STATION MARINE DINARD

UMS PATRIMOINE NATUREL — CENTRE D'EXPERTISE ET DE DONNÉES AFB · CNRS · MNHN

FISH PASS — INGÉNIERIE DES MILIEUX AQUATIQUES

COEUR émeraude

VOLET POISSONS MIGRATEURS 2015-2021

Anguille jaune (© G. Germis, BGM)

Saumon mâle (© G. Germis, BGM)

Grande alose (© FD56)

Lamproie marine (© F. Guérineau, FD35)

Truite de mer (© A. Langlois, Syndicat Horn)

Edition : Juin 2019

Etude de l'échappement et des voies de franchissement d'une AEP grâce à la télémétrie acoustique :

Cas des anguilles argentées du Frémur pour la saison d'avalaison 2017/18 (projet Bois Joli 3D)

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

Soutiennent les actions du volet "poissons migrateurs" :

Fédération Nationale Pêche · Fédération Départementale Pêche 22 · Fédération Départementale Pêche 29 · Bretagne Grands Migrateurs · Fédération Départementale Pêche 35 · Fédération Départementale Pêche 56

agence de l'eau Loire-Bretagne · Région Bretagne · Côtes d'Armor le Département · Finistère Penn-ar-Bed le Département · Morbihan · Préfet de la Région Bretagne, Préfet de Loire-Atlantique, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Bretagne · Agence Française pour la Biodiversité établissement public de l'État · Bretagne Environnement

Eau du Pays de Saint-Malo — Service public de production d'eau potable · saur

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

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

Les techniciens et chargés d'études du bureau d'études FISH PASS (BERTHELOT Y, TROGER F, ALLIGNE M, BONNAIRE F), pour leurs nombreuses interventions sur le terrain au cours de l'étude, ainsi que l'équipe technique du MNHN de Dinard. Egalement Richard Dayot de la SAUR pour sa collaboration lors des interventions au niveau du barrage de Bois Joli.

Ce document doit être cité comme suit :

Danet V., Trancart T., Acou A., Charrier F., Feunteun E., (2019). Etude de l'échappement et des voies de franchissement d'une AEP grâce à la télémétrie acoustique : Cas des anguilles argentées du Frémur pour la saison d'avalaison 2017/18. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, Station marine de Dinard/CRESCO, 67 p. + annexes.

Sommaire

Sommaire 2
Liste des figures 4
Liste des tableaux 6
Résumé étendu 7
1. Introduction 1
2. Matériels et méthodes 5
2.1 Présentation du site 5
2.1.1 Le Frémur 5
2.1.2 Les ouvrages structurant 6
2.2 La télémétrie acoustique 12
2.2.1 Le réseau acoustique mis en place 13
2.2.2 L'efficacité du réseau 15
2.3 Protocole de marquage 17
2.3.1 La pêcherie 17
2.3.2 Biométrie 17
2.3.3 Techniques de marquage 18
2.3.4 La relâche 20
2.4 Analyse des données de détection 20
2.4.1 Dispositif basse définition 20
2.4.2 Dispositif haute définition au droit du barrage de Bois Joli 22
2.4.3 Données environnementales 25
2.4.4 Test des facteurs environnementaux déclencheurs de la migration 27
3 Résultats 28
3.1 Suivi de la pêcherie et biométrie 28
3.1.1 Suivi de la pêcherie 28
3.1.2 Caractéristiques des individus marqués 30
3.1.3 La recapture des individus marqués dans les pièges de dévalaison 30
3.2 Quantification de l'échappement 31
3.2.1 L'échappement de la retenue AEP du Bois Joli 31
3.2.2 L'échappement de l'ensemble du réseau 33
3.3 Les comportements au sein de la retenue 35
3.3.1 Les facteurs déclencheurs de migration 35
3.3.2 Effet bloquant du barrage 37
3.3.3 Effet évolutif 37
3.4 Les comportements au pied du barrage 40

3.4.1 Validation de l'estimation de la position horizontale 40
3.4.2 Estimation des voies d'échappement les plus probables 41
3.4.3 Efficacité de franchissement 43
3.4.4 Comportements lors des tentatives d'échappement 46
4. Discussion 51
4.1 Suivi de la pêcherie et biométrie 51
4.1.1 La pêcherie 51
4.1.2 Caractéristiques des individus marqués 51
4.1.3 La recapture des individus marqués dans les suivis de la dévalaison 52
4.2 Le suivi acoustique : Quantification de l'échappement 53
4.2.1 Limites méthodologiques 53
4.2.2 Echappement de la réserve AEP 54
4.2.3 Echappement à l'échelle du bassin versant 54
4.3 Les comportements au sein de la retenue 56
4.3.1 Les facteurs déclencheurs de migration 56
4.3.2 Effet bloquant du barrage 57
4.3.3 Effet évolutif 57
4.4 Analyse comportementale au droit du barrage de Bois Joli 59
4.4.1 Nécessité d'avoir des positions précises 59
4.4.2 Précision de la méthode de détermination des positions 59
4.4.3 Comportements lors des tentatives d'évasion 60
5. Conclusion 61
6. Bibliographie 63
7. Annexes 68
Annexe 1: Méthode TDOA 68
Annexe 2 : Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (THELMA) 72
Annexe 3 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones VEMCO) 72
Annexe 4 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones THELMA) 73
Annexe 5 : Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées 73
Annexe 6 : Systèmes de fixation utilisés pour la mise en place des hydrophones 74
Annexe 7 : Illustrations 75

Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant du Frémur (source : BD-Carthage-onema-BD-carto, FISH PASS) 5

Figure 2 : Barrage de Bois Joli (vue amont hors surverse) (V.Danet) 7

Figure 3 : Barrage de Bois Joli (vue aval en surverse) avec ses 6 crêtes surversantes (V.Danet). 8

Figure 4 : Tour de prélèvement d'eau potable avec les 5 prises d'eau (vue amont du barrage du Bois Joli lors d'une vidange décennale) 9

Figure 5 : Barrage de Pont es Omnes (vue amont) (V.Danet) 10

Figure 6 : Barrage de Pont es Omnes (vue aval en surverse) et piège de dévalaison à gauche et de montaison à droite (V.Danet) 11

Figure 7 : Barrage de Pont Avet (vue de la zone de surverse) (V.Danet) 12

Figure 8 : Réseau complet d'hydrophones mis en place dans le Frémur et localisation de la pêcherie d'anguilles argentées. 15

Figure 9 : Représentation schématique de l'aire de détection d'un hydrophone 16

Figure 10 : Mesure du diamètre vertical de l'oeil gauche (V.Danet) 18

Figure 11 : Mesure de la Longueur pectorale gauche (V.Danet) 18

Figure 12 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques 19

Figure 13 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS) 20

Figure 14 : Illustration de la première étape de reconstruction des trajectoires 21

Figure 15 : Illustration de la deuxième étape de la reconstruction des trajectoires 22

Figure 16 : Bathymétrie de la zone de Haute Définition (point noir = point bathymétrique, point rouge = hydrophone Thelma) de la retenue AEP de Bois Joli. 26

Figure 17 : Evolution du nombre d'anguilles capturées aux verveux en fonction de la pluviométrie et du niveau d'eau de la retenue AEP 29

Figure 18 : Périodes et voies d'échappement de la réserve AEP en fonction du niveau d'eau de la réserve et de la pluviométrie (Gris = période de surverse) 32

Figure 19 : Schéma bilan du suivi de l'échappement des anguilles argentées marquées sur l'ensemble du réseau 34

Figure 20 : Résultats du modèle BRT (facteurs déclencheurs de la migration) (Trancart et al ; 2019) 36

Figure 21 : Efficacité de franchissement du barrage de Bois Joli par les anguilles marquées (count = nb d'anguilles ; temps_pr_sortir = nb de jours avant le franchissement) (Trancart et al ; 2019) 38

Figure 22 : ACP des différentes variables mesurées en fonction des 16 anguilles marquées réparties en 3 groupes (Lentes, Rapides et Non migrantes) (Trancart et al ; 2019) 39

Figure 23 : Quantile cumulatif de la distribution des erreurs pour l'émetteur test n ° 1 (ligne bleue) et l'émetteur test n ° 2 (ligne rouge). Les deux lignes pointillées représentent les quantiles 50% et 90% (Trancart et al ; 2019) 41

Figure 24 : Exemple des dix dernières positions estimées (~ 10 min) pour quatre anguilles argentées ayant utilisé la première crête surversante du barrage de Bois Joli. Ces anguilles sont

représentatives de toutes les anguilles ayant utilisé la surverse pour franchir le barrage. La couleur des points représente l'évolution temporelle (jaune pour le premier et rouge pour le dernier). Les points manquant sont hors cadre (Trancart et al ; 2019) 42

Figure 25 : Dix dernières positions estimées (~ 10 min) pour les trois anguilles ayant franchis le barrage par la prise d'eau potable. La couleur des points représente l'évolution temporelle (jaune pour le premier, rouge pour le dernier). Les points manquant sont hors cadre (Trancart et al ; 2019)..... 42

Figure 26 : Efficacité de franchissement du barrage évaluée via 4 mesures: Durée avant l'échappement, délai après surverse, nombre de détections au pied (< 10 m) du barrage, nombre de détections au pied (< 10 m) du barrage par jour (PE = Prise d'Eau ; SU = Surverse) (Trancart et al ; 2019) 45

Figure 27 : Périodes de présence près du barrage (< 10 m) pour les 3 anguilles passées par la prise d'eau (nuit moyenne = gris foncé, début de la nuit = gris le plus léger, fin de la nuit = gris clair) (Trancart et al ; 2019)..... 47

Figure 28 : Périodes de présence à proximité du barrage (> 10 m) pour les anguilles qui sont passées par la surverse (nuit moyenne = gris foncé, milieu de la nuit = gris le plus léger, fin de la nuit = gris clair, début du jour = jaune, fin du jour = orange) (Trancart et al ; 2019)..... 48

Figure 29 : Zones de présence près du barrage (< 10 m) pour les anguilles passées par la prise d'eau, en vue du ciel (en haut) et de face (en bas). En vue de face, la tour de prise d'eau est figurée par le rectangle vertical en pointillé noir et les fenêtres de la surverse par le plan horizontal (Trancart et al ; 2019) 49

Figure 30 : Zones de présence près du barrage (< 10 m) pour les anguilles passées par la surverse, vue du ciel (à gauche) et vue de face (à droite), pour la période antérieure (en haut) et pendant la surverse (en bas). En vue de face, la tour de prise d'eau est figurée par le rectangle vertical en pointillé noir et les fenêtres de la surverse par le plan horizontal (Trancart et al ; 2019)..... 50

Figure 31 : Box-plot des comparaisons de moyennes entre les anguilles marquées en acoustique et les anguilles capturées dans le piège de dévalaison de PEO 52

Figure 32 : Diagram illustrating the synchronization process. The number of digits after a number indicates the accuracy 69

Figure 33 : Relève des données d'un hydrophone Thelma sur le Bois Joli 75

Figure 34 : Relève des données d'un capteur accéléromètre sur le Bois Joli..... 75

Figure 35 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli..... 76

Figure 36 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli..... 76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Stade de maturité des anguilles argentées marquées en acoustique (méthode de Durif et al., 2005) et mesure des variables morphologiques : longueur totale (LT), poids (Pd), diamètre oculaire moyen (DO) et longueur pectorale moyenne (LP). Moyennes et erreur standard. 30

Tableau 2 : Résultat de la validation de l'estimation des positions horizontale avec les deux émetteurs tests (Trancart et al ; 2019)..... 40

Tableau 3 : Détermination des voies de franchissement par les deux méthodes (Trancart et al ; 2019)..... 43

Tableau 4 : Efficacité de franchissement du barrage de Bois Joli (Trancart et al ; 2019)..... 44

Résumé étendu

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

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

marquage aux PIT-tags montrent qu'un très faible pourcentage de 20 à 30% des anguilles argentées franchissent la retenue avec succès (Feunteun et al., 2000 ; Acou, 2006) alors que ce pourcentage dépasse les 80% dans les cours d'eau non aménagés comme l'Oir (Acou, 2006) ou la Loire (Bultel et al., 2013). De plus, les deux canalisations (de débit réservé et la prise d'eau potable) ne sont pas conçues pour permettre la dévalaison des anguilles et une grille est sensée empêcher l'accès aux anguilles dévalantes. Pourtant, des suivis montrent que de nombreuses anguilles peuvent franchir le barrage par ces deux voies, occasionnant des lésions significatives voire des mortalités. Un suivi en télémétrie acoustique d'anguilles argentées a montré que seulement 35 % des anguilles argentées franchissent avec succès le barrage de Bois Joli malgré des conditions favorables à la migration (Besson et al., 2016). Le suivi à long-terme de la dévalaison réalisé en aval du barrage du Bois Joli grâce à un dispositif de piégeage montre de plus, que le nombre d'anguilles argentées qui s'échappe de la retenue diminue au cours du temps (Charrier F., 2018). Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'urbanisation croissante de la région de Saint Malo, les surverses tardives voire inexistantes risquent de se généraliser selon les simulations réalisées par le syndicat Mixte. Il est donc important d'étudier ces systèmes dans le but de mettre au point des dispositifs de dévalaison qui permettent d'améliorer l'échappement des anguilles argentées au sein de ces retenues AEP, quelles que soient les conditions hydrologiques rencontrées lors des saisons de migration.

L'objectif de ce projet BJ3D était notamment :

1) d'étudier le(s) comportement(s) d'anguilles argentées au sein de la retenue du Bois Joli et en particulier de comprendre comment les anguilles migrantes s'orientent dans la retenue avant d'atteindre le barrage. Pour cela, des émetteurs acoustiques ont été implantés dans la cavité générale de 16 anguilles argentées femelles et un dispositif de 28 hydrophones couvrant l'ensemble de la retenue AEP a permis un suivi des détections jusqu'au barrage du Bois Joli ; 2) Préciser pour celles qui arrivent devant le barrage de Bois Joli, quelles sont les zones explorées et le cas échéant les voies préférentielles de passage parmi les trois possibles (surverse, vanne de débit réservé et conduite de la station de pompage) ? Pour cela un réseau dense de 26 hydrophones a été mis en place à proximité amont de la paroi du Bois Joli afin de déterminer avec une haute précision la localisation des détections des anguilles marquées dans les trois dimensions (latitude, longitude et profondeur). La localisation dans les deux premières dimensions a été estimée par l'analyse des TDOA (Time Difference of Arrival) et donnait une précision élevée (erreurs médianes variaient entre 1.14 m et 1.64 m). La localisation en profondeur dans la colonne d'eau a été estimée par les sondes de profondeur des marques acoustiques et affichaient une précision quasi parfaite (avec une résolution de 10 cm) ; 3) Quantifier l'échappement au barrage de Bois Joli mais également jusqu'à l'estuaire du Frémur. Deux hydrophones ont été placés en amont et en aval de chaque ouvrage situé en aval de la retenue AEP (barrages du

Pont es Omnes et du Pont Avet) afin de s'assurer du franchissement ou non des ouvrages, soit 10 hydrophones de l'aval du barrage de Bois Joli jusqu'à l'estuaire du Frémur.

Les résultats ont permis de mettre en évidence les nombreux impacts du barrage de Bois Joli sur la migration des anguilles argentées produites en amont de la retenue AEP. Tout d'abord, près de 19% (3/16) n'ont pas réussi à franchir le barrage du Bois-Joli et sont restées bloquées dans la retenue. Pour les autres (13/16), le franchissement effectif est intervenu principalement en début de surverse (Décembre 2017) après, dans la plupart des cas, plusieurs essais infructueux. Quand la première détection au pied du barrage, interprétée comme la première tentative de franchissement, est prise comme référence temporelle, le blocage de la migration a engendré une augmentation de la distance parcourue de 39.7 km (9.7 km – 77.2 km) en moyenne, et un temps de résidence supplémentaire de 21 jours environ (4.3 – 65.9 jours). Les conséquences de ce blocage de la migration sont une hausse de la dépense énergétique liée à la distance supplémentaire parcourue, et un retard de la migration. Les anguilles argentées cessent de se nourrir au stade argenté, et il est probable que les retards de migration entament les réserves énergétiques des individus, lesquelles sont indispensables pour arriver sur la zone de fraie et se reproduire efficacement. De plus, un timing différé peut également limiter la probabilité des individus à trouver des congénères sur la frayère et réduire ainsi leur succès reproducteur.

L'analyse des comportements a permis de mettre en évidence trois types distincts de stratégie d'échappement au sein de la retenue AEP du Bois Joli. Le groupe des anguilles argentées en échec de migration (19%) est le groupe des anguilles qui a parcouru la plus faible distance et qui s'est présenté le moins souvent au pied du barrage. Ces individus ne présentaient pas de différence significative en terme de stade de maturité ou encore de structure de tailles ou poids comparativement aux autres groupes. Un second groupe (31%) appelé « anguilles intelligentes » est constitué d'anguilles qui ont mis le plus de temps à franchir le barrage mais ont pris le moins de risque en se déplaçant le moins, limitant ainsi leur dépense énergétique et attendant les bonnes fenêtres environnementales pour s'échapper. L'analyse des facteurs déclencheurs de la migration par la méthode de Boosted Regression Trees montre que cette fenêtre environnementale favorable intervient quand l'augmentation du niveau d'eau dépassait un seuil de 0.5 m/12 h et que la direction du vent était ESE à SSO. Enfin, le groupe majoritaire (50%) des anguilles dites « Audacieuses » était constitué d'anguilles qui se sont échappées le plus rapidement. Ce sont les anguilles qui ont parcouru le plus de distances dans la retenue avant de s'échapper et qui se sont présentées le plus souvent devant le barrage. Avec la présence du barrage AEP du Bois Joli, c'est donc la 'personnalité' la plus efficace (qui présente un meilleur taux de franchissement), mais c'est également la plus risquée (Allendord, 2009). En effet, le

risque de se faire pêcher augmente généralement avec la distance parcourue. L'effet évolutif majeur est donc une sélection du comportement le plus à risque.

Sur les 13 anguilles qui ont franchi le barrage du Bois Joli, une majorité (n = 10, 77 %) a attendu la surverse et utilisé principalement la première crête surversante dont le niveau est situé 10 cm plus bas (28.10 NGF) que les cinq autres. Les autres anguilles (n = 3, 23%) ont emprunté la colonne de prise d'eau potable et sont ressorties par la vanne de débit réservé (n = 2) ou par la conduite de la station de pompage (n =1), toutes deux équipées de dispositif de piégeage. La méthode de localisation dans les trois dimensions (latitude, longitude et profondeur) des détections a permis de mettre en évidence 2 grands types de comportement en fonction des voies de franchissement utilisées (surverse *vs* prise d'eau). Les anguilles qui ont emprunté la prise d'eau ont été détectées pendant une longue période devant le barrage AEP, leurs mouvements étaient lents avant le franchissement, avec une activité exclusivement nocturne et une zone d'exploration préférentielle située au fond de la colonne d'eau et à proximité de la tour de prise d'eau menant aux deux sorties possibles (vanne de débit réservé ou conduite de la station de pompage). Les anguilles qui ont franchi le barrage par la surverse se sont présentées sur une plus courte période devant le barrage et leurs mouvements étaient rapides avant le franchissement, avec une activité aussi bien nocturne que diurne, ainsi que des zones d'exploration situées sur la droite du barrage.

Les résultats ont également montré que la sélection des voies de franchissement impactait significativement la survie des individus. En effet, les deux anguilles argentées qui ont été capturées à la sortie de la vanne de débit réservé étaient soient mortes ou moribondes, et n'ont pas été détectées dans les zones aval. Celle qui a dévalé *via* la conduite de la station de pompage montrait des lésions (éraflures) mais son transit dans la conduite n'a pas été mortel. Ce résultat est inattendu puisqu'un suivi du filtre de la station de pompage mené depuis 2011 par Fish pass montre que la mortalité totale (directe et indirecte) liée au passage dans le filtre est estimée à près de 70% (Charrier et al., 2019). Enfin, les conséquences du franchissement par surverse ont été évaluées pour celles recapturées au piège de dévalaison du Pont es Omnes situé 1 kilomètre plus en aval. Parmi les 10 anguilles qui ont choisi cette voie, trois étaient mortes et présentaient de nombreuses hémorragies faciales et corporelles ainsi que de nombreuses éraflures. Cette mortalité pourrait être liée au franchissement par surverse du barrage de Bois Joli *via* son parement rugueux et son absence de fosse de réception, et/ou aux conditions de captures dans le piège de dévalaison du Pont es Omnes lors d'une forte crue.

Finalement, l'échappement global qui représente la proportion d'individus marqués en amont du Bois Joli qui accède à l'estuaire du Frémur après avoir franchi successivement les trois barrages (Bois Joli, Pont es Omnes et Pont Avet) varie entre 0% et un maximum de 31% (5/16). Cet intervalle est dû à des

problèmes de détection au niveau du barrage du Pont Avet qui ne permettent pas d'identifier clairement le devenir des individus marqués. Quel que soit le niveau réel d'échappement, il intervient au cours d'une saison hydrologique favorable (surverse précoce observée en Décembre 2017). Ce résultat constitue donc une fourchette haute d'estimation de l'échappement dans le bassin versant du Frémur. A la date de rédaction de ce rapport (Juin 2019), la surverse de la saison 2018/19 n'a toujours pas eu lieu, et l'échappement annuel constaté est nul. Ce résultat montre clairement que les objectifs réglementaires d'échappement en anguilles argentées fixés à 40% ne sont pas respectés sur le bassin versant du Frémur.

En conclusion, cette étude montre que les barrages AEP limitent significativement l'échappement en anguilles argentées. Or, les études qui traitent de la dévalaison dans de tels systèmes sont peu nombreuses et l'essentiel des travaux concernent les ouvrages hydro-électriques. Une première étape consisterait à condamner réellement le franchissement par les voies de migration les plus dommageables du barrage de Bois Joli (vanne de débit réservé et conduite de la station de pompage). Ensuite, un aménagement de la voie de migration par surverse devra être réalisé pour limiter les érosions liées probablement au contact du parement rugueux de la paroi et/ou de l'absence de fosse de réception. Enfin, et c'est l'enjeu majeur à atteindre, il semble fondamental de penser dès à présent à la conception d'un dispositif de dévalaison efficace et attractif qui permette aux anguilles argentées de franchir le barrage du Bois Joli même quand la côte de surverse n'est pas atteinte. Les résultats sur les comportements d'exploration de la paroi du Bois Joli des anguilles argentées présentées ici seront probablement très utiles pour définir l'emplacement et mettre au point le design de ce dispositif de dévalaison qui s'avère crucial pour l'échappement en anguilles argentées du Frémur. L'étude met également en évidence la nécessité de créer un aménagement pour favoriser la dévalaison au niveau du barrage de Pont Avet.

1. Introduction

Autrefois abondante et considérée nuisible jusqu'en 1982 (Adam, 1997 ; Durif, 2003), l'anguille européenne *Anguilla anguilla* (L, 1758) est désormais classée en « danger critique d'extinction » sur la liste rouge mondiale et française de l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN). Le stock d'anguilles européennes connait en effet un effondrement majeur : le recrutement en civelles observé en Europe actuellement correspond à environ 10% des niveaux de la période de référence (1960-1970 ; ICES, 2018). Face à ce déclin, le conseil de l'Union Européenne a adopté le 18 septembre 2007 un règlement (CE n°1100/2007) instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes. Chaque Etat membre a dû proposer un plan de gestion au niveau national. Le plan de gestion Anguille (PGA) français a été approuvé par la Commission européenne le 15 février 2010.

L'objectif du PGA, comme celui de chaque Etat Membre de l'UE, 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 « pristine[1] » d'anguilles argentées. Pour atteindre cet objectif, le PGA a porté l'effort de gestion sur quatre mesures principales : (i) les mesures pour diminuer et encadrer la mortalité par pêche (professionnelle et récréative) sur tous les stades, (ii) les mesures pour diminuer et encadrer la mortalité autre que la pêche (continuité écologique, pollution, habitat, etc.), (iii) la mise en place de dispositifs pour déterminer l'échappement au sein des sites index et (iv) les mesures de reconstitution tel que le repeuplement. 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'espèce est soumise à de nombreuses pressions au cours de son cycle de vie continental telles que la modification et réduction de leurs habitats de croissance, la pression de pêche, la détérioration de leur condition de vie et de leur état sanitaire (pollution, parasitisme…), la rupture de la continuité écologique liée à la présence de barrages mais également la prédation (Adam G., 1997 ; Carpentier A., 2009).

Dans le contexte du réchauffement climatique, les retenues artificielles vont s'accumuler dans les cours d'eau pour répondre aux besoins croissants en eau potable, hydroélectricité et irrigation. L'Ouest de la France (Région Bretagne et Vendée) est une région particulièrement concernée en raison de l'absence de nappes phréatiques et de la nécessité d'avoir des retenues d'eau superficielle. Ainsi, un minimum de 30 barrages AEP (Alimentation en Eau Potable) est recensé dans cette région. A

[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.

l'échelle mondiale, ils sont probablement plusieurs milliers (Lehner *et al.*, 2008). Ces retenues et leurs barrages associés impactent directement les poissons migrateurs comme l'anguille européenne en limitant leur colonisation au stade juvénile (anguillettes) et leur dévalaison au stade argenté. L'essentiel de l'effort de gestion conduit depuis 30 ans a porté principalement sur la restauration des voies de migration anadrome grâce à l'aménagement de passes à anguilles. Les études concernant la dévalaison se sont focalisées sur les ouvrages hydroélectriques où des mortalités importantes (entre 20 et 100 %) d'anguilles argentées pouvaient être constatées lors du transit dans les turbines (Trancart T., 2013 ; Trancart T., 2018 ; Travade F., 1992). La problématique de la dévalaison au niveau d'ouvrages non-turbinants reste relativement peu documentée, probablement parce qu'il est considéré qu'une surverse lors des crues est suffisante pour favoriser la sortie d'un maximum d'anguilles argentées (Travade F., 1992). S'il convient de le vérifier, il est également important d'anticiper l'impact des années sèches sur l'échappement des anguilles argentées dans les sites où des barrages AEP sont présents. En effet, dans le contexte du changement global, la fréquence des années hydrologiques défavorables va augmenter, et des solutions doivent être trouvées pour permettre un échappement en anguilles argentées même quand les surverses sont tardives voire inexistantes.

Depuis 1996, un suivi anguille est réalisé dans le bassin versant du Frémur. Ce suivi permet de recueillir des données à long-terme concernant l'ensemble du cycle biologique continental de l'espèce : de la colonisation du bassin versant au stade juvénile jusqu'à la dévalaison des anguilles argentées (Charrier et al., 2017). Ce suivi met en lumière depuis longtemps une forte problématique de continuité piscicole sur plusieurs ouvrages présents sur le linéaire de ce petit fleuve côtier breton. Le barrage de Bois Joli construit en 1992 est le plus grand des ouvrages. Il a permis de créer une AEP de près de 3 000 000 de m^3 qui permet d'alimenter en eau potable toute la région de Dinard et Saint Malo. Il ne possède pas de système de dévalaison adapté. La migration des anguilles argentées est en effet dépendante de la surverse de la retenue et des suivis à long-terme par marquage PIT-tags montrent qu'une minorité franchissent la retenue avec succès (Acou, 2006). De plus, il existe deux canalisations (le débit réservé et la prise d'eau potable) qui partagent une prise d'eau commune en amont du barrage du Bois Joli. Aucune de ces canalisations n'est adaptée à la dévalaison des anguilles et une grille est sensée empêcher l'accès aux anguilles dévalantes. Pourtant, des suivis montrent que de nombreuses anguilles peuvent franchir le barrage par ces deux voies, occasionnant des lésions significatives voire des mortalités. Un suivi en télémétrie acoustique d'anguilles argentées a montré que seulement 35 % des anguilles argentées franchissent avec succès le barrage de Bois Joli malgré des conditions favorables à la migration (Besson et al., 2016). Le suivi à long-terme de la dévalaison réalisé en aval du barrage du Bois Joli grâce à un dispositif de piégeage montre de plus, que le nombre d'anguilles argentées qui s'échappe de la retenue diminue au cours du temps (Charrier F., 2018).

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'urbanisation croissante de la région de Saint Malo, les surverses tardives voire inexistantes, sont un scenario probable selon les simulations réalisées par le syndicat Mixte. Il est donc important d'étudier ces systèmes dans le but de mettre au point des dispositifs de dévalaison qui permettent d'améliorer l'échappement des anguilles argentées au sein de ces retenues AEP, et ce quelles que soient les conditions hydrologiques rencontrées lors des saisons de migration.

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

L'étude BOIS JOLIS 3D a pour objectif d'identifier et de comprendre le ou les comportements des anguilles argentées au sein de la retenue d'Alimentation d'Eau Potable (AEP) du Bois Joli, ainsi qu'au pied du barrage du Bois Joli, et de les suivre jusqu'à l'estuaire du Frémur lorsqu'elles ont réussi à franchir cet ouvrage, en utilisant la télémétrie acoustique.

L'acquisition de données par cette étude doit permettre d'apporter des éléments pour améliorer l'échappement des anguilles argentées du Frémur

Le projet s'articule autour de trois axes :

- **Etudier le(s) comportement(s) d'anguilles argentées dans la retenue du Bois Joli en attente de surverse : comment s'orientent-elles dans la masse d'eau pour atteindre le barrage ?** Des émetteurs acoustiques ont été implantés dans la cavité générale de 16 anguilles argentées femelles et un dispositif de 28 hydrophones disposés sur tout le linéaire de la retenue AEP a permis d'étudier leur comportement.
- **Préciser pour celles qui arrivent devant le barrage de Bois Joli, quelles sont les zones explorées et le cas échéant les voies préférentielles de passage ?** Pour cela un dispositif de 26 hydrophones a été installé juste en amont du barrage de Bois Joli afin d'obtenir, grâce à cette haute densité d'hydrophones, une haute précision permettant de retracer les trajectoires des anguilles en 3 dimensions. Pour confirmer les voies de migration empruntées, un suivi complémentaire des captures a été réalisé au niveau des deux conduites du barrage de Bois Joli (filtre de la station de pompage d'eau et le débit réservé).
- **Quantifier l'échappement au barrage de Bois Joli mais également jusqu'à l'estuaire du Frémur.** Deux hydrophones ont été placés en amont et en aval de chaque ouvrage

afin de s’assurer du franchissement ou non des ouvrages, soit 10 hydrophones de l’aval du barrage de Bois Joli à l’aval de Pont Avet.

2. Matériels et méthodes

2.1 Présentation du site

2.1.1 Le Frémur

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

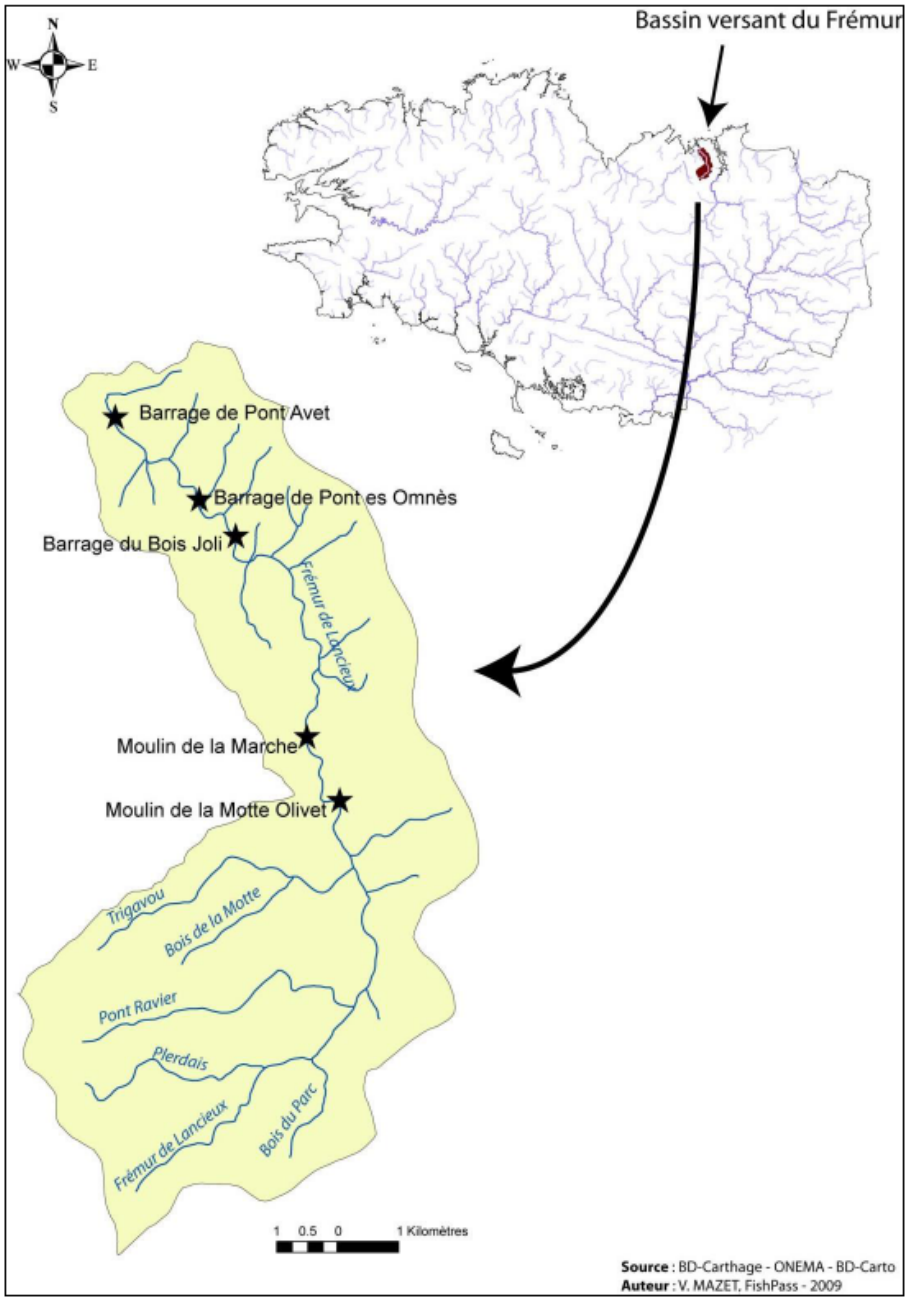


Figure 1 : Bassin versant du Frémur (source : BD-Carthage-onema-BD-carto, FISH PASS)

2.1.2 Les ouvrages structurant

2.1.2.1 Bois Joli

Le barrage de Bois Joli (Figure 2 et Figure 3) situé à 5.5 km de la mer a été construit en 1992. C'est un ouvrage AEP permettant de retenir l'eau et ainsi créer une réserve d'eau potable. Il mesure 150 m de long pour 15 m de haut créant un réservoir de 0.4 km² pour un volume maximal de 3 000 000 m^3. Cet ouvrage a été équipé d'un ascenseur de montaison (1ère mondiale) mais aucun dispositif spécifique n'est prévu pour la dévalaison des anguilles argentées.

Une station de pompage, pompant l'eau de la retenue est située à l'aval cet ouvrage.

Trois voies d'échappement pour les anguilles argentées au niveau de cet ouvrage sont possibles :

- **par surverse** quand la retenue est remplie et qu'elle atteint sa côte maximale (28,20 NGF) :

La surverse est possible au niveau de 6 crêtes surversantes de 6.90 m de large (Figure 3). La première fenêtre rive gauche possède une partie de 3 m de large plus basse de 10 cm par rapport aux autres. La surverse y est alors plus précoce et plus grande. Sa côte de surverse est alors de 28.10 m côte NGF (Niveau Général Français) contre 28.20 m pour les autres fenêtres (Legault et al., 2003; Acou et al., 2008). Sur le Frémur, la durée moyenne de la surverse observée depuis 2002 est de 3,4 mois centrée entre Janvier et Mars (Charrier et al., 2018). La période de surverse intervient donc tardivement par rapport à la période médiane de migration des anguilles argentées observée en Europe (Octobre/Novembre, Righton et al., 2016) lorsque celle-ci n'est pas entravée par la présence de barrages. Les anguilles utilisant la surverse pour franchir le barrage de Bois Joli font alors une glissade de 14m de hauteur le long d'un parement rugueux et arrivent brutalement au pied du barrage qui n'est pas équipé de fosse de réception. Les impacts de cette chute sur l'état sanitaire des anguilles ne sont pas connus.

- par la **conduite de pompage d'eau** : La conduite de pompage d'eau possède 5 prises d'eau en partie amont du barrage à 5 hauteurs différentes, dans une tour en béton au milieu du barrage, permettant de pomper l'eau de la retenue quelle que soit son niveau d'eau (Figure 4). La conduite a été équipée d'une grille métallique fine pour empêcher le passage des anguilles et leur mortalité. Mais un suivi réalisé au niveau du filtre du pompage depuis Mars 2012 montre que cette grille s'est révélée inefficace, de nombreuses anguilles ayant été retrouvées mortes dans le filtre situé en aval du barrage (Charrier et al., 2017).

- **par la conduite de débit réservé**, assurant un écoulement permanent entre l'amont et l'aval du barrage lorsqu'il n'y pas de surverse, utilise la même voie d'entrée que la station de

pompage mais est déversée directement en aval du barrage. Une grille a également été installée mais elle s'est avérée tout aussi inefficace (Legault et al., 2003).

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

Figure 3 : Barrage de Bois Joli (vue aval en surverse) avec ses 6 crêtes surversantes (V.Danet).

Il existe donc trois voies de passage pour les anguilles argentées (surverse, prise d'eau potable et débit réservé) mais aucune n'est véritablement adaptée pour la dévalaison.

Un filet a été spécialement installé au cours de cette étude au niveau de la sortie du débit réservé en aval du barrage de Bois Joli afin d'intercepter toutes les anguilles utilisant cette voie pour franchir le barrage. Le filtre de la station de pompage et le filet installés spécifiquement pour cette étude sur la sortie du débit réservé ont été relevés 2 fois par semaine dans le cadre du suivi Frémur par l'équipe technique de Fish-Pass et l'association Cœur-Emeraude. La biométrie de toutes les anguilles capturées a été réalisée et la présence de marque (acoustique ou PIT-tag) vérifiée. Les anguilles vivantes ont été marquées par un tatouage au Dermojet avant d'être remises à l'eau. Ce suivi permet donc de quantifier le nombre d'anguilles argentées (marquées ou non) qui transitent *via* ces conduites, et d'estimer un taux de mortalité différé grâce au suivi des dévalaisons du Pont es Omnes situé quelques centaines de mètres plus en aval (Charrier et al., 2016).

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

2.1.2.2 Pont es Omnès

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

Ce piège de dévalaison a été installé afin de réaliser un suivi de la dévalaison des anguilles produites en amont. Ce suivi est réalisé en routine par l'équipe de Fish-Pass et l'association Cœur Emeraude dans le cadre du suivi Frémur. Le piège est relevé 2 fois par semaines et une biométrie est réalisée sur chaque anguille capturée. Ce suivi a permis de vérifier si une anguille marquée avait franchi cet ouvrage.

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

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

2.1.2.3 Pont Avet

Situé à 2km de la mer, le barrage du Pont Avet (Figure 7) permet de créer une retenue de 15.8 ha pouvant contenir 500 000 m^3 d'eau, qui a été utilisée pour le fonctionnement de l'usine d'eau potable jusqu'en 2012. Cet ouvrage forme un arc de cercle de 96 m de long sur 11.7 m de haut. Le seul écoulement possible vers l'aval est la surverse sur la partie Est de l'ouvrage, qui est également la seule possibilité d'échappement des anguilles dévalantes.

Aucun dispositif de suivi de la dévalaison n'est présent au niveau du barrage de Pont Avet. Seules les données de détection des hydrophones installés en aval du barrage pourront permettre d'évaluer si les anguilles argentées marquées ont franchi ou non cet ouvrage.

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

2.2 La télémétrie acoustique

L'utilisation de la télémétrie acoustique permet d'estimer la position d'individus marqués dans le temps et l'espace, et dans certains cas d'enregistrer des paramètres abiotiques (température, pressions, accélération, etc.) (Jourdan & Labach, 2013). Cette méthode repose sur la réception d'un signal acoustique émis par un émetteur (positionné sur ou dans l'animal) par un ou plusieurs récepteurs (ou hydrophones) positionnés dans la zone d'étude. Les signaux peuvent être radioélectriques ou acoustiques, c'est la technologie acoustique qui a été privilégiée dans cette étude.

Le suivi par télémétrie acoustique est en effet particulièrement adapté au suivi de la faune aquatique (Bergé, 2012; Trancart, 2011). Les signaux acoustiques émis ont en effet l'avantage de se

propager rapidement et efficacement dans l'eau, quels que soient les niveaux de salinité. Les batteries internes offrent la possibilité d'effectuer des suivis sur une période satisfaisante (plusieurs mois) et tout en s'affranchissant d'une source d'alimentation externe souvent difficile à installer. Pour toutes ces raisons, la télémétrie acoustique a été choisie pour le suivi des anguilles argentées du Frémur.

2.2.1 Le réseau acoustique mis en place

Au total 62 hydrophones ont été déployés dans le bassin versant du Frémur, de la retenue AEP de Bois Joli à l'estuaire situé en aval du Pont Avet. Le réseau complet a été mis en place à partir du 12/09/2017 et le réseau a été retiré le 12/04/2018, le réseau acoustique a donc été opérationnel pendant 8 mois (Figure 8). Les hydrophones permettent d'enregistrer les signaux acoustiques émis à une position et un temps donné par un individu marqué. Deux types d'hydrophones compatibles avec les émetteurs ont été utilisés. Les hydrophones de la marque Thelma ont été utilisés pour le réseau dit Haute Définition (HD) du suivi, à proximité amont du barrage du Bois Joli. Ces hydrophones Thelma offrent la possibilité d'obtenir une précision à milliseconde de la donnée de détection, précision nécessaire pour permettre une localisation fine des détections et donc des voies de migration. Les hydrophones de la marque VEMCO ne permettent pas ce niveau de précision. Ils ont été installés partout ailleurs (retenue du Bois Joli jusqu'à l'estuaire du Frémur, Figure 8) pour confirmer le passage/échappement des anguilles dévalantes. Les deux types d'hydrophones ont une autonomie moyenne de 13 à 14 mois permettant de couvrir l'ensemble de la période de suivi (les caractéristiques techniques des hydrophones sont présentées en annexe).

2.2.1.1 La retenue de Bois Joli

Deux types de réseau ont été mis en place au sein de la retenue AEP du Bois Joli en fonction des différents objectifs.

2.2.1.1.1 Dispositif basse définition dans la retenue

Pour déterminer le comportement des anguilles argentées au sein de la retenue, 26 hydrophones de la marque Vemco ont été installés à distance régulière entre la tête de la retenue et l'amont du barrage du Bois Joli (dispositif en « colonne vertébrale » ; Figure 8). Pour cela chaque hydrophone est positionné sous une bouée (exemple de fixation en Annexe).

Ce réseau d'hydrophones permet de détecter les déplacements amont/aval au cours du temps au sein de la retenue.

2.2.1.1.2 Dispositif haute définition au droit du barrage de Bois Joli

Un second réseau de 26 hydrophones de la marque Thelma a été installé au droit du barrage de Bois Joli, offrant une forte densité d'écoute dans cette zone de 3.5 ha. Parmi eux, 3 hydrophones ont été équipés de tags synchronisateurs. Ils permettent de synchroniser les hydrophones entre eux et ainsi de conserver une précision horaire (à la milliseconde) dans la réception des signaux acoustiques. L'objectif de ce dispositif était de déterminer avec une précision métrique où prospectent les anguilles dans les 3 dimensions x, y et z (latitude, longitude et profondeur).

Tous les hydrophones de ce réseau haute définition sont fixés verticalement au fond à un corps-mort de 20 kg et reliés en surface par une petite bouée de signalisation. Ce système de fixation permet d'obtenir une position précise et fixe de chaque hydrophone. La position en x, y et z (au cm) de chaque hydrophone a été relevée à l'aide d'un matériel de topographie (Théodolite) lors de l'installation. Chaque récepteur Thelma est doté d'un capteur de température interne qui enregistre la température toutes les 10 minutes, ce qui est nécessaire pour déterminer avec précision la vitesse du son dans l'eau.

C'est ce réseau qui va permettre de définir les zones d'explorations préférentielles au droit de l'ouvrage et les voies de passages des anguilles argentées migrantes.

2.2.1.2 L'aval de la retenue AEP

Afin de quantifier le taux d'échappement (pourcentage d'anguilles qui arrivent à atteindre l'estuaire situé en aval de Pont Avet), des paires hydrophones ont été installées à proximité amont et aval des ouvrages du Pont es Omnes et du Pont Avet. Une paire supplémentaire a été installée en aval du barrage de Bois Joli pour confirmer le franchissement par surverse (Figure 8). Ainsi, ce sont 10 hydrophones supplémentaires de la marque Vemco qui ont été installés en aval du barrage de Bois Joli. Les hydrophones ont été disposés par paire de manière à élargir l'aire de détection couverte et maximiser les chances de détecter les anguilles marquées.

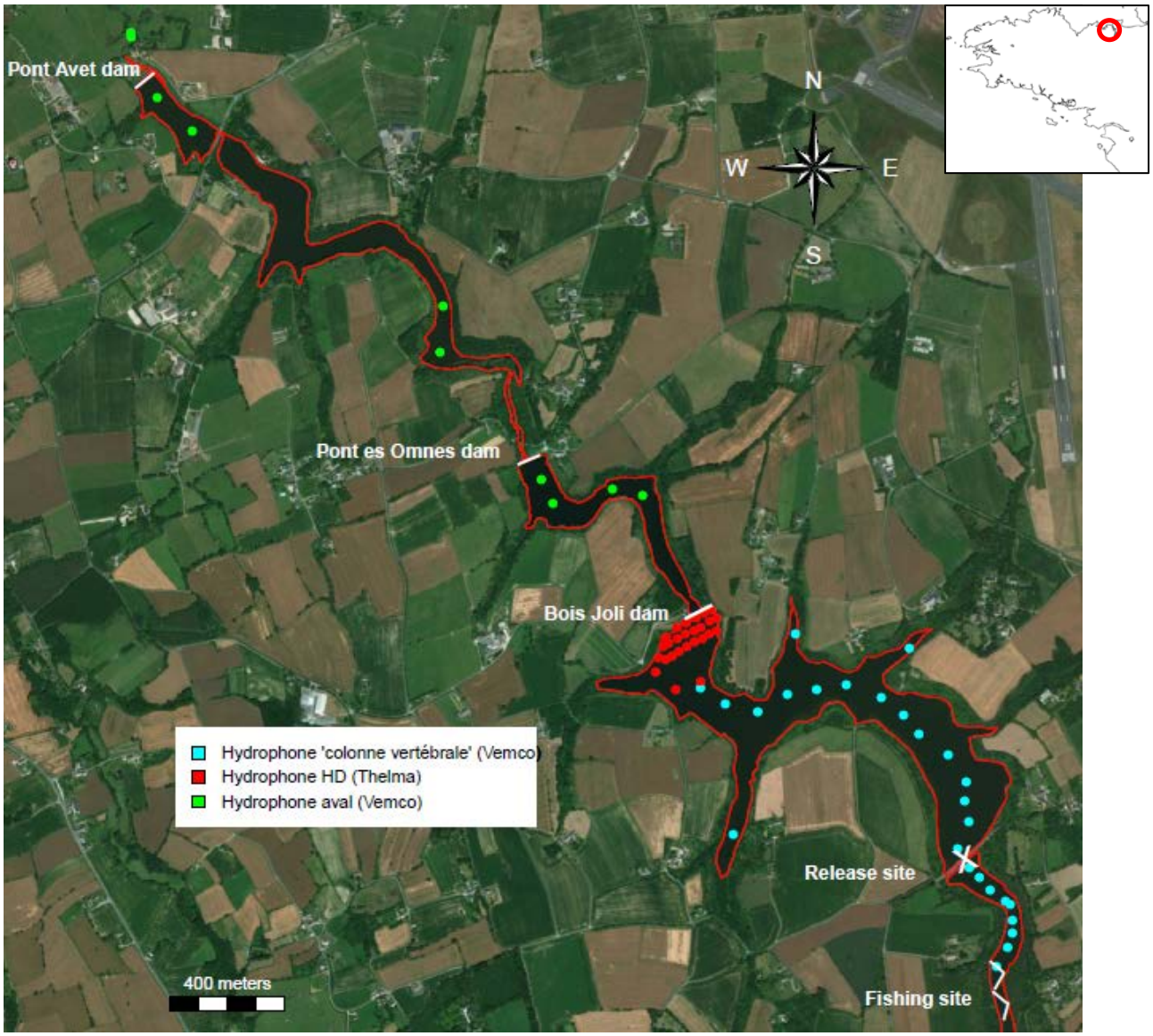


Figure 8 : Réseau complet d'hydrophones mis en place dans le Frémur et localisation de la pêcherie d'anguilles argentées.

2.2.2 L'efficacité du réseau

L'aire de détection (à une probabilité donnée) d'un hydrophone varie en fonction des conditions environnementales. La profondeur, la pluie, le vent, l'activité sur l'eau… sont autant de facteurs qui vont impacter la détection des émissions sonores par les hydrophones. L'hydrophone possède une aire de détection pour une probabilité de détection donnée qui décroit avec la distance au centre en fonction des conditions environnementales (Figure 9). La multiplication des hydrophones permet d'assurer une meilleure couverture de la zone et ainsi de capter un maximum de signaux émis.

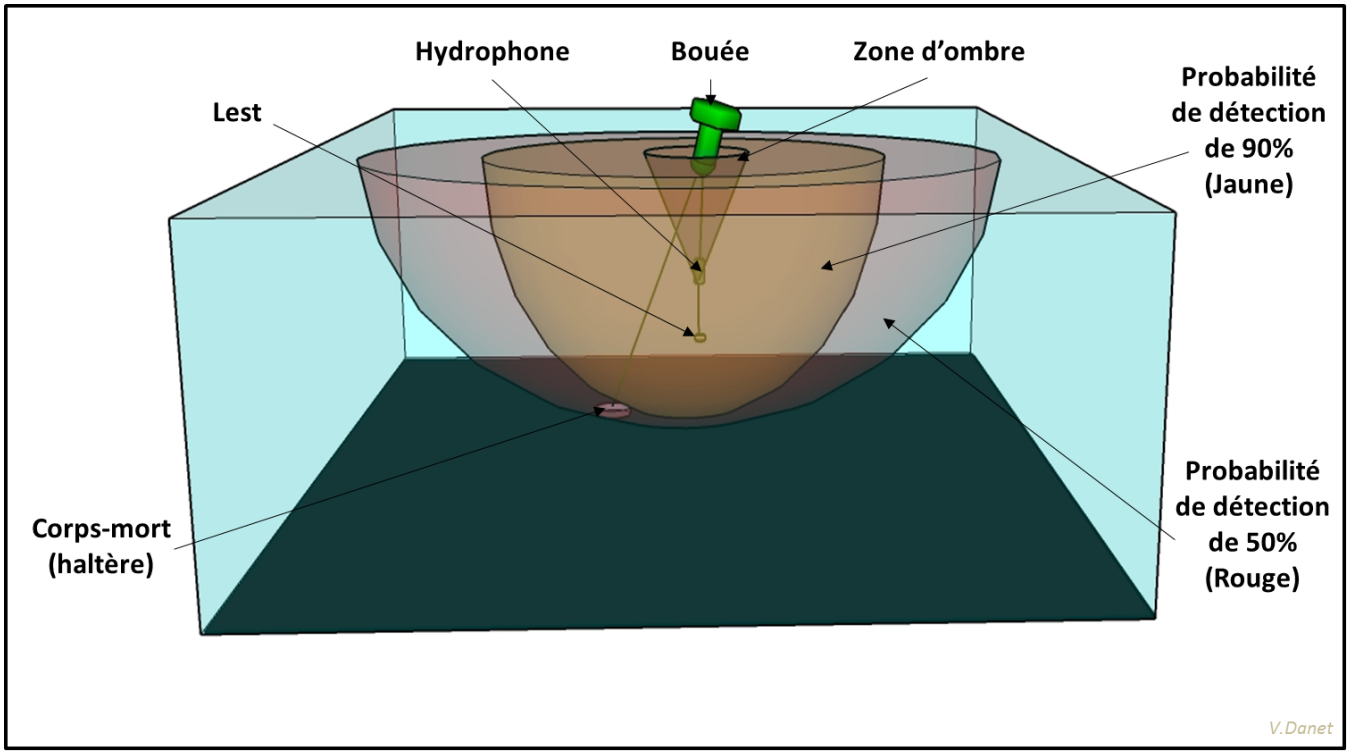


Figure 9 : Représentation schématique de l'aire de détection d'un hydrophone

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 (une émission toute les 10 secondes) pendant 3 minutes à des distances connues et variables de l'hydrophone (de 0 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 (18) permet ainsi de déterminer l'aire de détection maximale de l'hydrophone et les probabilités de détection en fonction de la distance émetteur-hydrophone.

Les tests réalisés dans les retenues de Pont es Omnes et de Pont Avet se sont avérés très concluants. L'analyse des données de détection réalisée *a posteriori* (i.e. après le démantèlement du réseau) a de plus confirmé que toutes les anguilles migrantes marquées ont été détectées en aval du Frémur, au moins jusqu'à la retenue du Pont Avet. En aval du Pont Avet, les tests réalisés ont montré que les hydrophones couvraient 40 mètres du lit de la rivière (90 % de détection) dans des conditions hydrologiques normales. Mais la configuration du site (lit mineur petit et profond avec un lit majeur très étendu) ne permet pas d'assurer une telle efficacité du réseau dans des conditions hydrologiques différentes. L'analyse des données de l'étude ont montré que les hydrophones en aval de Pont Avet n'ont probablement pas été efficaces en période de crue.

Le réseau acoustique complet sur le Frémur est composé d'un total de 62 hydrophones. Ce réseau a été installé le 12 septembre 2017 et retiré dans sa totalité le 14 mars 2018.

2.3 Protocole de marquage

2.3.1 La pêcherie

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

Pour réaliser le suivi acoustique des anguilles argentées, une pêcherie a été mise en place afin d'intercepter les anguilles argentées migrantes produites en amont de la retenue AEP et qui débutent leur migration d'avalaison et phase d'exploration dans la retenue.

Pour cela, 6 verveux composés d'une paradière de 12 m et de deux ailes de 6 m ont été installés en queue de retenue (Figure 8). Ils ont été installés en épi en alternance entre rive gauche et rive droite dans une zone de faible profondeur (moyenne de 1.50 m) permettant de couvrir au maximum le couloir de passage des anguilles argentées dévalantes.

En raison des niveaux d'eau très faibles au cours de l'automne, les verveux ont été déplacés plusieurs fois au cours du suivi afin d'être constamment immergés.

Les verveux ont été en place du 18/09/2017 au 22/01/2018.

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

2.3.2 Biométrie

Lors de chaque relève, toutes les anguilles ont été mesurées et pesées (Figure 10 et Figure 11). La taille a permis de sexer les individus argentés : en effet on considère qu'une anguille argentée de plus de 45 cm est une femelle (DeLeo & Gatto, 1995). Le diamètre des yeux et la taille des nageoires pectorales ont été mesurés afin de déterminer le stade de maturité de chaque anguille (Durif, 2003) et sélectionner les anguilles argentées migrantes. Enfin, l'état de santé externe de chaque anguille argentée a été évalué à l'aide d'une grille de notation conçue par l'ONEMA (2011) à partir des travaux d'Elie et Girard (Girard & Elie, 2007). L'objectif principal étant de capturer des anguilles argentées avec un poids suffisant pour réaliser un marquage acoustique (250 g).

Figure 10 : Mesure du diamètre vertical de l'oeil gauche (V.Danet)

Figure 11 : Mesure de la Longueur pectorale gauche (V.Danet)

2.3.3 Techniques de marquage

2.2.3.1 Le marquage acoustique

Un émetteur acoustique Thelma de type ID9 (Annexe 1) a été implanté dans la cavité générale de chaque anguille argentée femelle de plus de 250 g (limite minimale du poids de l'animal marquée pour ne pas dépasser la limite recommandée des 2 % du poids de l'animal (Winter, 1996)). Un total de 16 anguilles argentées femelles ont été équipées d'un émetteur acoustique au cours de l'étude.

Chaque émetteur acoustique implanté dans la cavité péritonéale par chirurgie (voir Trancart et al. (2017) pour le protocole opératoire) émet un signal sonore (Figure 12), composé de sept impulsions, toutes les 30 à 90 secondes de manière aléatoire. Chaque émetteur possède sa propre signature acoustique, ce qui permet le suivi simultané de plusieurs anguilles.

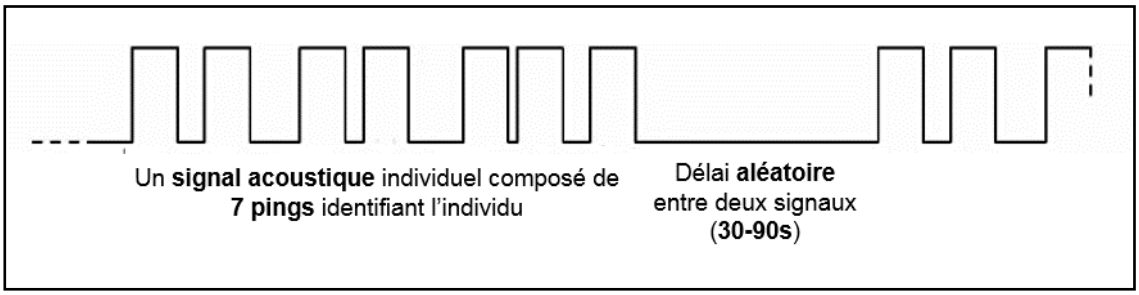


Figure 12 : Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques

La densité élevée du réseau acoustique au droit du barrage du Bois Joli n'a pas permis de relâcher plus de 10 individus marqués en même temps dans la retenue AEP. Un risque élevé de collisions des signaux acoustiques et donc une perte trop importante de données était à craindre. La stratégie a donc été de suivre en temps réel les déplacements et franchissements des anguilles argentées et de s'assurer de ne jamais dépasser ce nombre de 10 individus. Les marquages complémentaires ont donc été réalisés à chaque fois qu'un franchissement du barrage de Bois Joli était constaté par un ou plusieurs individus, et que parallèlement la pêcherie permettait un approvisionnement en anguilles argentées. Pour toutes ces raisons, ce sont 16 anguilles argentées qui ont été marquées au total avec un émetteur acoustique sur l'ensemble de la période d'étude.

Aucun test post-opératoire n'a été réalisé cette année. Le nombre d'anguilles argentées femelles capturées par la pêcherie avant la surverse était en effet insuffisant.

Cependant lors d'une précédente étude menée en 2015 sur le lac de Grand Lieu, un test post-opératoire conduit avec l'eau du Frémur sur 10 anguilles argentées pendant 12 semaines a montré que le marquage réalisé sur les anguilles n'affectait pas leur survie (Mazel et al., 2018).

2.2.3.2 Le marquage par PIT-tags

Le PIT (Passive Integrated Transponder, Figure 13)-tag est une petite marque magnétique qui possède un code alphanumérique unique permettant l'identification de chaque animal marqué. Ils ne possèdent pas de batterie, ce qui leur confère une durée de vie quasi illimitée (e.g., une anguille marquée a été recapturée 16 ans plus tard dans le Frémur ; Charrier et *al*., 2010) et une longueur réduite (12 mm). 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 marquage individuel est qu'il présente, entre autre, une durée de vie illimitée contrairement aux marques acoustiques.

Toutes les anguilles capturées (marquées à l'acoustique ou non) ont été marquées avec un PIT-tag. Ce double marquage, acoustique et PIT-tag, permet un contrôle supplémentaire des anguilles marquées au niveau des points de passage du suivi Frémur (au niveau du barrage du Bois Joli : filtre de la station de pompage et filet du débit réservé ; piège de dévalaison du Pont es Omnes) mais également un suivi potentiel de plusieurs années pour les anguilles marquées en acoustique lorsque les émetteurs acoustiques ne seront plus fonctionnels.

Figure 13 : PIT TAG 12 mm et injection dans une anguille (FISH PASS)

2.3.4 La relâche

Toutes les anguilles capturées ont été relâchées en aval de la pêcherie, pour limiter la recapture et ainsi améliorer la survie des anguilles marquées (Figure 8).

2.4 Analyse des données de détection

2.4.1 Dispositif basse définition

Le réseau basse définition d'hydrophone a enregistré au total 1 517 924 détections au cours des 6 mois de mise en place. La première étape commune à toutes les analyses réalisées a été la reconstruction des trajectoires *a posteriori* à partir de ces détections.

2.4.1.1 La colonne vertébrale

Les données collectées par les hydrophones sont des données discrètes : pour chaque hydrophone, on obtient la date et l'heure de chaque détection pour chaque anguille. Les données ont été obtenues après la relève des données des hydrophones (12/04/2018).

Ensuite, la trajectoire de chaque anguille argentée de l'étude a été reconstruite selon la méthode suivante à l'aide du logiciel R (R Developpement Core Team, 2005) : chaque anguille marquée a été positionnée dans l'espace toutes les 10 minutes en moyennant la position des hydrophones l'ayant détecté pendant ce laps de temps. Les positions de chaque émetteur sont pondérées par le nombre de fois où chaque hydrophone a détecté le signal émis par l'anguille (Figure 14). En effet, on part de l'hypothèse que plus une anguille est proche d'un hydrophone, plus les signaux émis par son émetteur sont détectés un grand nombre de fois par celui-ci pendant un laps de temps donné.

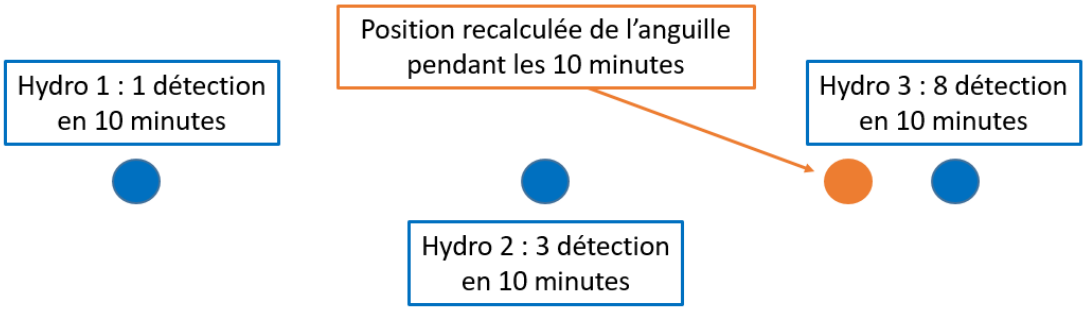


Figure 14 : Illustration de la première étape de reconstruction des trajectoires

En l'absence de détection sur ce pas de temps de 10 minutes, une interpolation des positions a été réalisée. La position est interpolée par régression linéaire grâce à ses positions recalculées (Figure 15). La régression linéaire est la méthode la plus précise comparativement à d'autres méthodes proposées et testées par Hedger (2008). Les tests réalisés sur les données acoustiques EDAAGL (Echappement des Anguilles Argentées du Lac de Grand Lieu ; Mazel et al., 2018) vont dans le même sens.

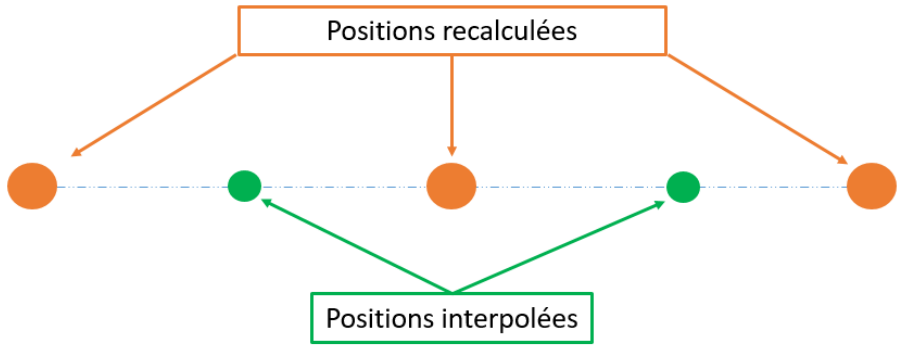


Figure 15 : Illustration de la deuxième étape de la reconstruction des trajectoires

Ainsi, la position est connue toute les 10 minutes pour chaque anguille marquée.

2.4.1.2 L'aval de la retenue AEP

Le réseau mis en place à l'aval de la réserve de Bois Joli permet de détecter le passage ou non des anguilles marquées au droit des ouvrages du Pont es Omnes et du Pont Avet. Pour ce réseau, la donnée directement extraite des hydrophones permet de valider le franchissement ou non des anguilles. Ce sont alors des données de présence/ absence au cours du temps qui permettent de définir directement le franchissement ou non de chaque ouvrage.

De plus, il permet de connaître le temps de résidence passé par chaque anguille dans les retenues du Pont es Omnes et du Pont Avet. Tant qu'une anguille n'est pas entendue au niveau des hydrophones aval d'un ouvrage, cela signifie qu'elle est toujours dans la retenue amont de l'ouvrage. L'écart entre la date et l'heure de la première et la dernière détection dans la retenue nous donne le temps de résidence.

2.4.2 Dispositif haute définition au droit du barrage de Bois Joli

2.4.2.1 Calcul de la position des détections dans le réservoir

2.4.2.1.1 Détermination de la position x, y

Un total de 5 370 000 détections a été enregistré sur les 26 hydrophones du réseau de haute définition.

Les positions x, y (i.e. latitude et longitude respectivement) des anguilles ont été calculées grâce à la méthode de la différence temporelle d'arrivée (**T**ime **D**ifference **O**f **A**rrival) (ex : Gustafsson et al., 2003).

La position de l'émetteur acoustique a été calculée à partir des différences dans les temps d'arrivée d'un même signal acoustique aux différents hydrophones composants le réseau HD.

L'heure de réception de la séquence sonore de l'émetteur dépend de l'horloge interne de chaque récepteur acoustique, basée sur des oscillateurs à cristal. La fréquence de ces oscillateurs varie légèrement d'un récepteur à l'autre, induisant une dérive temporelle spécifique à chaque récepteur. Par conséquent, la précision de la localisation d'un émetteur acoustique dépend à la fois de la précision de l'heure de réception du signal par les récepteurs (à la milliseconde près) et de la précision de la localisation des hydrophones eux-mêmes (au centimètre près). Cela nécessite une synchronisation très précise des différents récepteurs (à la milliseconde près) et une localisation très précise de leur emplacement (au centimètre près). La synchronisation est assurée grâce aux 3 tags de synchronisation positionnés dans le réseau HD en amont du barrage. Le positionnement des hydrophones au millimètre près est connu grâce au théodolite.

La méthode utilisée dans la présente étude comporte trois étapes: (1) la synchronisation de la base de données et l'élimination de la dérive temporelle, (2) la multilatération et (3) le filtrage des résultats aberrants (si nécessaire). Tous les traitements (synchronisation, multilatération et filtrage) ont été effectués à l'aide du logiciel R 3.5.0 (R Development Core Team, 2008). Les détails complets des méthodes sont disponibles dans l'annexe 1.

2.4.2.1.2 Détermination de la position z (profondeur)

Pour déterminer le positionnement vertical (la profondeur), le capteur de pression interne des émetteurs de profondeur acoustiques Thelma Biotel (D-LP9) a été utilisé. Des essais préliminaires dans un bassin artificiel (10 x 10 x 10 m) ont montré la précision parfaite (avec une résolution de 10 cm) de ces capteurs, pour trois profondeurs d'essai (2, 5 et 8 m) sur une période de 7 jours.

2.4.2.1.3 Validation de la détermination de la position x, y et z

Afin de valider la méthode présentée, deux émetteurs tests ont été placées à des positions X-Y-Z connues (au cm près) dans la retenue du Bois Joli, avec un intervalle moyen de 10 minutes entre deux signaux successifs tout au long de la période d'étude. L'écart (en mètres) entre la position réelle de ces émetteurs et leurs positions estimées a été calculée afin d'évaluer la précision de la méthode

2.4.2.2 Estimation des voies de migration empruntées par les anguilles migrantes pour franchir le barrage de Bois Joli

L'objectif est d'estimer les voies de passage les plus probables empruntées par les anguilles argentées en utilisant les données de localisation des individus marqués. Pour chaque anguille, les dix dernières positions estimées ont été retenues afin de déterminer l'itinéraire et la voie de franchissement (une des 6 crêtes surversantes ou une des 5 prises d'eau amont) les plus probables

utilisés lors du franchissement du barrage de Bois Joli. L'itinéraire de sortie le plus probable n'a été attribué à un individu donné que si les emplacements finaux estimés et la direction convergeaient clairement. Dans le cas contraire, l'itinéraire de sortie n'a pas été attribué.

En complément, les suivis de captures réalisés au niveau du débit réservé, du filtre de la station de pompage ont permis pour valider ou non les voies de franchissement.

2.4.2.2.1 Efficacité de franchissement

Afin d'évaluer l'efficacité de chaque anguille à franchir le barrage, quatre métriques ont été calculées pour chaque anguille :

- La durée du franchissement total (en jours) a été définie comme étant la différence de temps entre la première détection au droit du barrage (<10 m) une fois l'anguille relâchée et le franchissement réel observé sur le récepteur en aval du barrage.
- Le nombre total de détections à proximité du barrage (<10 m).
- Le nombre total de détections à proximité du barrage (<10 m) par jour.
- La durée par jour des détections à proximité du barrage (<10m).

Ces métriques vont permettre de définir la rapidité et l'efficacité de l'échappement mais également la persistance du comportement de dévalaison des anguilles.

2.4.2.2.2 Tactiques d'exploration

Afin de mettre en évidence différentes tactiques d'exploration, une autre métrique a été utilisée:

- Périodes de présence à proximité du barrage, définies comme la période de la journée au cours de laquelle une anguille a été observée au pied du barrage (<10 m). Cinq périodes ont été définies en fonction de la luminosité naturelle sur le site de l'étude au cours de l'expérience : début de la nuit (17h00 - 21h00), en pleine nuit (22h00 - 02h00), la fin de la nuit (03h00 - 07h00), le début de la journée (08h00 - 12h00) et la fin de la journée (13h00 - 16h00).

Enfin, pour caractériser l'exploration spatiale devant le barrage du Bois Joli, les positions individuelles ont été représentées selon deux points de vue différents :

- Vue du ciel, un raster (30 cellules x 20 cellules, résolution = 0,1 cellule / m en x et 0,3 cellule / m en y) a été utilisé. La valeur de chaque cellule correspond au nombre de détections observées dans cette cellule. Pour améliorer la lisibilité, les pourcentages ont ensuite été calculés.

- Vue de face, un raster (30 cellules x 15 cellules, résolution = 0,1 cellule / m en x et 1 cellule / m en y) a été utilisé. Les positions des anguilles ont été projetées selon une projection orthogonale. La valeur de chaque cellule correspond au nombre de détections observées dans cette cellule. Pour améliorer la lisibilité, les pourcentages ont ensuite été calculés.

2.4.3 Données environnementales

2.4.3.1 Les données météorologiques

De nombreuses données météorologiques ont été collectées afin de mieux comprendre le comportement des anguilles argentées : hauteur cumulée des précipitations, température moyenne, pression atmosphérique moyenne en mer, vitesse et orientation du vent. Ces variables météorologiques (1 donnée /jour) ont été fournies par la Station Météo-France de Pleurtuit située à moins de 2 kilomètres du barrage du Bois joli.

2.4.3.2 Les niveaux d'eau

Le niveau d'eau de la retenue de Bois Joli a été mesurée toutes les heures grâce à une sonde de niveau d'eau installée sur le barrage. Le niveau d'eau à l'aval du barrage a également été mesurée grâce à une échelle limnimétrique située au barrage du Pont es Omnes. Le niveau du plan d'eau de Pont Avet a été mesurée grâce à une échelle limnimétrique également.

2.4.3.3 La bathymétrie

La bathymétrie de la zone de haute définition a été réalisée point par point à l'aide d'un échosondeur avant la mise en place du réseau d'hydrophones. Ensuite une interpolation des points a été réalisée sur l'ensemble de la zone pour obtenir la Figure 16. Les profondeurs relevées sont basées sur la côte de surverse du barrage (28.20 m côte NGF).

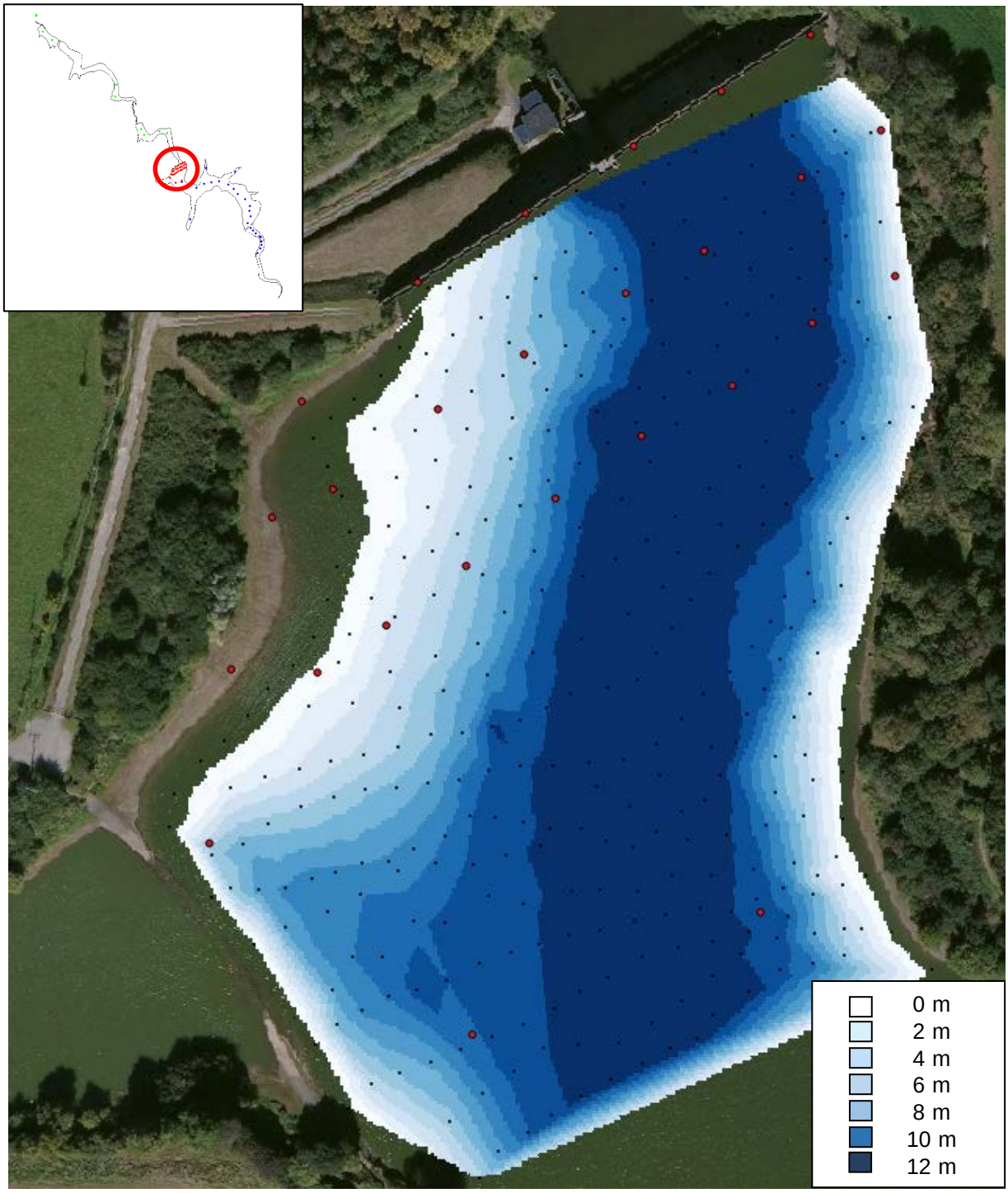


Figure 16 : Bathymétrie de la zone de Haute Définition (point noir = point bathymétrique, point rouge = hydrophone Thelma) de la retenue AEP de Bois Joli.

2.4.3.4 La température de l'eau

Les hydrophones Thelma étant munis d'un capteur de température, la température de l'eau a été mesurée toutes les heures au niveau de la zone de haute définition située au droit du barrage de Bois Joli.

2.4.4 Test des facteurs environnementaux déclencheurs de la migration

La retenue du Bois Joli est une zone lentique dans laquelle les variations d'intensité du courant sont moins rapides et de moindre ampleur que dans une rivière sans ouvrage. Les facteurs déclencheurs de la migration au sein de la retenue sont donc probablement différents de ceux connus dans les milieux ouverts où l'élévation du niveau et l'intensité du courant (la crue) sont les facteurs déclencheurs de la migration (Trancart et al., 2013).

Pour mettre en évidence les facteurs déclenchant la migration en amont de la retenue AEP des anguilles argentées, nous avons considéré que la migration était initiée lorsque les anguilles avaient atteint le barrage de Bois-Joli. L'analyse est donc portée au sein de la retenue sur les relations entre les données environnementales (Température (°C) de l'air et de l'eau, Pression atmosphérique (hPa), Direction du vent (°), Force du vent (Nd), Pluviométrie (mm/h), Niveau d'eau (cm)) et la présence d'anguilles argentées au droit du barrage de Bois-Joli, analysée à l'aide d'arbres de régression, Boosted Regression Tries (BRT) (Elith et al., 2006; Elith, Leathwick, & Hastie , 2008; Buston et Elith, 2011). Pour la modélisation, les facteurs environnementaux considérés sont ceux qui se sont produits depuis le moment de la relâche jusqu'à la première détection devant le barrage.

Les BRTs combinent deux algorithmes : des arbres de régressions (qui identifient les facteurs prédictifs par des divisions binaires récursives successives) et du boosting (combinaisons de plusieurs modèles simples pour améliorer les performances prédictives). Afin d'évaluer les modèles sélectionnés, les indices AUC (Area Under Curve) sont utilisés. Un indice AUC va de 0 à 1, la note de 1 équivaut à une discrimination parfaite, un score de 0.5 indique une discrimination équivalente à un tirage aléatoire et une valeur < 0.5 indique des performances moins bonnes qu'un tirage aléatoire.

3 Résultats

3.1 Suivi de la pêcherie et biométrie

3.1.1 Suivi de la pêcherie

Le suivi de la pêcherie a débuté le 18/09/2017 et s'est achevé le 22/01/2018, il a donc été opérationnel pendant près de 4 mois. Durant cette période, 34 relèves des verveux ont été effectuées permettant la capture d'un total de 476 anguilles. Parmi elles, seulement 39 (8%) anguilles ont été caractérisées au stade argenté selon la méthode de Durif et al. (2005).

La Figure 17 représente le nombre d'anguilles capturées, dont le nombre d'anguilles argentées capturées en fonction de la pluviométrie journalière cumulée.

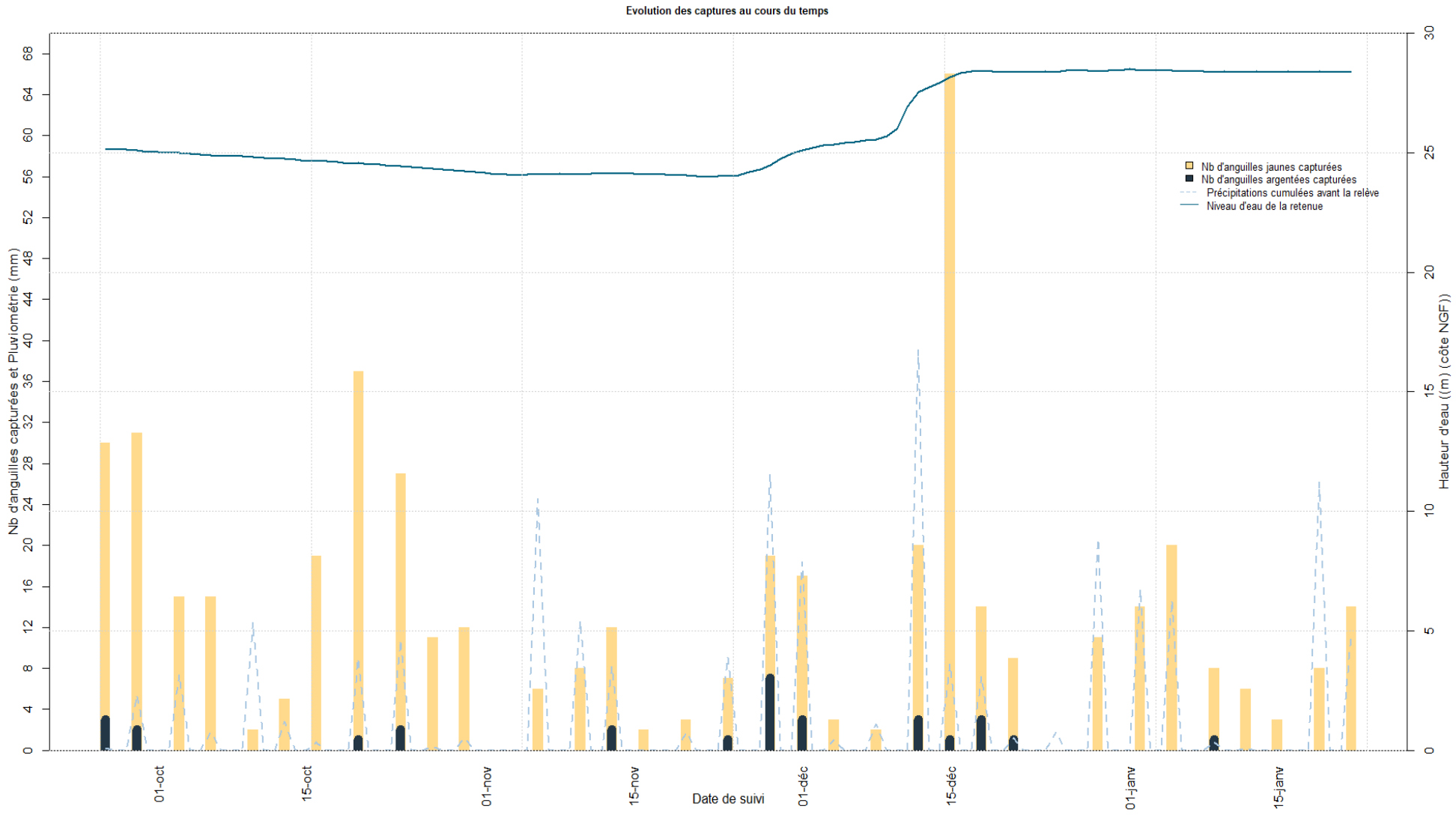


Figure 17 : Evolution du nombre d'anguilles capturées aux verveux en fonction de la pluviométrie et du niveau d'eau de la retenue AEP

Il n'y a pas de réel lien entre la pluviométrie, l'élévation du niveau d'eau et les captures d'anguilles. Le plus gros pic de captures à tout de même lieu lorsque le niveau d'eau de la retenue AEP atteint la côte de surverse. Les fortes précipitations ont engendré une forte arrivé d'eau dans la retenue et donc une élévation importante. Cette forte arrivée d'eau dans la retenue a été accompagnée d'une grande mobilité des anguilles et donc d'un pic important de capture dans les verveux.

3.1.2 Caractéristiques des individus marqués

Lors de cette étude, seulement 16 anguilles argentées femelles ont été marquées avec un émetteur acoustique (Tableau 1). Quatorze d'entre elles sont considérées comme migrante (FIV et FV) grâce à la méthode de Durif et al. (2005) contre deux pré-migrantes (FIII).

Tableau 1 : Stade de maturité des anguilles argentées marquées en acoustique (méthode de Durif et al., 2005) et mesure des variables morphologiques : longueur totale (LT), poids (Pd), diamètre oculaire moyen (DO) et longueur pectorale moyenne (LP). Moyennes et erreur standard.

Sexe	Stade	Degré d'argenture	n	LT (mm)	Pd (g)	DO (mm)	LP (mm)
Femelle	Pré-migrante	FIII	2	656 ± 169	496 ± 272	7.8 ± 1.3	32.8 ± 4.6
	Migrante	FIV	2	913 ± 86	1381 ± 190	10.1 ± 2.2	48 ± 2.8
	Migrante	FV	12	622 ± 74	442 ± 164	8.8 ± 0.82	34.3 ± 5.2
	Total		16	663 ± 127	566 ± 358	8.8 ± 1.1	35.8 ± 6.7

3.1.3 La recapture des individus marqués dans les pièges de dévalaison

3.1.3.1 Le suivi du filtre de la station de pompage

Un total de 53 anguilles a été capturées dans le filtre de la station de pompage. Parmi elles, 52 anguilles étaient argentées (dont trois mortes) et une seule anguille marquée en acoustique dans la retenue AEP a été recapturée. Elle était vivante au moment de la capture et a donc été relâchée dans la retenue du Pont es Omnes. Cette anguille n'a pas été capturée par le piège de dévalaison mais a été entendue sur tous les hydrophones de la retenue de Pont es Omnes et de Pont Avet, et a donc survécu au franchissement du barrage de Bois Joli par la conduite de la station de pompage.

3.1.3.2 Le suivi du débit réservé

Le suivi du débit réservé a permis la capture d'un total de 60 anguilles. La plupart (57) étaient des anguilles argentées dont 18 étaient mortes. Deux anguilles marquées en acoustique ont été capturées. L'une d'entre elle était vivante mais présentait de nombreuses hémorragies et éraflures au moment de sa capture. Elle a été relâchée dans la retenue du Pont es Omnes mais elle n'a plus jamais été détectée ensuite. Elle est très probablement morte suite au passage par le débit réservé. L'autre était morte et en présentait de nombreuses hémorragies et contusions au moment de sa capture. Aucune anguille marquée n'a survécu au franchissement du barrage en ayant emprunté la conduite du débit réservé.

3.1.3.3 Le suivi du piège de dévalaison du Pont es Omnes

Au 27/02/2018, un total de 403 individus a été capturé dans le piège (379 anguilles argentées dont 75 mortes), dont sept anguilles marquées avec seulement un PIT tag et sept autres étaient munis d'un émetteur acoustique.

Onze anguilles marquées en acoustique ont été entendues par les hydrophones situés dans la retenue de Pont Avet alors que seulement sept anguilles marquées en acoustiques ont été retrouvées dans le piège de dévalaison. Le taux de capture dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes a alors été de 64 % (7/11) lors de cette saison de dévalaison.

Trois anguilles argentées marquées en acoustique ont été retrouvées mortes dans le piège de dévalaison et n'ont donc pas survécu au cumul du franchissement du barrage de Bois Joli par surverse puis la capture dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes.

Trois voies de passage sont utilisées pour franchir le barrage de Bois Joli, la station de pompage (15 %), le débit réservé (8 %) et la surverse (77 %)

3.2 Quantification de l'échappement

3.2.1 L'échappement de la retenue AEP du Bois Joli

Au moment du retrait des hydrophones (12/04/2018), sur les 16 anguilles marquées, 13 ont franchi le barrage de Bois Joli. Une majorité d'anguilles (10/13 = 77%) a franchi le barrage par surverse, une (7%) est passée par la conduite de la station de pompage et deux autres (15%) par la voie du débit réservé. Elles ont toutes franchi le barrage après le début de la surverse. Trois anguilles sont restées bloquées dans la retenue AEP du Bois Joli.

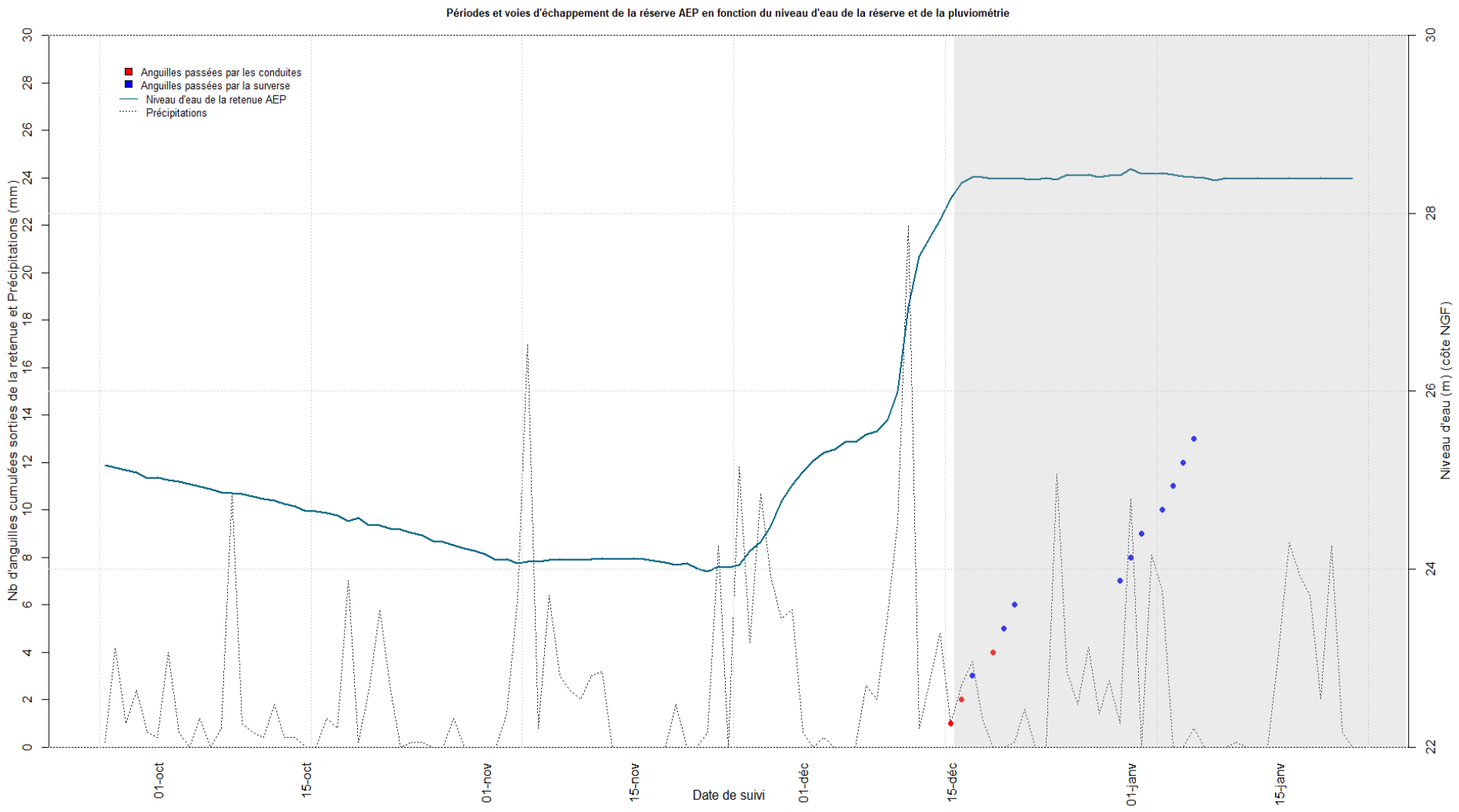


Figure 18 : Périodes et voies d'échappement de la réserve AEP en fonction du niveau d'eau de la réserve et de la pluviométrie (Gris = période de surverse)

Le taux d'échappement de la retenue AEP lors du suivi est de 81 % (13/16)

3.2.2 L'échappement de l'ensemble du réseau

En aval du barrage de Bois Joli, le réseau d'hydrophones permet de détecter les anguilles qui arrivent en amont et en aval de chaque ouvrage et ce jusqu'à l'aval du dernier ouvrage du Frémur.

- Echappement au niveau du barrage de Pont es Omnes

Sur les 13 anguilles ayant franchis le barrage de Bois Joli, seulement 11 se sont présentées devant le barrage de Pont es Omnes. Les deux autres anguilles n'ayant pas survécu au passage dans la conduite du débit réservé.

Sur les 11 qui se sont présentées devant le barrage du Pont es Omnes, sept d'entre elles ont été capturées dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes. Parmi elles, trois étaient mortes et présentaient de nombreuses hémorragies faciales et corporelles ainsi que de nombreuses éraflures, et les quatre autres ont été relâchées vivantes en aval du barrage de Pont es Omnes.

Quatre anguilles sur les 11 ont été entendues par les hydrophones en aval du barrage de Pont es Omnes et ont donc franchi le barrage sans être capturée par le piège de dévalaison.

Au total seulement huit anguilles sur les 16 individus marqués initialement (soit 50%) ont franchi le barrage de Pont es Omnes vivantes.

- Echappement au niveau du barrage de Pont Avet

Sur ces huit anguilles, seulement six ont atteint l'amont du barrage de Pont Avet. Les deux autres n'ont jamais atteint le barrage de Pont Avet au cours du suivi (arrêt de la migration, mortalité, prédation, perte d'émetteurs…).

Sur les six anguilles qui se sont présentées devant le barrage de Pont Avet, aucune anguille n'a été détectée en aval. Au vu des détections des hydrophones aval, aucune anguille n'est donc sortie du Frémur. Cependant, les dernières détections très proches du barrage de Pont Avet et une disparition des détections la nuit montre que cinq d'entre elles ont potentiellement franchis le barrage de Pont Avet sans être détectées en aval du barrage. En effet, un suivi actif au sein de la retenue de Pont Avet n'a révélé la présence d'aucune de ces cinq anguilles (Figure 19).

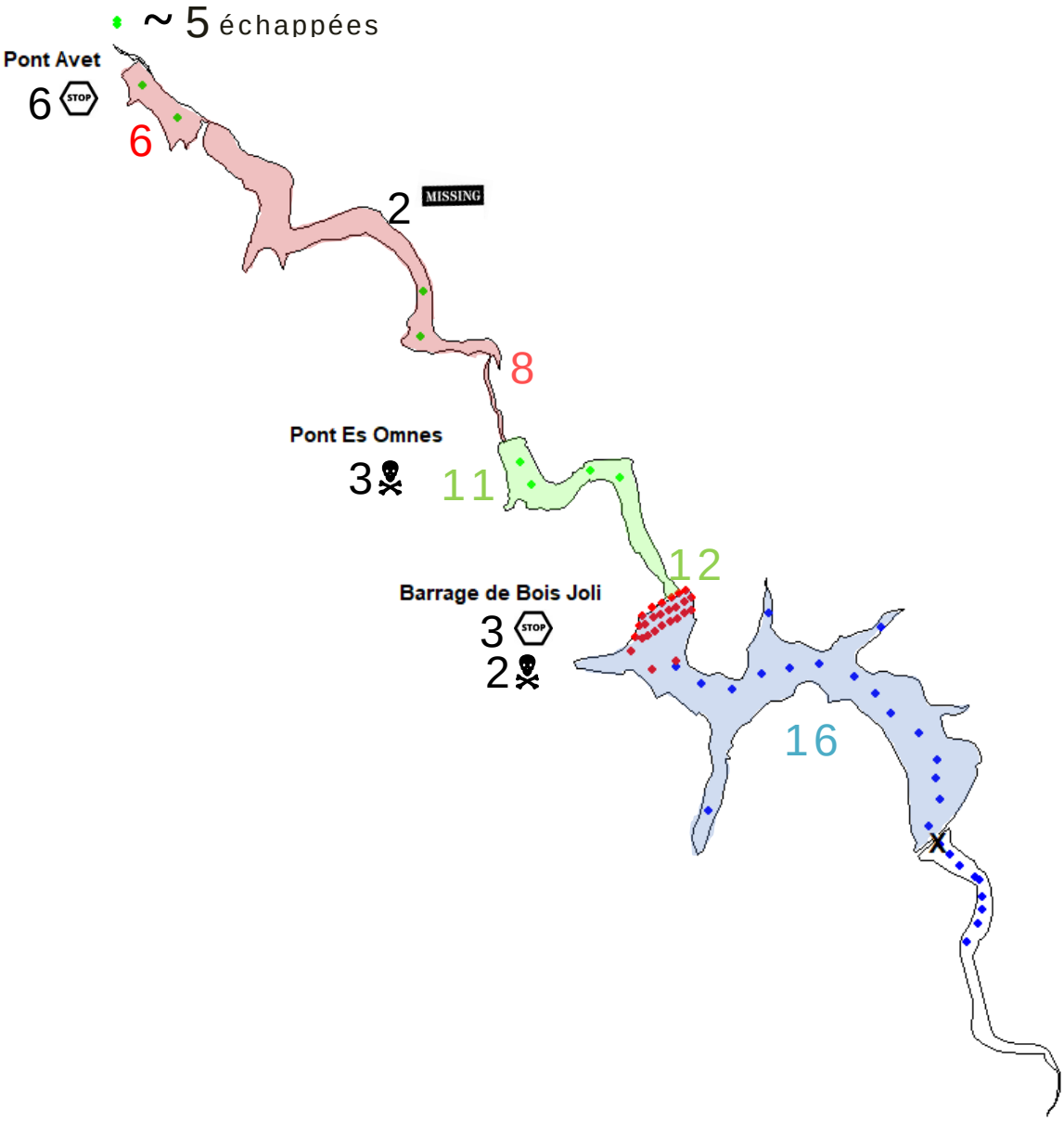


Figure 19 : Schéma bilan du suivi de l'échappement des anguilles argentées marquées sur l'ensemble du réseau

Au final, nous avons une perte en ligne au niveau de chaque ouvrage, 81 % (13/16) d'échappement de la réserve AEP, puis 50 % (8/16) du bassin de Pont es Omnes pour finir à 31 % (5/16) d'échappement du bassin de Pont Avet.

Le taux d'échappement des anguilles argentées du Frémur est au maximum de 31 %

3.3 Les comportements au sein de la retenue

La reconstruction des trajectoires de chaque individu en continu dans le temps (pas de temps de 10 minutes) a permis d'obtenir plusieurs métriques précises :

- Distances parcourues (par heure et par jour)
- Vitesses de déplacements
- Périodes de déplacements
- Gamme de profondeur prospectée
- Tentatives de franchissement (nombre, durée, fréquence)
- Réussite ou échec de franchissement
- Zones exploitées

3.3.1 Les facteurs déclencheurs de migration

Le modèle sélectionné n'utilisait que quatre variables: le niveau d'eau, l'augmentation du niveau de l'eau sur 12h, la direction du vent et la pression atmosphérique. Aucune des autres variables, comme la pluviométrie, n'a été sélectionnée. Ce modèle final avait une déviance expliquée par validation croisée de 55,58 % et une AUC de 0,95, ce qui peut être considéré comme un très bon score.

Les influences relatives étaient respectivement de 41,8%, 20,4%, 19,3% et 18,5% pour le niveau de l'eau, l'augmentation du niveau de l'eau sur 12h, la direction du vent et la pression atmosphérique (Figure 20).

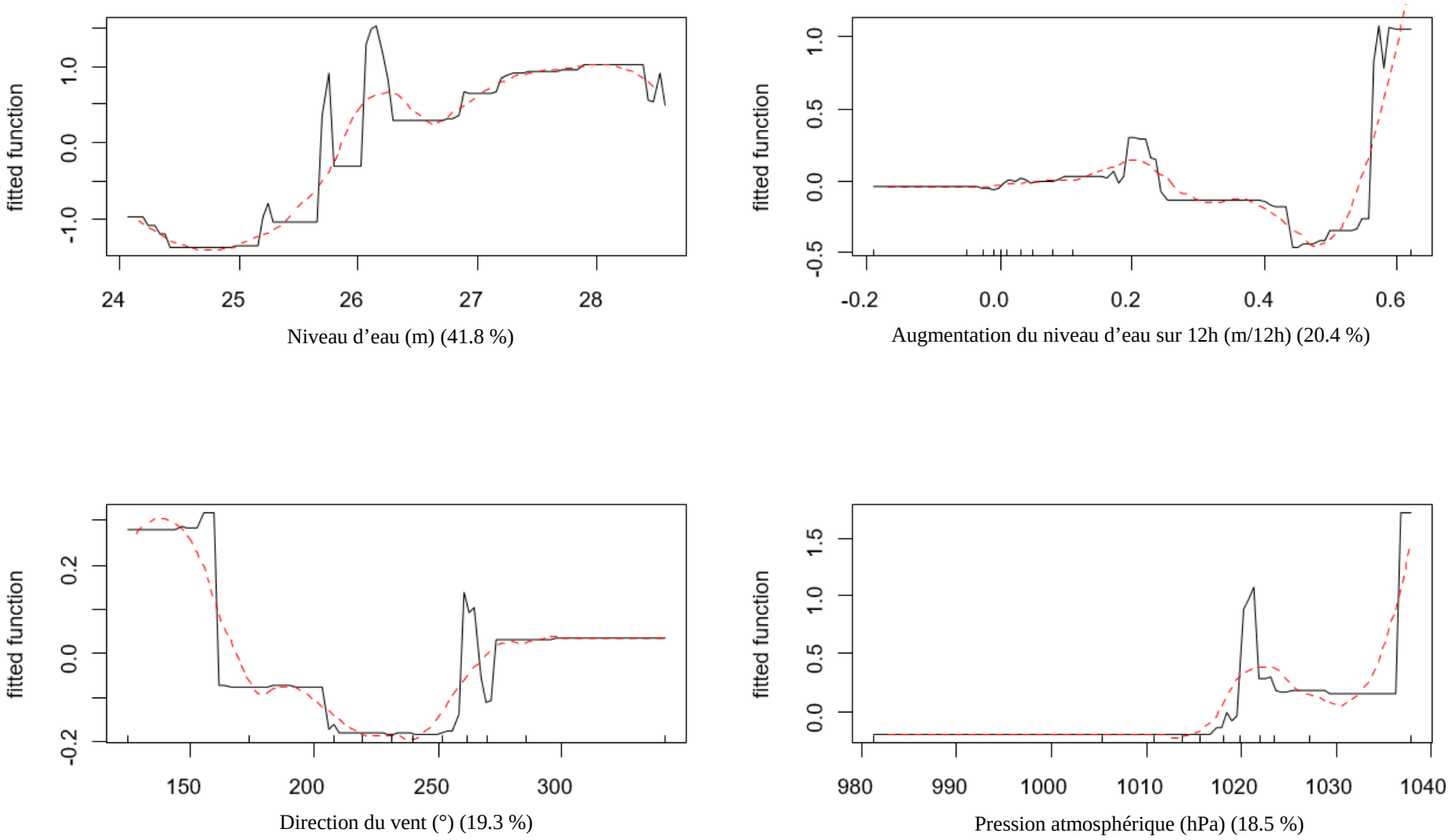


Figure 20 : Résultats du modèle BRT (facteurs déclencheurs de la migration) (Trancart et al ; 2019)

Le niveau d'eau a eu l'effet le plus important, avec un seuil abrupt autour de 25,7 m. En dessous de cette valeur, la présence devant le barrage, puis la migration en aval a été fortement réprimée. Le deuxième facteur le plus important a été l'augmentation du niveau de l'eau pendant 12 heures, avec à nouveau un seuil fort, autour de 0,5 m / 12h, qui a fortement favorisé la migration de l'anguille argentée. La direction du vent était le troisième facteur qui influait sur la migration de l'anguille argentée, avec un effet positif lorsque le vent soufflait de 125 à 170 ° (d'est-sud-est à sud-sud-ouest). Enfin, seules les pressions atmosphériques élevées (>1020 hPa) ont favorisé la migration.

L'élévation du niveau d'eau de la réserve AEP est le facteur déclencheur principal favorisant la migration d'avalaison des anguilles argentées situé en amont de la réserve AEP de Bois Joli

3.3.2 Effet bloquant du barrage

L'effet bloquant du barrage est directement visible avec trois individus sur 16 qui n'ont pas réussi à franchir le barrage de Bois Joli avant le 14/03/2018, soit 19 % des anguilles bloquées. Mais il existe également des impacts moins visibles mais non négligeables sur les individus :

- **La distance supplémentaire parcourue** : la différence de distance parcourue entre la première présentation devant le barrage et le passage effectif est en moyenne de 39.7 km supplémentaire (9.7 – 77.2 km)
- **Le temps de résidence supplémentaire :** la différence temporelle entre la première présentation devant le barrage et le passage effectif est en moyenne de 21.3 jours (4.3 – 65.9 j)

Les conséquences de ce blocage de la migration des anguilles argentées sont une hausse de la dépense énergétique, une distance supplémentaire parcourue et un retard de la migration. Sous nos latitudes, la migration des anguilles argentées en milieu ouvert est centrée entre Octobre et Novembre (Acou et al., 2008, 2000 ; Boubee et al., 2001; Burnet, 1969; Durif et al., 2003; Haro, 2003; Okamura et al., 2002 Trancart et al., 2013). L'effet retard du barrage sur la migration des anguilles argentées peut donc être considérable.

3.3.3 Effet évolutif

L'effet bloquant du barrage n'entraine-t-il pas à long terme une modification du phénotype comportementale de la population d'anguille produite au sein de l'AEP ?

La Figure 21 montre l'efficacité des anguilles pour franchir le barrage de Bois Joli, en utilisant la durée de la tentative comme métrique (la différence de temps entre la première présentation de l'anguille au pied du barrage **pendant la surverse** et son passage effectif en aval).

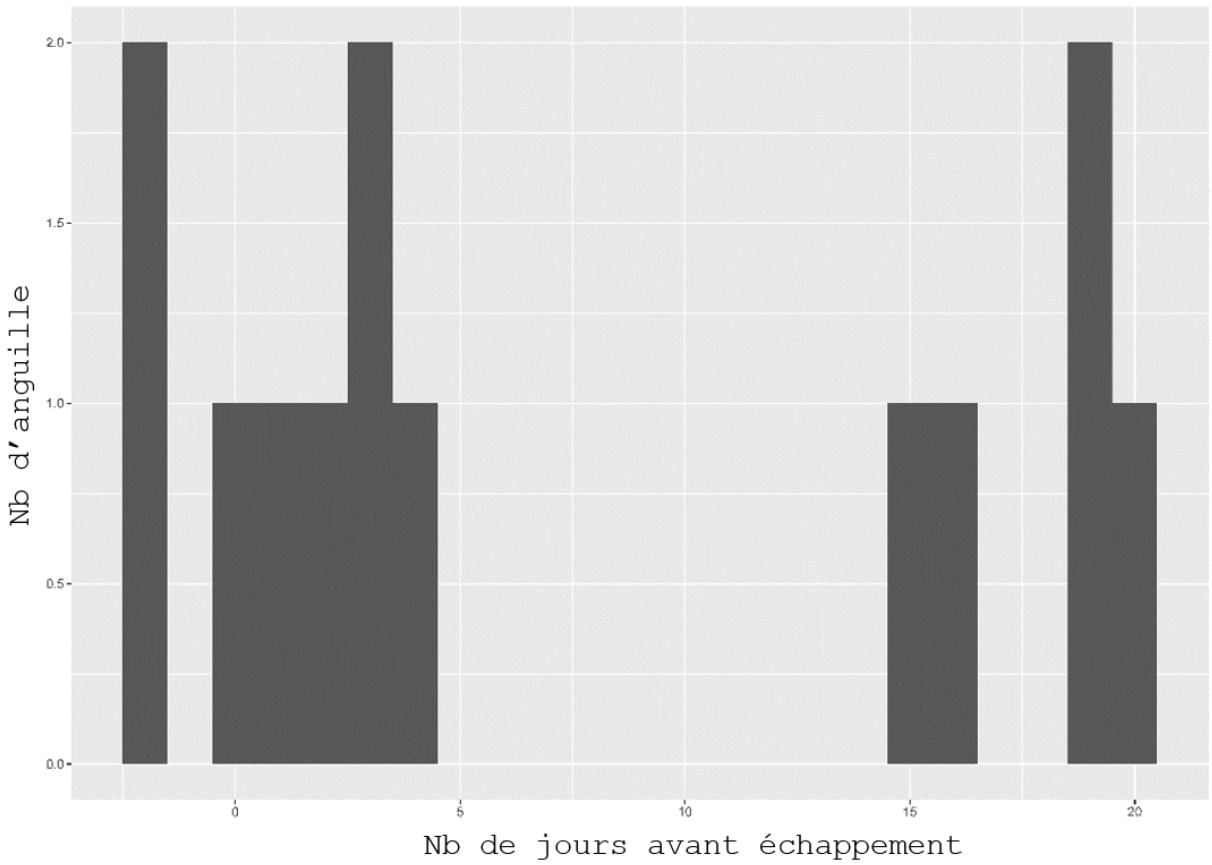


Figure 21 : Efficacité de franchissement du barrage de Bois Joli par les anguilles marquées (count = nb d'anguilles ; temps_pr_sortir = nb de jours avant le franchissement) (Trancart et al ; 2019)

Deux groupes distincts ressortent de ce graphique. On retrouve un groupe de 8 anguilles qui a réussi à franchir le barrage de Bois Joli en moins de 5 jours, les « rapides », et un second groupe de 5 anguilles qui ont mis entre 14 et 21 jours avant de franchir le barrage, les « lentes ». Un troisième groupe non représenté sur ce graphique représente les 3 anguilles qui n'ont pas réussi à franchir le barrage et sont donc dites « perdantes ».

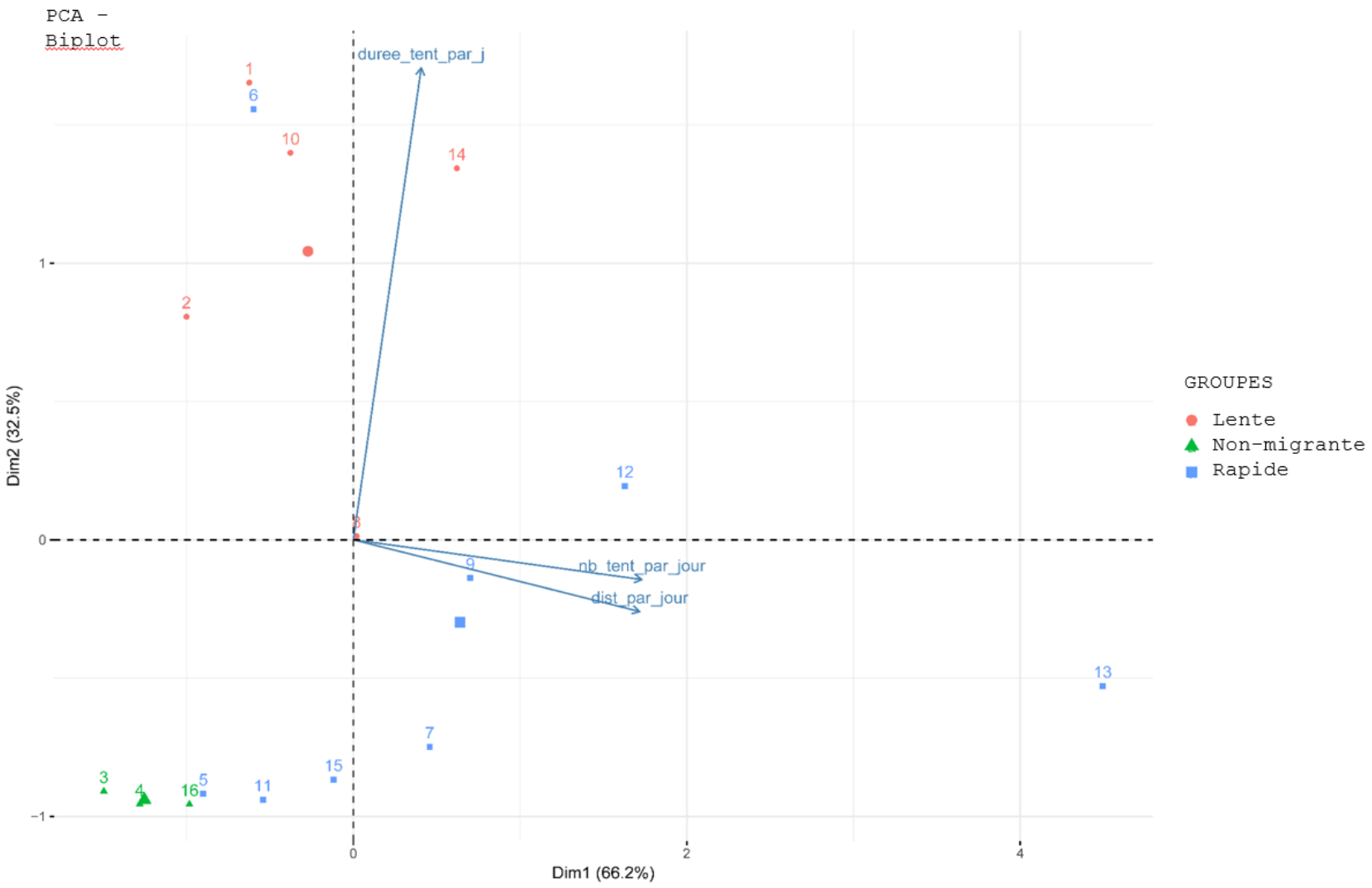


Figure 22 : ACP des différentes variables mesurées en fonction des 16 anguilles marquées réparties en 3 groupes (Lentes, Rapides et Non migrantes) (Trancart et al ; 2019)

L'Analyse en Composante Principale réalisée à partir des différentes métriques de chaque anguille marquée en acoustique (Figure 22) permet de faire ressortir 3 groupes d'anguille aux caractéristiques bien distinctes. Les anguilles « Lentes » vont être les anguilles ayant réalisé le moins de tentatives avec une durée entre les tentatives plus longues et donc parcourue une plus petite distance avant de franchir le barrage de Bois Joli. Alors que les anguilles dites « Rapides » ont quant à elle tenté plus de fois de franchir le barrage et ont donc parcouru beaucoup plus de distance, mais ont mis moins de temps à franchir le barrage. Les anguilles perdantes sont celles qui ont le moins tenté et donc parcouru le moins de distance.

3.4 Les comportements au pied du barrage

3.4.1 Validation de l'estimation de la position horizontale

Les erreurs médianes de localisation obtenues à partir des émetteurs tests situés en position fixe étaient de 1,14 et 1,64 m et variaient de 0,07 à 36,76 m (n = 3 413 emplacements sur 169 jours) (Tableau 2).

Tableau 2 : Résultat de la validation de l'estimation des positions horizontale avec les deux émetteurs tests (Trancart et al ; 2019)

	Emetteur test #1	**Emetteur test #2**
Nombre de positions estimées	2355	1058
Période	12 septembre au 28 février	12 décembre au 28 février
Nombre d'aberrations	3 (0.12 %)	1 (0.09 %)
Erreur médiane	1.14 m	1.64 m
Erreur min	0.33 m	0.07 m
Erreur max	18.38 m	36.76 m
Quantile (75 %, 90 %, 95 %)	2.00, 2.78, 3.32 m	2.42, 4.54, 6.41 m

Les fréquences cumulées des erreurs de repositionnement des deux émetteurs test indiquent que l'erreur de positionnement était inférieure à 2 m pour 80 % et 70 % des repositionnement pour les émetteurs 1 et 2, respectivement, et inférieure à 5 m pour 100 % et 93 % des repositionnement pour les émetteurs 1 et 2, respectivement (Figure 23). Pour les émetteurs, la précision infra-métrique (c'est-à-dire inférieure à 1 mètre) a été atteinte pour 30 % des repositionnements.

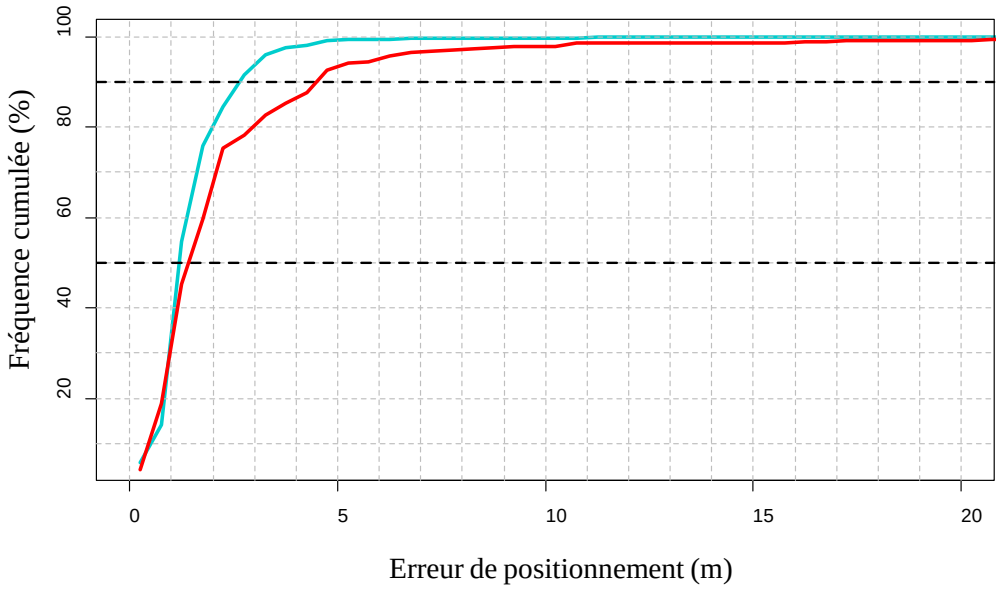


Figure 23 : Quantile cumulatif de la distribution des erreurs pour l'émetteur test n ° 1 (ligne bleue) et l'émetteur test n ° 2 (ligne rouge). Les deux lignes pointillées représentent les quantiles 50% et 90% (Trancart et al ; 2019)

3.4.2 Estimation des voies d'échappement les plus probables

Avec la première méthode, 13 anguilles argentées ont été observées en aval du barrage de Bois-Joli, et seulement trois d'entre elles ont été capturées dans les filets de la station de pompage et de la conduite du débit réservé, ce qui implique que les dix autres sont passées par surverse via une des 6 crêtes surversantes.

Avec la méthode d'estimation des voies de franchissement, la voie de sortie la plus utilisée est la surverse, car 10 d'entre elles l'ont utilisé. Pour neuf d'entre elles, la première crête surversante plus basse de 10 cm a été utilisée très majoritairement (Figure 24). Les trois autres ont utilisé la prise d'eau potable (Figure 25). Les deux méthodes d'analyses ont montré strictement les mêmes résultats pour toutes les anguilles marquées (Tableau 3).

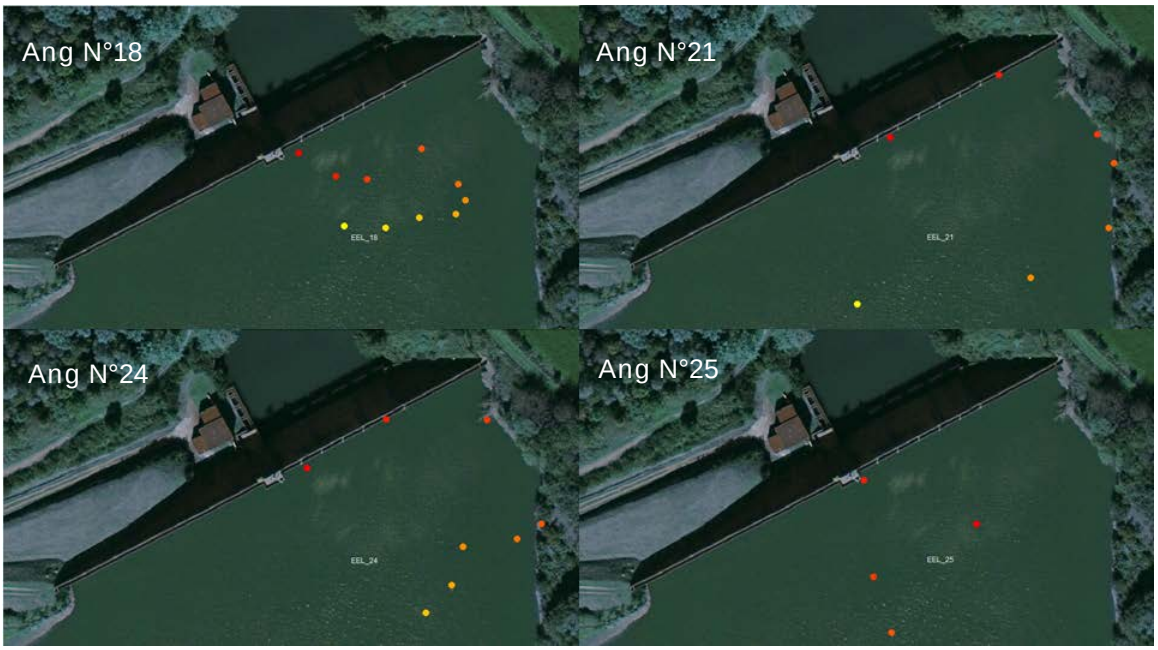


Figure 24 : Exemple des dix dernières positions estimées (~ 10 min) pour quatre anguilles argentées ayant utilisé la première crête surversante du barrage de Bois Joli. Ces anguilles sont représentatives de toutes les anguilles ayant utilisé la surverse pour franchir le barrage. La couleur des points représente l'évolution temporelle (jaune pour le premier et rouge pour le dernier). Les points manquant sont hors cadre (Trancart et al ; 2019)

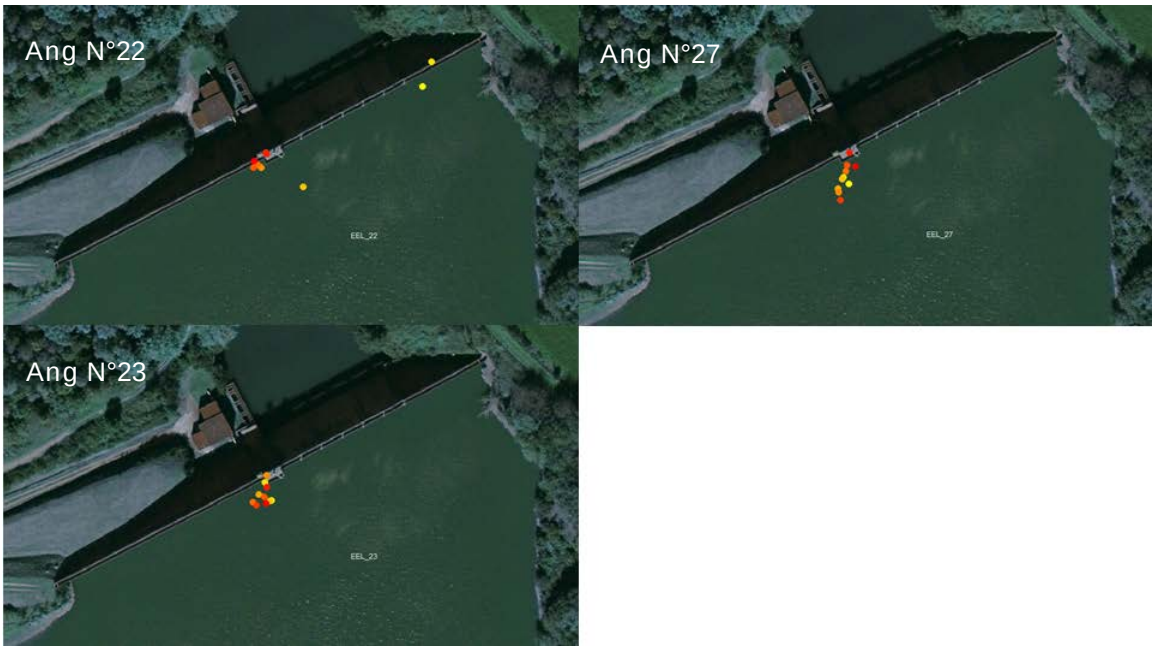


Figure 25 : Dix dernières positions estimées (~ 10 min) pour les trois anguilles ayant franchis le barrage par la prise d'eau potable. La couleur des points représente l'évolution temporelle (jaune pour le premier, rouge pour le dernier). Les points manquant sont hors cadre (Trancart et al ; 2019)

Tableau 3 : Détermination des voies de franchissement par les deux méthodes (Trancart et al ; 2019).

Numéro de l'anguille	Voies de franchissement observées	Voies de franchissement estimées par TDOA
#17	Surverse	Surverse
#18	Surverse	Surverse #1
#21	Surverse	Surverse #1
#22	Prise d'eau	Prise d'eau
#23	Prise d'eau	Prise d'eau
#24	Surverse	Surverse #1
#25	Surverse	Surverse #1
#26	Surverse	Surverse #1
#27	Prise d'eau	Prise d'eau
#28	Surverse	Surverse #1
#29	Surverse	Surverse #1
#30	Surverse	Surverse #1
#31	Surverse	Surverse #1

3.4.3 Efficacité de franchissement

Le temps nécessaire pour passer le barrage de Bois-Joli allait de 0,29 à 65 jours (Tableau 4). Les anguilles qui ont utilisé le prise d'eau potable ont été les plus rapides à passer (temps médian = 1,1 jour contre 18,53 jours pour les anguilles passées par la surverse). Tenant compte du moment où le barrage a commencé à surverser (le 15 décembre à 15h), 16,53 jours ont été nécessaires pour que les anguilles ayant utilisé la surverse quittent la retenue du Bois Joli (Tableau 4). De plus, les anguilles ayant utilisé la conduite d'eau potable présentaient également le plus grand nombre de détections par jour près du barrage. Par contre, leur nombre total de détections près du barrage était assez similaire entre les deux groupes.

Tableau 4 : Efficacité de franchissement du barrage de Bois Joli (Trancart et al ; 2019).

	Temps de franchissement (jours)	Temps de franchissement après la surverse (jours)	Nombre de détections au pied du barrage	Nombre de détections au pied du barrage par jour
Médiane pour les anguilles ayant emprunté la prise d'eau	1.10	- 2.40	118	106.33
Médiane pour les anguilles ayant emprunté la surverse	18.53	16.53	126.5	11.73

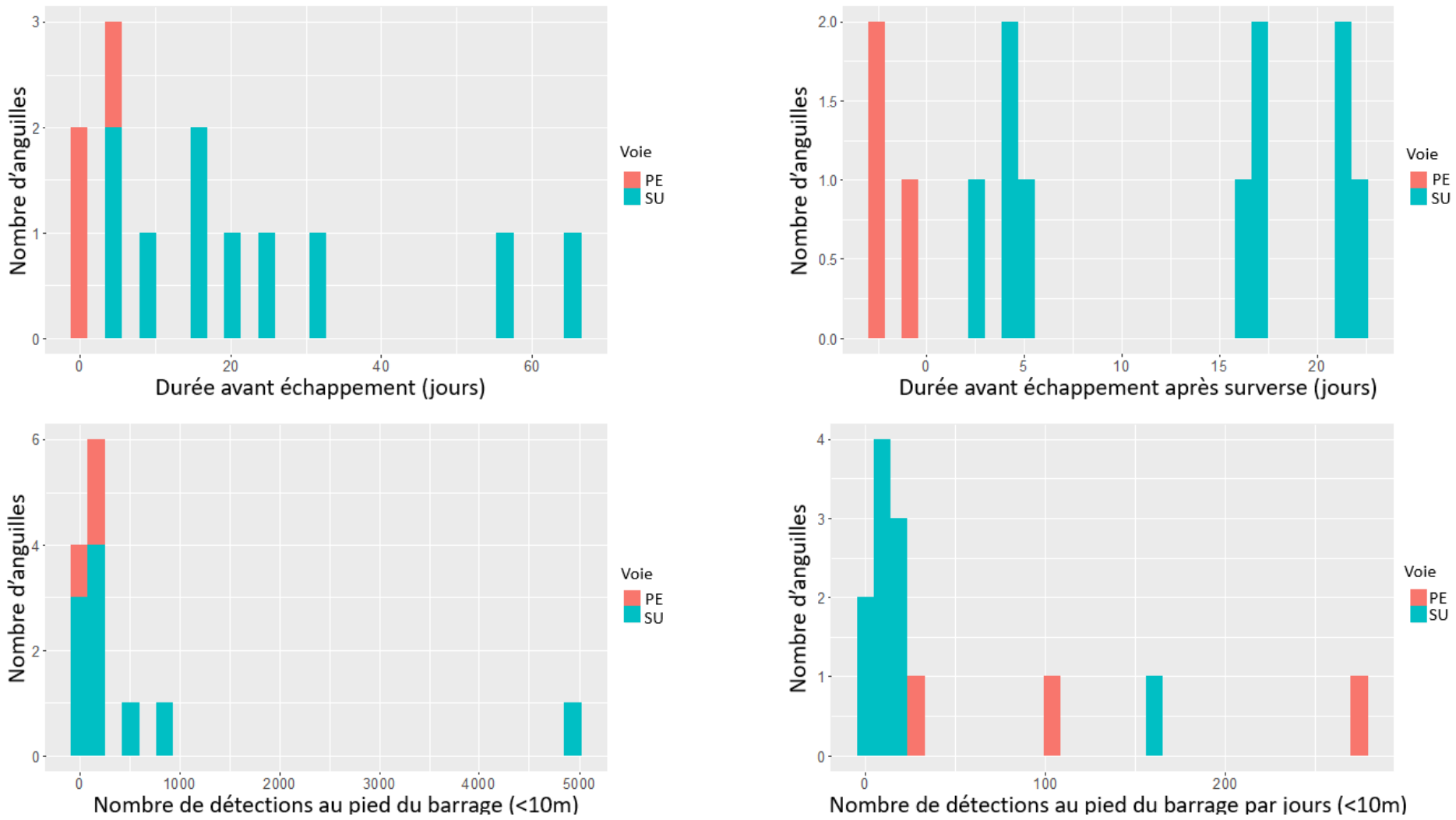


Figure 26 : Efficacité de franchissement du barrage évaluée via 4 mesures: Durée avant l'échappement, délai après surverse, nombre de détections au pied (< 10 m) du barrage, nombre de détections au pied (< 10 m) du barrage par jour (PE = Prise d'Eau ; SU = Surverse) (Trancart et al ; 2019)

3.4.4 Comportements lors des tentatives d'échappement

3.4.4.1 Différences comportementales entre les anguilles passant par la surverse et les anguilles passant par la prise d'eau potable

Une très forte différence de comportement entre les anguilles ayant franchi le barrage par la surverse et les anguilles ayant utilisé la prise d'eau a été observée. Les dernières 10 détections ont montré que les anguilles qui ont franchi le barrage de Bois Joli par surverse ont un mouvement final avec une plus grande vitesse partant de l'arrière du réservoir comme pour prendre de l'élan. Les anguilles ayant empruntées la prise d'eau ont quant à elles un mouvement final à faible vitesse (Figure 27).

Bien que le nombre d'anguilles passées par la prise d'eau soit trop faible (seulement 3) pour garantir des statistiques fiables, leur poids semble être équivalent à celui des anguilles passées par la surverse (554,1 +/- 193,56 g pour la surverse, 515 ± 225,3 g pour la prise d'eau).

Une différence dans la période de prospection autour du barrage a été mise en évidence puisque toutes les détections à proximité du barrage ont eu lieu la nuit pour des anguilles ayant franchi le barrage par la prise d'eau, tandis que des anguilles ayant emprunté la surverse ont été observées à proximité du barrage également pendant la journée pour environ 10 à 40 % des observations (Figure 28).

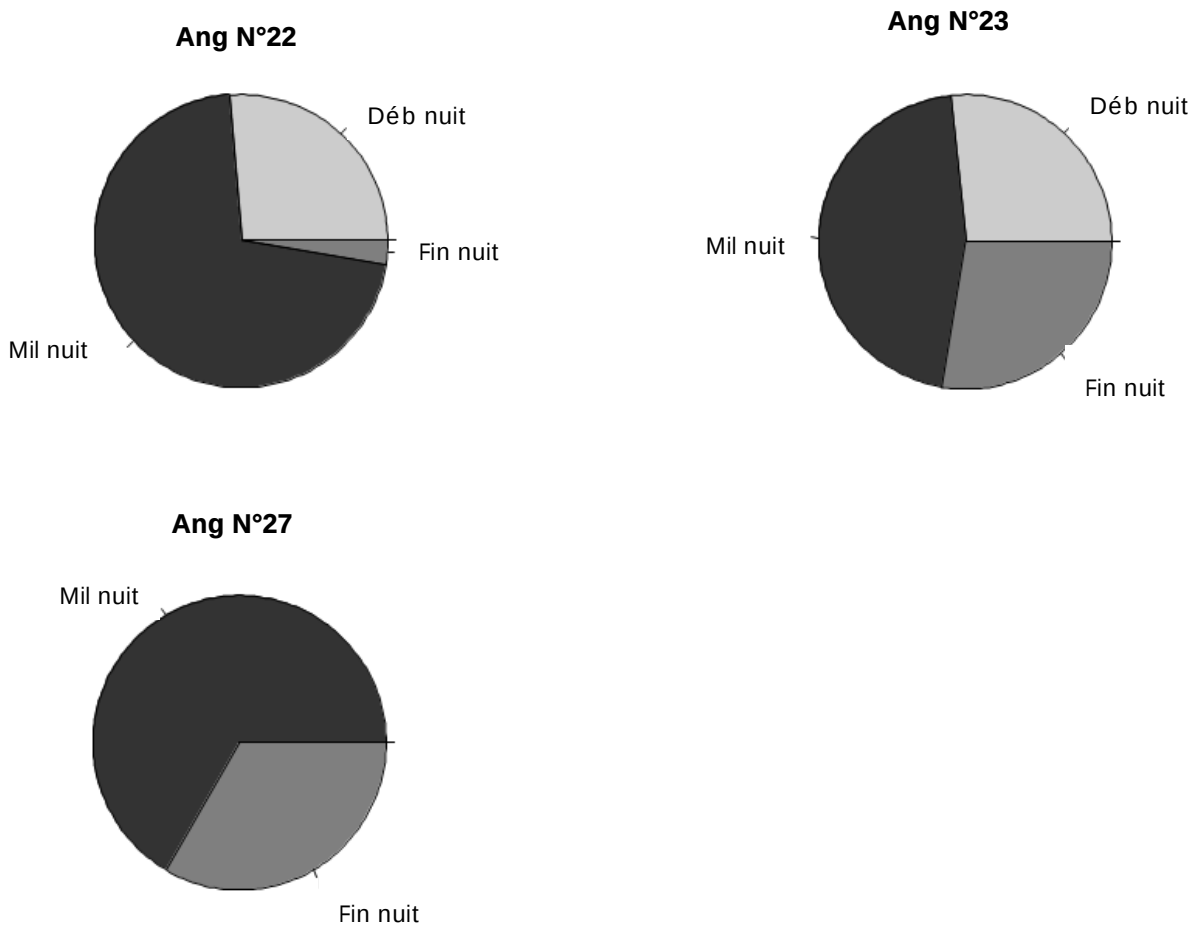


Figure 27 : Périodes de présence près du barrage (< 10 m) pour les 3 anguilles passées par la prise d'eau (nuit moyenne = gris foncé, début de la nuit = gris le plus léger, fin de la nuit = gris clair) (Trancart et al ; 2019)

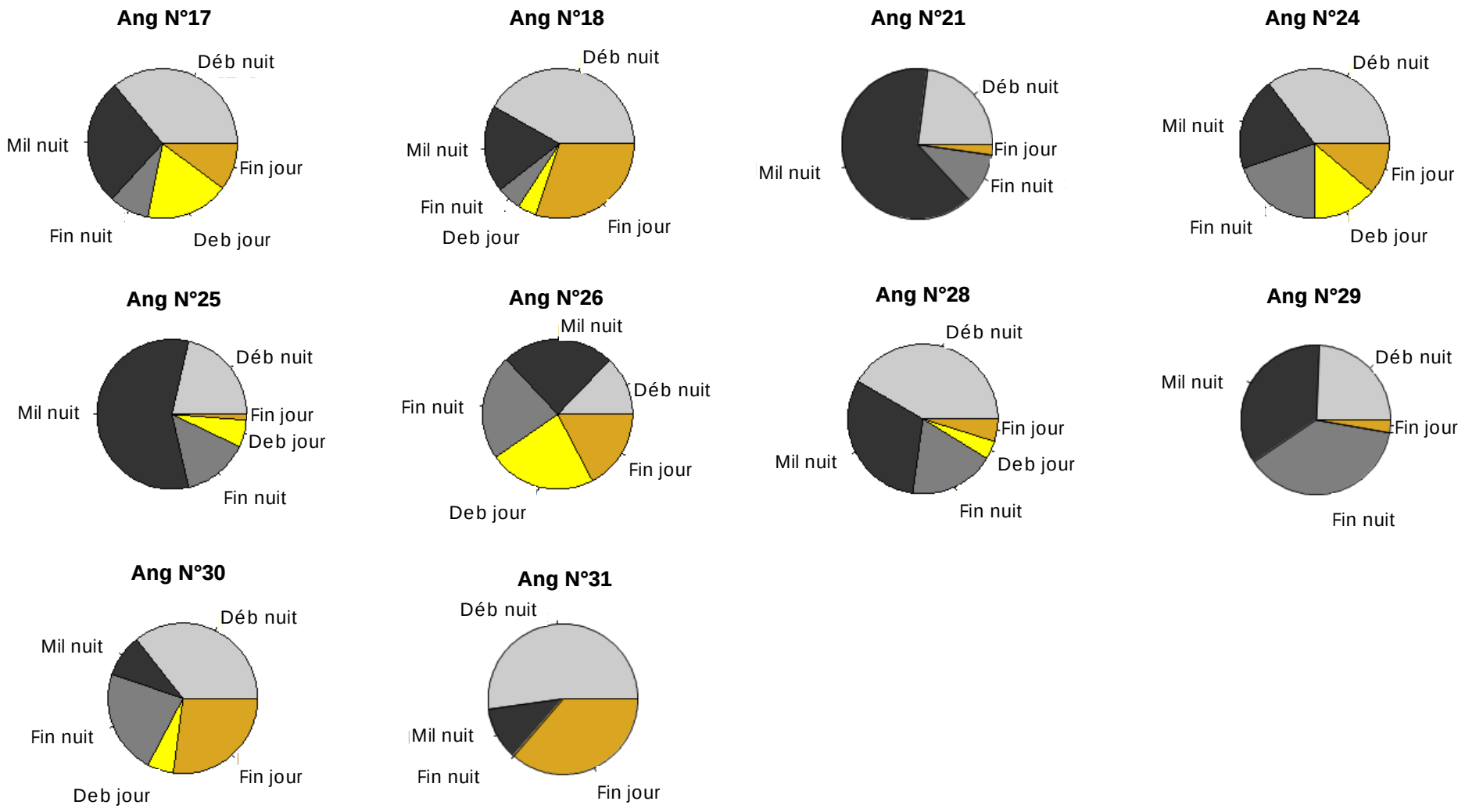


Figure 28 : Périodes de présence à proximité du barrage (> 10 m) pour les anguilles qui sont passées par la surverse (nuit moyenne = gris foncé, milieu de la nuit = gris le plus léger, fin de la nuit = gris clair, début du jour = jaune, fin du jour = orange) (Trancart et al ; 2019)

3.4.4.2 Tactiques d'exploration

Une forte différence a été observée dans les positions des localisations recalculées à proximité du barrage (< 10 m), en vue du ciel, pour les anguilles transitant par la prise d'eau et les anguilles ayant franchi le barrage de Bois Joli par la surverse. Les premières étaient situées principalement près de la tour de béton possédant les prises d'eau de pompage alors que les autres étaient principalement situées sur la bordure droite du barrage. Le côté droit a été plus exploré que le côté gauche (Figure 29 et Figure 30).

Sur la Figure 29, en vue de face, on retrouve nettement l'importance qu'ont porté les anguilles ayant franchi le barrage par la prise d'eau à prospecter autour de la colonne possédant les voies de pompage. De nombreuses cellules apparaissent en rouge autour de la colonne de prise d'eau en vue de face pour les anguilles ayant empruntées la prise d'eau alors qu'aucune cellule n'est en rouge dans la vue de face des anguilles ayant utilisé la surverse (Figure 30).

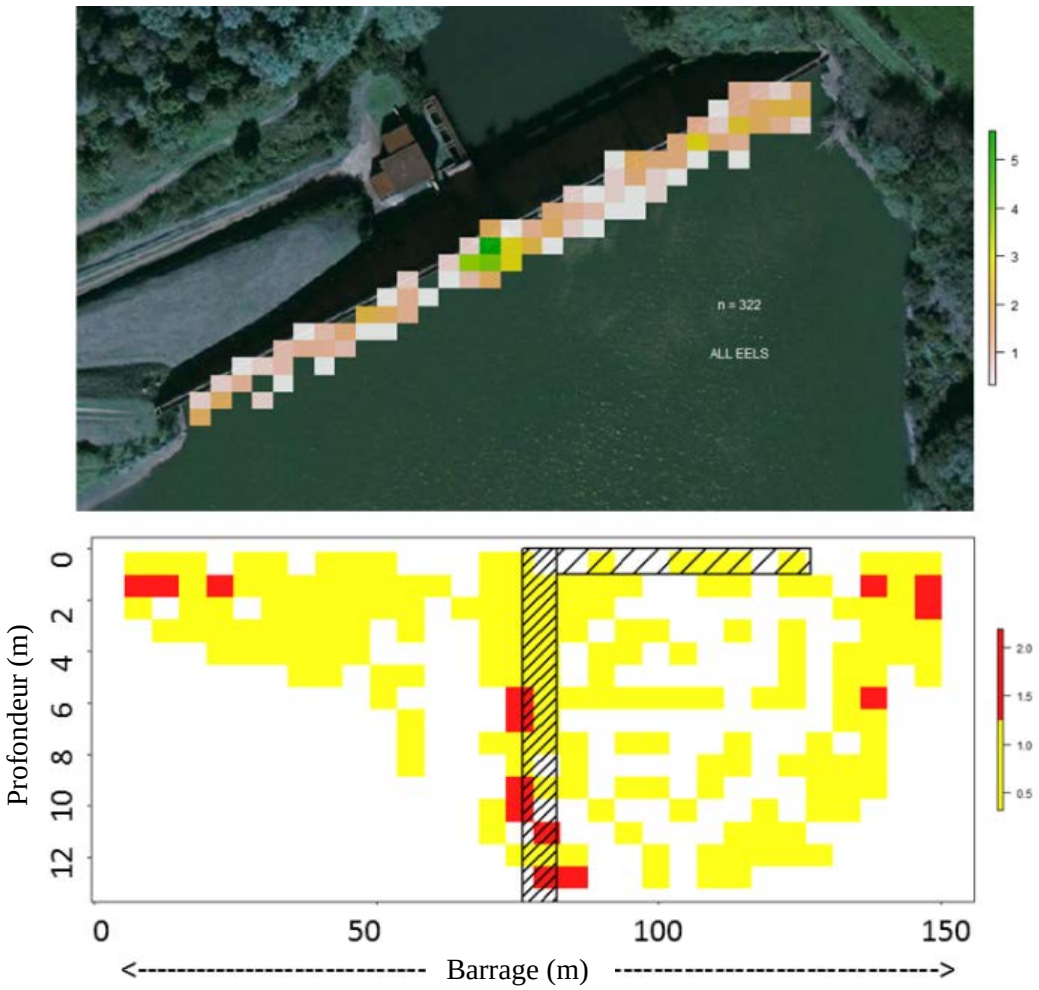


Figure 29 : Zones de présence près du barrage (< 10 m) pour les anguilles passées par la prise d'eau, en vue du ciel (en haut) et de face (en bas). En vue de face, la tour de prise d'eau est

figurée par le rectangle vertical en pointillé noir et les fenêtres de la surverse par le plan horizontal (Trancart et al ; 2019)

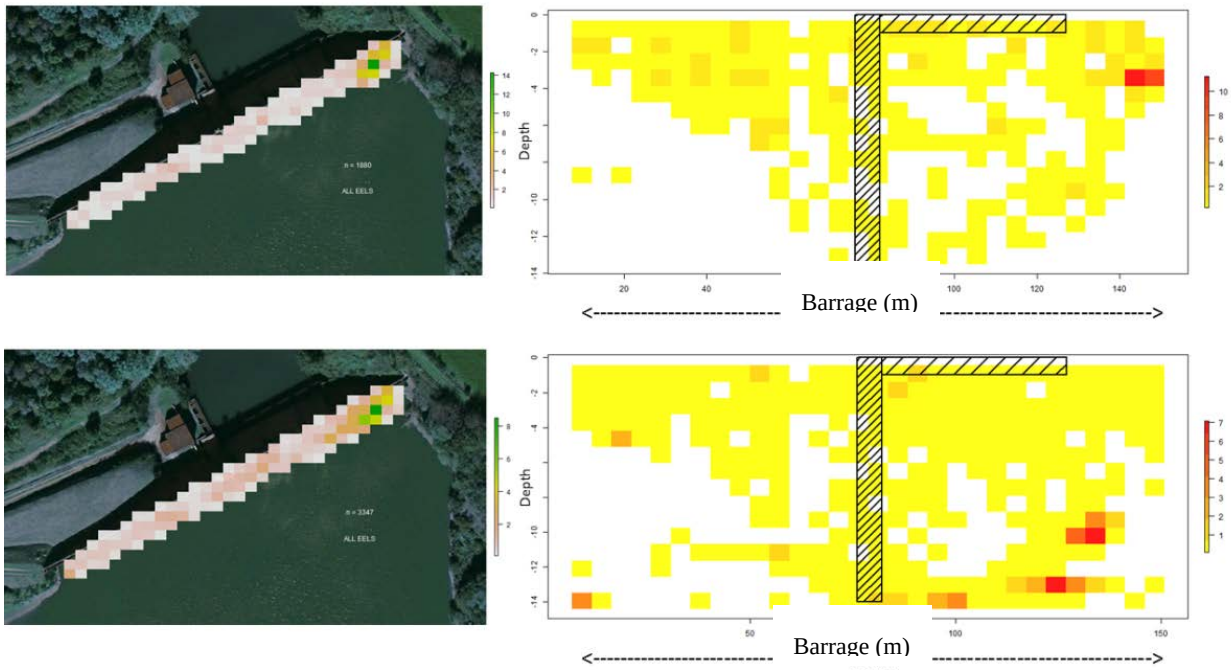


Figure 30 : Zones de présence près du barrage (< 10 m) pour les anguilles passées par la surverse, vue du ciel (à gauche) et vue de face (à droite), pour la période antérieure (en haut) et pendant la surverse (en bas). En vue de face, la tour de prise d'eau est figurée par le rectangle vertical en pointillé noir et les fenêtres de la surverse par le plan horizontal (Trancart et al ; 2019)

4. Discussion

4.1 Suivi de la pêcherie et biométrie

4.1.1 La pêcherie

Au total, 476 anguilles ont été capturées dont 39 anguilles argentées, soit 8 %. Ce pourcentage d'anguilles argentées est représentatif de la fraction d'anguille argentée au sein du Frémur, de 1 à 12 % de la population totale (d'après Charrier, 2016).

La Figure 17 représente la relation non significative entre les pics de pluies, l'élévation du niveau d'eau et les captures d'anguilles en amont de la retenue AEP. En effet, de nombreuses études ont montré l'effet de la pluviométrie sur les pics de migration, en milieu ouvert (sans l'effet de barrage) les anguilles profitent des ondes de crues pour démarrer leur migration d'avalaison (Trancart et al., 2013). Il est probable qu'à l'amont de la retenue AEP, le système ne fonctionne pas comme en milieu ouvert et ne soit tamponné par le barrage. L'effet retenue se fait sentir dès l'amont de la zone de pêche. On n'observe donc pas systématiquement un pic d'activité et donc de capture dans la pêcherie, suite à un pic de précipitation. Le nombre de captures n'est donc pas dépendant de la pluviométrie mais doit dépendre d'une combinaison de plusieurs facteurs.

4.1.2 Caractéristiques des individus marqués

Les anguilles argentées utilisées pour le marquage acoustique sont les anguilles femelles les plus grandes et les plus grosses qui ont été capturées avec une moyenne de 663 mm (± 127 mm) et 566 g (± 358 g). En effet, le poids de l'émetteur de pouvant pas dépasser 2 % du poids de l'animal, l'étude acoustique s'est donc portée sur les plus gros individus capturés.

Les anguilles argentées femelles capturées dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes en 2017/2018 avaient une taille et un poids moyen de 621 mm et 475 g. Aucune différence significative (p=0.79 et 0.80) n'a été mise en évidence pour la taille et le poids des individus entre les deux groupes (marquées et population totale). Les anguilles femelles marquées en acoustique lors de cette étude sont donc représentatives des anguilles femelles migrantes (Figure 31).

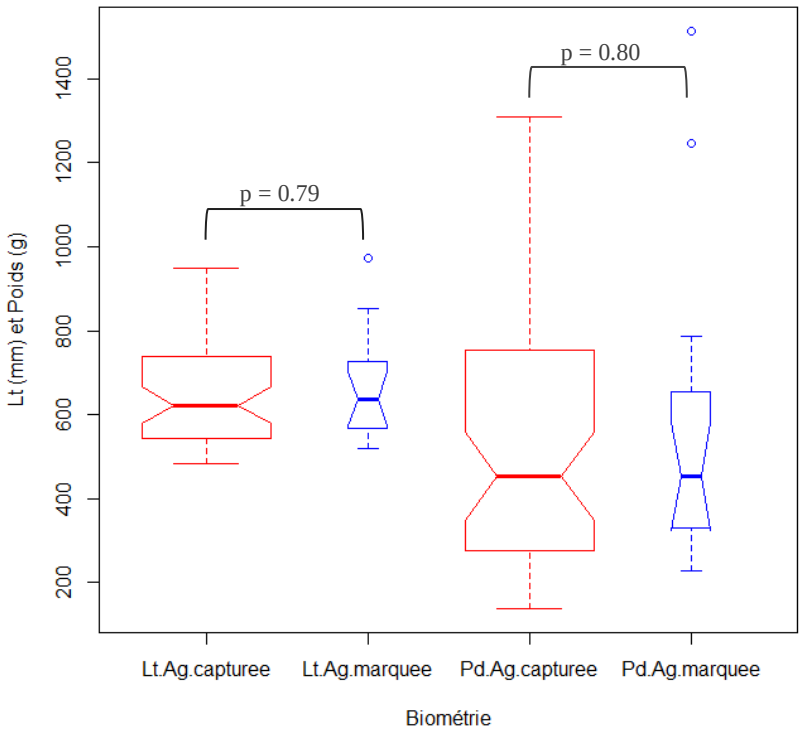


Figure 31 : Box-plot des comparaisons de moyennes entre les anguilles marquées en acoustique et les anguilles capturées dans le piège de dévalaison de PEO

4.1.3 La recapture des individus marqués dans les suivis de la dévalaison

4.1.3.1 Le suivi du filtre de la station de pompage

Parmi les anguilles marquées, une seule a utilisé la conduite de la station de pompage d'eau potable pour quitter la réserve AEP et franchir le barrage de Bois Joli. Cela signifie que la prise d'eau de la station de pompage est une voie de franchissement du barrage de Bois Joli pour les anguilles argentées migrantes comme cela a déjà été confirmé (Charrier et al., 2019). L'anguille était vivante au moment de sa capture et a été relâchée dans la retenue du Pont es Omnes. Si cette anguille n'a pas été capturée par le piège de dévalaison - elle a probablement échappé au piège de dévalaison lors de la crue - elle a été entendue sur tous les hydrophones de la retenue de Pont es Omnes et de Pont Avet. Cette observation montre que le transit par la conduite n'a pas été mortel pour l'unique anguille argentée marquée qui a utilisé cette voie. Ce résultat est inattendu et très probablement pas représentatif. En effet, un suivi du filtre de la station de pompage mené depuis 2011 par Fish Pass montre que la mortalité totale (directe et indirecte) liée au passage dans le filtre est estimée à près de 70% (Charrier et al., 2019). Pour celles qui survivent, le transit *via* cette conduite augmente significativement le temps nécessaire pour traverser la retenue du Pont es Omnes (28 jours en moyenne, min/max : 1/893 jours). Ainsi, outre une mortalité importante créé par le filtre, il s'avère que le passage par le filtre perturbe la migration de dévalaison des anguilles en retardant la migration

des individus encore vivants voire en stoppant la migration d'une partie d'entre elles jusqu'à 2 ans. Dans ces conditions, il parait fondamental pour la préservation de l'espèce de contrôler et de limiter l'accès à cette conduite par un système de grille efficace et complétement hermétique à l'entrée de la prise d'eau.

4.1.3.2 La conduite du débit réservé

Deux anguilles marquées ont utilisé quant à elles la conduite du débit réservé pour franchir le barrage de Bois Joli. Au moment de leurs captures, l'une d'entre elle était morte et l'autre moribonde. Cette dernière a tout de même été relâchée à l'aval du barrage mais n'a probablement pas survécu à ses blessures puisqu'elle n'a jamais été détectée par les hydrophones plus en aval par la suite. Il est donc indispensable d'empêcher l'accès à la conduite de débit réservé pour préserver les anguilles migrantes qui tenteraient de franchir le barrage de Bois Joli par cette voie.

4.1.3.3 Le piège de dévalaison de Pont es Omnes

Les anguilles argentées marquées peuvent échapper au piège du Pont es Omnes, c'est-à-dire qu'elles peuvent franchir le piège sans être capturées pendant les pics de migration. Pour cette saison 2017/2018, le taux de recapture d'anguilles argentées marquées à l'acoustique dans le piège est de 64% (soit 4 individus échappés). Ce résultat est cohérent avec les tests réalisés chaque année dans le cadre du programme Frémur qui montrent un échappement d'environ 37% quand le débit est supérieur à 1500 $l.s^{-1}$ (Acou, 2006). Une amélioration du piège de dévalaison serait donc à prévoir pour obtenir une meilleure efficacité des captures lors des crues. De plus, il y a une forte proportion d'anguilles mortes dans le piège de dévalaison. Cette mortalité pourrait être liée au franchissement par surverse du barrage du Bois Joli via son parement rugueux et son absence de fosse de réception, et/ou aux conditions de captures dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes. Une amélioration des conditions de captures des anguilles dans le piège de dévalaison est également à prévoir pour améliorer le taux de survie des anguilles dévalantes, avec par exemple la mise en place d'un filet à la sortie de la conduite pour amortir la projection des anguilles contre la cage. Dans le cadre des travaux prévus au niveau du barrage du Bois Joli, le syndicat a prévu d'aménager la paroi du barrage d'un revêtement lisse.

4.2 Le suivi acoustique : Quantification de l'échappement

4.2.1 Limites méthodologiques

Avec les récents progrès technologiques, en particulier dans le domaine des batteries, la technologie de télémétrie acoustique s'est fortement améliorée ces dernières années. Par conséquent, cette technologie est très souvent et très largement utilisée en écologie aquatique (Hussey et al.,

2015). Certaines études récentes portent sur un nombre très important d'individus marqués, atteignant parfois plusieurs milliers d'individus. Outre le coût d'une telle étude, il existe une limite technique à l'augmentation du nombre d'individus marqués dans une zone fermée: la collision des signaux acoustiques. Ce phénomène se produit lorsque plusieurs émetteurs se trouvent au même endroit et au même moment. Les signaux se "heurtent" parfois les uns avec les aux autres, empêchant ainsi les récepteurs de les différencier. Dans la présente étude, une forte accumulation d'anguilles marquées au-devant le barrage de Bois Joli était à craindre et les données analysées a posteriori ont confirmé cette hypothèse. Compte tenu de la taille de la retenue, de la puissance de sortie des émetteurs acoustiques utilisés et des gammes de détection des récepteurs acoustiques, nous avons choisi de limiter le nombre d'anguilles marquées présentes simultanément dans la retenue à une dizaine d'individus maximum. De cette manière, le nombre de périodes pendant lesquelles une anguille n'a pas été détectée dans le réseau de récepteurs était très faible, inférieure à 10 % pour toutes les anguilles marquées. Une augmentation du nombre d'anguilles marquées aurait certainement eu des conséquences négatives sur la qualité des paramètres étudiés.

4.2.2 Echappement de la réserve AEP

Le taux d'échappement de la retenue AEP du Bois Joli atteint 81 % (13/16). Cependant, parmi ces 13 individus, deux anguilles argentées sont mortes suite au franchissement du barrage de Bois Joli via la conduite du débit réservé. Finalement, le taux d'échappement est donc de 68.75% (11/16). Ce taux d'échappement reste bien supérieur à d'autres sites possédant des barrages non-turbinants comme des vannages. Sur le lac de Grand-Lieu, le taux d'échappement était de 35 % en 2016 (18/52), et de seulement 23 % (12/52) en 2017 (Danet et al, 2018). A noter que le taux d'échappement observé au niveau du barrage de Bois Joli a lieu au cours d'une saison 2017/18 à l'hydrologie favorable puisque la surverse de la retenue est intervenue relativement précocement dans la saison (Décembre 2017). L'échappement observé pour cette saison 2017/2018 au niveau du barrage de Bois Joli apparait donc comme une estimation haute. Au moment de la rédaction de ce rapport (Juin 2019), la surverse du Bois Joli n'a toujours pas eu lieu, et les simulations réalisées par le Syndicat montre que des années sans surverse devraient à terme être de plus en plus fréquentes. Par ailleurs, pour bien appréhender l'échappement à l'échelle du bassin versant du Frémur, il convient de prendre en compte l'impact cumulé des barrages situés en aval du Bois Joli.

4.2.3 Echappement à l'échelle du bassin versant

Juste en aval du Bois Joli, seulement 50 % des anguilles franchissent le barrage de Pont es Omnes vivantes. Cinq anguilles sur 13 sont en effet mortes suite au franchissement cumulé du barrage

de Bois Joli et de Pont es Omnes. En effet une grande majorité des anguilles réussissent à franchir le barrage de Bois Joli mais 25 % d'entre elles ont été retrouvée morte dans le piège de dévalaison de Pont es Omnes. L'ensemble des relèves du piège montre que les anguilles retrouvées mortes dans le piège arrivent déjà mortes ou moribondes. Les dégâts pathologiques sont donc créés en grande partie en amont du piège, ce qui signifie que le franchissement actuel du barrage de Bois Joli n'est pas sans danger pour une fraction de la population d'anguille migrante.

Une amélioration du parement du barrage de Bois Joli ou la création d'un système de dévalaison permettant aux anguilles de franchir le barrage en continu sans dommage corporel ni retard à la migration est à prévoir. De tels aménagements devraient voir le jour dans le cadre des travaux du barrage en 2019/2020. Une amélioration du piège de dévalaison serait également à prévoir afin de réduire l'échappement constaté lors des forts débits (1500 l/s) et des risques d'impacts sur la grille lors de ces mêmes conditions.

Sur les 16 anguilles marquées initialement en queue de retenue du Bois Joli, seulement six anguilles ont effectivement atteint le barrage de Pont Avet et une seule a échoué en restant en amont du réservoir de Pont-Avet. Les cinq autres n'ont pas été détectées par les hydrophones situés en aval du barrage mais ont été observés pour la dernière fois au niveau de l'hydrophone situé juste en amont du barrage. Le rapport entre le nombre de détections sur ce dernier récepteur et le nombre d'émissions théoriques indiquait une présence très proche de ce récepteur pour quatre anguilles sur les cinq. Pour la majorité de ces anguilles, leur dernière détection s'est produite pendant la nuit. Pour ces anguilles, l'hypothèse la plus probable est un franchissement du barrage, conduisant à un taux d'échappement d'au moins quatre voire cinq anguilles. Ce résultat peut s'expliquer par l'arrivée d'une crue permettant une large surverse sur le barrage du barrage de Bois Joli et des zones situées en aval, noyant la partie aval du barrage du Pont Avet. Cette crue a fait déborder le Frémur de son cours d'eau (dire des usagers) limitant probablement la détection des émetteurs par les hydrophones mais permettant le franchissement des anguilles argentées migrantes.

En considérant que les cinq anguilles argentées détectées pour la dernière fois en amont du barrage de Pont Avet ont échappé à la détection des hydrophones situés en aval du Pont Avet, il apparait que le taux d'échappement final observé sur le Frémur pour cette saison 2017/2018 est au maximum de 31.25% (5/16). Comme précisé précédemment, ce taux d'échappement intervient au cours d'une saison hydrologique favorable et apparait donc comme une estimation haute. Au final trop peu d'anguilles argentées produites en amont de la réserve AEP participe au stock de reproducteurs.

Il est donc urgent de trouver une solution adéquate à l'amélioration du franchissement du barrage de Bois Joli, mais également du piège de dévalaison de Pont es Omnes et du barrage de Pont Avet, pour qu'une plus grande partie des anguilles argentées produites dans le Frémur puissent migrer en mer et ainsi participer au stock de reproducteurs. Un système de dévalaison limitant les risques de blessures ou mortalités pour les anguilles au niveau du barrage de Bois Joli (système de dévalaison et amélioration de la qualité du déversoir) et une amélioration des conditions de capture des anguilles dans le piège de dévalaison sont à prévoir. De plus une ouverture moins large mais plus profonde au niveau du barrage de Pont Avet permettrait aux anguilles de percevoir le sens du courant et ainsi de mieux franchir le barrage.

Perte en ligne tout le long du Frémur avec un maximum de 31,25 % d'échappement total.

4.3 Les comportements au sein de la retenue

4.3.1 Les facteurs déclencheurs de migration

Les facteurs déclenchant la migration de l'anguille argentée en rivière ont été clairement identifiés (voir, par exemple, la revue dans Trancart et al., 2013). Le facteur le plus fréquemment cité est le débit d'eau, avec un fort effet positif (rhéotaxie négative). Lorsque la mesure du débit d'eau n'est pas disponible, la pluviométrie est un très bon proxy et peut être considérée comme le deuxième facteur de déclenchement le plus efficace. Cette rhéotaxie peut être considérée comme un transport de flux sélectif, où les anguilles argentées choisissent des conditions environnementales limitant l'effort, puis la consommation de réserves de graisse. Dans la présente étude, la pluviométrie n'a pas été retenue dans le modèle final. Les essais préliminaires n'ont montré aucune relation significative entre la pluviométrie et le débit d'eau dans le réservoir, le niveau d'eau ou l'augmentation sur 12 heures du niveau d'eau. Ces résultats pourraient s'expliquer par la présence du barrage de Bois-Joli, par la taille relativement petite de la conduite du débit réservé (débit minimal de 0,04 $m^3.s^{-1}$) et par la faible taille (60 km^2) du bassin versant du Frémur et son utilisation (essentiellement des zones agricoles). Dans cette configuration, les précipitations importantes ne créent pas un effet « chasse d'eau » important dans le bassin du Frémur, ce qui empêche les anguilles argentées de détecter un facteur déclenchant. Dans de telles conditions, c'était un autre facteur qui sera le déclencheur: le niveau d'eau de la retenue et l'augmentation sur 12h du niveau d'eau. C'est probablement le même déclencheur que dans les écosystèmes lentiques, comme au sein du plus grand lac de plaine de France (Trancart et al., 2017). Hormis les facteurs hydrologiques, la direction du vent a eu un effet fortement positif lorsqu'elle a soufflé au sud-sud-est. Cette direction est également la direction de la rivière Frémur, ce qui suggère que cette direction du vent a causé un courant d'eau de surface, un mouvement

hydrodynamique, qui pourrait être interprété comme un facteur déclencheur pour les anguilles argentées. Ces vents ne sont pas dominants dans la zone d'étude, où les vents les plus présents sont les vents de nord ou de nord-ouest, couplés à des basses pressions atmosphériques. Les vents de sud sont régulièrement couplés à des pressions atmosphériques élevées, ce qui a entraîné le quatrième facteur déclencheur: les pressions atmosphériques élevées. Cela pourrait avoir un effet considérable sur la gestion de cette espèce en voie de disparition, retardant ou annulant la migration naturelle en aval. Dans cette étude, ces facteurs de déclenchement ont été présents en janvier, alors que la migration classique dans les rivières non aménagées de la même zone géographique a généralement lieu entre septembre et novembre.

4.3.2 Effet bloquant du barrage

Le barrage de Bois Joli à un effet bloquant sur la population d'anguilles argentées migrantes produites dans la réserve AEP. Trois d'entre elles (19 %) n'ont pas du tout réussi à franchir le barrage, ce qui génère une perte de potentiels reproducteurs.

Tel que mentionné précédemment, la présence du barrage de Bois-Joli pourrait réduire ou supprimer la perception des déclencheurs environnementaux de la migration en aval de l'anguille argentée. Les deux anguilles n'ayant pas migré en aval n'ont probablement pas ressenti les paramètres déclencheurs. Quoi qu'il en soit, ces trois anguilles ont montré un mouvement important après la relâche, éliminant définitivement l'hypothèse de mort post-opératoire. Cependant, l'une d'entre elle (n ° 20) a été observée pendant une courte période, puis a soudainement disparu. Mais elle a été entendue par les hydrophones de la retenue AEP à la fin de l'étude, ce qui signifie qu'elle était remontée en amont de la zone d'étude. La seconde anguille (n°19) est restée dans la zone de relâche et était remontée en amont de la zone de relâche à la fin du suivi. La troisième anguille (n ° 32) a tenté de franchir le barrage neuf fois au cours d'une période cumulée de 9,3 heures, mais a finalement échoué, puis est retournée en amont de la retenue AEP. Elle était à nouveau détectée dans le site de relâche à la fin du suivi.

De plus, l'effet bloquant engendre une hausse de la dépense énergétique et un retard à la migration pouvant compromettre la survie de l'anguille à long terme et son potentiel reproducteur.

Les barrages « non turbinants » ne sont pas sans conséquence dans le succès de migration et dans la capacité reproductrice des anguilles argentées.

4.3.3 Effet évolutif

Les anguilles argentées migrantes produites en amont de la réserve AEP ont adoptées des stratégies différentes afin de mener à bien leur migration d'avalaison.

Trois types différents de personnalités ressortent dans l'analyse du comportement des anguilles au sein de la réserve AEP :

- Les « Timides » sont les anguilles qui n'ont pas réussi à quitter la retenue AEP. Ce sont les anguilles qui ont le moins tenté de franchir le barrage de Bois Joli et également celles qui ont parcouru le moins de distance.
- Les « Audacieuses » sont les anguilles qui vont être les plus rapides à franchir le barrage du Bois Joli. Ce sont celles qui ont tenté le plus souvent de franchir le barrage et fait de grands mouvements en cherchant d'autres voies de sortie quand elles étaient bloquées. Elles ont donc parcouru plus de distance. Il y a donc une sélection potentielle de la personnalité « audacieuse » car c'est celle qui va prendre le moins de retard dans la migration mais utiliser le plus d'énergie. C'est à priori la personnalité la plus efficace d'après Caudill et al. 2007, mais c'est aussi la plus risquée (Allendorf 2009). Dans un milieu où il existe une forte pression de pêche, ces anguilles ont plus de probabilité de se faire pêcher car ce sont celles qui parcours le plus de distances.
- Les « Intelligentes » sont les anguilles qui ont réussi à franchir le barrage de Bois Joli tout en parcourant le moins de distance possible. Ce sont également celles qui ont tenté de franchir le barrage un nombre de fois plus faible en n'explorant pas complètement le réservoir mais en essayant de franchir le barrage pendant une longue période. Elles ont mis plus de temps à franchir le barrage mais elles ont pris moins de risque en se déplaçant moins, limitant leur dépense énergétique, en attendant les bons facteurs environnementaux pour s'échapper.

L'analyse du comportement des anguilles argentées au sein de la réserve AEP fait ressortir trois comportements distincts chez les anguilles argentées marquées. Cependant, le barrage de Bois Joli à un impact sur ces trois comportements. Il va augmenter leur dépense énergétique, créer un retard voire un blocage complet dans leur migration de reproduction. Le dernier effet inattendu du barrage serait un effet évolutif, conduisant à la sélection du comportement le plus à risque.

4.4 Analyse comportementale au droit du barrage de Bois Joli

4.4.1 Nécessité d'avoir des positions précises

Sur des sites particuliers, où les différentes voies d'échappement sont clairement séparées, les méthodes télémétriques « classiques » peuvent donner de bons résultats et suffises pour définir les voies d'échappement. Par exemple, en étudiant la migration de 15 anguilles argentées européennes, Durif et al. (2002) ont réussi à estimer les voies de sorties avec trois possibilités différentes : barrage, turbines et vanne de fond. Malheureusement, cette méthode nécessite une ségrégation spatiale claire et évidente entre les différentes voies d'échappements. Dans la présente étude, la prise d'eau et les fenêtres de surverse étaient très proches (<2m), limitant ainsi l'utilisation de cette méthode. Une autre méthode, fournissant des positions très précises, était nécessaire.

4.4.2 Précision de la méthode de détermination des positions

La méthode présentée dans cette étude présentait une erreur de localisation moyenne de 1,14 m pour l'émetteur test n ° 1 et d'1,64 m pour l'émetteur test n ° 2. Le premier émetteur d'essai était situé très près des issues potentielles pour les anguilles. Pour cet émetteur, la précision de localisation était constante pendant la période de l'étude (09/12/17 au 17/02/28/18). Le deuxième émetteur a été placé près du rivage. Au début de l'expérience, les récepteurs proches de cet émetteur étaient hors d'eau et ne fonctionnaient donc pas avant que le niveau de l'eau ne l'est submergé. Espinoza et al. (2011) ont montré que l'estimation des positions était significativement plus efficace à l'intérieur qu'à l'extérieur d'une zone étudiée. Les erreurs ont donc été calculées dans cette étude uniquement lorsque tous les récepteurs étaient submergés (après le 15 décembre).

La précision dans cette étude semble être meilleure ou équivalente à celle rapportée dans des études comparables utilisant des systèmes de positionnement commerciaux. Par exemple, Espinoza et al. (2011) ont montré que la précision de localisation moyenne des estimations de Vemco Positionning System (VPS) d'un émetteur fixe déployé à plusieurs endroits dans un réseau de récepteurs était de 2,64 ± 2,32 m, alors que Guzzo et al. (2018) ont constaté que les estimations de la précision des positions HR-VPS pour tous les essais stationnaires étaient de 5,6 m, et Biesinger et al. (2013) ont démontré une précision de positionnement d'environ 2 m. Cette précision améliorée pourrait être expliquée par (i) le positionnement du récepteur au centimètre près en utilisant un théodolite pour les coordonnées x et y, et en utilisant un décamètre pour z, et par (ii) la mesure en temps réel de température de l'eau pour corriger en permanence la vitesse du son dans l'eau au moment exact de la réception du signal acoustique. Cela a été possible en utilisant le capteur de température interne inclus dans les récepteurs Thelma.

La précision de la méthode de détermination des positions utilisées dans cette étude était suffisamment bonne pour permettre une analyse à petite échelle des mouvements, comme l'exige le contexte actuel de migration d'avalaison de l'anguille argentée dans la retenue AEP du Bois Joli.

4.4.3 Comportements lors des tentatives d'évasion

Peu d'études ont analysé le comportement des anguilles devant un barrage. Par exemple, Brown, Haro et Boubée (2007) ont utilisé une méthode de télémétrie 3D pour suivre 21 anguilles argentées devant franchir une centrale hydroélectrique au cours de leur migration d'avalaison. Dans cette étude, les auteurs ont montré que les anguilles *Anguilla dieffenbachia* et les anguilles *A. australis* migraient principalement de nuit, et que la majorité des anguilles entrait dans le réservoir situé au centre du chenal. Le temps de séjour dans le réservoir variait de quelques minutes à dix heures. Plusieurs anguilles remontent la rivière avant de revenir et continuent leurs recherches. Les seules prises de sortie en aval dans le réservoir étaient les prises d'air des turbines. Deux types de réponses comportementales ont été observées lorsque des anguilles ont rencontré les grilles de la centrale, et ces deux types étaient spécifiques à une espèce :

- *Anguilla dieffenbachia* est soit passée directement par les grilles, soit par la prise d'eau, soit elle a refusé le passage immédiat et commencé à chercher un autre chemin de passage dans ou en amont de la zone de détection.
- *A. australis* est la seule espèce à avoir ce comportement. Cette espèce a fait beaucoup plus de tentatives pour passer en aval via les turbines, ce qui correspondait à des temps de résidence beaucoup plus longs dans le réservoir, probablement à la recherche d'autres emplacements de passage.

La présente étude sur le Frémur a permis de mettre en évidence des différences de comportement entre les anguilles ayant franchi le barrage par la conduite de pompage d'eau potable et les anguilles ayant franchi le barrage par la surverse. Il faut noter une discrimination parfaite entre ces deux groupes. Toutes les anguilles qui ont emprunté la prise d'eau se sont présentées pendant une longue période devant le barrage et leurs mouvements étaient lents avant le franchissement, avec une activité exclusivement nocturne et des zones d'exploration situées à proximité de la tour possédant les conduites de prélèvement d'eau, autour de 6 à 7 m correspondant à la profondeur de la prise d'eau au moment de la surverse. Toutes les anguilles qui sont passées par la surverse se sont présentées pendant une courte période devant le barrage et leurs mouvements étaient rapides et continus avant le franchissement, avec une activité nocturne et diurne, ainsi que des zones d'exploration préférentielles situées en rive droite du barrage. De plus, une certaine différence dans la profondeur

des détections a été observée, avec des anguilles qui sont passées par la surverse qui ont exploré plus la surface de la colonne d'eau que les autres anguilles.

Vingt anguilles d'Amérique *Anguilla rostrata* ont été suivies à l'aide de la même technologie (HTI ©) dans le Connecticut (Massachusetts, États-Unis) (Brown & Castro-Santos, 2009). Les anguilles suivies ont été détectées à toutes les profondeurs, mais la plus grande partie de leur temps près du fond, avec des mouvements verticaux occasionnels étant interprétés comme un comportement de recherche en aval. Une partie importante de ces anguilles a été détectée avant de franchir le barrage, et plusieurs fois de nouveau dans le réseau acoustique, et la majorité d'entre elles ont été détectées en train de franchir le barrage à travers les turbines.

Neuf anguilles européennes ont été marquées à l'aide d'émetteurs acoustiques (Sonotronics ©) dans la Moselle (Allemagne) (Behrmann-Godel & Eckmann, 2003). Lorsque les anguilles migrantes sont arrivées au barrage, elles ont traversé les turbines immédiatement ou sont restées en amont de la centrale pendant 8 jours, montrant un comportement circulaire : approche du trashrak, sprint en amont et finalement franchissement par les turbines.

Ce phénomène est également clairement présent dans notre étude. Le délai entre deux transmissions successives était d'environ 60 secondes, ce qui implique que le nombre de détections à proximité du barrage est une approximation du temps passé dans la zone la plus proche du barrage (< 10 m). La forte différence entre le temps passé à proximité du barrage et le temps total nécessaire au franchissement suggère également un comportement circulaire. De plus, l'analyse détaillée des trajectoires des anguilles avant le franchissement indiquait des mouvements circulaires, du centre du réservoir vers le barrage, en suivait la rive droite du bassin, pour finalement s'échapper par la surverse.

5. Conclusion

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

Premièrement, le déclenchement de la migration peut être ralenti voire annulé en atténuant l'effet des déclencheurs environnementaux observés de manière classique, comme le débit d'eau. Ce retard peut atteindre plusieurs mois, impliquant une arrivée potentielle sur le site de reproduction supposé de la mer des Sargasses après le pic moyen d'arrivée d'anguilles argentées estimé en février (Righton et al., 2016).

Deuxièmement, la présence du barrage a un réel impact négatif, augmentant le temps et la distance pour s'échapper du milieu de croissance. Ce délai, ajouté au premier, augmente d'avantage le temps d'arrivée final. L'augmentation de la distance a également un impact sur la forme physique, entraînant une réduction de la part d'énergie allouée à la migration et à la reproduction.

Troisièmement, une partie de la population n'a jamais trouvé le moyen de franchir le barrage, ce qui a entraîné une perte totale de potentiel reproducteur de cette espèce.

Quatrièmement, un effet évolutif caché serait à prendre en compte, avec la sélection possible du phénotype « audacieux », considéré comme un phénotype dangereux, très sensible à la pression humaine comme la pêche.

Enfin, une mortalité directe causée par les conduites de prélèvement d'eau, le déversoir et le piège de dévalaison peut fortement affecter la migration de l'anguille argentée.

Cette étude montre clairement que les barrages AEP limitent l'échappement des anguilles argentées. Des solutions d'aménagements pour rétablir cette continuité écologique de l'amont vers l'aval du bassin versant doivent être impérativement trouvées par les gestionnaires et les biologistes de la conservation pour la sauvegarde de cette espèce en danger critique d'extinction.

6. Bibliographie

Acou, A, Lefebvre, F., Contournet, P., Poizat, G., Panfili, J., & Crivelli, A. (2003). Silvering of Female Eels (Anguilla anguilla) in Two Sub-Populations of the Rhone Delta. *Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture*, *368*, 55–68.

Acou, A., Boury, P., Laffaille, P., Crivelli, A. J., & Feunteun, E. (2005). Towards a standardized characterization of the potentially migrating silver European eel (<I>Anguilla anguilla</I>, L.). *Archiv Für Hydrobiologie*, *164*(2), 237–255.

Acou, A., Laffaille, P., Legault, A., & Feunteun, E. (2008). Migration pattern of silver eel (Anguilla anguilla, L.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish*, *17*(3), 432–442.

Acou, a., & Gabriel, G. (2009). Differential production and condition indices of premigrant eels in two small Atlantic coastal catchments of France. *Eels at the Edge: …*, *33*(0), 250–281.

Acou A., Boury P., Boisneau C., Bodin M., Feunteun E., (2010). Estimation du potentiel reproducteur en anguilles argentées de la Loire amont : saisons de migration 2001-05 à 2008- 09. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, CRESCO, Dinard. 40 p

Acou A., Boisneau C., Bodin M., Bultel E., Boury P et Feunteun E, 2015. Evaluation du flux annuel d'anguilles argentées produit en Loire fluviale (amont d'Ancenis) pour 6 saisons d'avalaison (de 2001/02 à 2004/05, 2008/09 et 2012/13) et étude du comportement d'avalaison jusqu'à l'estuaire par télémétrie acoustique (saison 2011/12). Rapport final. Station Marine de Dinard. Muséum National d'Histoire Naturelle

Adam G. et Elie P., (1994). Mise en évidence des déplacements d'anguilles sédentaires (*Anguilla anguilla* L.) en relation avec le cycle lunaire dans le lac de Grand-Lieu (Loire-Atlantique). Bull. Fr. Pêche Piscic. (1994) 335 : 123-132.

Adam G., (1997). L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) : dynamique de la sous-population du lac de Grand-Lieu en relation avec les facteurs environnementaux et anthropiques. Université Paul Sabatier, Toulouse II, spécialité hydrobiologie, thèse de doctorat, 353 p.

Adam G., Feunteun E., Prouzet P., Rigaud C., coordinateurs, (2008). L'anguille européenne. Indicateurs d'abondance et de colonisation. Quae Editions. 393 p.

Allendorf, F. W., & Luikart, G. (2009). *Conservation and the genetics of populations*. John Wiley & Sons.

Behrmann-Godel, J., & Eckmann, R. (2003). A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish*, *12*, 196–202.

Berge, J., Biondi, A., Machi, P., Brunel, H., Pierot, L., Gabrillargues, J., ... & Bonafé, A. (2012). Flow-diverter silk stent for the treatment of intracranial aneurysms: 1-year follow-up in a multicenter study. *American Journal of Neuroradiology*, *33*(6), 1150-1155.

Besson, M. L., Trancart, T., Acou, A., Charrier, F., Mazel, V., Legault, A., & Feunteun, E. (2016). Disrupted downstream migration behaviour of European silver eels (Anguilla anguilla, L.) in an obstructed river. *Environmental Biology of Fishes*, *99*(10), 779–791. https://doi.org/10.1007/s10641-016-0522-9

Biesinger, Z., Bolker, B. M., Marcinek, D., Grothues, T. M., Dobarro, J. A., & Lindberg, W. J. (2013). Testing an autonomous acoustic telemetry positioning system for fine-scale space use in marine animals. *Journal of experimental marine biology and ecology*, *448*, 46-56.

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.

Boubée, J. A. T., & Williams, E. K. (2006). Downstream passage of silver eels at a small hydroelectric facility. *Fisheries Management and Ecology*, *13*, 165–176.

Brown, L., Haro, A. L. E. X., & Castro-Santos, T. H. E. O. D. O. R. E. (2009). Three-dimensional movement of silver-phase American eels in the forebay of a small hydroelectric facility. In *American Fisheries Society Symposium* (Vol. 58, pp. 277-291).

Burnet, A. M. R. (1969). The growth of New Zealand freshwater eels in three Canterbury streams. *New Zealand journal of marine and freshwater research*, *3*(3), 376-384.

Buston M, Elith J, (2011). Determinants of reproductive success in dominant pairs of clownfish: a boosted regression tree analysis

Caudill, C. C., Daigle, W. R., Keefer, M. L., Boggs, C. T., Jepson, M. A., Burke, B. J., … Peery, C. A. (2007). Slow dam passage in adult Columbia River salmonids associated with unsuccessful migration: delayed negative effects of passage obstacles or condition-dependent mortality? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *64*(7), 979–995.

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.

Charrier F, Mazel V, Caraguel J-M, Abdallah Y, Le Gurun LL, Legault A, Laffaille P. 2012. Escapement of silver-phase European eels, Anguilla anguilla, determined from fishing activities in a Mediterranean lagoon (Or, France) ICES J. Mar. Sci. 69(1): 30-33

Charrier F., Le Gurun L., Abdallah Y., Legault A., Caraguel J.-M., Blanck A., LebeL I., (2010). Contribution à l'amélioration des connaissances et à la gestion de l'Anguille

européenne, Anguilla anguilla, dans les lagunes méditerranéennes - Cas de l'Etang de l'Or. Rapport CEPRALMAR. Groupement MRM/FISH PASS. 135 p.

Charrier F., Mazel V., Caraguel J.M., Abdallah Y., Le Gurun L., Legault A., Lafaille P., (2011) Escapement of silver-phase European eels, Anguilla anguilla, determined from fishing activities in a Mediterranean lagoon (Or, France)

Charrier F., Mazel V., Bonnaire, F., & Legault A., 2017. Suivi des migrations d'anguilles et évaluation des stocks en place sur le Frémur. Rapport Fish-Pass. 139p

Charrier F., Mazel V., Bonnaire, F., & Legault A., 2018. Suivi des migrations d'anguilles et évaluation des stocks en place sur le Frémur. Rapport Fish-Pass. 142p

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.

Danet V., Mazel V., Berthelot Y, Clairbaux M., Acou A., Charrier F., Trancart T., Feunteun E., (2018). Echappement des anguilles argentées du lac de Grand Lieu pour la saison d'avalaison 2016/2017. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, Station marine de Dinard/CRESCO, 181 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.

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., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., … Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, *29*, 129–151.

Elith J., Leathwwick J.R., Hastie T., (2008). A working guide to boosted regression trees

Espinoza, M., Farrugia, T. J., Webber, D. M., Smith, F., & Lowe, C. G. (2011). Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals. *Fisheries Research*, *108*(2-3), 364-371.

Feunteun, E., Acou, A., Laffaille, P., & Legault, A. (2000). European eel (*Anguilla anguilla*): prediction of spawner escapement from continental population parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *57*, 1627–1635.

Feunteun, E. (2002). Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): An impossible bargain. *Ecological Engineering*, *18*(5), 575–591.

Feunteun, E., Acou, A., Guillouët, J., Laffaille, P., & Legault, A. (1998). Spatial distribution of

an eel population (Anguilla anguilla L.) in a small coastal catchment of northern Brittany (France). Consequences of hydraulic works. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, (349), 129–139.

Girard P. et Elie P., (2007). Manuel d'identification des principales lésions anatomo-morphologiques et des principaux parasites externes des anguilles. CEMAGREF / Asso. « Santé Poissons Sauvages ». Etude Cemagref n°110. Groupement de Bordeaux. 81 p.

Gustafsson, F., & Gunnarsson, F. (2003, April). Positioning using time-difference of arrival measurements. In *2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings.(ICASSP'03).* (Vol. 6, pp. VI-553). IEEE.

Haro A 2003. Downstream Migration of Silver-Phase Anguillid Eels. In Aida, K., K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Eds). Eel Biology, Springer Verlag (Tokyo), 215-222.

Hedger, R. D., Martin, F., Dodson, J. J., Hatin, D., Caron, F., & Whoriskey, F. G. (2008). The optimized interpolation of fish positions and speeds in an array of fixed acoustic receivers. *ICES Journal of Marine Science*, *65*(7), 1248-1259.

Hussey, N. E., Kessel, S. T., Aarestrup, K., Cooke, S. J., Cowley, P. D., Fisk, A. T., ... & Flemming, J. E. M. (2015). Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world. *Science*, *348*(6240), 1255642.

ICES. (2018). *Report of the Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels (WGEEL)*. Kavala, Greece.

Legault, A., Acou, A., & Feunteun, J. G. E. T. E. (2003). Suivi de la migration d'avalaison des anguilles par une conduite de débit réservé. Discharge pipe on a reservoir dam, 43-54.

Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *89*(10), 93-94.

Leo, G. D., & Gatto, M. (1995). A size and age-structured model of the European eel (Anguilla anguilla L.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *52*(7), 1351-1367.

Mazel V., Danet V., Acou A., Charrier F., Simon D., Trancart T., Feunteun E., (2016). Echappement des anguilles argentées du lac de Grand Lieu pour la saison d'avalaison 2015/2016. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, Station marine de Dinard/CRESCO, 181 p.

Okamura, A., Yamada, Y., Mikawa, N., Tanaka, S., & Oka, H. P. (2002). Exotic silver eels Anguilla anguilla in Japanese waters: seaward migration and environmental factors. *Aquatic Living Resources*, *15*(6), 335-341.

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.

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.

Tesch F.W., (1977). The eel. Biology and Management of Anguillid eels. Londres. Chapman and Hal. 434 p.

Trancart, T. (2011). Analyse comparative des tactiques déployées lors de la migration de colonisation des bassins versants par les poissons migrateurs amphihalins thalassotoques (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).

Trancart, T., Acou, A., De Oliveira, E. & Feunteun, E. (2013) Forecasting animal migration using SARIMAX: an efficient means of reducing silver eel mortality caused by turbines. *Endangered Species Research*, **21**, 181–190.

Trancart, T., Feunteun, E., Danet, V., Carpentier, A., Mazel, V., Charrier, F., Acou, A. (2017). Migration behaviour and escapement of European silver eels from a large lake and wetland system subject to water level management (Grand-Lieu Lake, France): New insights from regulated acoustic telemetry data. *Ecology of Freshwater Fish*, (June)

Winter, J.D., 1996. Underwater biotelemetry, in: L. A. Nielsen, and D.L.J. (Ed.), Fisheries Techniques. American fisheries Society, Bethesda, MD., pp. 555–590.

7. Annexes

Annexe 1: Méthode TDOA

Step 1: Database synchronization and drift removal

Prior to analysis, it is necessary to synchronize the data from each receiver to the nearest millisecond from each other and also to correct the mechanical drift in the internal clock (that is systematically observed for each receiver). These two biases were corrected using synchronization tags located in the centre of the reservoir (Figure 2), at a position 5 cm below a receiver (hereafter referred to as the reference receiver (RR). This tag was set up to emit regularly, to the nearest millisecond, every 600.000 seconds. Each synchronization acoustic signal was individually identified (# of the sync signal; Figure 3). These two elements provided the theoretical emission time (TET, in milliseconds) (Figure 3). Given that sound velocity in water is temperature-dependent, temperature recorded by the RR for each TET was used for the real-time correction of sound velocity.

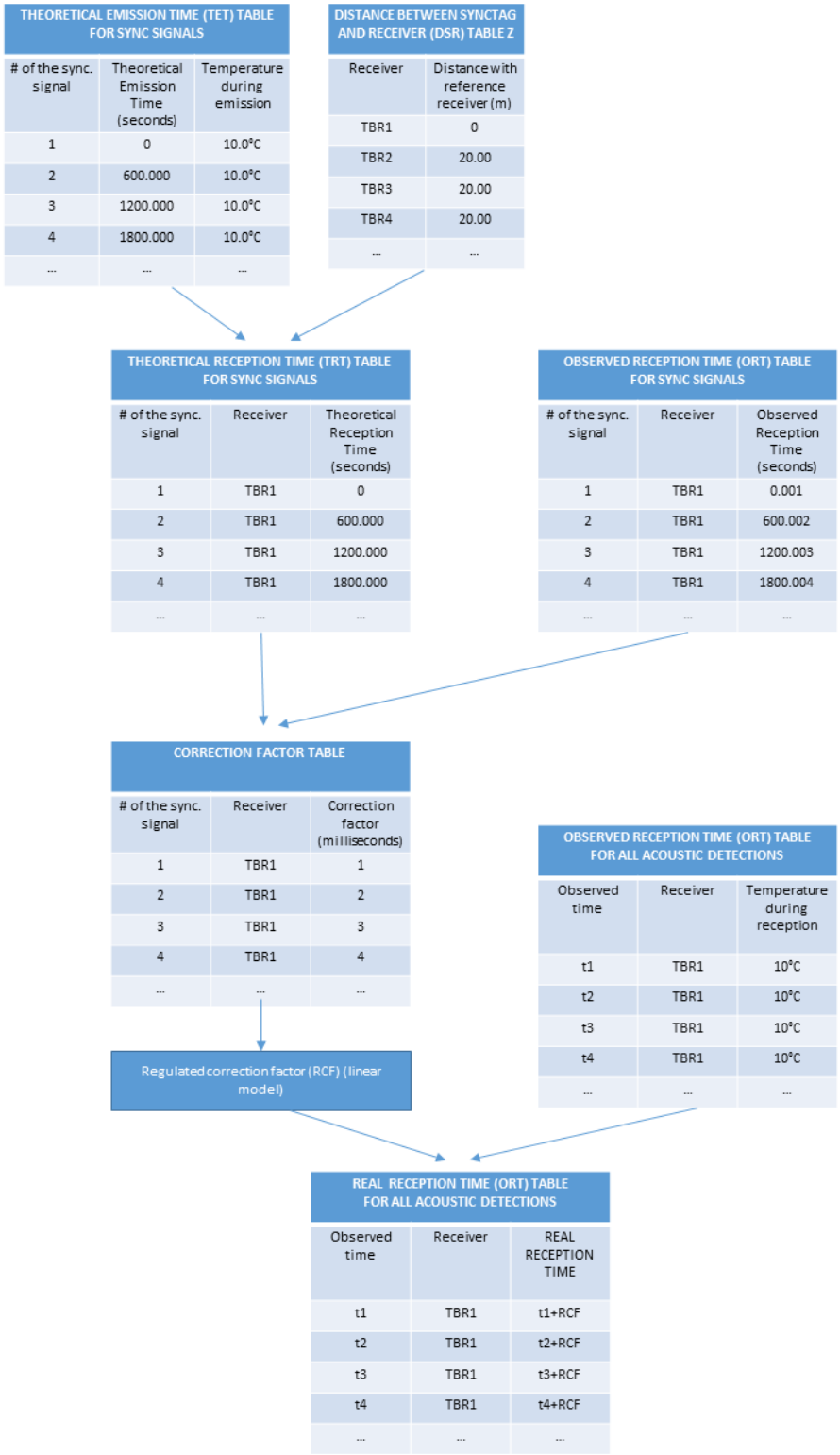


Figure 32 : Diagram illustrating the synchronization process. The number of digits after a number indicates the accuracy

Distances between the ST and each acoustic receiver were calculated to the nearest centimetre.

From the TET and DSR tables, the theoretical reception time (TRT) was calculated for each synchronization signal and each receiver. The TRT is defined as follows:

Equation 1:

$$TRT = TET + t(RR - receiver)_{Temp}$$

where t(RR-receiver)Temp is the time taken for a signal to travel from the RR to a given receiver at a particular water temperature. The time taken for the signal to travel to the given receiver is calculated as follows:

Equation 2 :

$$t(RR - receiver)_{Temp} = \frac{d(RR - receiver)}{v_{Temp}}$$

where d(RR- receiver) is the distance between the RR and a given receiver, and v is the sound velocity in water. The velocity of the sound in water was calculated as follows:

Equation 3:

$$v_{Temp} = 1449.2 + 4.6 \times Temp - 0.055 \times Temp^2 + 0.00029 \times Temp^3 + (1.34 - 0.010\, x\, Temp) \times (S - 35) + 0.016 \times z$$

where z is the depth and Temp is the temperature. Z is the mean value between the depth of the RR and the depth of each receiver for each synchronization signal. Temp is the mean between the temperature close to the RR and the temperature close to each receiver for each synchronization signal. For each synchronization signal (identified according to the consistency between # of the sync. signal in the TRT Table and # of the sync. signal in the ORT Table), the difference between TRT and the observed reception time (ORT) (i.e. the recording downloaded from receivers) was calculated (Figure 3). This value was the correction factor (only for sync. signals).

For all acoustic detection values in the ORT Table, it is necessary to interpolate the correction factors. The correction for the actual signals (that is not a synchronization signal) is calculated based on a linear regression using the correction factors corresponding to the two closest synchronization signals. The reception time was modified according to these correction factors to yield the real reception time, without drift and with perfect synchronization (Figure 3).

Multilateration

The synchronized database was used to determine accurate locations using the multilateration technique, as described by Andersen (2011). Multilateration is a technique that uses multiple omnidirectional sensors in order to isolate the unknown position of a signal in two- or three-dimensional Euclidian space. In the present method, this technique was used only for

horizontal positioning, X and Y (longitude and latitude). The signal from an emitter is registered by all receivers, as the signal wave expands spherically in all directions with constant propagation speed. The time difference when two receivers register the signal event is called the time difference of arrival (TDOA) (Andersen, 2011)). On the basis of TDOA and the location of each registration, i.e. sensor positions, it is possible to deduce the location of the signal emitter through a set of hyperbolic equations described by pairwise TDOA at four hydrophones. The linear predictor function for a pairwise hydrophone Hn and Hm is defined for each i detection as follows:

Equation 4 :

$$\mu TDOA(Hn, Hm, t(i)) = \frac{\left(\left(x_{Hn} - x(t(i))\right)^2 + \left(y_{Hn} - y(t(i))\right)^2\right)^{0.5} - \left(\left(x_{Hm} - x(t(i))\right)^2 + \left(y_{Hm} - y(t(i))\right)^2\right)^{0.5}}{v}$$

where x and yHm/Hn are the hydrophone positions, x and yt(i) are the estimated position of the tag at time t for detection I, and v is the sound velocity as determined from Equation 3.

To solve this equation system, we used an R version of the Matlab “mldivide” function.

Filtering

Having determined locations, all the estimations that were not located in the study site were removed.

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

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

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

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

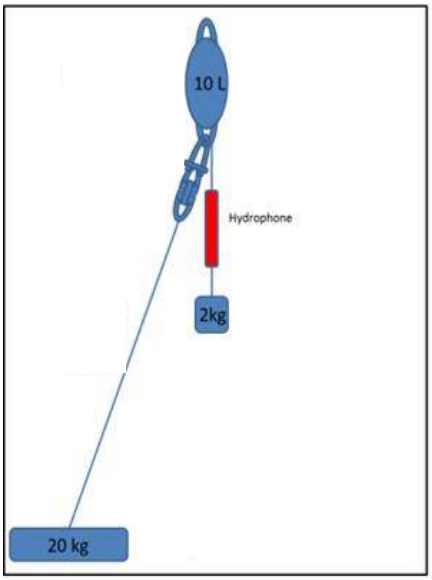
Annexe 4 : Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques installés (hydrophones THELMA)

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

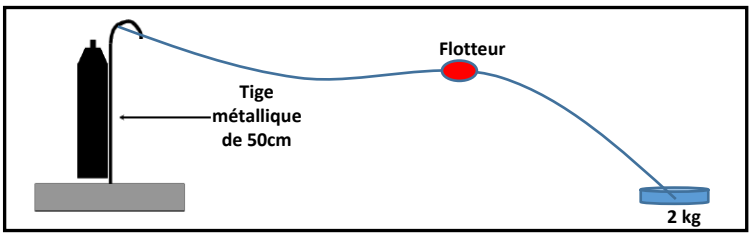
Annexe 5 : Dates des marquages et nombre d'anguilles argentées marquées

Date du marquage	Nombre d'anguilles marquées
26 Septembre 2017	1
29 Septembre 2017	1
20 Octobre 2017	1
13 Novembre 2017	1
24 Novembre 2017	1
28 Novembre 2017	4
01 Décembre 2017	2
08 Décembre 2017	1
15 Décembre 2017	1
18 Décembre 2017	1
21 Décembre 2017	1
09 Janvier 2018	1

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



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



- Système furtif utilisé en aval de Pont Avet

Annexe 7 : Illustrations

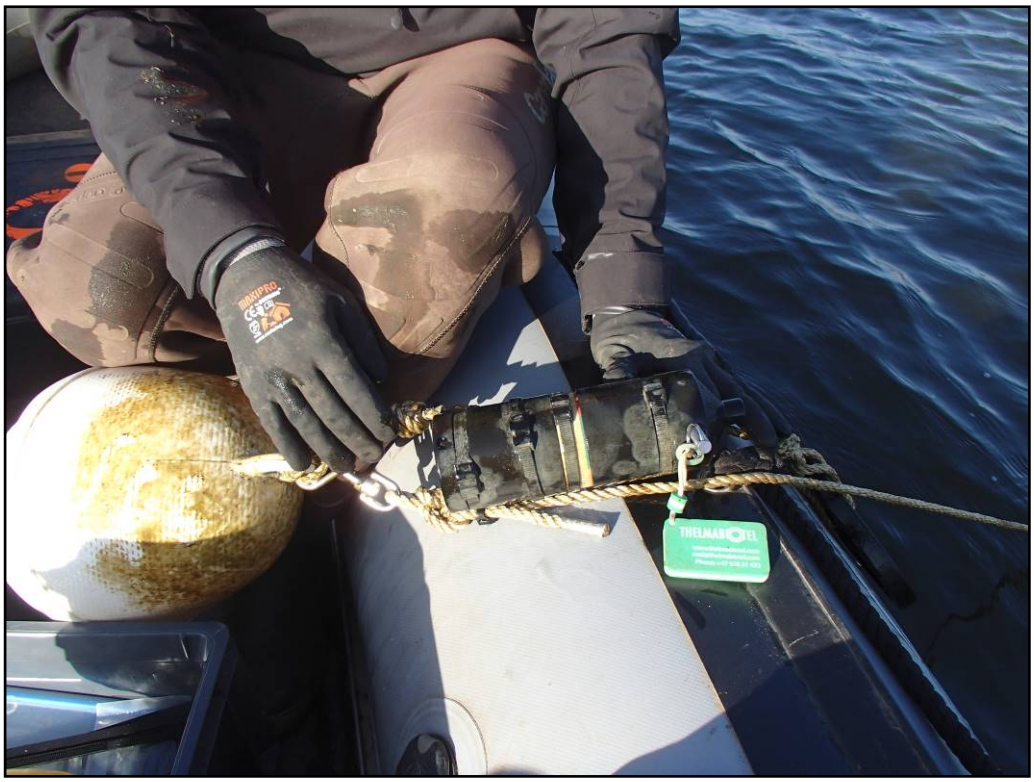


Figure 33 : Relève des données d'un hydrophone Thelma sur le Bois Joli

Figure 34 : Relève des données d'un capteur accéléromètre sur le Bois Joli

Figure 35 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli

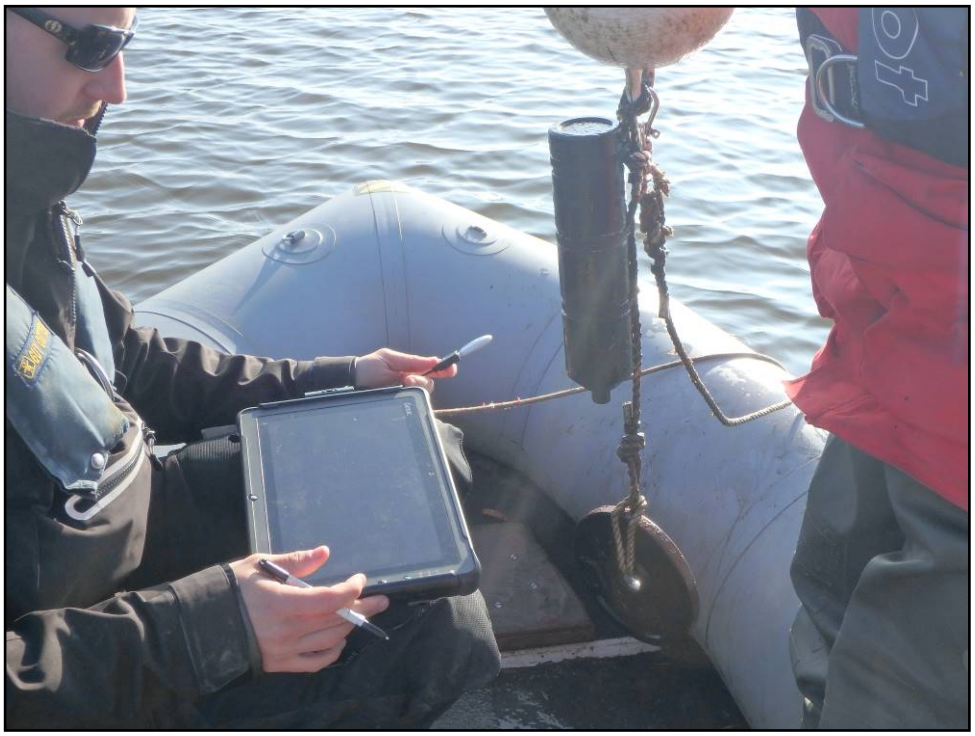


Figure 36 : Relève des données d'un hydrophone Vemco sur le Bois Joli