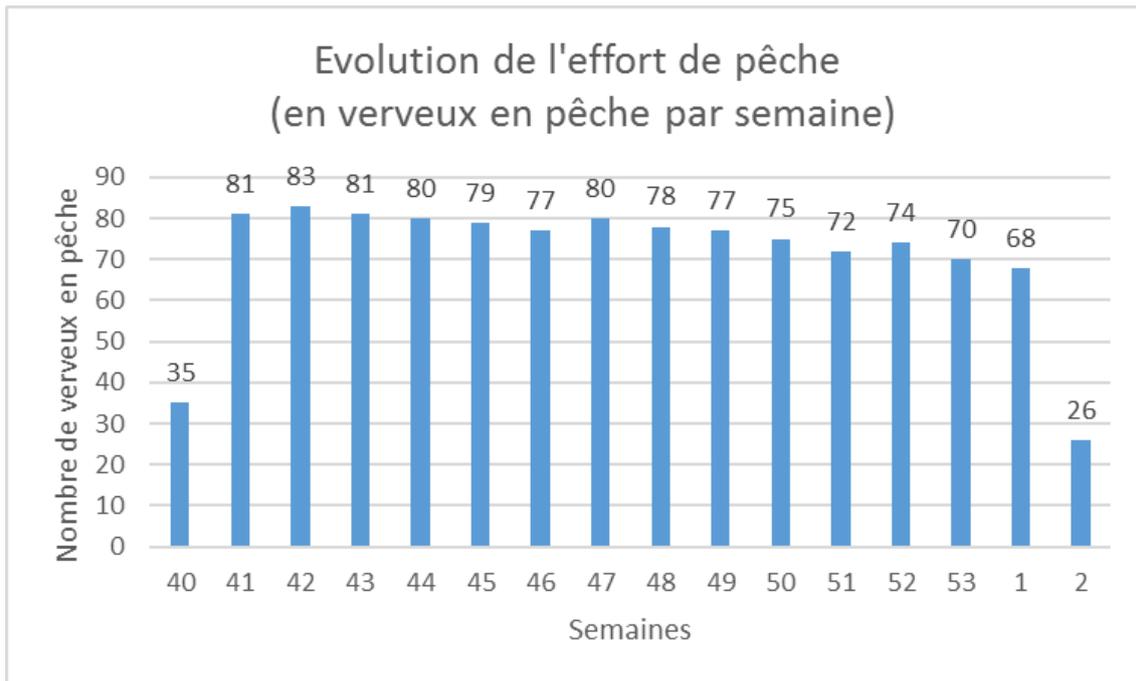


Figure 46 : Evolution des efforts de pêche par semaine sur la durée de la saison de pêche à l'anguille argentée. D'après les données issues des fiches de suivi et des suivis terrain.

La collecte des durées de pose, du nombre d'engin relevés et même du nombre de poches relevées à chaque sortie de pêches, a permis d'obtenir une évolution précise de l'effort de pêche sur la période Octobre / Janvier.

3.1.1.4 CPUE

Il est possible de construire un graphique montrant l'évolution de la capture par unité d'effort (CPUE), ce graphique est présenté en Figure 47, il faut noter la présence de forts écarts. En effet, la capture par unité d'effort (CPUE) varie de moins de 70 grammes / verveux / 24 h à la semaine 50 à plus de 2,7 kg / verveux / 24 h à la semaine 1.

- Résultats -

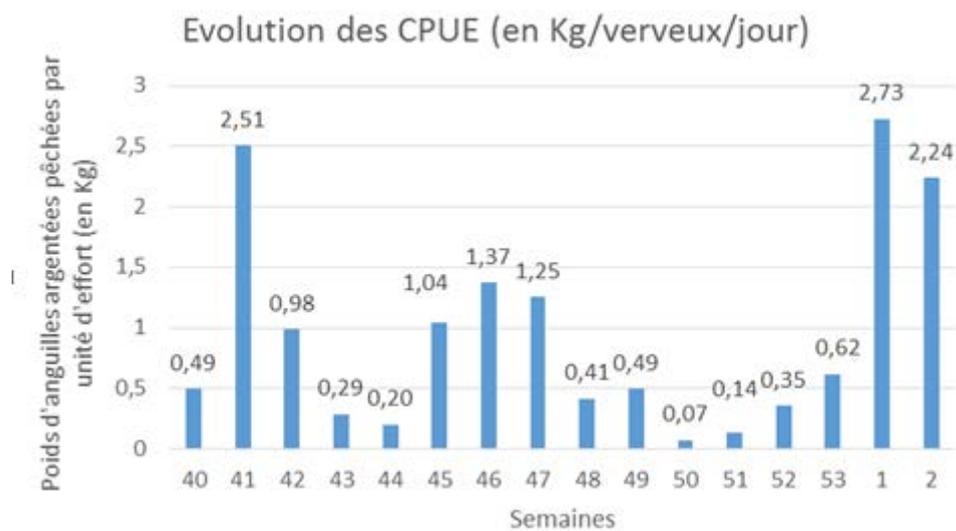


Figure 47 : Evolution des CPUE (moyennes) par semaine. D'après les données issues des fiches de suivi et des suivis terrain.



Figure 48 : Relève d'un verveux sur le lac de Grand Lieu (V MAZEL)

- Résultats -

3.1.2 Biométrie : Caractéristiques de la fraction exploitée

La biométrie a été réalisée (par le SMIDAP / FISHPASS) sur un échantillon d'environ 50 individus issus des captures d'anguilles du jour de la relève. Cette biométrie est faite avant le tri réalisé par les pêcheurs professionnels. Ainsi, les anguilles jaunes ont été relâchées sur le plan d'eau.

3.1.2.1 Taux d'argentine

Pour ce qui est du taux d'argentine, comme le montre la Figure 49, il varie au cours du temps. Des taux d'argentine assez faible, inférieurs à 33 % lors des échantillonnages de fin d'année (semaine 50) ont été constatés. Des taux d'argentine faibles ont été observés plusieurs fois au cours de la saison. Ainsi, durant les semaines 39, 40, 44 et 50, les taux d'argentine ne dépassaient pas les 50 %, avec 46 % ; 49 % ; 37 % et 33 % respectivement. Il a fallu attendre la semaine 46 pour avoir des taux d'argentine supérieur à 65 % avec notamment 81 %, 75 % et 90 % aux semaines 46 ; 49 et 1 respectivement.

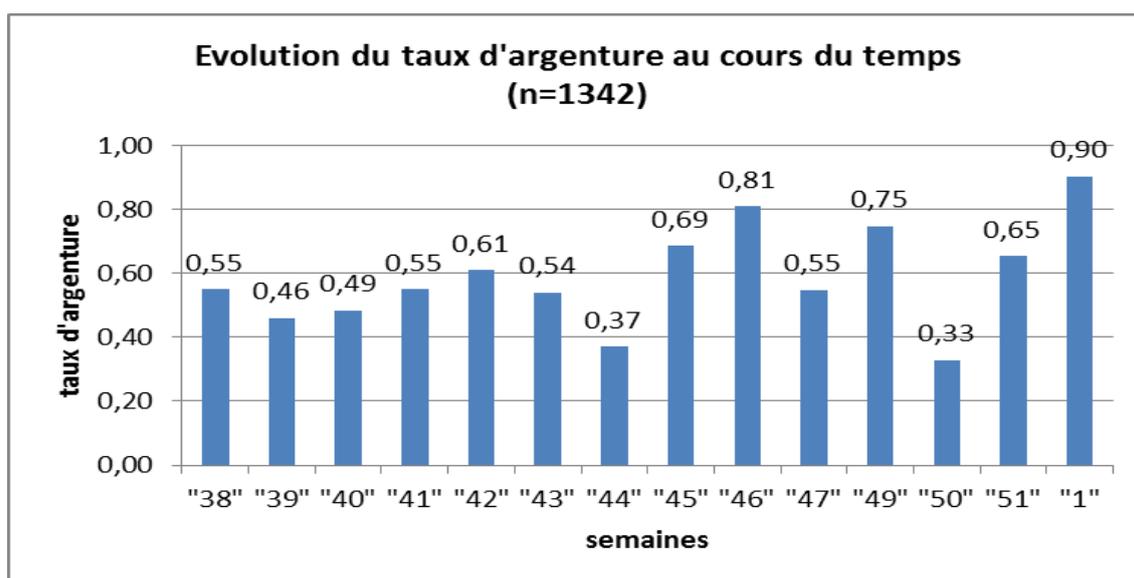


Figure 49 : Evolution du taux d'argentine moyen par semaine au cours de la période d'étude. D'après les données récoltées lors des biométries.

- Résultats -



Figure 50 : Anguilles jaune et argentée de même taille (V MAZEL)

3.1.2.2 Sex-ratio

La proportion moyenne de mâles observée sur la durée de l'étude est de 85 %, 674 mâles ont été comptabilisés pour 122 femelles (N = 796 ; $\alpha = 0.145$). La plus forte proportion de mâles (100 %) est relevée lors de la semaine 40, celle de femelle (52.13 %) au niveau de la semaine 1. L'évolution de la proportion des deux sexes, sur de la période d'étude, peut être constatée. Ainsi la Figure 51 montre l'évolution de cette dernière par semaine. Il faut remarquer que la proportion de femelles connaît des pics aux semaines 45 et 46 puis à la semaine 49 avec 23 % ; 26 % et 25 % respectivement. C'est lors de la semaine 1 que la plus forte proportion de femelles est observée (52 %).

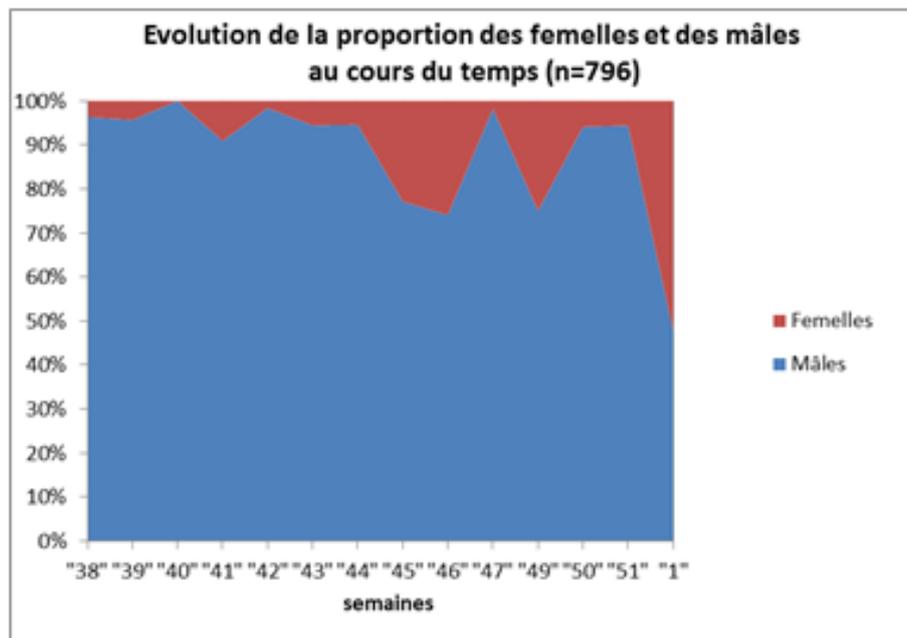


Figure 51 : Evolution des proportions des deux sexes au cours du temps. D'après les données récoltées lors des biométries.

- Résultats -

3.1.2.3 Taille et classes de taille

Les relevés des différents paramètres morphologiques, lors des biométries ont permis de calculer la taille moyenne des anguilles capturées en fonction de leur stade ainsi que de leur sexe :

- Taille moyenne des anguilles jaunes : 397 mm (N = 1342 ; σ = 113 ; Min-Max = 276-907).
- Taille moyenne des anguilles argentées (tous sexes confondus) : 416 mm (N = 796 ; σ = 130 ; Min-Max = 300-907).
- Taille moyenne des mâles étaient de 363 mm (N = 674 ; σ = 21 ; Min-Max = 300-447)
- Taille moyenne des femelles étaient de 708 mm (N = 122 ; σ = 87 ; Min-Max = 472-907)
- Les tailles moyennes des anguilles argentées varient significativement au cours de la période d'étude. (Données : taille ~ semaine : Kruskal-Wallis χ^2_{KW} = 113.0295, df = 13, p-value < 2.2e-16).

Tableau 5 : Caractéristiques des individus passés en biométrie. Les semaines 48, 52, 53 et 2 correspondent aux semaines sans biométrie. D'après les données récoltées lors des biométries.

Semaines	Nombre d'AG	Poids				Taille				Sexe	
		Moyenne	Écartype	Min	Max	Moyenne	Écartype	Min	Max	Nb Mâles	Nb Femelles
38	55	115,89	97,43	63	749	376,73	63,32	320	742	53	2
39	46	124,09	181,49	62	1307	381,07	76,92	330	835	44	2
40	66	90,86	14,57	64	137	358,73	20,88	300	425	66	0
41	55	146,02	159,90	64	890	396,62	85,42	323	740	50	5
42	61	96,51	55,67	64	505	368,52	42,45	330	656	60	1
43	54	105,26	80,69	56	506	371,43	58,34	315	630	51	3
44	37	106,68	108,69	57	675	369,92	71,62	305	691	35	2
45	70	228,11	276,86	67	1117	440,63	144,44	330	772	54	16
46	81	244,74	300,39	63	1364	449,91	147,74	325	865	60	21
47	56	92,02	59,61	46	515	364,89	41,13	320	620	55	1
48											
49	68	225,68	280,71	57	1146	441,19	146,99	321	830	51	17
50	17	113,18	153,92	30	707	381,71	91,74	330	730	16	1
51	36	102,47	86,99	60	545	373,36	61,95	317	652	34	2
52											
53											
1	94	497,14	420,98	64	1317	570,54	202,17	338	907	45	49
2											
Total général	796	188,77	256,00	30	1364	416,14	130,46	300	907	674	122

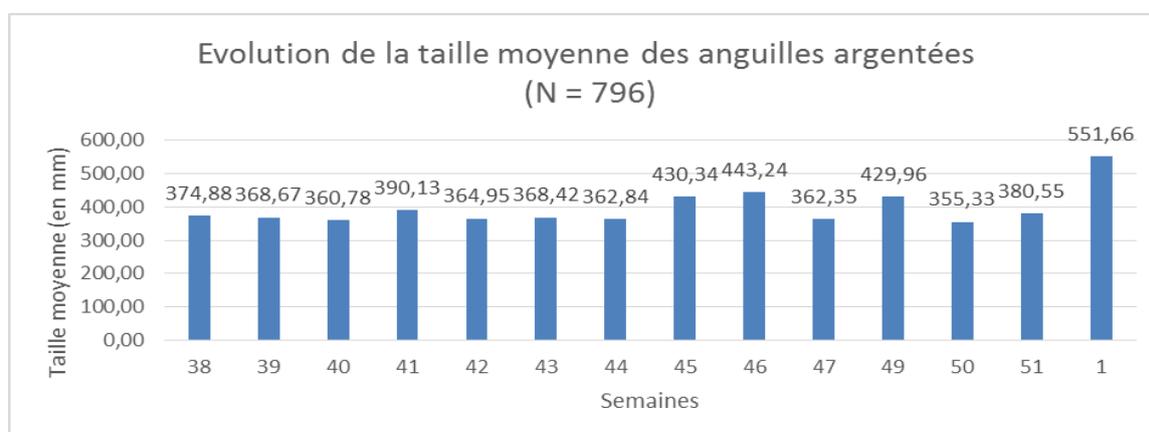


Figure 52 : Evolution de la taille moyenne des anguilles argentées.

- Résultats -

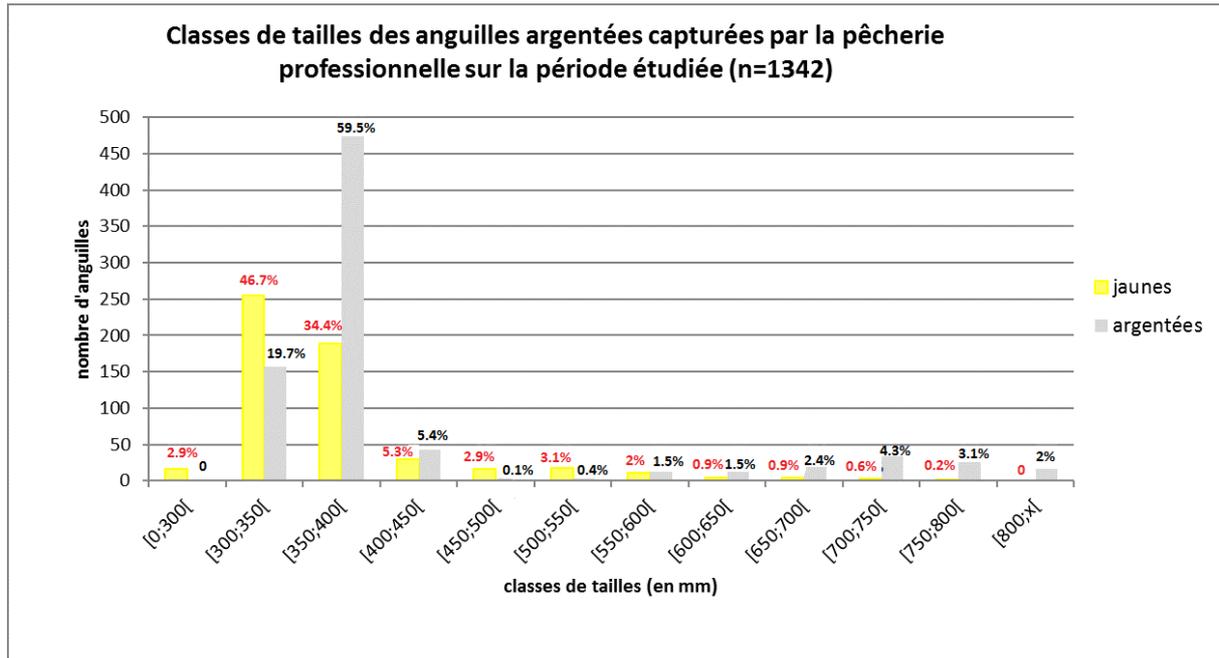


Figure 53 : Répartition des anguilles étudiées en classes de taille en fonction de leur stade. D'après les données récoltées lors des biométries.

La présence de deux modes peut être remarquée pour les anguilles argentées (Figure 53). Ainsi 84.67 % des anguilles argentées échantillonnées (N = 796) mesuraient moins de 450 mm et appartiennent au premier mode. L'autre partie appartient à un mode distinct. Ces deux modes caractérisent le dimorphisme sexuel chez l'anguille. Il est possible de déduire le sexe de l'individu considéré. Ainsi, un individu étant argenté et mesurant plus de 450 mm sera considéré comme une femelle. Comme cela a déjà été montré dans la littérature (Vollestad et al., 1986 ; Acou et al., 2003), les mâles s'argentent en moyenne à des tailles beaucoup plus faibles (407.8 mm ; $\sigma = 25.4$, min-max : 348-460 mm) que les femelles (783 mm ; $\sigma = 97.2$, 470-1138 mm). De plus, les données issues de l'étude des gonades réalisée sur 102 individus montrent que la taille des femelles argentées matures est comprise entre 607 et 880 mm (N = 50) alors que celle des mâles est comprise entre 318 et 401 mm (N = 52). L'étude du possible recouvrement (classes de tailles comprises entre 450 mm et 600 mm) entre les mâles et les femelles argentés n'a pu être réalisée car les individus argentés collectés par la pêche des classes de tailles [450-500], [500-550] et [550-600] ne représente respectivement que 0.1 %, 0.4 % et 1.5 % des individus échantillonnés au cours de toute la saison et cette gamme de taille n'était pas disponibles au moment de la conservation des individus pour la biométrie spécialisée (Figure 53).

- Résultats -

D'après les données récoltées (taille, poids et stade) lors des biométries et les données compilées issues des fiches de suivi, il a été possible d'obtenir la proportion (Figure 54), en poids d'anguilles argentées capturées par la pêcheur durant la saison 2015/2016, que représente chaque classe de taille. Ce graphique est intéressant dans une optique de gestion de la pêcheur et d'évaluation de la maille optimale des engins pour réduire les captures d'anguilles jaunes (ne plus avoir à trier trop d'anguilles jaunes).

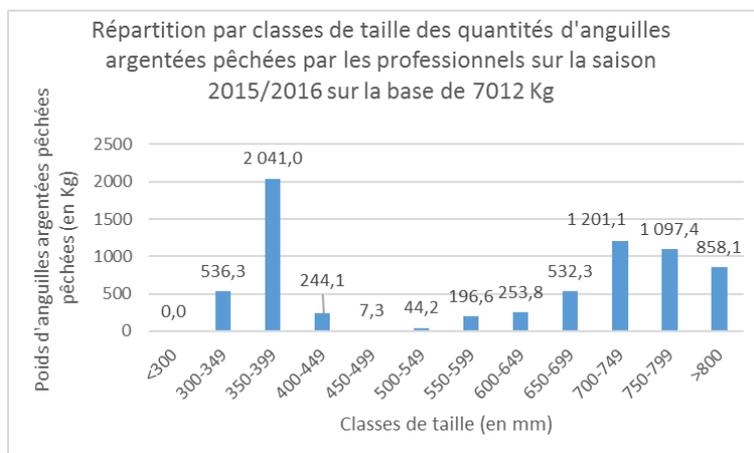


Figure 54 : Répartition des quantités d'anguilles argentées pêchées en fonction des classes de taille.

3.1.2.4 Relation Taille/Poids

Les données de taille et de poids de l'échantillon ont permis d'établir la relation : Poids = f(Taille) (Figure 55). La relation est la suivante : $P = aL^b$ où P est le poids (g), L la taille (cm), a et b sont des coefficients. D'où d'après les données : $P = 1,4 \cdot 10^{-3} L^{3,0693}$. Où $a = 1,4 \cdot 10^{-3}$ (en cm) et $b = 3,07$. Avec un $R^2 = 0,98$. Après vérifications, les deux points qui semblent s'écarter de la courbe, ne sont pas des erreurs.

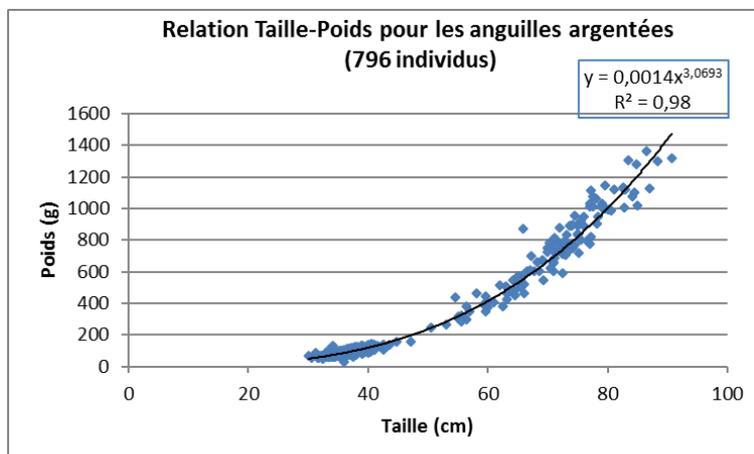


Figure 55 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les anguilles argentées.

- Résultats -

Cette relation Taille-Poids a également été réalisée en fonction des deux sexes. Pour les femelles l'équation ainsi obtenue est : $P = 1,1 \cdot 10^{-3} L^{3,1451}$. Où $a = 1,1 \cdot 10^{-3}$ (en cm) et $b = 3.15$. Avec un $R^2 = 0.93$ et pour les mâles : $P = 8,1 \cdot 10^{-3} L^{2,5897}$. Où $a = 8,1 \cdot 10^{-3}$ (en cm) et $b = 2.59$. Avec un $R^2 = 0.67$. Les deux figures correspondantes sont présentées ci-dessous (Figure 56 et Figure 57).

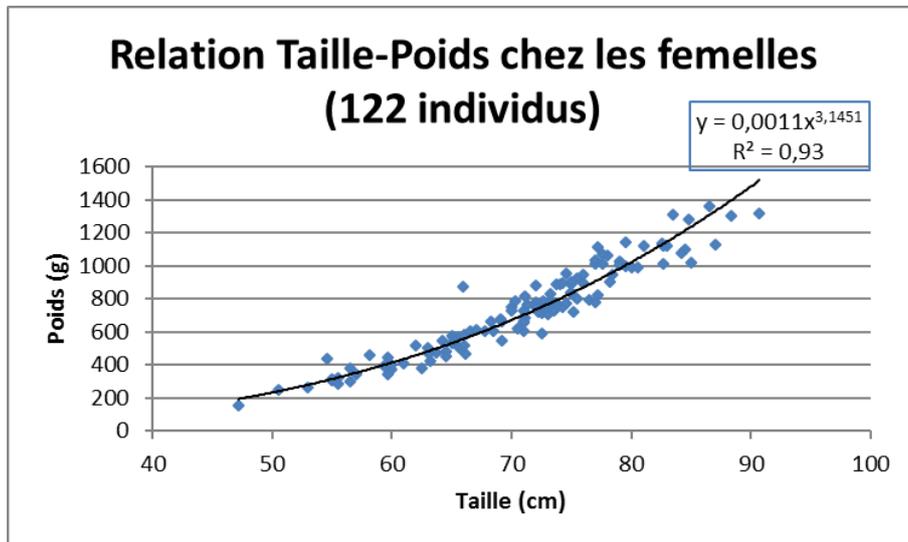


Figure 56 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les femelles.

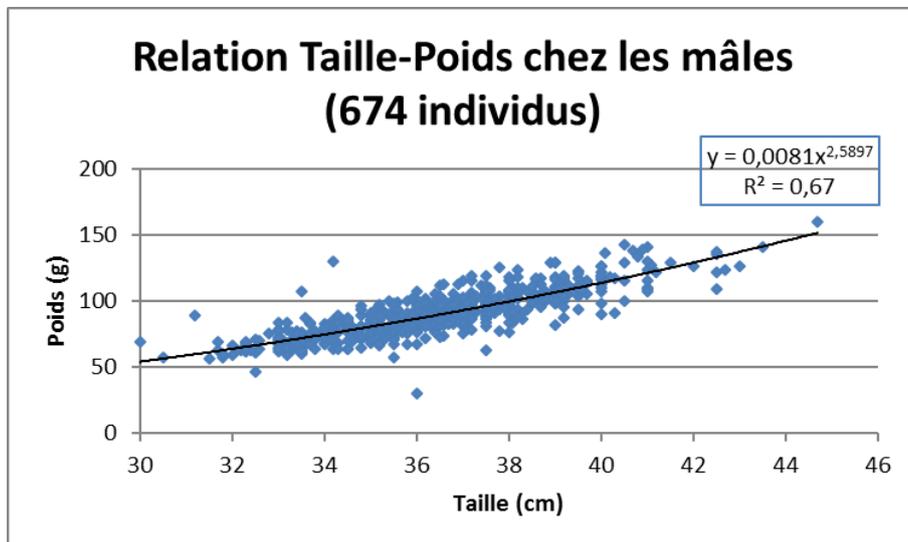


Figure 57 : Graphique représentant la relation taille-poids pour les mâles.

- Résultats -

3.1.3 Biométrie spécialisée : qualité des géniteurs produits

3.1.3.1 Qualité externe des géniteurs

Les résultats de l'étude de la qualité externe, sur les individus destinés au marquage (N = 524) et sur les individus issus de la biométrie spécialisée (N = 102), montrent d'après la Figure 58, que les anguilles du lac de Grand-Lieu sont pour la plupart lésées (81 % ; N = 626). Il est retrouvé de nombreuses érosions (ERxx) et grosseurs, essentiellement localisées sur les nageoires (Figure 61) (AGxx) qui représente 43 % et 34 % (N = 506) respectivement (Figure 59). En revanche, ces lésions sont pour la plupart, d'importance mineure (1 ou 2). En effet, 95 % (N = 506) présentent des lésions externes d'importance mineure (XXX1, XXX2) (Figure 60).

L'indice pathologique général calculé selon la méthode d'Elie et Girard (2014) est de 1.23. D'après la grille d'interprétation la condition de la population d'anguilles argentée du lac de Grand-Lieu est considérée comme « détériorée ».

Tableau 6 : Tableau des correspondances des abréviations utilisées lors de l'étude des lésions externes.

Sain	Érosion	Grosseur	Altération de la couleur	Hémorragie	Parasite	Ulcère	Absence d'organe
OOCO	ER	AG	AC	HE	PX	UL	AO

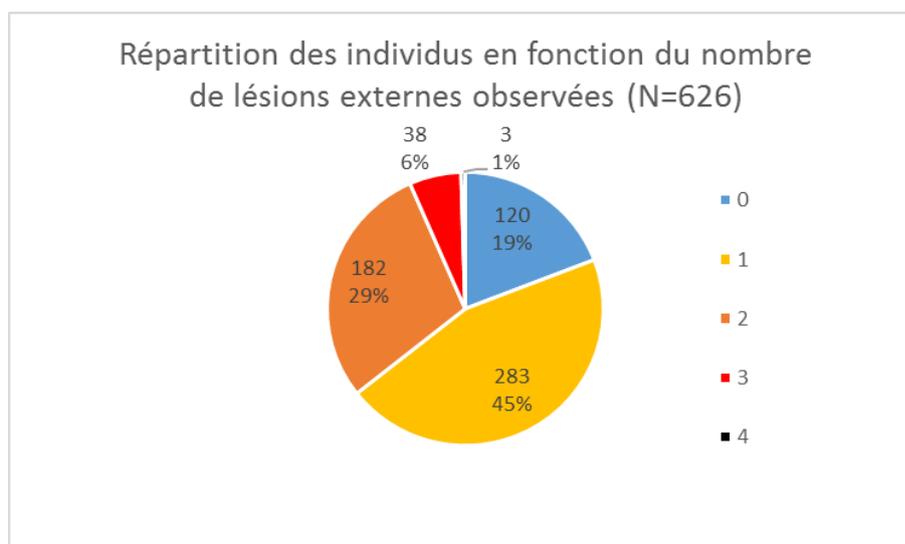


Figure 58 : Qualité des géniteurs vis-à-vis des lésions externes.

- Résultats -

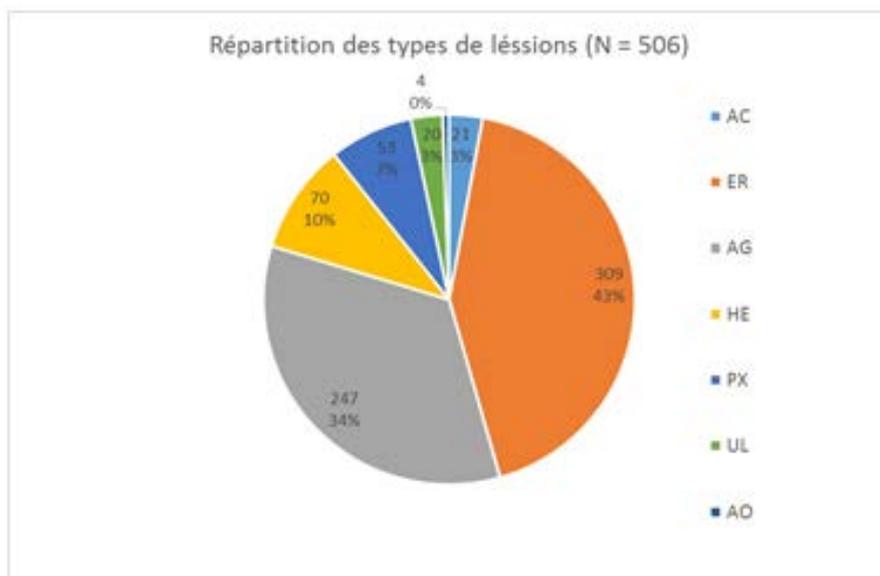


Figure 59 : Répartition des types de lésions externes.

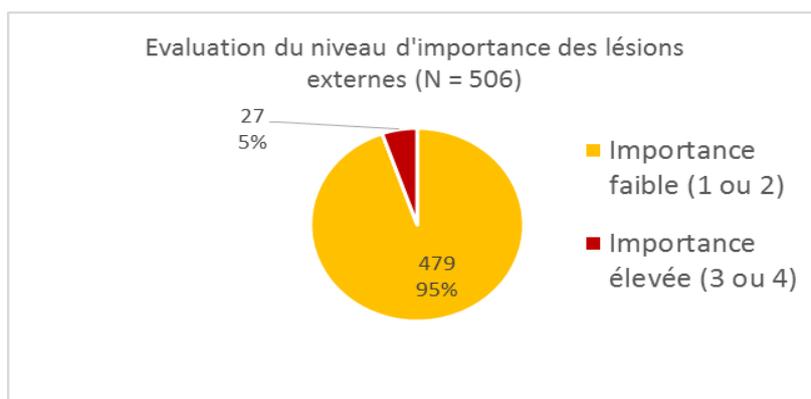


Figure 60 : Répartition des niveaux d'importance des lésions externes.



Figure 61 : Photo de « kystes » dans les nageoires (CODAGE AGNX) (FISH PASS)

- Résultats -

3.1.3.2 Caractéristiques des individus conservés pour la parasitologie interne

Les caractéristiques des individus ayant fait l'objet d'une biométrie spécialisée sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 7). D'après le Tableau 7, la taille des individus était comprise entre 318 mm et 401 mm pour les mâles et entre 607 mm et 880 mm pour les femelles. Les tailles moyennes étant de 360,12 mm pour les mâles et de 727,74 mm pour les femelles.

Tableau 7 : Caractéristiques des individus conservés pour la parasitologie (N=102)

		Longueur	Poids	Vessie natatoire			Parasites
		(en mm)	(en g)	Opacité	Epaisseur	Pigmentation	(en nb)
moyenne	M	360,12	87,56	1,50	1,13	1,35	4,69
	F	727,74	756,44	1,02	0,68	0,96	7,58
	T	540,32	415,44	1,26	0,91	1,16	6,11
Min	M	318	63	0	0	0	0
	F	607	369	0	0	0	0
	T	318	63	0	0	0	0
Max	M	401	115	2	2	2	21
	F	880	1230	2	2	2	94
	T	880	1230	2	2	2	94
Ecart type	M	19,57	12,37	0,58	0,63	0,71	5,37
	F	58,52	212,82	0,68	0,65	0,73	15,39
	T	189,64	367,38	0,67	0,68	0,74	11,47

3.1.3.3 Qualité interne des géniteurs vis-à-vis de *A. crassus*

Pour ce qui est des pathologies internes, les anguilles du lac de Grand-Lieu sont pour la plupart parasitées par *A. crassus* (Prévalence 74 % ; N = 102, Figure 63). La charge parasitaire est élevée (24 % possèdent plus de 10 parasites/individu ; N = 75, Figure 64) et l'intensité moyenne est de 6.31 avec un maximum atteignant 94 parasites retrouvés sur une femelle de 638 g. L'abondance moyenne est de 6.11.



Figure 62 : Vessie natatoire en cours de dissection contenant des parasites (FISH PASS)

- Résultats -

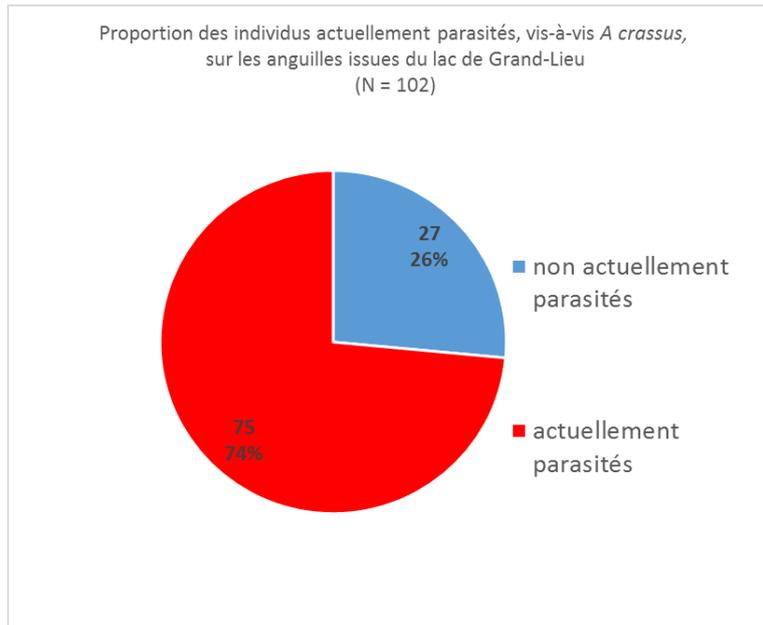


Figure 63 : Qualité des géniteurs vis-à-vis du parasitisme par *A. crassus*.

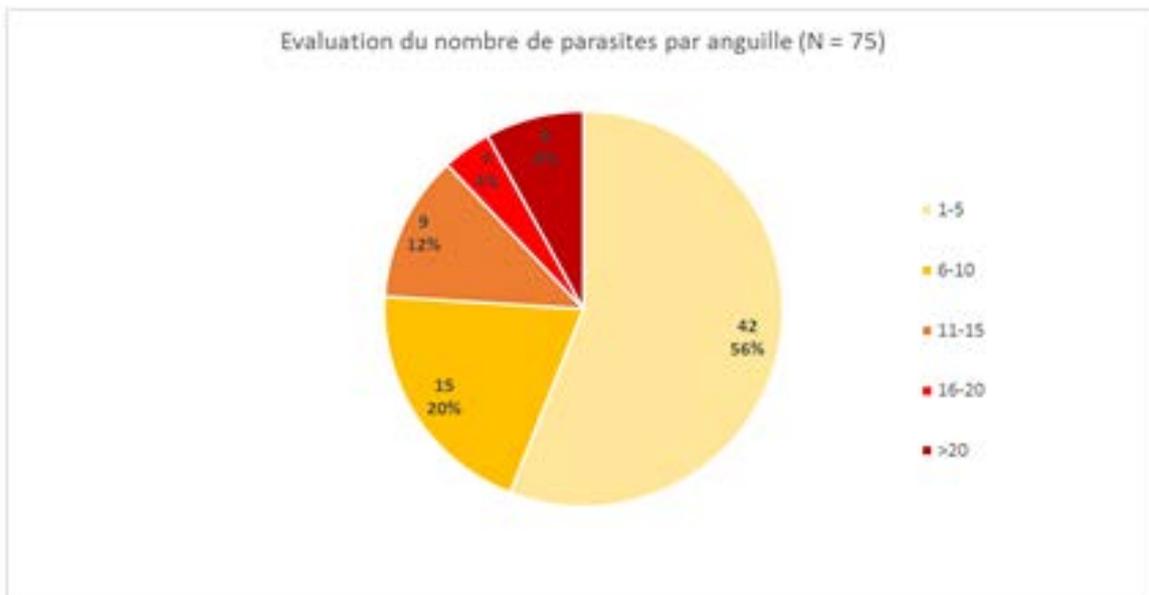


Figure 64 : Evaluation de la charge parasitaire des individus actuellement parasités (sacrifiés en janvier 2016).

Une part des individus ne possédaient pas de parasites lors de l'autopsie mais en ont possédé par le passé. De ce fait, seul 3 % (N = 102) des individus sont réellement sains vis-à-vis d'*A. crassus* (Figure 65). Ainsi les caractéristiques de la vessie natatoire montrent un effet de la présence passée du parasite, cette dernière est endommagée.

- Résultats -

Tableau 8 : Fréquence des SDI sur les individus analysés

Nombre	%	SDI
7	6,86%	0
12	11,76%	1
14	13,73%	2
18	17,65%	3
22	21,57%	4
16	15,69%	5
13	12,75%	6

PSDI : 81,37

Les individus sains sont dissociés des individus lésés à partir du moment où ils ne présentent pas de parasite au moment de l'autopsie et que leur SDI est de 0.

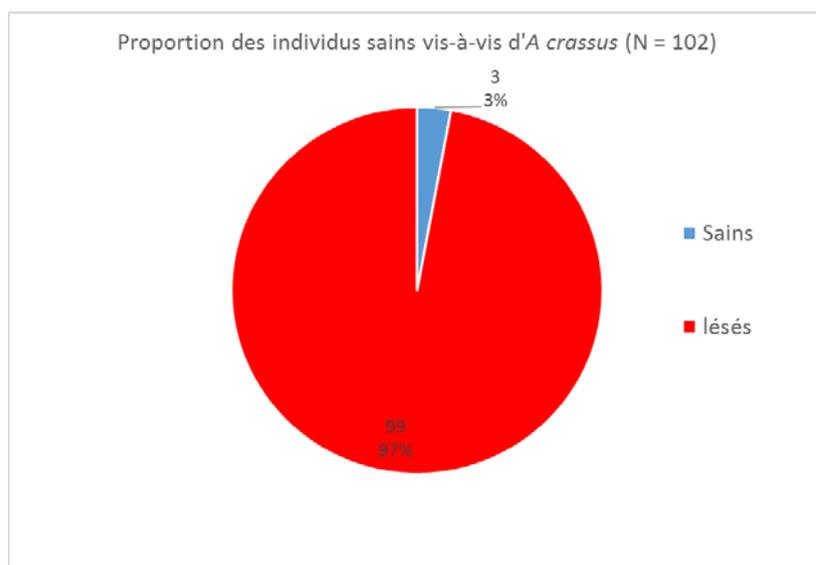


Figure 65 : Proportion des individus parasités ou ayant été parasités par *A. crassus* et présentant des lésions internes.

- Résultats -

3.1.3.4 Clé taille / âge

L'ageage montre que la majeure partie des mâles sont âgés de 3 ans (75 % ; N = 52) alors que les femelles sont âgées de 5 à 9 ans. (Figure 66)

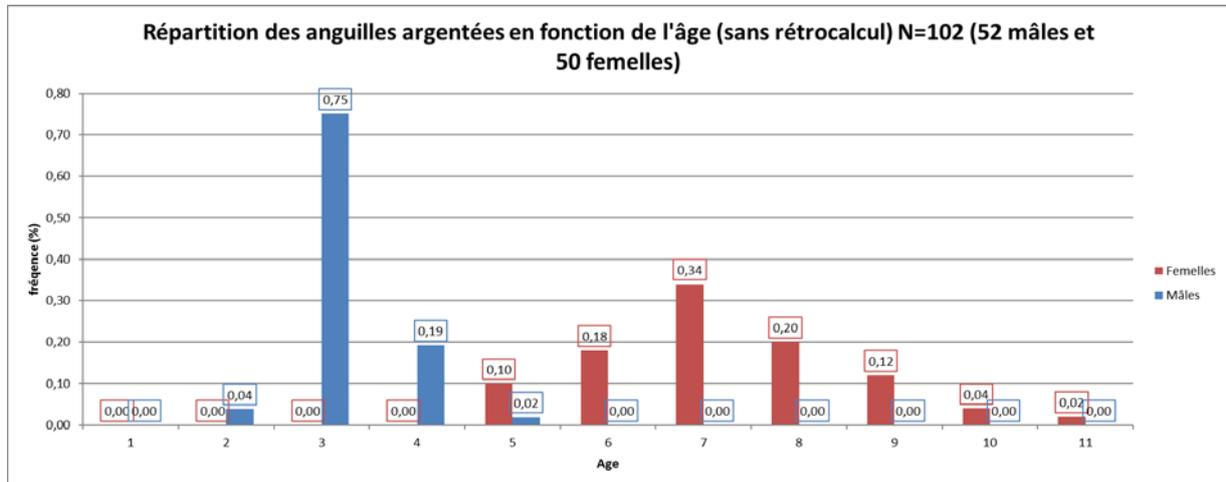


Figure 66 : Répartition des anguilles argentées en fonction de l'âge (sans rétro-calcul).

Le rétro-calcul, d'après la formule de Frazer Lee (1920, Panfili *et al.*, 2002) permet d'obtenir une clé Taille/Âge présenté dans le tableau suivant (Tableau 9)

$$Li = b + (Lc - b) (Si / Sc)$$

Où :

- Li : Taille à l'âge i (en mm)
- b : Ordonnée à l'origine de la régression $Lc = d Sc + b$ réalisée sur l'ensemble de l'échantillon (N = 102)
- Lc : Taille à la capture (en mm)
- Si : Rayon de l'annuli à l'âge i (en mm)
- Sc : Rayon total de l'otolithe (en mm)

Etape 1 : Réaliser la régression $Lc = d Sc + b$

Avec

Lc : taille à la capture (mm)

Sc : rayon total de l'otolithe (mm)

- Résultats -

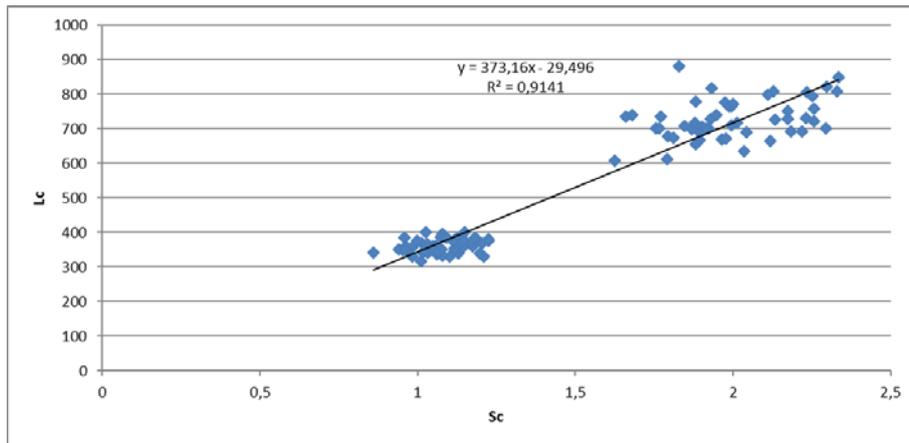


Figure 67 : Relation longueur total de l'individu-rayon total de l'otolithe pour les 102 individus.

La régression obtenue est :
 $Lc = 373.16 Sc - 29.496$
 D'où : $b = - 29.496$

Etape 2 : Calcul des Li via la formule de Frazer Lee.

$b = - 29.496$ d'où $Li = - 29,496 + (Lc + 29,496) (Si / Sc)$

Tableau 9 : clé taille / âge.

Age (ans)	[<-1]	[1-2]	[2-3]	[3-4]	[4-5]	[5-6]	[6-7]	[7-8]	[8-9]	[9->]
Taille (mm)	[<129]	[129-237]	[237-352]	[352-452]	[452-563]	[563-634]	[634-690]	[690-724]	[724-766]	[>766]

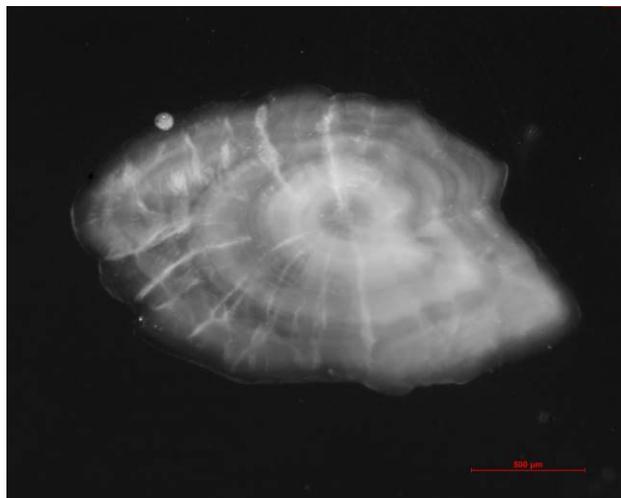


Figure 68 : Otolithe d'une anguille argentée de Grand Lieu (FISH PASS)

- Résultats -

3.1.4 Sexage

Sur les 102 individus conservés pour la biométrie « spécialisée » 52 sont des mâles et 50 sont des femelles. Dans cet échantillon, issu de la pêche professionnelle, il n'y a pas de recouvrement de la cohorte des mâles et de la cohorte des femelles. La taille des mâles argentés est ainsi comprise entre 318 et 401 mm et celle des femelles argentées est comprise entre 607 et 880 mm. Sur les 52 mâles analysés 51 présentent un stade de développement des gonades au « stade 5 » et un individu est au « stade 4 » et 100 % des femelles présentent un stade de développement des gonades au « stade 8 ». **La limite de 450 mm pour discriminer les mâles des femelles se vérifie.**

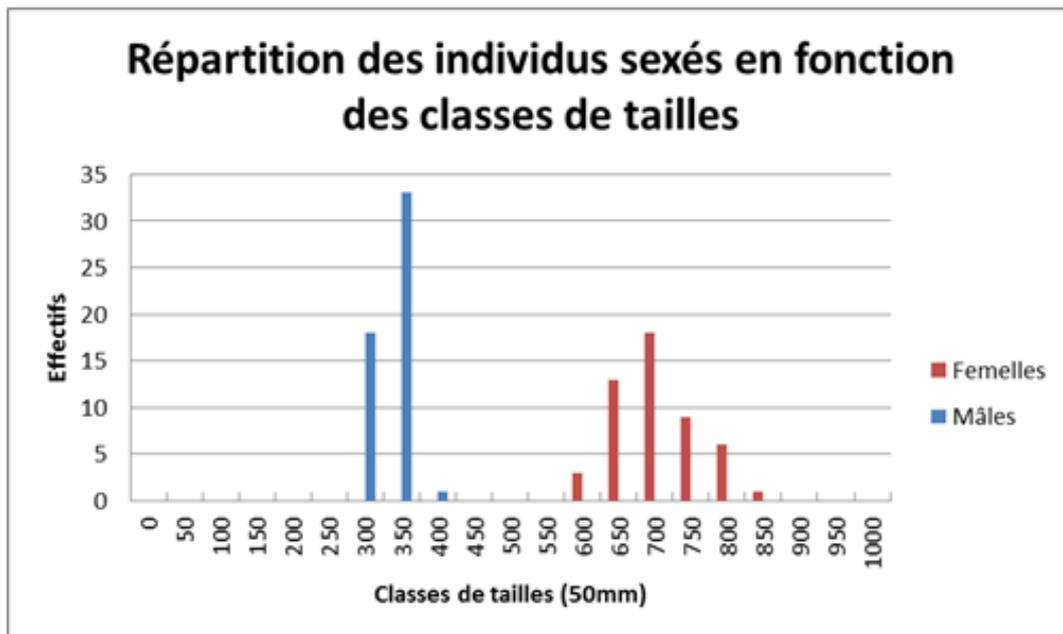


Figure 69 : Répartition des individus sexés (N=102)

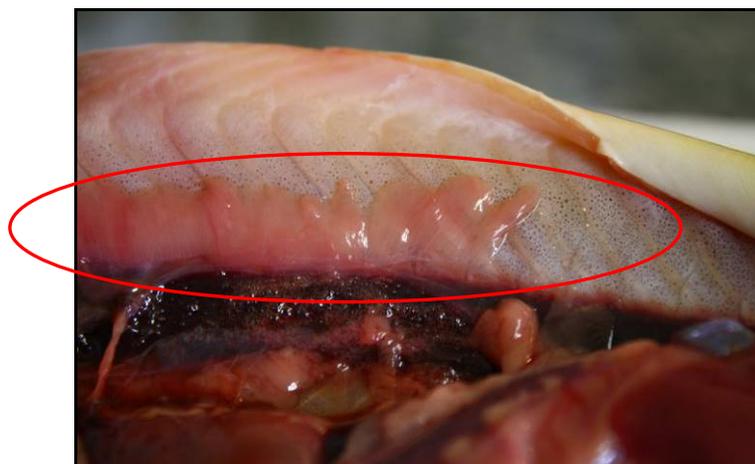


Figure 70 : Gonade d'anguille femelle (FISH PASS)

3.2 Capture Marquage Recapture aux PIT-Tag

3.2.1 Caractéristiques des individus marqués

Lors de la campagne de CMR, 524 anguilles argentées ont été marquées d'un tag unique (PIT-tag). Ces anguilles ont subi une biométrie où la taille, le poids, le taux d'argenture et une analyse des pathologies externes selon le protocole de Beaulaton et Penil ont été relevés. Ainsi la taille et le poids moyen de ces individus étaient respectivement de 386.66 mm (N = 524 ; $\alpha = 84.49$) et 125.85 g (N = 524 ; $\alpha = 140.27$). Les tailles sont comprises dans l'intervalle [min = 294 ; max = 780] (Tableau 10). La structure en taille des individus marqués montre deux modes, le premier dont le sommet se situe à 365 mm caractérise la fraction « mâle » de l'échantillon, et le deuxième dont le sommet se situe aux alentours de 725 mm caractérise la fraction « femelle » de l'échantillon (Figure 71).

Tableau 10 : Caractéristiques des individus marqués aux PIT-tags et relâchés (les individus vivant à l'issu du test de mortalité et perte de marque ont également été relâchés (N=27).

Marquage	N total	N Mâles	N Femelles	Taille				Poids			
				Moyenne	Écartype	Min	Max	Moyenne	Écartype	Min	Max
1	180	178	2	367,44	26,48	294	526	92,84	19,91	45	213
2	120	119	1	366,02	41,60	318	758	94,94	67,45	62	808
3	90	90		363,48	22,42	312	420	91,16	17,08	55	145
Test	27	22	5	436,70	132,91	322	733	201,59	222,08	66	719
4	107	81	26	449,02	145,64	305	780	226,10	251,78	58	858
Total général	524	490	34	386,66	84,49	294	780	125,85	140,27	45	858

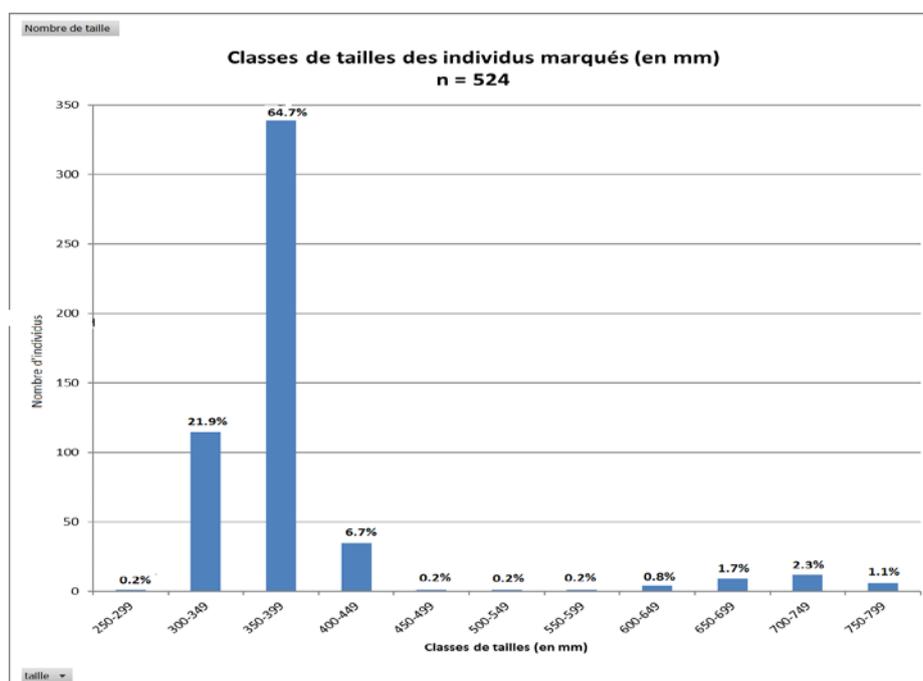


Figure 71 : Répartition des individus marqués en classes de taille.

- Résultats -

L'échantillon se caractérise, en termes de genres, par la présence de 34 femelles pour 490 mâles ce qui fait une proportion de femelles de moins de 7 %. Dans le cadre de cette étude, il est possible d'y ajouter les 51 femelles marquées au sonique par le MNHN. Ainsi, il a été relâché 85 femelles pour 490 mâles soit une proportion de femelles de 14.8 %. Cette proportion est représentative de la fraction exploitée. En effet, la proportion de femelle fut en moyenne de 15 % (N = 796 ; min = 0 % ; max = 52 %). Ce calcul est basé sur les 796 individus argentés ayant subis une biométrie.

3.2.2 Test de perte de marque et de mortalité

Tout d'abord, sur les 30 anguilles marquées, aucune perte de marque n'a été observée après les 15 jours de test *in situ*. Pour ce qui est de la mortalité, 2 anguilles du lot « témoin » et 3 anguilles du lot « marqué » sont mortes. Sur les 3 individus marqués, 2 présentaient une infection au niveau de l'incision du trocart malgré l'utilisation d'aiguilles à usage unique et de la désinfection de l'incision. Il a été conclu, à la vue de ces résultats, qu'il n'y avait pas d'effet significatif du marquage sur la survie des individus marqués

→ Test Fisher ($N_{\text{échantillon}} < 30$)

H_0 : témoin = marqué

H_1 : témoin \neq marqué

$P_{\text{value}} > 5\%$ donc non rejet de H_0

Tableau 11 : Comparaisons des caractéristiques morphologiques des individus issus du lot « marqué » et du lot « témoin ».

Type	Nombre			Taille (en mm)				Poids (en g)			
	Total	Mâles	Femelles	Moyenne	Écartype	Min	Max	Moyenne	Écartype	Min	Max
Marqués	30	25	5	428,77	128,21	322	733	189,93	213,31	66	719
Témoins	30	25	5	426,13	143,76	330	800	212,47	282,61	64	1046
Total général	60	50	10	427,45	135,06	322	800	201,20	248,50	64	1046

Les tests ont été réalisés en plaçant chacun des lots dans une couve à l'intérieur des viviers des pêcheurs professionnels disposés sur le plan d'eau pour se placer dans les conditions les plus proches possibles du milieu étudié (température, qualité d'eau, ...).

- Résultats -



Figure 72 : Couve utilisée par les pêcheurs professionnels pour stocker les anguilles sur le lac de Grand Lieu (FISH PASS)



Figure 73 : Photographies des anguilles morte durant le test de rétention de marque (A gauche : présence d'une infection, A droite présence d'une nécrose au point d'insertion) (FISH PASS)

- Résultats -

3.2.3 Partie recapture

Sur toute la durée de la saison de pêche professionnelle, 105 anguilles ont été recapturées. 99 d'entre elles sont passées par les dispositifs de contrôle (lecteur PIT-tag) et 6 sont issues d'un calcul réalisé au prorata pour une quantité d'anguilles non passée dans les lecteurs à une période donnée.

Sur la base de 105 recaptures sur les 524 individus déversés marquées, il est obtenu un taux de recapture de 20 %. Les recaptures se sont effectuées de manière assez homogènes. En effet, seule la semaine 41 semble se démarquer, les recaptures ont eu lieu sur toute la durée de l'étude (période de pêche). La cinétique des recaptures est présentée dans la Figure 74. La cinétique de recapture est en accord avec celle des captures par la pêcherie. Il faut remarquer que les 4 lots ont eu au moins 10 recaptures chacun. En effet, les lots 1, 2, 3 et 4 comptabilisent 45, 25, 22 et 13 recaptures respectivement. Les recaptures ont été assez diffusées pour l'ensemble des lots. Ainsi, des recaptures issues du lot 1 ont été observées durant les dernières semaines.

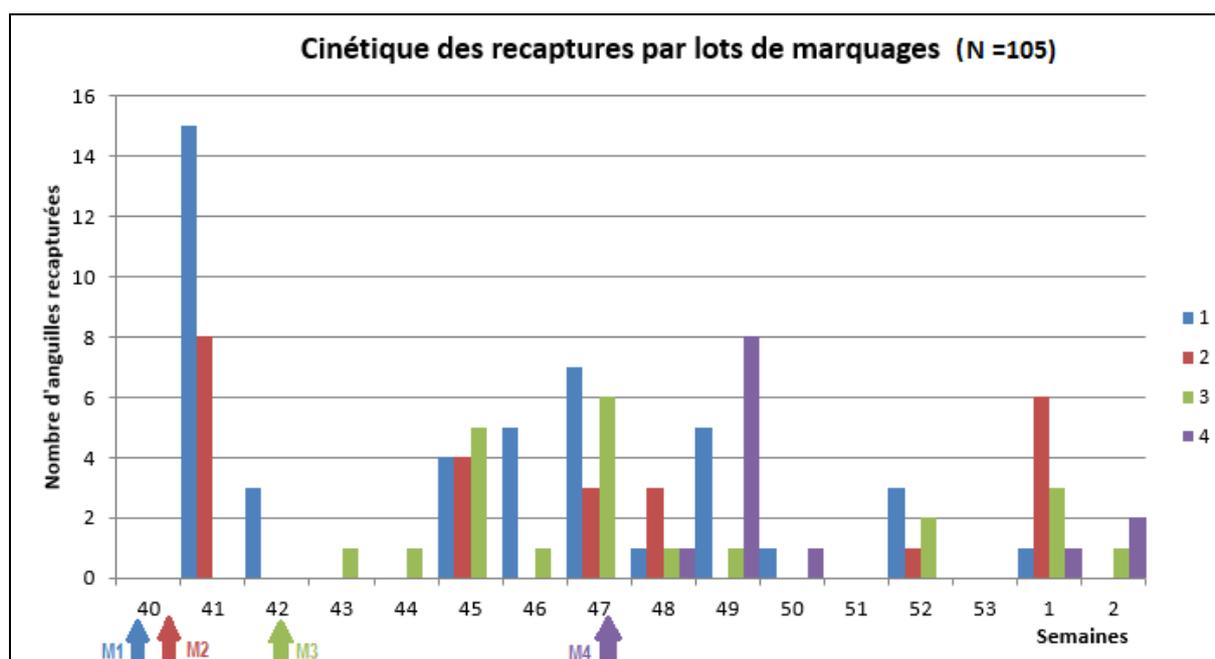


Figure 74 : Représentation de la cinétique des recaptures des anguilles marquées aux PIT-tag lors des quatre séances de marquage (M1 à M4).

- Résultats -

3.2.4 Estimation des taux d'échappement et d'exploitation sur les anguilles du lac de Grand-Lieu

Parmi les 524 anguilles marquées, 105 ont été recapturées (20 %) entre le 1^{er} octobre 2015 et le 15 janvier 2016 (Tableau 13). Les captures totales d'anguilles de la pêche sur cette période ont été de 7012 kg. Ce qui représente environ 43083 individus (Tableau 12).

Tableau 12 : Tableau de synthèse des captures par sexe sur la saison de pêche 2015-2016

Synthèse des captures par la pêche sur le Lac de Grand Lieu pour la saison de pêche à l'anguille argentée 2015-2016										
Semaine (Num)	Poids TOT PECHE (g)	Poids moy MALES (g)	Poids moy FEMELLES (g)	% MALES (g)	% FEMELLES (g)	Poids MALES PECHE (g)	Poids FEMELLES PECHE (g)	NB MALES PECHE	NB FEMELLES PECHE	NB TOT PECHE
38	0	98,70	571,50	0,82	0,18	0	0	0	0	0
39	0	93,27	802,00	0,72	0,28	0	0	0	0	0
40	51843	90,86	0,00	1,00	0,00	51843	0	571	0	571
41	1422036	100,18	604,40	0,62	0,38	886935	535101	8853	885	9739
42	572222	73,72	505,00	0,91	0,09	523135	49086	7097	97	7194
43	162975	86,73	420,33	0,78	0,22	126819	36156	1462	86	1548
44	109875	82,80	524,50	0,73	0,27	80673	29202	974	56	1030
45	575644	89,67	695,38	0,30	0,70	174553	401091	1947	577	2523
46	739536	91,60	682,29	0,28	0,72	205029	534508	2238	783	3022
47	701642	84,33	515,00	0,90	0,10	631519	70123	7489	136	7625
48	226324	85,28	636,67	0,59	0,41	134306	92019	1575	145	1719
49	265804	86,29	643,82	0,29	0,71	76229	189576	883	294	1178
50	37472	76,06	707,00	0,63	0,37	23702	13770	312	19	331
51	69878	83,06	432,50	0,77	0,23	53493	16385	644	38	682
52	183633	86,35	854,86	0,43	0,57	78142	105490	905	123	1028
53	302549	86,35	854,86	0,43	0,57	128746	173804	1491	203	1694
1	1298892	88,84	872,10	0,09	0,91	111125	1187767	1251	1362	2613
2	291183	88,84	872,10	0,09	0,91	24912	266271	280	305	586
TOTAL	7011509					3311161	3700348	37972	5111	43083

Tableau 13 : Récapitulatif des recaptures hebdomadaires d'individus marqués aux PIT-tag selon leurs lots de marquage. Table d'entrée du logiciel SPAS calculant une estimation de l'abondance en anguille argentée et le taux d'exploitation.

Marquage	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	1	2	Semaine	
1	180	0	15	3	0	0	4	5	7	1	5	1	0	3	0	1	0	45
2	120	0	8	0	0	0	4	0	3	3	0	0	0	1	0	6	0	25
3	117	0	0	0	1	1	5	1	6	1	1	0	0	2	0	3	1	22
4	107	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	1	0	0	0	1	2	13
Total	524	0	23	3	1	1	13	6	16	6	14	2	0	6	0	11	3	105
Nombre anguille prélevées	571	9739	7194	1548	1030	2523	3022	7625	1719	1178	331	682	1028	1694	2613	586		43083
Taux recapture	0,20																	

D'après les recaptures des individus marqués, la cinétique de ces dernières et la cinétique des captures d'anguilles argentées par la pêche (en nombre), il est possible, grâce au logiciel SPAS, sous certaines hypothèses (pas de perte de marques pendant la durée de l'étude, probabilité de capture indépendante du marquage, probabilité de recapture des anguilles marquées supérieure à 0, population fermée) d'estimer la taille de la population du lac de Grand-Lieu. Cette estimation est réalisée via l'estimateur groupé de Petersen.

Il est obtenu une estimation de la production en anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu de 213 387 individus pour la saison 2015/2016.

($\alpha = 5\%$; [177310 - 249463])

L'abondance des anguilles argentées produites dans le lac représente 213 387 individus (Tableau 14), soit environ 32 571 kg (8,35 kg/ha) : calcul basé sur un poids moyen de 152,64 g et sur une surface de 3900 ha.

- Résultats -

Le taux d'exploitation est évalué à 20,2 % (1,67 kg/ha), ce qui permet d'estimer un échappement de 79,8 % (6,68 kg/ha) des anguilles argentées par rapport à la production sur la saison 2015/2016.

Ce taux d'échappement sera, par la suite, discuté aux vues des résultats disponible dans la littérature.

Tableau 14 : Synthèse des résultats obtenus grâce au logiciel SPAS.

	N	Erreur standard	Taux d'exploitation (%)	Taux d'échappement (%)
Estimateur groupé de Petersen	213387 [177310 - 249463]	18406	20,2 [17,3 - 24,3]	79,8 [75,7 - 82,7]

3.3 Suivi acoustique

3.3.1 Bilan des détections de télémétrie acoustique

Sur l'ensemble du réseau il y a eu **64978** détections durant le suivi correspondant à 25 anguilles (les 7 anguilles capturées directement par la pêche n'ont pas été entendues). Ainsi, sur les **51 individus marqués** aux émetteurs acoustiques: (Figure 75)

- **10** individus ont été recapturés par la pêche dans le lac, soit un taux de recapture de **19.6 % soit à un niveau équivalent observé avec les PIT-tags (20.2 %)**.
- **18** sont sortis du plan d'eau et ont atteint l'ouvrage du vieux Buzay, soit **35 %** d'échappement du plan d'eau. Parmi elles, 15 ont été entendues soit aux exutoires du canal de la Martinière soit dans la Loire. Les 3 autres anguilles arrivées au droit des derniers ouvrages sont sans doute passées sans être détectées malgré une prospection active réalisée sur la zone. Pour autant, il est hautement probable que ces anguilles se soient échappées. **Ainsi, 100 % des anguilles qui ont franchi le vannage de Bouaye ont réussi à atteindre l'estuaire de la Loire.** Les trajectoires enregistrées montrent que les anguilles suivent le courant principal afin d'atteindre la Loire. En effet, elles empruntent le vannage ouvert au moment de leur arrivée dans le canal de la Martinière. **Ainsi, l'échappement observé du système est de 35 %.**
- **19** anguilles n'ont jamais été entendues ou capturées (37 %) et 4 ont été entendues mais ne sont jamais sorties du plan d'eau ou réentendues, il reste **23** individus dont il n'est pas possible de connaître le devenir avec le réseau mis en place lors de ce suivi, soit **45 %**.

- Résultats -

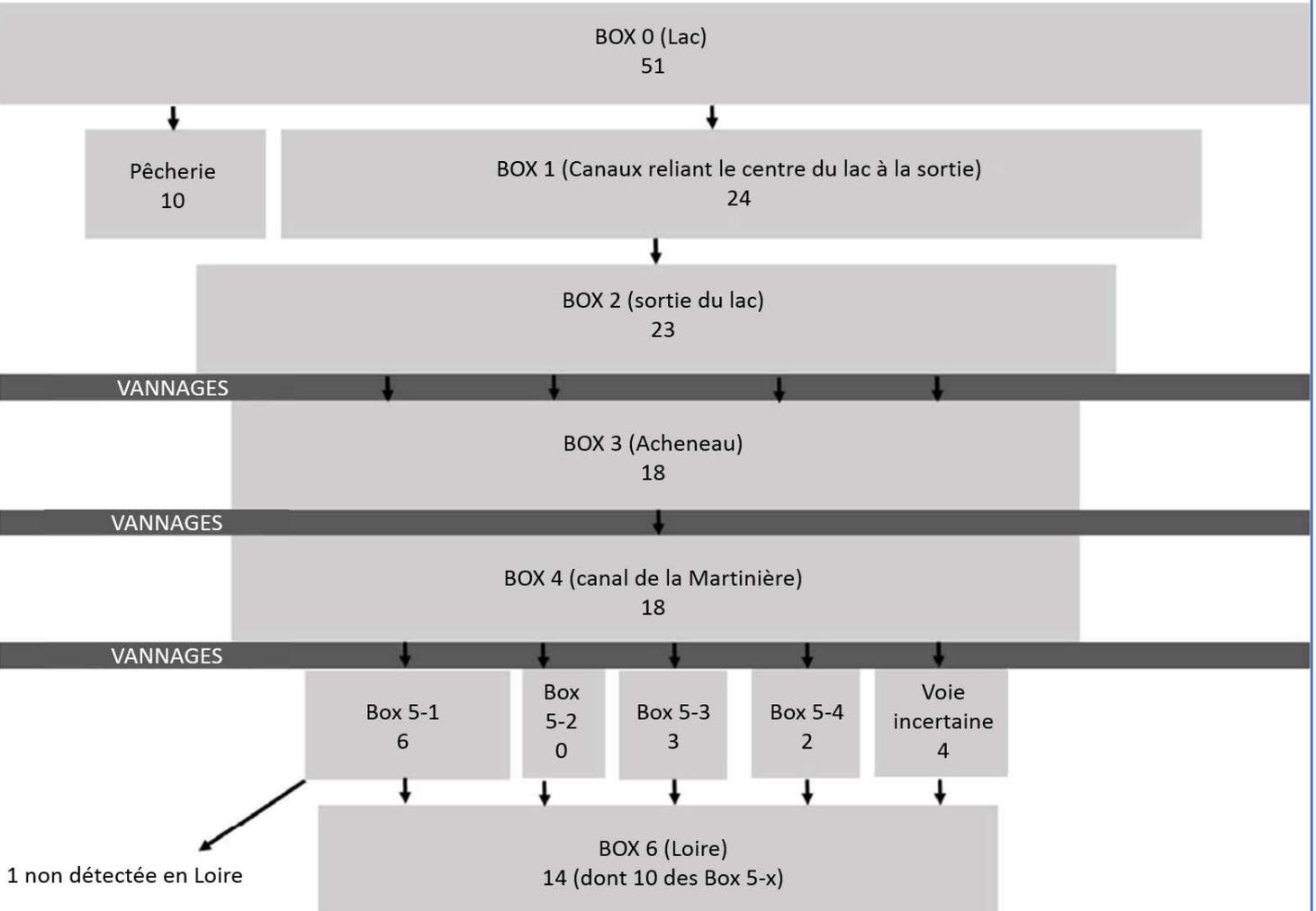


Figure 75 : Bilan des détections par box des 51 anguilles marquées. Bilan arrêté au 01/05/2016, date à laquelle une partie des hydrophones a été retirée.

3.3.2 Comportements migratoires des 18 anguilles ayant quittées le lac

- Au sein du lac

La majorité des anguilles argentées marquées possèdent un stade d'argenture cohérent avec un statut d'anguille migrante ou potentiellement migrante (Durif *et al.*, 2005). Ces anguilles sont donc supposées être en attente de stimuli environnementaux favorisant leur migration.

Au sein du lac de Grand-Lieu, les analyses statistiques des données de détections en fonctions des paramètres environnementaux, ont permis de faire ressortir trois comportements distincts au moment de la migration.

- Résultats -

- 1) Le premier comportement a lieu dans le lac (autour des zones de relâches), les anguilles vont alors se déplacer de manière aléatoire dans le lac. Il n'y a pas de facteurs environnementaux particuliers, en tout cas ceux testés dans cette étude, favorisant ces déplacements.
- 2) Le second comportement correspond à la réception de signaux environnementaux les poussant vers la sortie du lac. Les anguilles vont alors être réceptives à l'élévation du niveau d'eau (24,3 % de la déviance expliquée) et au courant ainsi créé vers la sortie. C'est alors un comportement basé sur un contrôle environnementale lié au régime hydrodynamique et à la lumière (la migration des anguilles est nocturne pour éviter les prédateurs, elle est alors favorisée par une lune descendante). Une élévation journalière du niveau d'eau de 8 cm semble nécessaire pour favoriser le passage des 2 box (Figure 76).

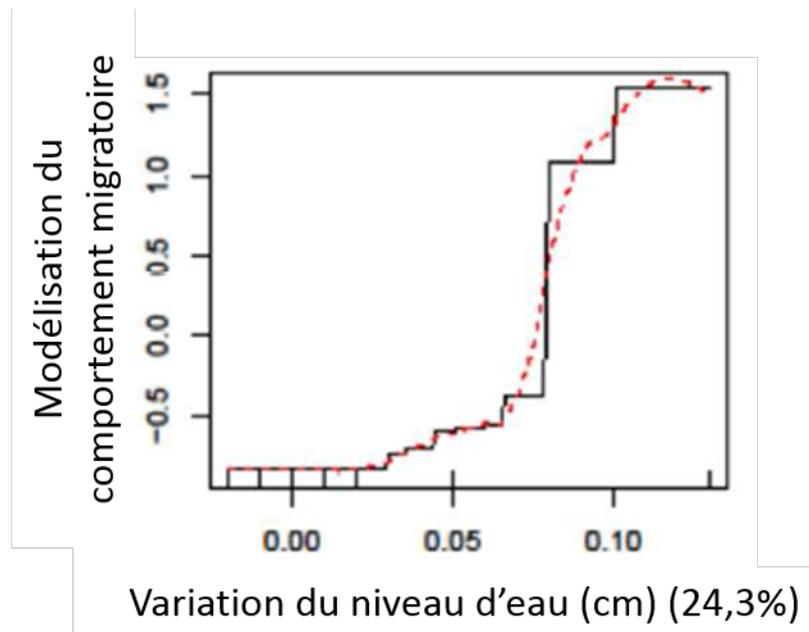


Figure 76 : Résultat des BRT pour le comportement du passage de Box0 à Box1/Box2 (y=variable modélisée (y<0 = variable non favorable; y>0 = variable favorable) ; rouge = proxy de la migration modélisée, passage d'une Box à l'autre)

- 3) Le troisième comportement est le franchissement du barrage du lac. Les anguilles vont réussir à franchir le barrage séparant le lac de l'Acheneau, uniquement lorsque l'élévation journalière du niveau d'eau est supérieure à 5 cm (11,4 % de la déviance expliquée) et que l'ensemble des vannes du lac atteint une ouverture cumulée de plus de 70 cm (33,5 % de la déviance expliquée) (Figure 77).

- Résultats -

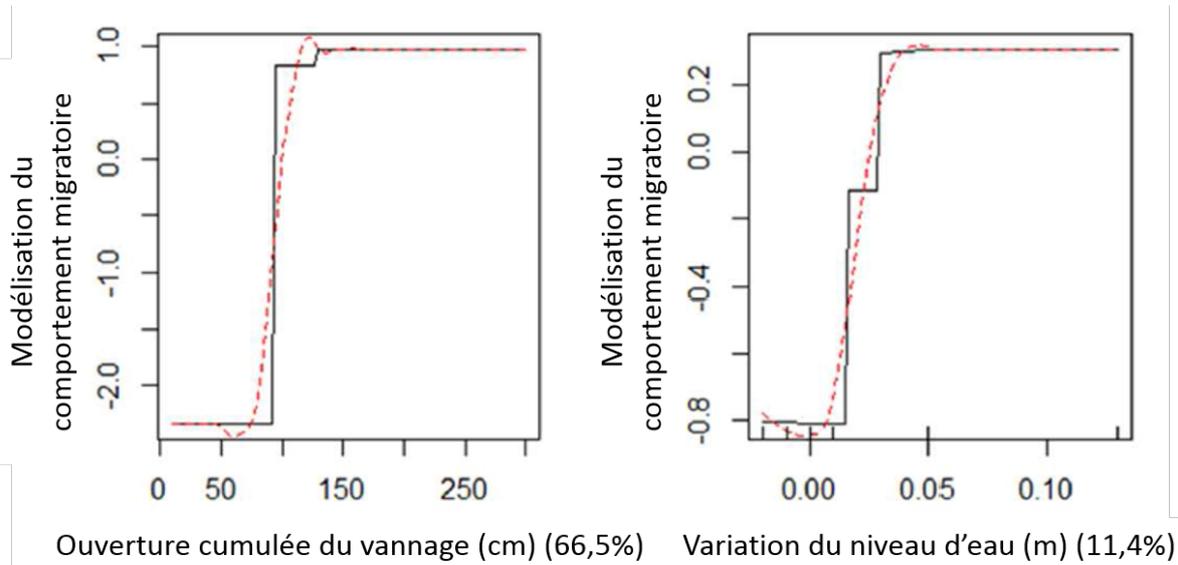


Figure 77 : Résultat des BRT pour le comportement du passage de Box1/Box2 à Box3 (y=variable modélisée (y<0 = variable non favorable; y>0 = variable favorable) ; rouge = proxy de la migration modélisée, passage d'une Box à l'autre)

La synchronisation entre l'échappement des anguilles (passage de Box2 à Box3), l'ouverture des vannes et l'élévation du niveau d'eau est présentée dans la Figure 78 :

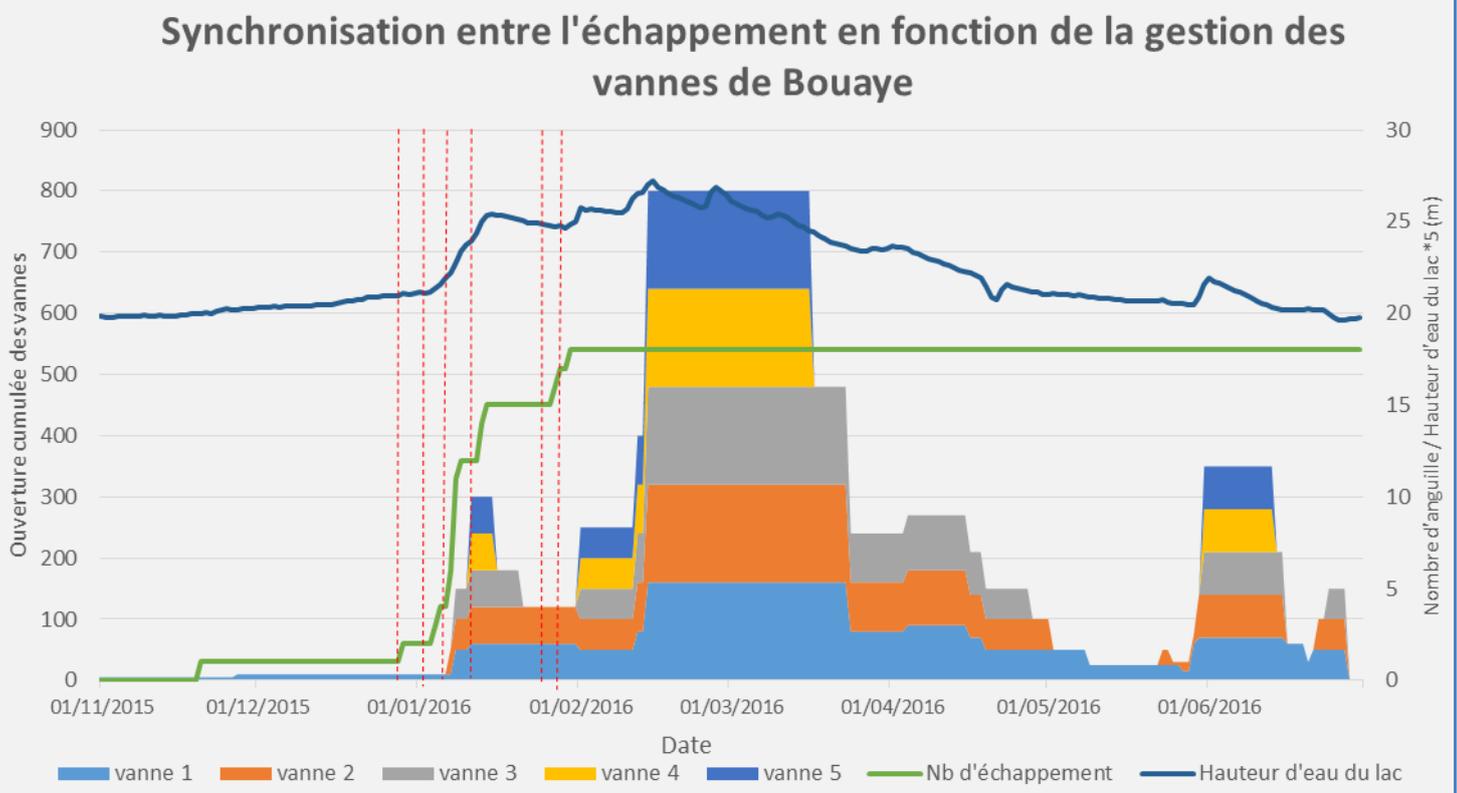


Figure 78 : Synchronisation entre l'échappement des anguilles et la gestion des vannes de Bouaye

- Résultats -

Dans un premier temps, l'élévation du niveau d'eau va pousser les anguilles à migrer, puis dans un second temps, l'ouverture des vannes favorise la sortie des anguilles.

La grande partie des anguilles quitte le lac lors de la première élévation du niveau et lors de la première grande ouverture des vannes (9 anguilles en 5 jours).

D'après le graphe 78, une ouverture cumulée de 300 cm (soit 60 cm d'ouverture sur chaque vanne) permet le passage de l'ensemble des anguilles se présentant à l'ouvrage. Le niveau d'ouverture le plus efficace est probablement entre 70 cm et 300 cm d'ouverture cumulée.

Ce qui signifie que les anguilles étaient prêtes à migrer, mais qu'elles attendaient des conditions favorables pour dévaler.

Une seconde période a été favorable (fin janvier), d'autres anguilles ont réussi à s'échapper lorsque le niveau du lac était très élevé.

En dehors de ces deux périodes aucune autre anguille n'a quitté le lac alors que les conditions semblaient favorables (variations du niveau d'eau et vannages ouverts en grand).

Aucune anguille ayant quitté le lac n'a emprunté le passage de « Maison Blanche », alors qu'il était potentiellement empruntable pendant une longue période (à partir du 15 décembre), comme nous le montre la Figure 79 :

- Résultats -

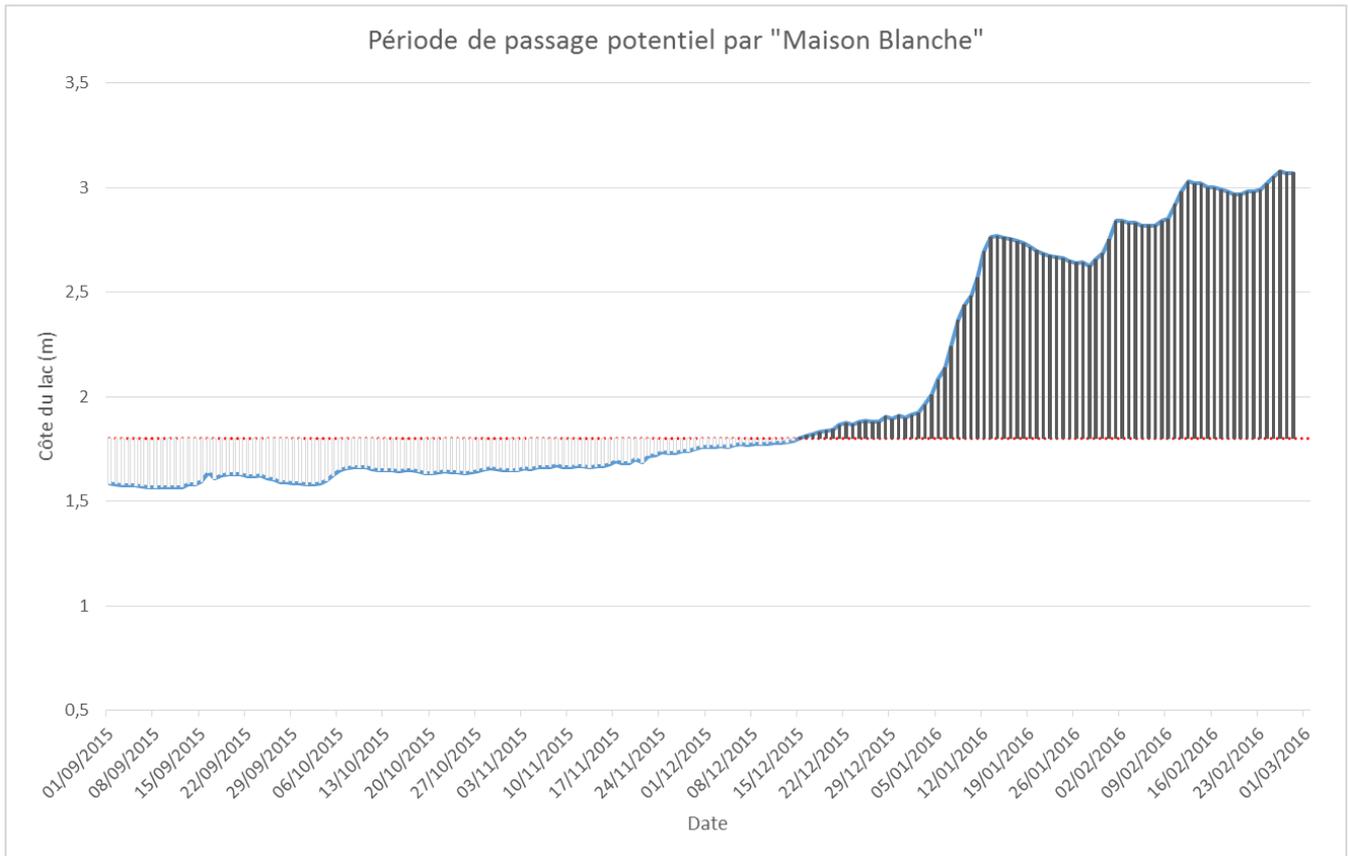


Figure 79 : Période de migration potentielle des anguilles argentées par le passage de « Maison Blanche ». La côte de potentialité est au-dessus de 1.80m (côte de Buzay) représentée en pointillé rouge

- Du lac à la Loire

Toutes les anguilles sorties du lac ont traversé l'Acheneau facilement avec une durée de transit moyenne de 13.4 heures (± 6.2 h), soit une vitesse de déplacement de $2.23 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Ensuite, elles suivent le courant principal pour atteindre la Loire (Figure 75):

- Passage par le vannage de la Bourrine pour accéder au vannage de la Martinière et ensuite atteindre la Loire (cas de 2 individus)
- Passage par le vannage de Vieux Buzay pour directement atteindre dans la Loire par le barrage de Buzay (cas de 3 individus) (Figure 80 et 81)
- Soit après avoir franchies le vannage de Vieux Buzay, elles atteignent la Loire par le vannage du Carnet 14km plus loin (cas de 6 individus). Il s'avère que sur la période d'étude, le vannage du carnet a été le plus utilisé pour évacuer l'eau de Grand-Lieu.

Les anguilles ont atteint la Loire entre 4 minutes et 4 jours une fois dans le canal de la Martinière.

Pour certains individus, le chemin emprunté n'est pas totalement connu car le réseau d'hydrophones dans cette zone n'est pas parfait. De ce fait, 4 anguilles ont été détectées, par les

- Résultats -

hydrophones installés dans la Loire au niveau de Paimboeuf, sans avoir été détectées dans les exutoires.



Figure 80 : Vue aval du vannage de Buzay à marée basse (FISH PASS)



Figure 81 : Vue des bouées des corps morts sur lesquels sont fixés les hydrophones à marée basse (FISH PASS). Hors d'eau, les hydrophones ont peu de chance de capter des signaux acoustiques.

4 Discussion

4.1 Suivi de la pêcherie

4.1.1 La pêcherie

4.1.1.1 Evolution du tonnage au cours de la saison

La capture d'anguilles argentées, par les professionnels, est de 7012 Kg pour la saison 2015/2016 (du 1er octobre 2015 au 15 janvier 2016). L'évolution de cette capture semble progressive, même si elle est marquée par trois nettes augmentations correspondant aux 3 périodes où les conditions climatiques étaient plus favorables aux mouvements des anguilles (pluviométrie et vent plus importants ...). Comme tout engin passif, la pêche aux verveux est très dépendante du mouvement des anguilles argentés qui a lieu au cours des fenêtres environnementales favorables : Ces périodes correspondent aux semaines 41, 45-46 de 2015 et à la 1ère semaine de 2016.

4.1.1.2 Effort de pêche

L'effort au cours de cette saison 2015/2016 est compris entre 83 et 68 engins en pêche sur le plan d'eau par jours. Il faut toutefois noter que la saison 2015/2016 fut particulière en termes de conditions météorologiques (crues tardives). En effet, les épisodes de crues habituelles, du lac de Grand-Lieu, ont lieu moins tardivement (octobre - novembre) que pour cette saison 2015/2016 (décembre - janvier). Les pêcheurs ajustent leur effort de pêche aux conditions environnementales. Ainsi lors des périodes où peu de captures sont susceptibles d'être réalisées, les professionnels préfèrent retirer leurs engins afin de se prémunir des dégradations que les rats pourraient causer.

4.1.1.3 CPUE

Comme il a été dit précédemment, les CPUE sont variables de moins de 100 g / verveux / 24 h la semaine 50 à plus de 2,5 Kg / verveux / 24 h pour la semaine 41 et 1.

Le verveux comme engin de pêche est utilisé sur le lac de Grand Lieu depuis la fin des années 1970, depuis son importation sur le site, il permet la réalisation de 98,12 % des captures d'anguilles en Poids (les lignes de fond et les bosselles n'apportaient que des captures accessoires que ce soit en nombre d'anguilles ou en poids lorsque celles-ci étaient encore utilisées). Les données historiques

- Discussion -

(1991-1995) relatent des efforts de pêche, sur la même période (octobre / janvier) compris entre 12 et 92 verveux par jour sur le plan d'eau. A cette époque, il relève des CPUE comprises entre 0.9 et 10 Kg / verveux / jour de relève avec un maximum en novembre de 9.8 Kg d'anguilles relevées par engin et par jour. Il est donc possible de comparer les résultats de cette étude avec les résultats historiques disponibles dans la thèse de Gilles Adam. Sur la même période (octobre-janvier) avec le un effort de pêche comparable en 1995, le tonnage de la pêcherie s'élevait à 8103 kg (jaunes et argentées confondues, en comptant tout le mois de janvier alors que pour cette étude la pêche est fermée au 15 janvier).

1995	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.
Captures d'anguilles au verveux (kg)	172	3524	2840	1521	2589	3961	3442	2899	3728	1305	171
Total 26152 kg											

Figure 82 : Captures totales mensuelles d'anguilles au verveux de la pêcherie professionnelle du lac de Grand Lieu en 1995 (Adam, 1997).

Il semblerait donc qu'à effort constant, les résultats de la pêcherie soient très proches de ceux de 1991-1995 (soit 20 ans plus tard et dans un contexte général de baisse du stock à l'échelle de l'ensemble de l'aire de répartition). Gilles Adam souligne également qu'il « existe en fait une forte similarité entre les captures annuelles de l'ensemble des pêcheurs de la période du début des années 60 (1959 à 1967) et celles de la période (1991-1995), selon les années, entre 20 et 30 tonnes d'anguilles sont pêchées dans le lac de Grand-Lieu. ». Cette forme de stabilité serait donc visible depuis les années 60 sur le lac de Grand Lieu.

4.1.2 Biométrie : caractéristiques de la fraction exploitée

4.1.2.1 Taille et classes de taille

Les anguilles capturées sur le lac de Grand-Lieu sont, dans la majeure partie du temps, relativement de grande taille par rapport à celle de l'étang de l'Or. En effet, l'étude de la population d'anguilles capturées sur l'étang de l'Or (Charrier et *al.*, 2010). montre que la population est caractérisée par des individus de petite taille contrairement à celle du lac de Grand Lieu : 75 % des captures font moins de 300 mm sur le site de l'étang de l'Or (Charrier et *al.*, 2010). Alors que ce pourcentage ne représente seulement que 0.12 % sur le la de Grand-Lieu Ceci peut être en partie expliqué par une différence de maillage, la maille utilisée sur l'Or est de 6 mm alors que celle sur le lac de Grand Lieu est de 10 mm (avec une échappatoire en maille de 12, à l'initiative des

professionnels). Il faut noter que les pêcheurs de l'Or ciblent également des anguilles de petites tailles à destination des centres d'élevage italiens (Charrier et *al.*, 2010) contrairement aux pêcheurs professionnels du lac de Grand-Lieu qui ciblent des anguilles de plus grandes tailles à destination des restaurants et d'autres transformateurs. La structure en taille des anguilles argentées montre deux modes dans les deux zones : le premier situé au niveau de la taille 380 mm pour l'Or, 365 mm pour Grand-Lieu. Le second situé au niveau de la taille 580 mm pour l'Or, 725 mm pour Grand-Lieu (Charrier et *al.*, 2010). Ce qui laisse supposer un dimorphisme sexuel dans les deux cas. La taille des femelles argentées semble plus importante sur le lac de Grand-Lieu comparée à celle de l'étang de l'Or. La taille moyenne des femelles argentées en Europe est de 632.3 mm (min-max : 450-863, Acou et *al.*, 2010). Comparativement au site du lac de Grand-Lieu où la moyenne atteint 708.3 mm (472-907). Les anguilles argentées femelles issues de ce lac sont en moyenne plus grandes que celles mesurées dans différents sites au niveau européen. La fécondité augmentant avec la taille, il semblerait que les femelles produites sur le plan d'eau de Grand-Lieu soient considérées parmi les plus fécondes d'Europe. Toutefois, la taille des femelles argentées issues du lac de Grand-Lieu est moins importante que celle des femelles de Loire (en amont du lac). En effet, lors de l'étude du potentiel reproducteur des anguilles en Loire, la taille moyenne des femelles argentées était de 783.3 mm ($\alpha = 97.2$). (Acou et *al.*, 2010)

4.1.2.2 Relation Taille/Poids

La relation entre le poids (en g) et la taille (en cm) des anguilles donne des coefficients a et b respectivement de $1.1 \cdot 10^{-3}$ et 3.12. Ces valeurs sont comparables à celles retrouvées habituellement en Europe (Boulenger et *al.*, 2015, Adam et *al.*, 2008). En effet, ces dernières sont comprises, pour le coefficient a, entre $0,16 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-3}$ et, pour le coefficient b, entre 3 et 3,38. Les valeurs de ces coefficients sur l'Or étaient en accord avec ces dernières (Charrier et *al.*, 2010). En effet, a et b étaient de $1 \cdot 10^{-3}$ et 3,16 respectivement.

4.1.2.3 Sex-ratio

La proportion de femelles a été tout au long de la période d'étude assez faible voir très faible en début de période, en moyenne inférieure à 20 % et ne dépassant qu'une seule fois, en fin de période, la barre des 50 % (semaine 1 : 52 %). Ces chiffres montrent une forte dominance des mâles dans les captures des professionnels de Grand-Lieu et donc vraisemblablement dans la population elle-même. Ces résultats peuvent être comparés à ceux issus d'études sur d'autres hydrosystèmes tels que l'étang du Vaccarès (delta du Rhône, 6500 ha) où il a été relevé des proportions de femelles

à 54.4 % (N = 1134 ; 617 femelles pour 517 mâles). (Acou et *al.*, 2003) Sur la lagune de Bages-Sigean (Méditerranée, 3800 ha), où il a été relevé une forte dominance de mâles (97 %, N = 1042, Amilhat et *al.*, 2009). Sur l'étang de l'Or (lagune en Hérault, 3000 ha) la proportion de femelles relevée était de 32 %. Ce dernier résultat semble plus proche de celui de Grand-Lieu. En revanche, en Loire, la proportion de femelles est très supérieure à celle observée sur le lac de Grand-Lieu. En effet, lors de l'étude du potentiel reproducteur des anguilles en Loire, il a été observé une moyenne de 98 % (N = 5669) de femelles sur la durée de l'étude. (Acou et *al.*, 2010). Sur le Frémur, l'étang de l'Or et la plupart des sites européens, le premier mode en termes d'anguilles argentées, inférieur à 450 mm, est constitué de mâles et le deuxième, supérieur à 450 mm, ne présente que des femelles (Acou et *al.*, 2005, Adam et *al.*, 2008). Sur le lac de Grand-Lieu le sexage confirme également ces données. En effet, d'après les résultats de biométrie spécialisée, la taille des femelles est comprise entre 680 mm et 807 mm et celle des mâles est comprise entre 318 mm et 401 mm.

4.1.3 Biométrie spécialisée : Qualité des géniteurs

4.1.3.1 Qualité externe des géniteurs

L'étude de la qualité externe de géniteurs montre que la plupart présentent des lésions externes (81 % ; N = 626). Il faut remarquer que 43 % des individus étudiés présentaient des érosions (ER). La présence de cette pathologie peut notamment s'expliquer par la technique de pêche (verveux) et par le conditionnement des prises (viviers et poches) ainsi que par la prédation aviaire qui peuvent produire ce genre de pathologie. En revanche, les autres pathologies, indépendantes de la pêche (hémorragie, grosseurs, altérations de la couleur, ulcères ...), sont liées à d'autres facteurs. Les ulcères hémorragiques sont souvent causés par infection bactérienne ou/et par la présence de métaux lourds dans les sédiments. L'apparition de grosseurs est le plus souvent signe de parasitose (Girard et Elie, 2007).

4.1.3.2 Qualité interne des géniteurs (parasitisme par *A. crassus*)

L'état de santé des futurs géniteurs du lac de Grand-Lieu montre, d'après la biométrie spécialisée, un fort taux de parasitisme (prévalence) vis-à-vis d'*A. crassus*. En effet, seulement 26 % des individus ayant subi la biométrie (n = 102) ne présentaient pas de parasites au moment de l'autopsie. De plus, l'évaluation de la qualité de la vessie (selon la méthode de Lefebvre) a pu révéler qu'au total seul 3 % des individus n'ont jamais été infectés (aucunes traces et absence de détérioration de la vessie) par *A. crassus* et peuvent être considérés comme sains. Lors de l'étude, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes (ENVN), en 1992, la prévalence était de 86,29 % (n = 124,

- Discussion -

Adam, 1997). Ceci montre que la prévalence est élevée depuis au moins les années 1990. De la même façon, lors de l'étude en Loire de P.Boury et E.Feunteun sur les saisons de 2001 à 2004, la prévalence moyenne relevée était de 66.8 % (n = 682) et que seul, en moyenne, 3.8 % des anguilles autopsiées (n = 682) pouvaient être considérés comme saines vis-à-vis d'*A. crassus*. (Acou et al., 2010). Une forte intensité de la charge parasitaire (nombre de parasites par individu) a été observée lors de l'autopsie. En effet, les individus parasités possédaient un grand nombre de parasites : 6,17 par individu (N = 75). La charge parasitaire semble avoir diminué depuis 1992. En effet, en 1992, lors de l'étude de l'ENVN (sur les échantillons de Gilles Adam récoltés en 1991, durant la période de dévalaison), la charge parasitaire moyenne était de 10.73 parasites par individu (N = 124, Adam, 1997). La comparaison avec les charges parasitaires moyennes observées lors de l'étude sur le potentiel reproducteur des anguilles argentées de Loire réalisée par P.Boury et E.Feunteun montre des charges parasitaires moyennes des anguilles dévalantes proches de celles retrouvées sur le lac de Grand-Lieu. En effet, ils observent des charges parasitaires comprises entre 3.85 et 6.98 (Acou et al., 2010).

Il est probable que les anguilles atteintes de pathologies qu'elles soient externes (érosions, hémorragies) ou qu'elles soient internes (parasitisme) aient des succès reproducteurs plus faibles. Les individus parasités par *A. crassus* auront également de fortes difficultés à effectuer la traversée transatlantique compte tenu du dysfonctionnement de leur vessie natatoire.

4.2 CMR (Capture – Marquage – Recapture)

Les recaptures ont été effectuées de la semaine 41 (début octobre) à la semaine 2 (mi-janvier). Elles ont été réalisées lieu à l'occasion de pics migratoires qui ont le plus généralement lieu au cours de « fenêtres environnementales favorables ».

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). Cependant, il est probable que les véritables stimuli environnementaux soient des facteurs associés qui varient au cours des précipitations et des événements de crues comme la turbidité, la conductivité, des stimuli olfactifs (odeurs) ou des baisses de pression atmosphérique, plutôt que la crue elle-même (Haro 2003). Caroline Durif suggère que les fenêtres migratoires correspondent avant tout à des périodes où l'intensité lumineuse est la plus faible. La totalité des facteurs environnementaux classiquement considérés comme responsables de la migration (vent, dépression, nouvelle lune, crue, etc.) ont en effet pour conséquence une diminution de la luminosité, particulièrement celle perçue par l'anguille migrante dans son environnement aquatique. Chaque épisode correspond à une augmentation de la turbidité de l'eau et à une diminution de la conductivité. Selon elle, le débit agirait directement en tant que vecteur de migration et indirectement à travers l'augmentation de turbidité qu'il engendre. Ainsi, l'intensité des vagues de dévalaison dépendra de la synergie de ces paramètres importants pour le déclenchement et la persistance du phénomène (Durif 2003).

Des anguilles marquées en octobre ont été recapturées en janvier. Cela laisse supposer que le mouvement de dévalaison est sans doute contrôlé par l'apparition de bonnes conditions environnementales. A noter que les conditions hydrologiques de la saison 2015-2016 semblent particulières (faible pluviométrie, crue tardive, niveaux d'eau bas) et que les observations décrites ci-dessus sont difficilement transposables à des années hydrologiques plus classiques.

La pluviométrie reste encore le fait marquant de cette année 2015, avec un cumul annuel de pluies à St Mème le Tenu de 20% inférieur à la moyenne des 29 dernières années.

Les particularités :

- 1. un mois de mars avec seulement 50% des pluies habituelles sur une moyenne de 29 années,**
- 2. un mois de mai avec 25% de pluies en plus**
- 3. Les mois de juin et juillet avec seulement 50% des pluies habituelles**
- 4. ~~40% de pluies en plus en août et 15% de plus en septembre~~**
- 5. Et sur la période d'octobre à décembre environ la moitié de la pluviométrie moyenne.**

- Discussion -

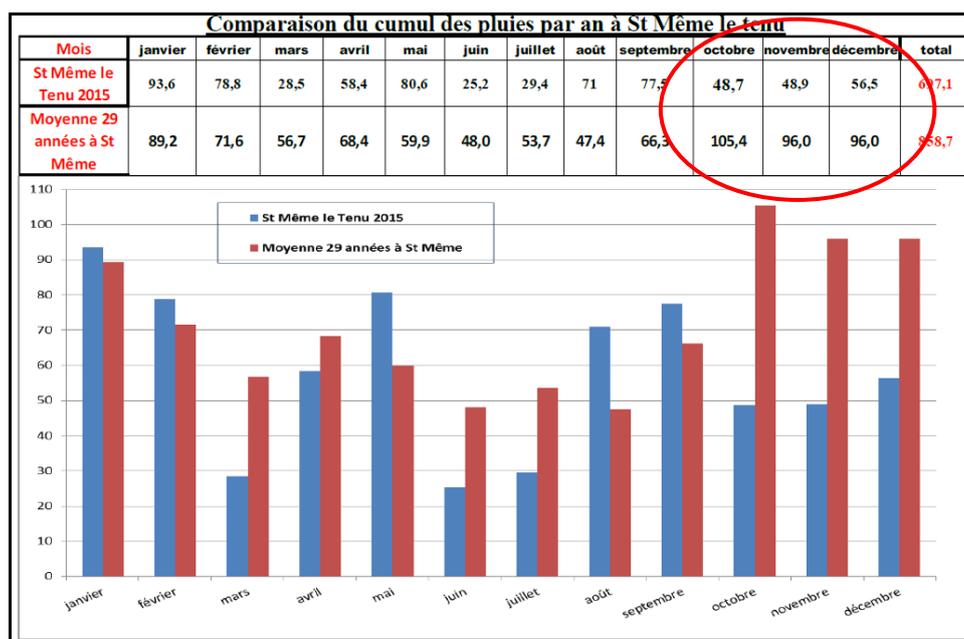


Figure 83 : Données de pluviométrie à proximité du lac de Grand Lieu (SAH)

4.2.1 Taux d'échappement à la pêcherie des anguilles argentées du lac de Grand-Lieu

L'estimation par la méthode de CMR au PIT-tag d'anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu (pour la saison 2015 – 2016) s'élève à 213 387 individus, sur une surface de 3900 hectares (Adam, 1997), ce qui représente **une production de 8,35 kg/ha**. Ces indications permettent une comparaison avec des systèmes hydrographiques de mêmes dimensions : l'étang de l'Or avec une superficie de 2960 hectares possède une production sensiblement supérieure de 13,55 Kg/ha. (Charrier *et al.*, 2010) ; l'étang de Bages-Sigean avec une superficie de 3800 hectares possède quant à lui une production bien supérieure de 30 Kg/ha (Amilhat *et al.*, 2007). Les lagunes étant plus productives que les systèmes d'eau douce (Acou *et al.*, 2003). La production en anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu est nettement inférieure à celles de ces deux lagunes (situées sur la façade méditerranéenne). Néanmoins, ce chiffre reste dans l'intervalle de ceux retrouvés en Europe, où les productions oscillent entre 0.03 – 50 Kg/ha (Amilhat *et al.*, 2007). La production d'anguilles argentées retrouvée, dans les systèmes hydrographiques européens d'eau douce, fait partie de l'intervalle [0.003 ; 6.9] Kg/ha. La production calculée pour la saison 2015/2016, sur le lac de Grand-Lieu est supérieure à cet intervalle (8.35 Kg/ha). Ce qui laisse supposer une forte production d'anguilles argentées sur le lac de Grand-Lieu par rapport à ses homologues européens.

D'après l'estimation par la CMR et sur la base d'une moyenne de 5 % des anguilles jaunes qui s'argentent chaque année (PGA), l'estimation du nombre total d'anguilles dans le plan d'eau de Grand Lieu se situerait aux alentours de 4 267 740 individus [3546200-4989260]. Cette estimation, avec les biais qu'elle peut comporter, est comparable avec l'estimation fournie par Adam dans sa

thèse : « Au total, tous âges confondus, nous estimons le nombre d'individus de la sous-population d'anguilles du lac de Grand-Lieu à 4 933 500 anguilles dont 957 500 de plus de 3 ans (c'est-à-dire potentiellement capturable par les engins de pêche professionnels). »

Le taux d'échappement à la pêche des anguilles argentées calculé lors de cette étude (79.8 %) fait partie des taux d'échappement les plus élevés d'Europe. En effet, les taux d'échappement les plus importants retrouvés dans la littérature ont été rencontrés dans les lagunes, 87 % en Camargue (Bevacqua et al., 2007), 80-82 % sur Bages-Sigean (Amilhat et al., 2007), 80 % sur l'étang de l'Or (Charrier et al., 2010) et sur le fleuve Saint Laurent au Canada sur lequel Caron estime un taux d'échappement, de l'espèce *A rostrata*, compris entre 74 % et 80 % (Caron et al., 2003). En revanche, des taux d'échappement faibles sont retrouvés en eau douce. Ainsi, des taux de 37-46 % sur le Rhin (Klein Breteler et al., 2007) et 30 % sur le lac de l'Yssel au Pays-Bas (Dekker, 2000). Lors de l'étude du potentiel reproducteur des anguilles argentées en Loire, le taux d'échappement à la pêche estimée était compris entre 85.5 et 87.8 %.

4.3 Echappement en anguilles argentées de Grand Lieu : les apports du suivi acoustique

4.3.1 Un faible taux d'exploitation dans le Lac

Sur les 51 anguilles marquées, 10 ont été capturées par la pêche, soit environ 20 %. Ce résultat est identique à celui obtenu via le suivi PIT-tags (20 %), ce qui suggère une bonne évaluation du taux de prélèvement de la pêche pour cette saison 2015/16. Comme cela a été précisé précédemment, ce taux d'exploitation est faible comparativement à ceux observés dans d'autres systèmes européens (ex : Dekker, 2000). A noter que deux anguilles ont été capturées par la pêche après avoir tentées, en vain, de franchir le vannage de Bouaye (cf Figure 75 Bilan des détections). Le taux de prélèvement de la pêche est donc directement impacté par la gestion du vannage et il apparaît clairement que les anguilles migrantes qui n'arrivent pas à s'échapper ont une probabilité plus élevée d'être prélevée par la pêche.

4.3.2 Un échappement en anguilles argentées limité par le vannage de Bouaye

Un résultat important de l'étude est que **seulement 35 % (soit 18 ind.) des anguilles marquées ont réussi à s'échapper du Lac**. Ce faible taux d'échappement est expliqué par la difficulté des anguilles à franchir le vannage de Bouaye. L'analyse statistique montre en effet que l'échappement a lieu principalement au cours d'augmentations significatives des niveaux d'eau (> 5 cm/jour) et quand l'ouverture cumulée des 5 vannes atteint au minimum 70 cm. Ce résultat suggère

que la **synchronisation des signaux environnementaux favorables à la dévalaison (hausse du niveau d'eau) et l'ouverture du vannage à des niveaux suffisants (> 70 cm) est nécessaire pour permettre l'échappement**. Si les conditions sont favorables mais que le vannage n'est pas ouvert, aucun échappement n'est possible (ex : fin novembre début décembre).

La voie de migration par le passage de « Maison Blanche » n'est pas empruntée par les anguilles argentées malgré le niveau d'eau du lac favorable. C'est probablement lié à un manque d'attractivité (courant trop faible, mauvais positionnement par rapport au lac ...)

Pour cette saison 2015/16, le vannage de Bouaye semble être l'unique 'point de blocage' de la dévalaison à Grand Lieu. En effet, le trajet entre le plan d'eau et le canal de la Martinière s'effectue sans encombre et sans retard à la migration, le niveau d'ouverture du vannage de Bouaye ayant des répercussions directes sur la gestion des ouvrages situés à l'aval. Lorsque le vannage de Bouaye est ouvert, les divers exutoires du canal de la Martinière sont gérés pour évacuer l'eau du bassin versant ce qui permet aux anguilles de sortir relativement rapidement de ce système hydraulique très anthropisé pour regagner la Loire, libre de tout ouvrage jusqu'à l'océan. **Ainsi, toutes les anguilles qui ont réussi à franchir le vannage de Bouaye ont atteint rapidement l'estuaire de la Loire.**

4.3.3 Le devenir d'une majorité d'anguilles argentées n'est pas connu

Une majorité d'anguilles argentées (45 %) n'a jamais été détectée par le réseau acoustique mis en place ou capturée par la pêche, ni même approchée des canaux reliant le milieu du lac à la sortie. Des trackings actifs ont été réalisés dans le lac pour tenter de détecter ces individus, mais en vain (rappelons qu'un tag est potentiellement détectable dans l'eau jusqu'à épuisement de la batterie interne (Octobre 2016)). Comment expliquer ce résultat ? Plusieurs hypothèses peuvent être avancées, ou écartées :

- Certaines anguilles ont différé leur migration et sont encore présentes dans le Lac (ou dans les zones amont) et le réseau acoustique déployé au cours de cette saison 2015/16 n'a pas permis de les détecter. Une année supplémentaire de suivis PIT-tag et acoustique permettrait d'avoir des informations précieuses sur ces individus. Rappelons que toutes les anguilles marquées étaient au stade argenté selon la méthode de Durif et al. (2003), excepté une anguille jaune (FII) qui a été prélevée par la pêche.
- Certaines anguilles argentées sont mortes dans le lac. Plusieurs types de mortalités doivent être considérées ici (la mortalité par pêche est exclue puisque déjà quantifiée). Tout d'abord la mortalité naturelle qui doit atteindre entre 5 et 20 % par an en fonction des auteurs

- Discussion -

(Adam, 1997 ; Boulenger *et al.*, 2016). La prédation aviaire (héron, cormoran) ou piscicole (brochet, silure) même s'il est peu probable que les gammes de taille des anguilles marquées (> 70 cm en moyenne) soient des proies fréquentes (Carpentier *et al.*, 2009). Une mortalité liée au marquage peut être envisagée également. Mais les résultats du suivi post-opératoire (0 perte de marque et mortalité nulle) réalisé en conditions contrôlées suggèrent que ces mortalités doivent être relativement faibles.

S'il est impossible à l'heure actuelle de préciser le devenir de ces individus. Il est probable de cerner les causes de ce faible échappement. En effet, il est fort probable que le plus gros problème au sein du lac de Grand-Lieu soit une mauvaise synchronisation entre le déclenchement de la migration, engendrée par une forte élévation du niveau d'eau (>5 cm/j), et l'ouverture suffisante du vannage de Bouaye. Le décalage entre ces deux paramètres est probablement la cause d'un déséquilibre entre la réception de signaux environnementaux et les conditions de migration, engendrant une perte d'orientation et provoquant pour certaines anguilles un arrêt partiel voir total de la migration.

5 Conclusion

Cette étude a permis d'étudier la population d'anguilles argentées du lac de Grand-Lieu et la pêche associée à cette dernière. L'étude proposait de suivre les 7 professionnels lors de leurs sorties, ainsi 31 jours de suivis et 21 biométries (1342 individus) ont permis d'acquérir de nombreuses données sur la population du lac de Grand-Lieu. Le tonnage d'anguilles argentées capturées par la pêche est de 7012 Kg pour la saison 2015/2016. et l'effort de pêche au cours de cette saison est compris entre 83 et 68 engins sur le plan d'eau par jours (maximum autorisé 91 verveux) ce qui semble en accord avec les données collectées en 1995 par Adam. Comme évoqué précédemment les captures sont réalisées sous forme de pics au cours de la saison à la faveur de conditions environnementales propices. La fraction exploitée de la population est caractérisée par des tailles et des poids moyens de 416 mm pour 189 g pour les mâles (N = 674) et de 708 mm pour 736 g pour les femelles (N = 122) et est en majeure partie composée de mâle (85 %). L'état de santé des futurs géniteurs semble préoccupant. En effet, 81 % des individus étudiés présentaient des pathologies externes. De plus, l'étude de la qualité interne des individus montrait que la plupart étaient au moment de l'autopsie ou par le passé, parasités par *Anguillicoloides crassus*. En effet, 73 % des individus testés (n = 102) étaient infestés par *A. crassus* au moment de l'autopsie et 97 % présentaient des traces de la présence actuelle ou passée du Nématode. Les intensités parasitaires étaient élevées. En effet, 24 % d'entre eux possédaient plus de 10 nématodes. Il semble, d'après les résultats et leurs constances dans le temps, que l'impact du parasitisme soit très élevé pour les individus ayant accompli une partie de leur cycle biologique en eau douce. Ce qui présente un risque important pour le devenir des géniteurs jusqu'au lieu de ponte. Ainsi il serait intéressant d'acquérir plus de données sur l'impact réel de ce paramètre sur l'état actuel de la population d'anguilles à l'échelle de son aire de répartition.

La méthode utilisée lors de cette étude (PIT-Tag) pour estimer la production s'est révélée très efficace, sans perte de marque ni mortalité significative associée à l'opération et avec un taux de recapture par la pêche de 20 % (105 recaptures sur 524 marqués) la robustesse de la méthode est plutôt bonne. L'étude a permis d'estimer une production de 213 387 individus soit une production de 8.35 Kg à l'hectare avec un taux d'exploitation par la pêche de 20,2 % et de fait un taux d'échappement des anguilles argentées à la pêche égal à 79,8 % par rapport à la production actuelle du plan d'eau. Les résultats obtenus s'avèrent comparables avec les pêcheries en plan d'eau ayant recours au même engin de capture. De plus, il serait intéressant dans un second temps de

- Conclusion -

transposer ce type d'étude à la population d'anguilles jaunes également exploitée sur le site pour permettre d'estimer le niveau de prélèvement au stade jaune et ainsi accéder au niveau de prélèvement globale de l'espèce sur ce site. Il serait intéressant de réitérer cette étude l'année prochaine. Les conditions climatiques de cette année ont fait que cette saison de pêche ne pouvait être considérée comme une saison de référence. En effet, la période de pêche s'est étalée du 1er octobre 2015 au 15 janvier 2016, durant toute la période légale de pêche à l'anguille argentée. Il est nécessaire de comparer les résultats issus de cette étude avec ceux d'une année typique (avec une crue vers début novembre, soit 1 à 2 mois de pêche).

Le suivi acoustique a mis en évidence l'influence fondamentale de la gestion hydraulique du lac de Grand Lieu (vannage de Bouaye) sur le niveau d'échappement des anguilles jusqu'à l'estuaire. En effet, l'échappement du lac s'effectue au cours de très courtes fenêtres temporelles et environnementales définies par la hauteur d'ouverture du vannage de Bouaye. Cependant, une fois le vannage passé, toutes les migrantes accèdent à l'estuaire de la Loire. Pour autant, près de 45 % des candidates à la dévalaison n'ont pas réussi à franchir cet obstacle fautes de bonnes conditions environnementales ou de franchissabilité, et sont probablement encore bloquées dans le Lac. Une hypothèse probable est ce que ces individus bloqués dans le Lac ont retardé voire perdu leur comportement de dévalaison, et sont soumis à des pressions de mortalité (par pêche, naturelle, prédation aviaire, etc.) plus importantes.

6 Perspectives

- **Une gestion de l'ouvrage de Bouaye pour favoriser l'échappement des anguilles argentées est-elle possible ?**

L'ouvrage de Bouaye est un barrage à la migration naturelle de l'anguille, mais il est également indispensable à la survie du lac, qui serait asséché l'été sans lui. Il faut donc trouver un compromis pour à la fois permettre une gestion raisonnée de l'ouvrage et un échappement optimal des anguilles argentées. Les résultats montrent que l'échappement est quasi nul alors que les vannes sont ouvertes de 10 cm. Probablement que ce faible niveau d'ouverture ne permet pas un appel d'eau suffisant pour orienter les migrantes vers l'aval. Mais il est également possible que les vitesses de courant généré inhibent le passage des anguilles vers l'aval. Au-delà d'une certaine vitesse créée par l'ouvrage, l'anguille pourrait ne pas vouloir s'y engager. Dans ce contexte, une gestion « ichthyo-compatible » du vannage de Bouaye semble nécessaire. Une option envisagée serait de procéder quand cela est possible à l'ouverture d'une seule vanne (et non plusieurs) pendant trois jours consécutifs lors d'un épisode pluvieux. Cette manœuvre serait réalisée en concertation avec le SAH pour assurer sa mise en œuvre opérationnelle et assurer qu'elles sont compatibles avec le règlement d'eau.

- **Quel est le devenir des anguilles non-détectées ?**

Pour répondre à cette question, un suivi complémentaire sera réalisé au cours de la saison 2016/17. Il permettra d'apporter des informations sur ces individus marqués en 2015/16, et de mieux comprendre comment les anguilles s'orientent dans la retenue avant de franchir le vannage de Bouaye.

85 hydrophones ont été installés en Septembre 2016 (80 sur le lac afin de connaître les déplacements des anguilles au sein du lac et 5 en aval pour s'assurer du taux d'échappement) (Figure 84).

30 anguilles argentées mâles ont également été marquées en plus des **50 anguilles argentées femelles** prévues.

Les objectifs de cette seconde étude sont de :

- Réaliser 2 biométries par semaine sans interruption. (Pour accéder à un niveau de données plus fin et donc plus précis)

- Perspectives -

- Comparer deux années hydrologiques différentes entre elles pour savoir si cela influence le niveau de capture.
- Suivre les déplacements dans le plan d'eau pour comprendre l'effet de la gestion de l'ouvrage sur l'échappement total
- Suivre les déplacements dans le plan d'eau pour comprendre le devenir des individus actuellement non détectés.



Figure 84 : Position des 80 hydrophones installés sur le lac de Grand Lieu et des 3 hydrophones directement en aval du lac (rouge : Hydrophone classique ; jaune : hydrophone avec une sonde température intégrée, vert : capteur T° supplémentaire, bleu : accéléromètre, violet : zone de relâche) en Septembre 2016

A la date d'écriture du rapport (Octobre 2016), deux anguilles argentées femelles marquées lors de la précédente étude ont été entendues par ce nouveau réseau d'hydrophone. Les données de détection enregistrées indiquent que ce sont bien des anguilles en déplacement, et donc des anguilles vivantes. Cette étude EDAAGL2 va donc apporter des informations précieuses sur le comportement des anguilles argentées dans le Lac.

Afin de compléter les connaissances sur l'échappement et la production du bassin versant de la Loire, ce type d'étude pourrait également être mis en place dans les trois autres zones (la Sèvre nantaise, la Brière et l'Erdre). A noter que sur l'Erdre, une pêche professionnelle est actuellement en place avec deux pêcheurs, ce qui laisse la possibilité de mettre en œuvre le même type d'outil que sur le lac de Grand Lieu et sur le cours de de la Loire. Le suivi acoustique qui pourrait être associé à la CMR sur ce site permettrait d'étudier et évaluer l'impact du franchissement de l'ouvrage de Saint Felix seul ouvrage entre l'Erdre et l'océan.

7 Bibliographie

Acou A., Lefebvre F., Contournet P., Poizat G., Panfili J., Crivelli A. J., (2003). Silvering of female eels (*Anguilla anguilla*) in two sub-populations of the Rhône delta. Bull. Fr. Pêche Piscic. 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 (*Anguilla anguilla*, L.). Arch. Hydrobiol. 164: 237–255.

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., Gabriel G., Lafaille P., Feunteun E., (2009). Differential production and condition indices of premigrant eels (*Anguilla anguilla*) in two small Atlantic coastal catchments of France. Am. Fish. Soc. Symp. 58 : 157–174.

Acou A., Laffaille P., Legault A., (2008). Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. Ecology of Freshwater Fish. 17 (n°3): 432-442.

Acou A., Lefebvre F., Contournet P., Poizat G., Panfili J., Crivelli A. J., (2003). Silvering of female eels (*Anguilla anguilla*) in two sub-populations of the Rhône delta. Bull. Fr. Pêche Piscic. 368 : 55-68.

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.

- Bibliographie -

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.

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., 1997b. 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

- Bibliographie -

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

- Bibliographie -

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 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 greatcormorants *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 CEPALMAR. 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.

- Bibliographie -

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, 8p.

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.

- Bibliographie -

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.

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.

- Bibliographie -

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 Ingendahl 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 (*Pseudodactylogyrus 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.

- Bibliographie -

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).

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.

- Bibliographie -

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.

- Bibliographie -

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. Aq. 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 ecosystems 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.

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.

- Bibliographie -

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.

8 Annexes

Annexe 1a. Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (VEMCO)

Photographie	
	V9 – 2L
Longueur (mm)	29
Diamètre (mm)	9
Poids dans l'air (g)	4.7
Poids dans l'eau (g)	2.9
Délai minimal (s)	30
Délai maximal (s)	90
Autonomie estimée (j)	400
Fréquence d'émission (kHz)	69
Nombre de pulse codant	8

Annexe 1b. Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones) (VEMCO, 2010)

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 1c. Photos du matériel utilisé pour le marquage des anguilles argentées



1- Photo d'un verveux positionné dans le lac (a) et lors de la relève par le pêcheur (b)



2- Photo des anguilles argentées (c) et du matériel utilisé (d ; e) lors du marquage



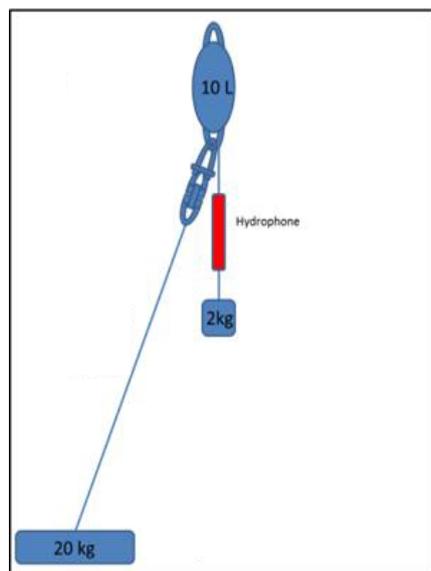
3- Photo de l'opération chirurgicale réalisée sur les anguilles et du matériel utilisé (f ; g)

- Annexes -

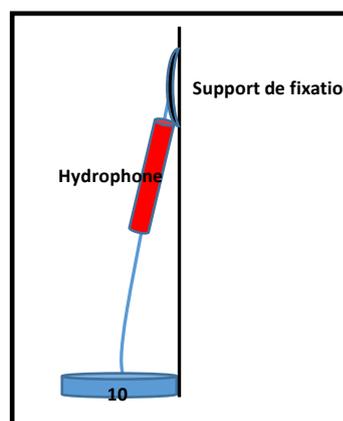
Annexe 1d. Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées

Date du marquage	Nombre d'anguilles marquées
25 Septembre 2015	18
16 Octobre 2015	16
20 Novembre 2015	17

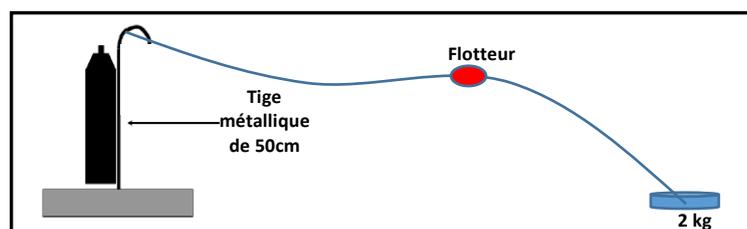
Annexe 2 : Systèmes de fixations utilisés pour la mise en place des hydrophones



- Système utilisé pour tous les hydrophones du lac



- Système furtif utilisé le long d'un support en aval du lac



- Système furtif utilisé en plein eau en aval du lac