



HAL
open science

Mise au point d'une méthode de quantification des anguilles en milieu profond

Sabine Allou, Pablo Rault, Anne Tréguier, Frédéric Marchand, Didier Azam,
Laurent Beaulaton

► **To cite this version:**

Sabine Allou, Pablo Rault, Anne Tréguier, Frédéric Marchand, Didier Azam, et al.. Mise au point d'une méthode de quantification des anguilles en milieu profond. [Rapport de recherche] AFB; INRA. 2018. hal-03138182

HAL Id: hal-03138182

<https://hal.science/hal-03138182>

Submitted on 11 Feb 2021

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

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

Mise au point d'une méthode de quantification des anguilles en milieu profond

Rapport final
INRA_2017_016_04

**Sabine ALLOU, Pablo RAULT, Anne TREGUIER, Frédéric
MARCHAND, Didier AZAM, Laurent BEAULATON**

*U3E, INRA, 65 rue de Saint Briec, CS, 35042 Rennes Cedex
Pôle Gest'Aqua AFB-INRA, 65 rue de Saint Briec, CS, 35042 Rennes
Cedex*

Décembre 2018

• AUTEURS

Sabine ALLOU, ingénieur de recherche (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), sabine.allou@inra.fr

Pablo RAULT, assistant ingénieur (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB -INRA) pablo.rault@inra.fr

Anne TREGUIER, ingénieur de recherche (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB -INRA)

Frédéric MARCHAND, ingénieur d'étude / directeur adjoint de l'U3E (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB -INRA), frederic.marchand@inra.fr

Didier AZAM, ingénieur de recherche / directeur de l'U3E (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB -INRA), didier.azam@inra.fr

Laurent BEAULATON, chef du pôle Gest'Aqua (AFB DREC / Pôle Gest'Aqua AFB - INRA), Laurent.Beaulaton@Afbiodiversite.fr

• CONTRIBUTEURS

Agence française pour la biodiversité :

Richard DELANOE, technicien (AFB / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), richard.delanoe@afbiodiversite.fr

U3E INRA Rennes :

Julien TREMBLAY, technicien (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), julien.tremblay@inra.fr

Jean-Pierre DESTOUCHES, technicien (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), jean-pierre.destouches@inra.fr

UMR ESE INRA Rennes :

Marie NEVOUX, chargée de recherche (INRA ESE / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), marie.nevoux@inra.fr

EPTB Vilaine :

Cédric BRIAND Cedric.Briand@eptb-vilaine.fr pôle Milieu et Animation Bassin,

Brice SAUVAGET Brice.Sauvaget@eptb-vilaine.fr technicien « Poissons Migrateurs »

Gérard ERIAU gerard.eriau@eptb-vilaine.fr technicien « Poissons Migrateurs »

• CORRESPONDANTS

Sabine ALLOU, ingénieur de recherche (INRA U3E / Pôle Gest'Aqua AFB-INRA), sabine.allou@inra.fr

Laurent BEAULATON, directeur du pôle Gest'Aqua (AFB DREC / Pôle Gest'Aqua AFB - INRA), Laurent.Beaulaton@Afbiodiversite.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France, Normandie, Manche, Oir

Niveau de lecture : Initié

• RESUME

Cette étude vise à mettre au point un protocole fiable permettant de quantifier les densités d'anguilles en milieux profonds (>70 cm). Cela permettrait notamment d'améliorer le modèle EDA en fournissant des données de densité (et non uniquement des indices d'abondance) en milieux profonds. En effet, pour échantillonner l'anguille, trois méthodes sont principalement utilisées : les opérations de pêche électrique (en milieux peu profonds <70 cm) ; les dispositifs de franchissement (qui capturent les individus en migration) et les engins passifs. Ces derniers sont utilisables en milieux profonds et permettent d'échantillonner le stock d'anguilles jaune en place. En revanche, ils sont dépendants de l'activité quotidienne des anguilles et sont très diversifiés donc peu standardisés.

Pour mettre au point un protocole fiable permettant de quantifier les densités d'anguilles en milieux profonds, différents tests en milieux naturels (l'Oir, la Vilaine) et en milieux contrôlés (plateforme expérimentale PEARL Rennes-Le Rheu). Les expérimentations en milieux contrôlés portaient sur les points clés du protocole d'échantillonnage : l'anesthésie, le marquage et le choix des engins par rapport à la sélectivité et l'efficacité de capture. Ces expérimentations ont permis d'ajuster le protocole d'échantillonnage et de fiabiliser les résultats obtenus.

Sur l'Oir, un affluent de la Sélune, des protocoles utilisant divers engins de pêche passifs ont été testés: verveux, nasses avec ou sans entonnoirs et avec ou sans appâts. L'usage d'une bourgne (type de nasse) modifiée avec un bec PVC a été retenu, car elle présente une efficacité de capture correcte et homogène, et son utilisation est plus aisée que celle des verveux et des grandes nasses. Par ailleurs, pour mieux comprendre le comportement et le déplacement des poissons afin d'évaluer l'efficacité des engins passifs de piégeage, 559 anguilles de plus de 20 cm ont été identifiées à l'aide de PIT Tags. Les suivis ont été réalisés avec l'utilisation d'engins passifs, mais aussi d'antennes RFID fixes et mobiles et de pêches électriques. L'analyse des données de capture-marquage-recapture (CMR) a permis de mettre au point des modèles pour quantifier l'utilisation de l'espace par les anguilles et estimer la taille de la population qui occupe le site (modèle multi-événement/modèle POPAN). Cette approche a souligné l'intérêt d'intégrer les données de télémétrie pour diminuer l'incertitude autour des estimations. Enfin, cela a mis en évidence que l'effort de marquage du protocole actuel n'est pas assez efficace. Dans les milieux étudiés, les bourgues (nasses), même optimisées pour la capture d'anguilles jaunes, ont des efficacités de capture limitées. Il en résulte une mauvaise estimation de la taille de la population par les modèles CMR, dépendants du nombre d'individus initialement marqués. La contrainte d'un marquage important des individus, imposée par cette méthode, la rend pour l'instant inopérante pour des suivis de routine. Il pourrait s'avérer intéressant de continuer à rechercher des moyens de capture adaptés à l'anguille et sa faible détectabilité pour améliorer cette base de protocole. De plus, les techniques récentes utilisant les approches Bayésiennes de CMR, plus fastidieuse et moins intuitives, semblerait être une solution pour intégrer des données de télémétrie RFID pour une estimation non biaisée de la densité d'anguilles sur notre secteur d'étude.

Sur la Vilaine, un protocole adapté du dispositif expérimental développé par Ubl & Dorow (2015) a été expérimenté, en partenariat avec l'EPTB de la Vilaine. Cette technique, adaptée aux eaux côtières et aux lacs, semble appropriée pour évaluer la densité d'anguilles dans les eaux profondes de nos rivières de grande étendue. Cependant, sa mise en œuvre est très complexe et coûteuse. De plus, malgré un balisage conséquent du site, plusieurs bateaux sont entrés dans la zone, dégradant le matériel et remettant en cause l'expérimentation. Une phase d'expérimentation plus poussée serait nécessaire pour valider l'imperméabilité de l'enclos aux anguilles.

Ce projet présente une nouvelle approche de la recherche de connaissance sur les anguilles dans les eaux continentales par le suivi intensif de plus de 550 anguilles marquées PIT-tag sur 3 années. Malgré le travail effectué pour d'explorer le potentiel des engins passifs comme méthode d'évaluation de l'abondance de l'anguille dans différents milieux profonds, cette fiche-action n'a pas mené à un protocole abouti. Néanmoins, des progrès ont été réalisés, des expérimentations complémentaires sont envisagées et une grande partie des données récoltées n'a pas ou peu été exploitée pour l'instant, laissant entrevoir de nombreuses pistes de recherche.

• MOTS CLES

Anguilla anguilla, milieux profonds, engins de pêche, antennes RFID, capture-marquage-recapture, Oir, PEARL, Vilaine

• SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

En réponse à la forte diminution du stock d'Anguille européenne (*Anguilla anguilla*) depuis plusieurs décennies, l'union européenne a adopté le règlement (CE) N°1100/2007, dit règlement anguille, avec pour objectif la reconstitution du stock de l'espèce. A ce titre, chaque État Membre doit évaluer les stocks d'anguilles s'échappant de son territoire, conformément aux Plans de Gestion Anguilles (PGA) nationaux.

Le PGA français, approuvé en février 2010, présente notamment l'évaluation de ses stocks d'anguilles à travers un modèle de prédiction nommé Eel Density Analysis (EDA). Plusieurs ajustements ont fait évoluer le modèle depuis sa version EDA 1.3 présentée dans le PGA, jusqu'au modèle le plus récent EDA 2.2. Cette dernière version, limite particulièrement l'incertitude de l'état de la population d'anguilles argentées en milieux profonds. Pour les anguilles jaunes, le modèle se base sur les données collectées sur le terrain, actuellement obtenues par pêche électrique. Cependant, la pêche électrique ne permet pas d'acquérir des données quantitatives sur les populations d'anguilles dans les milieux aquatiques considérés comme « profonds », dépassant 70 centimètres de profondeur. Or, ces milieux profonds constituent une large gamme d'habitats, très fréquentés par l'anguille.

Cette étude étalée sur trois années a eu pour objectif de mieux connaître les anguilles de ces milieux et de mettre au point un protocole de quantification des populations d'anguilles adapté aux milieux profonds. Un protocole de quantification basé sur la méthode de capture – marquage – recapture (CMR) a fait appel à des engins passifs de capture optimisés spécialement pour l'anguille jaune ainsi qu'à la technologie d'identification par radiofréquence (RFID), apportant des informations complémentaires sur les individus marqués. La mise au point de cette méthode a fait appel à plusieurs expérimentations sur différents sites d'essai. Le principal site d'étude en milieu naturel est une rivière courante d'environ un mètre de profondeur située en Basse Normandie.

Par ailleurs, un protocole de quantification à l'aide d'un enclos a été testé sur la Vilaine.

Démarrée en 2015, cette action a permis une première mise en œuvre d'expérimentations en milieu naturel au cours de l'année, dont les méthodes et résultats sont présentés dans le premier rapport d'avancement. Un second rapport d'étape présente les avancées réalisées en 2016, deuxième année de recherche. Il s'articule autour de différents protocoles mis en œuvre en milieux naturels et en milieux contrôlés. Le présent rapport final inclut les résultats des différentes expérimentations menées lors des trois années 2015-2017, ainsi que les analyses de données et les pistes de recherche permettant de se rapprocher d'un protocole de quantification des anguilles en milieux profonds.

L'action visait donc à mettre au point un protocole de quantification des anguilles en milieu profond. La pêche électrique y étant inopérante, il était nécessaire de mettre au point une méthode d'échantillonnage par CMR.

L'ensemble des engins passifs de capture pouvant être utilisés en milieux profonds a été passé en revue. Les engins les plus adaptés aux caractéristiques de l'anguille (verveux, nasses et bourgnes) ont été retenus et testés. La capacité de rétention de chacun de ces engins a été caractérisée en milieu contrôlé. Pour obtenir une bonne rétention des anguilles jaunes, le maillage des bourgnes de 6 mm est optimal et limite l'échappement par le vide de maille. Afin de limiter la sortie des anguilles par l'entrée de l'engin, plusieurs types de modifications ont été réalisées sur l'entonnoir central de la bourgne et testées. Un entonnoir central modifié avec un filet fermé par élastique ou par un bec PVC permet d'éviter presque totalement l'échappement par le franchissement de ces entonnoirs.

Des campagnes d'échantillonnages ont été menées en milieu naturel, dans des rigoles expérimentales et sur la rivière Oir. Ces échantillonnages ont permis de décrire l'efficacité de capture de chaque engin et sa facilité d'utilisation. Ils ont également permis une première description de la population d'anguilles, en terme de biométrie et de comportement. L'effort d'échantillonnage nécessaire pour l'anguille a ainsi pu être calibré sur chaque type d'engin passif. L'effet de l'appâtage a également été testé, sans montrer d'effet significatif sur l'efficacité de capture des anguilles. Il a donc été abandonné.

Une première conclusion a été de retenir la bourgne modifiée, dite « PVC bec de canard » comme engin passif optimisé pour la capture des anguilles jaunes. Les détails de sa fabrication sont disponibles en Annexe 3. L'efficacité de capture de cette bourgne modifiée est supérieure à la bourgne standard, grâce à une capacité de rétention supérieure. L'utilisation de la bourgne est beaucoup plus aisée que les verveux et les grandes nasses. Son efficacité de capture est correcte, certes plus faible que le verveux mais est facilement compensée par un nombre d'engins plus important. Le coût réduit de cette bourgne, sa compacité et sa reproductibilité aisée en font un engin facile d'utilisation, répondant à nos besoins.

Le protocole de CMR permettant de quantifier la population d'anguilles a donc été effectué à l'aide de cet engin. La robustesse de ces données a été renforcée par un suivi télémétrique des anguilles. La télémétrie a constitué une révolution dans l'étude de la faune sauvage. Les techniques évoluent rapidement, en terme de précision et de coûts. Une étude préalable a été donc entreprise afin de déterminer le type d'équipement le plus approprié à cette expérimentation.

Le marquage par puce RFID est couramment utilisé sur les populations piscicoles. Relativement invasif, il nécessite une implantation dans l'organisme de l'animal. Cependant, il présente l'avantage de pouvoir être détecté à distance, durant toute la durée de vie de l'animal. L'anesthésie et le marquage des animaux sont donc des phases indispensables du suivi télémétrique. Cette étape permet également de récolter des données biométriques afin d'améliorer la connaissance de la population et de faciliter les suivis individuels.

Un protocole d'anesthésie a été mis en place et optimisé pour répondre à ces besoins. Un bain anesthésiant de benzocaïne à 28 mg.L⁻¹ permet de marquer l'anguille dans de bonnes conditions, en autorisant un réveil rapide. Le marqueur optimal retenu pour les anguilles est le PIT-tag de 12 mm. Cette puce RFID est insérée dans la cavité abdominale de l'anguille, à l'aide d'un pistolet injecteur. La taille limite de marquage des anguilles est de 20 cm, afin que le PIT-tag n'excède pas 2% du poids de l'animal. Pour cette gamme de taille, le taux de survie est supérieur à 95%.

Afin de suivre la population d'anguille, un site de test comprenant 5 secteurs a permis de calibrer l'effort d'échantillonnage nécessaire avec les engins passifs de capture durant plusieurs mois et de tester la télémétrie. Le réseau d'antennes de détection fixes déployé le long de la rivière Oir comprend 9 unités. Le protocole de montage et d'installation est décrit, et comprend l'installation d'un Tag-tracker sur chaque antenne. Ce tracker permet d'estimer l'efficacité de détection de chaque antenne, sachant qu'elles ne détectent que les individus en mouvement, qui passent dans le cadre de l'antenne. Afin de compléter ce réseau, une antenne de détection mobile a permis de parcourir périodiquement l'ensemble des sites et de détecter les individus peu mobiles. L'efficacité de détection de cette antenne mobile est également connue à l'aide de PIT-tags balises déposés au fond de la rivière dans chaque secteur.

L'ampleur de cette étude, tant sur le nombre d'anguilles marquées que sur la durée du suivi, quasiment en continu grâce à l'utilisation des antennes fixes, est une approche qui a été peu utilisée jusque-là.

Le couplage de la capture et de la RFID a permis de marquer individuellement un grand nombre d'individus et de multiplier les moyens de les suivre au cours du temps. Des modèles CMR peuvent alors estimer certains paramètres démographiques en tenant compte de la probabilité de détection des individus.

Un premier type de modèle, multi-état multi-événement, a été développé sous E-SURGE afin de mieux connaître le comportement des anguilles dans le système. On observe ainsi qu'à court terme, les anguilles ont peu de chance de quitter le système, par mort ou émigration définitive. Par contre, elles ont une forte probabilité de se déplacer hors d'un secteur de 50m. L'hypothèse d'une population ouverte est ainsi préférée. Il est supposé, qu'entre chaque occasion, le recrutement et la mortalité des anguilles soient négligeables mais que des phénomènes de migrations dans et hors du système soient possibles, principalement due à une prospection alimentaire autour de leur habitat refuge. D'autre part, un test d'ajustement sous U-CARE a mis en évidence une hétérogénéité individuelle dans le comportement des anguilles face aux méthodes de détection, confirmée par des estimations différentes de la probabilité de détection avec le modèle multi-événement. Ce comportement peut entraîner des biais dans les estimations des paramètres démographiques mais cet impact peut toutefois être modéré par l'élaboration de modèles appropriés.

A cause des hypothèses nécessaires à la construction des modèles de population, il ne semblerait pas exister, à notre connaissance, de modèle préétabli qui conviendrait pour l'exploitation de nos données. Une première étape a alors été de tester un modèle simpliste, utilisant seulement les données de capture et de comparer l'estimation de densité obtenue aux estimations faites lors de deux opérations de pêche électrique effectuées sur le même secteur. Le modèle POPAN retenu permet de paramétrer le modèle d'estimation de la taille de population Jolly-Seber en population ouverte à l'aide du logiciel MARK. L'abondance sur le site test est estimée à 390 anguilles [Intervalle de confiance à 95% : 358 – 447]. Dans un second temps, les données utilisées dans le modèle de population ont été dégradées afin de simuler la réalisation du protocole dans des conditions simplifiées d'utilisation (quatre semaines de piégeage, sans événement de marquage au préalable). L'estimation de la taille de la population est cette fois largement sous-estimée avec seulement 108 anguilles [IC 95% : 99 – 130]. Cette sous-estimation est principalement due à une probabilité de capture trop faible (seulement 2%) et donc un nombre d'individus marqués trop faible pendant les 4 semaines de protocoles.

En comparaison à cette méthode d'estimation, deux sessions de pêche électrique ont été réalisées sur le même secteur, l'une réalisée dans les conditions optimales d'une pêche complète et l'autre s'est déroulée avec une hauteur d'eau bien supérieure à 70cm, correspondant à un milieu profond. Pour ce même secteur, la pêche électrique réalisée en milieu profond donne une estimation de l'abondance d'anguilles significativement plus faible et semble moins réaliste comparée aux estimations du modèle de population, témoignant que la quantification des individus par pêche électrique dans ces conditions est inenvisageable.

Le modèle simple permet, dans une certaine mesure, d'obtenir les estimations souhaitées. Toutefois, l'effort de marquage du protocole tel qu'il est actuellement n'est pas assez efficace par rapport à la taille de la population. Dans les milieux étudiés, les bourgnes, même optimisées pour la capture d'anguilles jaunes, ont des efficacités limitées. Il en résulte une mauvaise estimation de la taille de la population par les modèles CMR, dépendants du nombre d'individus initialement marqués.

Les techniques récentes utilisant les approches Bayésiennes de CMR, plus fastidieuses et moins intuitives, sembleraient être une solution pour intégrer des données de télémétrie RFID pour une estimation non biaisée de la densité d'anguilles sur notre secteur d'étude.

Par ailleurs, un partenariat avec l'EPTB de la Vilaine et un pêcheur professionnel a permis de tester un protocole de quantification à l'aide d'un enclos sur la Vilaine. Ce protocole adapté aux milieux profonds de grandes étendues a déjà été appliqué sur les zones côtières ou en lac, mais son application en rivière est plus complexe. Des difficultés liées aux débits et au vent se sont rapidement relevées limitant pour le bon déroulement du protocole. La taille du dispositif expérimental et la maille fine du filet choisie pour limiter les échappements d'anguilles rend sa mise en place très complexe. La pose et la relève de l'enclos sont des opérations très délicates, susceptibles de déchirer le filet. De même, le colmatage par des poissons maillés et les débris végétaux est important et un nombre suffisant de flotteurs est nécessaire pour empêcher le filet de couler. Cela permet également de rendre le dispositif plus visible et donc plus sécurisé, d'autant plus que le site d'étude est exposé à la circulation importante des bateaux de plaisance. Cette technique, adaptée pour les eaux côtières et aux lacs, pourrait être appropriée pour évaluer la densité d'anguilles dans les eaux profondes de nos rivières de grande étendue. Cependant, sa mise en œuvre est très complexe et coûteuse et nécessiterait notamment une phase d'expérimentation plus poussée pour valider l'imperméabilité de l'enclos aux anguilles.

Ce projet présente une nouvelle approche de la recherche de connaissance sur les anguilles dans les eaux continentales par le suivi intensif de plus de 550 anguilles marquées PIT-tag sur 3 années. Malgré le travail effectué pour explorer le potentiel des engins passifs comme méthode d'évaluation de l'abondance de l'anguille dans différents milieux profonds, cette fiche-action n'a pas mené à un protocole abouti. Néanmoins, des progrès ont été réalisés, des expérimentations complémentaires sont envisagées et une grande partie des données récoltées n'a pas ou peu été exploitée pour l'instant, laissant entrevoir de nombreuses pistes de recherche (croissance, comportement ...).

• SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	12
II.	CONTEXTE GENERAL	13
II.1.	L'ANGUILLE EUROPEENNE	13
II.1.1.	<i>Le déclin de l'anguille européenne</i>	13
II.1.2.	<i>L'anguille européenne et son cycle biologique</i>	15
II.1.3.	<i>Le comportement de l'anguille jaune en eau douce</i>	16
II.2.	METHODES D'ECHANTILLONNAGE EXISTANTES ET LEURS LIMITES	18
II.2.1.	<i>Capturabilité d'un poisson</i>	18
II.2.2.	<i>La pêche électrique</i>	18
II.2.2.1.	Les principes de la pêche électrique	18
II.2.3.	<i>Les avantages et les inconvénients de la pêche à l'électricité</i>	19
II.2.4.	<i>Les dispositifs de franchissement des obstacles</i>	20
II.2.4.1.	Principes des passes à poissons	20
II.2.4.2.	Les avantages et les inconvénients des dispositifs de franchissement d'obstacles	20
II.2.5.	<i>Les engins passifs</i>	20
II.2.5.1.	Principes de la capture par engin passif	21
II.2.5.2.	Les avantages et les inconvénients des engins passifs	23
II.3.	LA TECHNOLOGIE AU SERVICE DU SUIVI PISCICOLE	24
II.3.1.	<i>La méthode de Capture-Marquage-Recapture</i>	24
II.3.2.	<i>La technologie RFID</i>	24
II.3.2.1.	Qu'est-ce que la technologie RFID ?	24
II.3.2.2.	Le PIT-tag	24
II.3.2.3.	L'interrogateur	25
II.3.2.4.	La détection des PIT-tags par l'interrogateur	26
II.3.2.5.	Les limites de la RFID	27
	ENCADRE 1 : QUANTIFICATION D'UNE POPULATION D'ANGUILLES EN MILIEU PROFOND : PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	29
III.	SITES DE L'ETUDE ET CALENDRIER	30
III.1.	L'OIR ET LA STATION DE PIEGEAGE DE CERISEL : SITE D'ETUDES EN MILIEU NATUREL	30
III.1.1.	<i>L'Oir : rivière d'expérimentation</i>	30
III.1.2.	<i>La station de piégeage de Cerisel</i>	30
III.1.3.	<i>Le site test sur l'Oir</i>	31
III.2.	LA PLATEFORME EXPERIMENTALE : SITE DES ETUDES EN MILIEUX CONTROLES	33
III.3.	LA VILAINE	34
III.4.	CALENDRIER GENERAL DES EXPERIMENTATIONS	36
IV.	TEST ET OPTIMISATION D'ENGINS PASSIFS POUR LA CAPTURE D'ANGUILLE	38
IV.1.	PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE DES ANGUILLES PAR ENGINS PASSIFS	38
IV.1.1.	<i>Les différents engins testés</i>	38
IV.1.2.	<i>Protocole de Capture – Marquage – Recapture</i>	39
IV.1.3.	<i>Calendrier détaillé des campagnes de piégeage</i>	40
IV.2.	RESULTATS GENERAL DES CAPTURES EN MILIEU NATUREL	41
IV.2.1.	<i>Effort d'échantillonnage par années et par secteurs</i>	41
IV.2.2.	<i>Résultats des captures toutes espèces</i>	42
IV.2.3.	<i>Résultats des captures anguilles</i>	43
IV.2.3.1.	Captures totales des anguilles avec les différents engins	43
IV.2.3.2.	CPUE par engin par jour	45
IV.2.3.3.	CPUE par engin par secteur	45

IV.2.4.	<i>Les recaptures d'anguilles</i>	46
IV.2.4.1.	Nombre de recapture par individu	46
IV.2.4.2.	Délais de recapture.....	47
IV.2.4.3.	Déplacements de recapture	48
IV.2.5.	<i>Biométrie des anguilles capturées</i>	48
IV.3.	COMPARAISON DES ENGINS DE CAPTURE	50
IV.3.1.	<i>Etude de la sélectivité des engins de pêche passifs</i>	50
IV.3.1.1.	Objectifs	50
IV.3.1.2.	Protocoles expérimentaux.....	50
IV.3.1.3.	Comparaison des tailles capturées en milieu naturel	52
IV.3.1.4.	Etude de l'échappement des engins de capture en milieu contrôlé.....	53
IV.3.2.	<i>Etude de l'efficacité d'engins de pêche passifs</i>	57
IV.3.2.1.	Objectifs	57
IV.3.2.2.	Protocole	57
IV.3.2.3.	Résultats de l'efficacité de capture en milieu naturel.....	58
IV.3.2.4.	Résultats de l'efficacité de capture en milieu contrôlé.....	60
IV.3.3.	<i>Etalonnage de l'effort d'échantillonnage par engins passifs</i>	61
IV.3.3.1.	Objectifs	61
IV.3.3.2.	Protocole	61
IV.3.3.3.	Effort d'échantillonnage optimal en milieu naturel.....	62
ENCADRE 2 : DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE D'ECHANTILLONNAGE PAR ENGIN PASSIF		64
V. UTILISATION DE LA RFID		65
V.1.	L'ANESTHESIE ET LE MARQUAGE PIT-TAG	65
V.1.1.	<i>L'anesthésie des anguilles à la benzocaïne</i>	65
V.1.2.	<i>Le marquage PIT-tags des anguilles</i>	66
V.2.	LES ANTENNES FIXES POUR DETECTER LES DEPLACEMENTS DES ANGUILLES	67
V.2.1.	<i>Construction et installation des antennes</i>	67
V.2.2.	<i>Mise en place d'un réseau d'antennes</i>	67
V.2.3.	<i>Fonctionnement des antennes fixes</i>	70
V.2.3.1.	Fonctionnement du réseau d'antennes : suivi du Tag-tracker	70
V.2.3.2.	Efficacité de détection : Approche à l'aide de l'antenne double	71
V.2.4.	<i>Résultats des détections par antennes fixes</i>	72
V.2.4.1.	Bilan des détections par les antennes fixes	72
V.2.4.2.	Les détections des antennes fixes par espèces.....	72
V.2.4.3.	Les détections d'anguilles par les antennes fixes	73
V.2.4.4.	Les détections d'anguilles par jours.....	73
V.2.4.5.	Les détections des anguilles par tranche horaire	74
V.2.4.6.	Les détections des anguilles par les différentes antennes.....	75
V.2.4.7.	Facteurs spatio-temporels d'influence sur l'activité de l'anguille jaune.....	75
V.2.4.8.	Les antennes fixes pour détecter les sorties du site d'étude	76
V.3.	LE SUIVI DES ANGUILLES PAR RADIOPISTAGE : LE PIT-TRACKING	77
V.3.1.	<i>Principe du PIT-tracking</i>	77
V.3.2.	<i>Fabrication de l'antenne mobile</i>	77
V.3.3.	<i>Mise en œuvre du PIT-tracking sur la zone étudiée</i>	78
V.3.4.	<i>Résultats des détections par PIT-tracking</i>	78
V.3.4.1.	Les différentes sessions de PIT-tracking.....	78
V.3.4.2.	Efficacité de détection des PIT-tags balise par l'antenne mobile	78
V.3.4.3.	Les PIT-tags détectés par antenne mobile	79
V.3.4.4.	Détections des anguilles par PIT-tracking	80
V.3.4.5.	Répartition et déplacements des anguilles.....	80
ENCADRE 3 : ASSOCIATION DE LA TECHNOLOGIE RFID A LA CAPTURE-RECAPTURE		82

VI.	ANALYSE D'UN PROTOCOLE DE COUPLAGE DES DONNEES DE CAPTURE ET RFID	83
VI.1.	PROTOCOLE DE CAPTURE-MARQUAGE-RECAPTURE ET DE SUIVI PAR RFID.....	83
VI.1.1.	<i>Apport de la RFID dans les études CMR.....</i>	83
VI.1.2.	<i>Protocole et données récoltées.....</i>	83
VI.2.	INTEGRATION DES DONNEES DE TELEMETRIE DANS UN MODELE DE CMR MULTI-ETATS MULTI-EVENEMENTS POUR L'ESTIMATION DE LA SURVIE ET DES DEPLACEMENTS	85
VI.2.1.	<i>Introduction aux modèles multi-états multi-événement</i>	85
VI.2.2.	<i>Construction du modèle multi-états, multi-événements</i>	85
VI.2.2.1.	Les hypothèses en CMR.....	85
VI.2.2.2.	Données utilisées et hypothèses spécifiques	85
VI.2.2.3.	Analyse de la qualité d'ajustement	86
VI.2.2.4.	Définition des états et des événements	87
VI.2.2.5.	Paramétrisation du modèle multi-événement	88
VI.2.3.	<i>Résultats des estimations des paramètres démographiques : survie, déplacements, probabilité de détection.....</i>	90
VI.2.3.1.	Sélection du meilleur modèle.....	90
VI.2.3.2.	Estimation de la probabilité de survie journalière.....	91
VI.2.3.3.	Estimation de la probabilité de déplacement entre les secteurs.....	92
VI.2.3.4.	Probabilité de détection selon le processus de trap-dépendance.....	93
VI.2.4.	<i>Apports du modèle multi-états multi-événements dans l'étude des anguilles en milieux profonds 93</i>	
VI.3.	ESTIMATION DE LA DENSITE A L'AIDE DES DONNEES DE CAPTURE-MARQUAGE-RECAPTURE	94
VI.3.1.	<i>Introduction aux modèles de population.....</i>	94
VI.3.2.	<i>Construction du modèle « POPulation ANALysis »</i>	96
VI.3.2.1.	Paramètres démographiques estimés par le modèle POPAN	96
VI.3.2.2.	Hypothèses du modèle POPAN.....	96
VI.3.2.3.	Données utilisées et hypothèses spécifiques	96
VI.3.2.4.	Paramétrisation du modèle POPAN	97
VI.3.2.5.	Estimation des paramètres du modèle et de la taille de la population	97
VI.3.2.6.	Estimation des paramètres du modèle et de la taille de la population	98
VI.3.3.	<i>La pêche électrique : point de repère pour l'estimation de la densité.....</i>	98
VI.3.4.	<i>Discussion</i>	100
	ENCADRE 4 : ANALYSE DES DONNEES PAR MODELISATION CMR AVEC INTEGRATION DES DONNEES DE CAPTURE ET RFID	101
VII.	PROTOCOLE DE QUANTIFICATION EN MILIEU PROFOND DE GRANDE ETENDUE.....	102
VII.1.	OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION.....	102
VII.2.	DESCRIPTION DU DISPOSITIF	102
VII.2.1.	<i>Méthode développée par Ubl et Dorow</i>	102
VII.2.2.	<i>Adaptation du dispositif</i>	102
VII.3.	MISE EN ŒUVRE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	103
VII.3.1.	<i>Protocole expérimental.....</i>	103
VII.3.2.	<i>Première campagne d'expérimentation en 2016</i>	104
VII.3.3.	<i>Deuxième campagne d'expérimentation en 2017.....</i>	104
VII.4.	RESULTATS	105
VII.4.1.	<i>Résultats de la campagne de 2016.....</i>	105
VII.4.2.	<i>Résultats de la campagne de 2017.....</i>	106
VII.5.	DISCUSSION	107
VIII.	CONCLUSION	109
IX.	GLOSSAIRE	111
X.	BIBLIOGRAPHIE	112
XI.	TABLE DES ILLUSTRATIONS	116
XII.	ANNEXES	121

- **LISTE DES ENCADRES :**

Encadré 1 : Quantification d'une population d'anguilles en milieu profond : problématique et objectifs

Encadré 2 : Développement d'une méthode d'échantillonnage par engin passif

Encadré 3 : Association de la technologie RFID à la capture-recapture

Encadré 4 : Analyse des données par modélisation CMR avec intégration des données de capture et RFID

• MISE AU POINT D'UNE METHODE DE QUANTIFICATION DES ANGUILES EN MILIEU PROFOND

I. Introduction

En réponse à la forte diminution du stock d'anguille, l'Union Européenne a adopté un règlement (1100/2007) ayant pour objectif la reconstitution de l'espèce. Ce règlement stipule que chaque état membre doit fournir une évaluation des stocks d'anguilles migrant en mer à partir de son territoire. Suite à ce règlement, la France a mis en place le Plan de Gestion Anguille (PGA) français adopté par la commission européenne en février 2010 (anonyme 2010). En France l'évaluation du stock d'anguilles se base sur un système de quelques rivières index réparties sur le territoire et dénombrant les arrivées d'anguilles, les échappements d'anguilles argentées et les données sur les anguilles jaunes capturées lors de pêches électriques soit lors des opérations pour le Réseau de Connaissances et de Surveillance (RCS) soit au sein de réseaux spécifiques anguilles. Cependant, la pêche électrique ne permet pas d'acquérir des données quantitatives sur les populations d'anguilles dans les milieux aquatiques considérés comme « profonds », dépassant 70 centimètres de profondeur. Or, ces milieux profonds constituent une large gamme d'habitats, très fréquentés par l'anguille.

Fort de ce constat, une action a été planifiée dans le cadre du PGA français, dont l'objectif était la « mise au point d'une méthode de quantification en eau profonde ». Financée par l'Agence Française de la Biodiversité, cette action a été réalisée par le pôle AFB-INRA Gest'aqua de Rennes. Le présent rapport est le bilan de cette action, et présente le compte-rendu des expérimentations et des résultats obtenus sur les trois années du projet, de 2015 à 2017. Deux rapports intermédiaires ont été rendus en février 2016 et janvier 2017, comportant plus de précisions sur les expérimentations des deux premières années. Afin de mettre au point cette méthode de quantification des populations d'anguilles en milieu profond, des expérimentations ont été menées en milieux contrôlés et sur sites naturels.

Le protocole expérimental principal fait appel à des engins de captures passifs et l'utilisation de la technologie RFID (identification par radiofréquence) et a été conçu pour des rivières de taille moyenne. Une seconde méthode d'échantillonnage spécifique aux milieux profonds estuariens ou lacustres, faisant appel à des filets, a également été testée en rivière de grande étendue.

II. Contexte général

II.1. L'anguille européenne

II.1.1. Le déclin de l'anguille européenne

L'anguille européenne, *Anguilla anguilla*, est une espèce migratrice thalassotoque. Elle partage son cycle de vie entre une phase de croissance continentale, en eau douce et une phase de reproduction océanique. Depuis plusieurs décennies, cette espèce connaît un déclin drastique dans les recrutements observés (Figure 1 ; ICES 2014). Elle est actuellement considérée comme étant en danger critique d'extinction par l'IUCN (ICES 2000). Les raisons de ce déclin semblent multiples et difficiles à dissocier. Baltazar-Soares *et al.* (2014) et Acou (2006) évoquent respectivement des facteurs impliquant la phase océanique et la phase continentale dont :

- ▶ la modification des courants marins ;
- ▶ la dégradation des habitats continentaux (pollution dont les PCB) ;
- ▶ la réduction de l'accessibilité des habitats continentaux ;
- ▶ l'introduction de parasites (en particulier *Anguillicollosa crassus* dans les années 1980, qui détériore la vessie natatoire) ;
- ▶ la pêche qui exploite tous les stades continentaux.

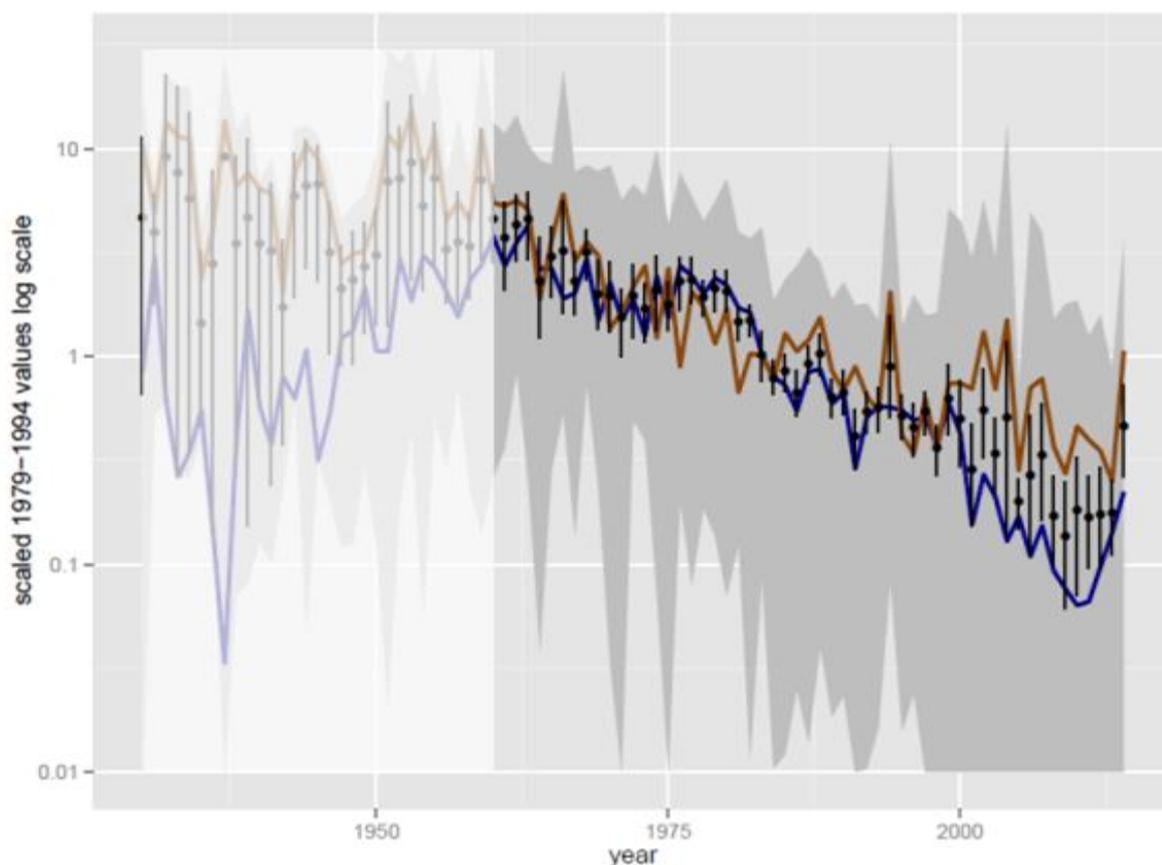


Figure 1. Séries temporelles du recrutement des civelles et des anguilles jaunes en Europe. Chacune des 45 séries ont été définies selon les moyennes observées dans les années 1979 à 1994. Les valeurs moyennes des séries combinées entre les deux stades et leurs intervalles de confiance (95%) sont représentés par des points noirs et des barres. Les lignes marron et bleue représentent respectivement les valeurs moyennes pour l'anguille jaune et la civelle. L'étendue des séries est représentée par un ombrage gris. La période 1900-1950 n'a pas été utilisée pour calculer la référence et est représentée par un ombrage en blanc. L'échelle logarithmique est à noter (ICES 2014).

En réponse à ce déclin drastique, le règlement (CE) N° 1100/2007 du conseil du 18 septembre 2007 (Conseil de l'Union Européenne 2007), dit règlement anguille, a été créé. Il a pour but d'instituer des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes.

► l'article premier définit que « Le présent règlement établit un cadre pour la protection et l'exploitation durable du stock d'anguilles européennes de l'espèce *Anguilla anguilla* dans les eaux communautaires, dans les lagunes côtières, dans les estuaires, dans les fleuves et rivières, ainsi que dans les eaux intérieures des États membres communiquant avec ces fleuves et rivières, qui se jettent dans les mers [...] »

► l'article 2 (Elaboration d'un plan de gestion de l'anguille) stipule que « les États membres [doivent élaborer] un plan de gestion de l'anguille pour chaque bassin hydrographique [...] ». « L'objectif de chaque plan de gestion est de réduire la mortalité anthropique afin d'assurer avec une grande probabilité un taux d'échappement vers la mer d'au moins 40 % de la biomasse d'anguilles argentées correspondant à la meilleure estimation possible du taux d'échappement qui aurait été observé si le stock n'avait subi aucune influence anthropique. Le plan de gestion des anguilles est établi dans le but de réaliser cet objectif à long terme. ». Ainsi, « chaque plan de gestion de l'anguille [doit présenter] une description et une analyse de la situation actuelle de la population d'anguilles [...], qu'il relie à l'objectif visé en matière d'échappement [...] »

► l'article 9 (Rapports et évaluation) établit que « chaque État membre rend compte à la Commission [...] du suivi assuré, de son efficacité et des résultats obtenus, et [présente] notamment les meilleures estimations disponibles concernant [entre autre] le pourcentage de la biomasse d'anguilles argentées qui quittent le territoire de l'État membre et migrent vers la mer pour s'y reproduire [...] »

Ces différents articles mettent en avant la nécessité de connaître les stocks d'anguilles présents dans les bassins hydrographiques français. En réponse à ce règlement, la France a mis en place le Plan de Gestion Anguille (PGA) français adopté par la commission européenne en février 2010 (anonyme 2010). Ce PGA présente notamment l'état de la population d'anguilles, à travers les prédictions d'un modèle baptisé EDA 1.3 (Eel Density Analysis ; Figure 2). Ce modèle consiste à prédire les densités d'anguilles jaunes en se basant sur des données collectées sur le terrain et en considérant diverses variables (telles que la distance à la mer ou le bassin hydrographique). Ces prédictions permettent alors d'en déduire l'échappement historique ou actuel des anguilles argentées, comme stipulé dans le règlement anguille.

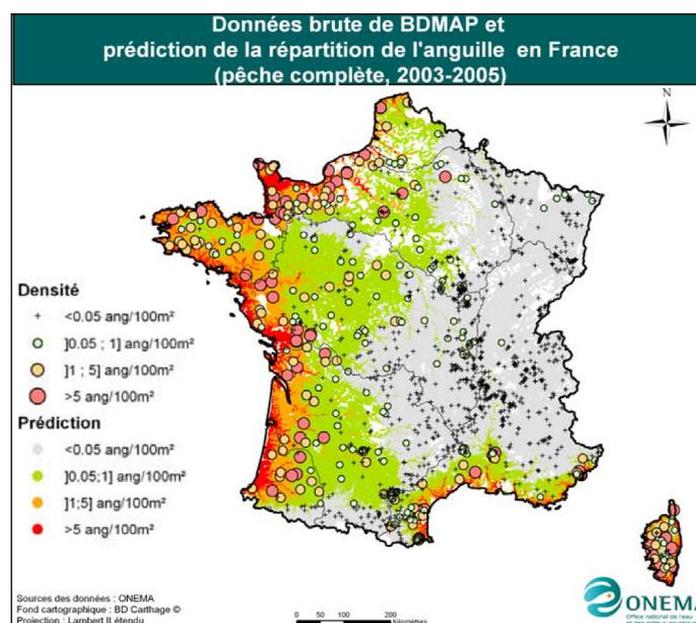


Figure 2. Densité observée et prédite (densité estimée) d'anguilles jaunes pour la période 2003-2005 (PGA, 2010)
Source des données : Onema, BD Carthage

Ce modèle a évolué pour donner les modèles EDA 2.0 et EDA 2.1 (Jouanin *et al.* 2012) puis EDA 2.2 (Figure 3 ; Briand *et al.* 2015). Les modifications majeures sont : 1. l'intégration de variables supplémentaires et 2. l'augmentation du nombre de données de terrain supportant le modèle. En particulier, la version 2.2 prend en considération un plus grand nombre de protocole de pêche électrique dans la calibration du modèle afin de limiter l'incertitude de la production d'anguilles argentées pour les milieux profonds.

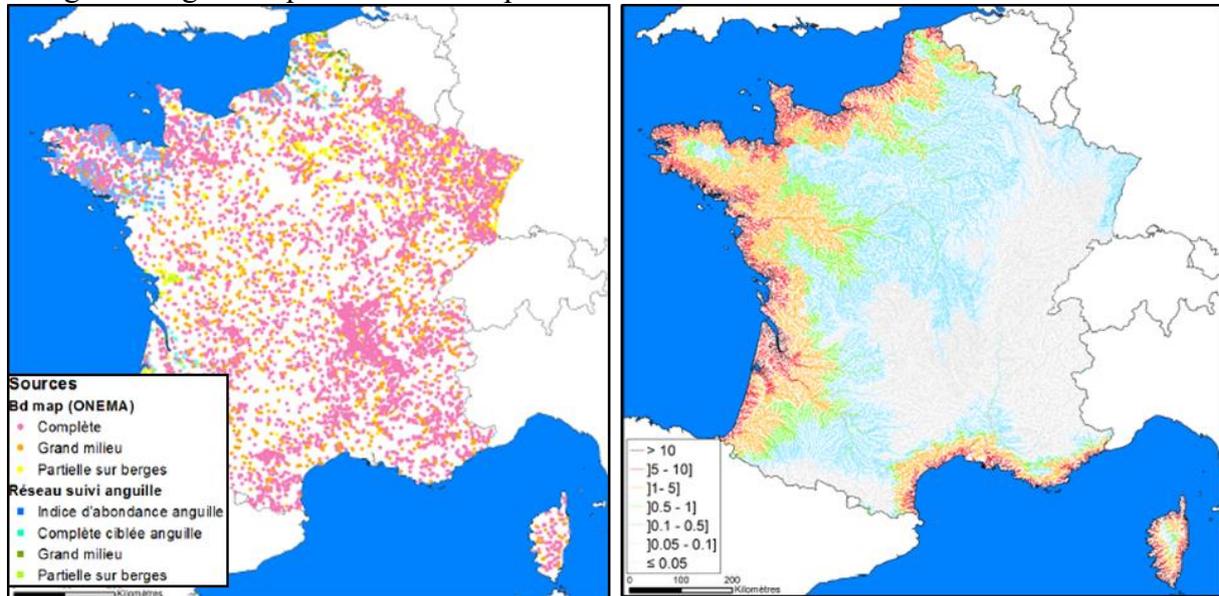


Figure 3. Répartition des données de pêche électrique, par type de données utilisées (à gauche), et densités d'anguilles jaunes (en anguille.100m⁻²) prédites en France métropolitaine par le modèle EDA 2.2 en 2012 (à droite). Les données correspondent à l'ensemble des années disponibles (d'après Briand *et al.* 2015).

Source des données : BdMap (ONEMA) et réseaux suivi anguille (RSA)

Cependant, ce modèle a l'inconvénient d'être basé uniquement sur des données d'abondance obtenues par pêche électrique. Cette méthode d'échantillonnage est considérée peu efficace en milieux considérés comme « profonds », supérieurs à 70 cm. A partir de 70 cm de profondeur, les milieux ne sont plus considérés comme totalement prospectables à pied et au-delà d'1,50 m de profondeur, la pêche électrique n'est plus efficace (Belliard *et al.* 2012). Or ces milieux représentent une part non négligeable des habitats occupés par l'anguille.

//.1.2. L'anguille européenne et son cycle biologique

L'anguille européenne *Anguilla anguilla* est une espèce diadrome, pour laquelle le cycle de vie présente encore diverses zones d'ombre, notamment lors de la phase océanique. Ce cycle présente différents stades (Figure 4).

La zone de frai présumée est la mer des Sargasses, au large de la Floride (Figure 4 ; Schmidt 1923). Le cycle biologique démarre par la production d'œufs, dont éclosent des larves leptocéphales, applaties suivant l'axe antéro-postérieur. Durant 1 à 3 ans, ces larves dérivent passivement suivant les courants du Gulf stream pour atteindre les côtes européennes.

Au niveau du plateau continental, elles subissent une première métamorphose qui les transforment en civelles, les préparant à une migration anadrome. Ces civelles sont transparentes et mesurent entre 60 et 80 mm. Elles se pigmentent pour devenir des anguilles jaunes. Cette phase de croissance peut durer de 3 à 18 ans.

Une seconde et dernière métamorphose, l'argenture, va transformer les anguilles jaunes en anguilles argentées. Cette métamorphose induit différentes transformations :

- ▶ régression du tube digestif,
- ▶ augmentation de la masse graisseuse.

L'anguille cesse alors de s'alimenter et puise l'énergie nécessaire à la migration vers la zone de frai dans les réserves accumulées :

- changement de livrée : le dos devient plus sombre et le ventre prend une couleur argentée ; ces deux parties étant séparées par une ligne latérale marquée,
- accroissement du diamètre oculaire,
- augmentation de la taille de la nageoire pectorale,
- modification de la vascularisation de la vessie gazeuse.

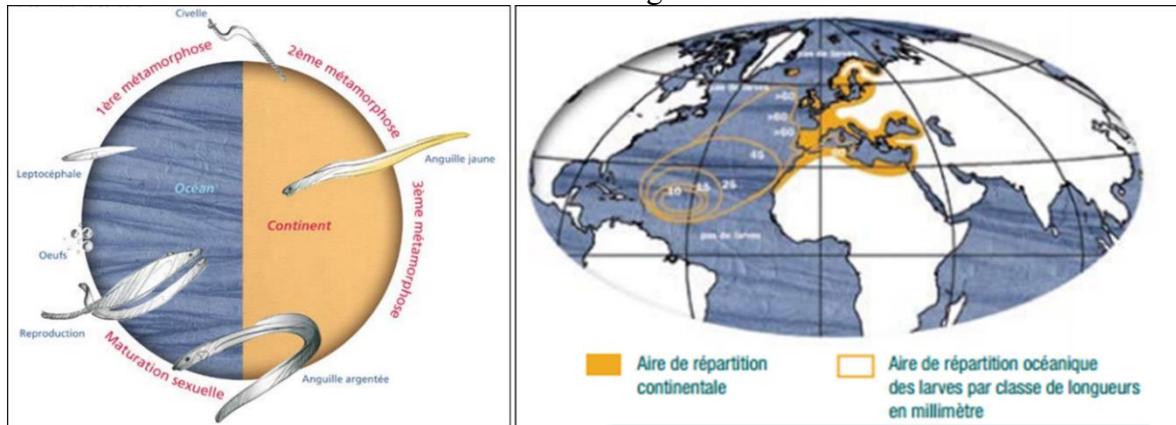


Figure 4. Le cycle de vie de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* et son aire de répartition (Vecchio & Roussel 2010)

Après l'argenture, la migration génésique démarre : l'anguille dévale jusqu'en estuaire puis migre vers la mer des Sargasses. En mer, l'anguille pourra alors atteindre des profondeurs variant de 200 m (la nuit) à 1000 m (le jour), voire au-delà, afin de profiter des contre-courants du Gulf stream et d'éviter la prédation. Une fois dans la zone de frai, elle va se reproduire, puis mourir.

//.1.3. Le comportement de l'anguille jaune en eau douce

L'anguille est capable de coloniser une grande diversité de milieux aquatiques. Cependant, sa densité décroît au sein d'un bassin versant, depuis les estuaires jusqu'en amont des cours d'eau. L'intensité de cette décroissance varie selon la taille des individus (Figure 5 ; Lasne & Laffaille 2008). La taille moyenne des anguilles s'accroît au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de l'embouchure du bassin versant.

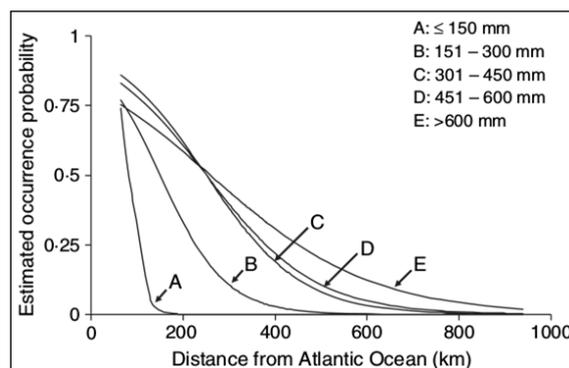


Figure 5. Probabilité de présence de l'anguille par classe de taille dans le bassin de la Loire (Lasne & Laffaille 2008)

Certaines civelles ne vont pas migrer vers l'amont mais rester en estuaires (Daverat 2005). Lors du stade anguillette, Feunteun *et al.* (2003) distinguent deux types de comportements migratoires :

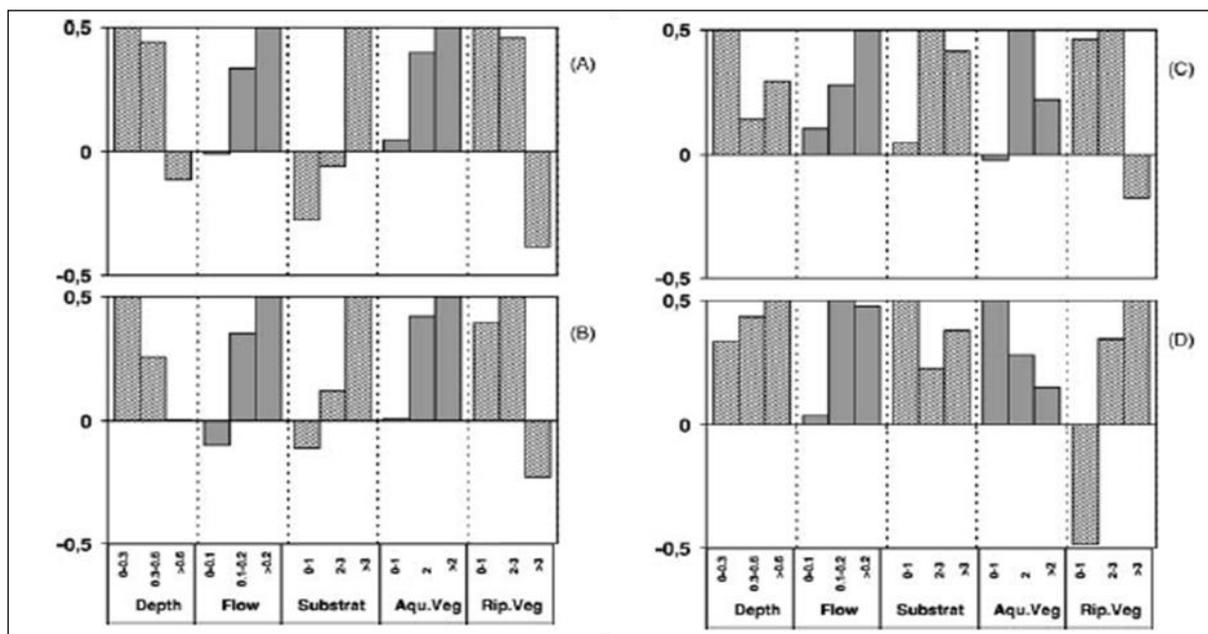
- le comportement pionnier : les jeunes anguilles jaunes migrent le plus en amont du système fluvial, quels que soient les paramètres populationnels et environnementaux ;
- le comportement fondateur : elles migrent et se sédentarisent dès qu'elles trouvent un habitat favorable, c'est à dire un habitat pour lequel la capacité d'accueil n'est pas atteinte.

L'anguille est une espèce poïkilotherme lucifuge. L'activité des anguilles jaunes est donc principalement nocturne et varie notamment selon la température et le cycle lunaire. Une température inférieure à 12 °C et la pleine lune lui sont défavorable. Leur activité dépend également de la nébulosité et de la turbidité de l'eau, qui affectent la pénétration de la lumière dans l'eau. Enfin, cette activité peut être influencée par d'autres facteurs tels que les précipitations, les niveaux d'eau, ou la pression atmosphérique (Adam *et al.* 2008 ; Feunteun *et al.* 2003).

Après leur phase primordiale d'établissement, les anguilles présentent un cycle saisonnier (Feunteun *et al.* 2003) qui dépend notamment des changements de facteurs environnementaux, à savoir la température, la concentration en oxygène ou la qualité de l'eau. Au début du printemps, l'anguille recherche un habitat productif, elle quitte donc les zones hivernales profondes. En été, elle s'installe sur un site moins profond, productif et favorable. Son habitat de vie est alors plus étroit. A la fin de l'automne, elle recherche de nouveau un site hivernal profond et abrité pour passer l'hiver. Cependant, outre ce schéma comportemental global, après un ou deux ans passés en rivière, Feunteun *et al.* (2003) distinguent deux comportements types :
 ► la résidence (« home range dwellers ») : elles s'établissent dans une aire donnée pour plusieurs années. Elles sont alors territoriales mais peuvent se déplacer au sein de leur habitat à la recherche de nourritures ou d'abris (Rigaud 2010).
 ► le nomadisme : elles ne sont pas établies dans une aire donnée. Ce nomadisme peut être intrinsèque, dû à des changements de préférentiels d'habitats en lien avec la taille ou déclenché par des conditions environnementales telles que des pluies, des crues, des marées, la température, les niveaux d'eau ou des perturbations humaines.

Ces comportements ne sont probablement pas exclusifs et peuvent intervenir en alternance au cours de la vie des individus, selon l'âge et les variations de l'environnement.

Les préférentiels d'habitat changent également avec la taille des individus (Figure 6 ; Laffaille *et al.* 2003). Les petites anguilles (< 15 cm) préfèrent les milieux peu profonds (< 60 cm), contrairement aux anguilles de plus de 45 cm.



//.2. Méthodes d'échantillonnage existantes et leurs limites

Ce chapitre se focalise principalement sur les méthodes d'échantillonnages permettant de pêcher l'anguille au stade anguille jaune. Sachant qu'elles ne sont pas spécifiques à ce stade, elles permettent de pêcher également des anguilles argentées.

Brandt (1971) a établi un inventaire des méthodes d'échantillonnage de l'anguille, depuis la pêche à la ligne jusqu'à des techniques plus élaborées. Parmi ces techniques, Adam *et al.* (2008) identifient les 3 catégories d'outils les plus utilisées pour collecter des données sur l'anguille : les opérations de pêche électrique, les dispositifs de franchissement et les engins de capture passifs. La principale différence entre la première technique et les deux autres est le mode de capture. La pêche électrique est une capture active ne nécessitant pas le déplacement des anguilles, contrairement aux modes de captures passifs qui requièrent que les anguilles soient en mouvement (déplacement, recherche d'abris ou de nourriture).

//.2.1. Capturabilité d'un poisson

Quelle que soit la technique d'échantillonnage utilisée, la capturabilité d'un poisson va dépendre de sa disponibilité (Figure 7 ; Ximenes 1986 ; Baisez 2001 ; Beaulaton 2008), soit :

► de sa présence

► de sa vulnérabilité à la technique de capture : dépend de son comportement, de sa taille...

Les anguilles sont souvent dissociées en 6 classes de taille (< 15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm, 60-75 cm, et > 75 cm) en raison de comportements et de préférentiels d'habitat différents (Adam *et al.* 2008 ; Laffaille *et al.* 2003).

Enfin, l'efficacité de l'échantillonnage, soit la fraction d'individus capturée parmi la fraction accessible, dépend de l'effort de pêche (technique de pêche, nombre de sessions... ; Figure 7 ; Ximenes 1986).

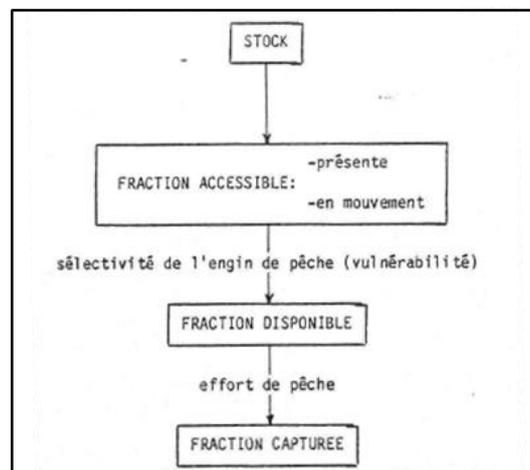


Figure 7. Schéma représentant la fraction capturable lors de l'échantillonnage de l'anguille par rapport au stock, dans le cas d'un échantillonnage par engins passifs (Ximenes 1986)

//.2.2. La pêche électrique

//.2.2.1. Les principes de la pêche électrique

La pêche électrique est couramment utilisée à des fins scientifiques pour capturer tous types d'espèces. Elle consiste à établir un champ électrique dans l'eau, qui va conduire le poisson à manifester divers comportements facilitant sa capture (Luneau, Mertens & Changeux 2003). Le matériel de pêche comprend deux électrodes : une perche isolante qui se termine par un anneau métallique de 40 cm de diamètre, l'anode ; et une tresse métallique, la cathode (Figure 8a). Elles sont alimentées par un groupe électrogène via un redresseur de courant. Quand ces deux

électrodes sont plongées dans l'eau, un champ électrique s'établit. Lorsqu'un poisson entre dans ce champ, il subit une nage forcée en direction de l'anode. L'individu est alors capturable à l'aide d'une épuisette (Figure 8b ; Cowx & Lamarque 1990 ; Adam *et al.* 2008). Plus il se rapproche de l'anode, plus le courant est élevé. S'il dépasse le seuil de tétanie, il se raidit et cesse toute activité de nage (Figure 8c).



Figure 8. Déroulement de la pêche électrique (gauche) et comportement de l'anguille en réponse au courant (droite). Exemple d'un matériel portable : l'anode (+) attire le poisson, qui est capturé avec une épuisette et stocké dans un seau (Luneau, Mertens & Changeux 2003). Comportements de nage normale, de nage forcée et de tétanie chez une anguille soumise à un courant électrique (Cowx & Lamarque 1990).

Il existe différents appareils de pêche électrique : martin pêcheur, héron... qui utilisent différents types de courants (continu, alternatif, crénelé...). De la même manière, il existe différents protocoles de pêche électrique (Adam *et al.* 2008 ; Pottier, Marchand & Azam 2016) :

- ▶ pêche par épuisement (Lambert, Feunteun & Rigaud 1994 ; Baldwin & Aprahamian 2012) : plusieurs passages sont effectués successivement sur une même station délimitée par des filets. Au cours de chaque passage, les individus capturés sont retirés de l'eau. Des méthodes statistiques permettent d'estimer le nombre total de poissons sur la station ;
- ▶ pêche par point (Laffaille *et al.* 2005 ; Germis 2009) : un unique passage est effectué par bandes le long de la rive ou par point (EPA) avec un effort standardisé. Les méthodes statistiques ne fournissent qu'un indice d'abondance, pouvant être relié à une densité.

II.2.3. Les avantages et les inconvénients de la pêche à l'électricité

La pêche électrique offre divers avantages : une faible mortalité engendrée, une capturabilité qui ne semble pas être sélective et une recherche active des individus, qui ne dépend donc pas de leur activité, et donc de leur comportement (Baisez 2001).

Comme le précise la partie II.2.1, pour être capturé, un individu doit être 1. accessible, 2. vulnérable c'est-à-dire attiré et/ou immobilisé dans le champ électrique ; 3. détecté par l'opérateur ; et 4. capturé dans l'épuisette (Adam *et al.* 2008 ; Baisez 2001). De ce fait, la pêche électrique nécessite un certain nombre de conditions pour être efficace, à savoir une eau claire, facilitant le repérage du poisson par l'opérateur, une végétation clairsemée, une conductivité moyenne, un faible courant, une température comprise entre 10 et 20°C et une faible profondeur (Lamarque 1976).

De plus, l'efficacité de la pêche électrique varie selon les espèces et la taille des individus (Baisez 2001; Luneau, Mertens & Changeux 2003). L'anguille serait particulièrement peu vulnérable (Lamarque 1976 ; Baisez 2001 ; Lambert & Rigaud 1999). Par exemple, cachée dans des abris, elle peut être difficilement délogeable et ce, d'autant plus qu'elle est facilement tétanisable.

//.2.4. Les dispositifs de franchissement des obstacles

Dans cette partie sont également inclus les dispositifs de piégeage des anguilles à des fins scientifiques.

//.2.4.1. Principes des passes à poissons

La passe à poissons (spécifique ou non à l'anguille) permet le passage des individus à travers un obstacle, depuis l'aval vers l'amont (Rigaud *et al.* 1988). Elle limite l'entrave de l'obstacle à la libre circulation des anguilles dans le cours d'eau. Elle peut être équipée de dispositifs permettant le comptage des individus y pénétrant (par piégeage par exemple ; Figure 9 ; Charrier *et al.* 2014).



Figure 9. Passe et pièges sur le barrage de Pont Es Omnes (Charrier *et al.* 2014)

//.2.4.2. Les avantages et les inconvénients des dispositifs de franchissement d'obstacles

Placés au niveau d'un ouvrage infranchissable, ces dispositifs sont les seuls moyens, pour les individus, d'effectuer des déplacements vers l'amont ou vers l'aval. Ils permettent donc, selon leur fonctionnement, de suivre l'ensemble des individus migrants (comme le souligne Rigaud *et al.* 1988) dans un sens ou dans l'autre.

Ils présentent l'inconvénient d'être fixes. Ils ne permettent donc pas d'étudier tous les sites désirés. Contrairement à la pêche électrique, ces dispositifs ne peuvent intercepter que des individus en activité. Ils permettent de suivre essentiellement des phénomènes de migration unidirectionnels : la montaison des anguilles jaunes, et la dévalaison des anguilles argentées, et non des mouvements d'anguilles sédentaires au sein de leur habitat.

//.2.5. Les engins passifs

Il existe de très nombreux engins passifs, dont certains présentent un design spécifique à la capture de l'anguille.

II.2.5.1. Principes de la capture par engin passif

Malgré leur diversité, les engins passifs de pêche à l'anguille sont tous basés sur le même principe : un entonnoir inversé guide l'individu vers l'entrée mais rend complexe sa sortie (Figure 10 ; Figure 11). Il s'agit donc d'une technique nécessitant que l'individu soit en mouvement.

Deux grandes catégories d'engins peuvent être distinguées : 1. les verveux et 2. les nasses. Un verveux est un engin en filet souple dont la structure est présentée sur la figure 10. (Luneau, Mertens & Changeux 2003 ; Figure 10). Il est construit à partir de fils de nylon fixés sur des anneaux rigides. Afin de reposer sur le fond, il doit être tendu à l'aide de piquets, de poids ou d'ancres aux deux extrémités. Il contient une à trois chambres, toutes constituées d'une entrée en entonnoir, mais présentant des mailles de plus en plus fines (avec une maille minimum de 10 mm généralement). La réglementation indique que le diamètre de la dernière entrée doit être de 4 cm. La première chambre peut être précédée d'un pavillon, en forme de rond ou de D, d'un diamètre plus large. Enfin, les verveux sont souvent installés avec une ou deux ailes (appelées également paradères), qui vont guider le poisson vers l'entrée de l'engin.

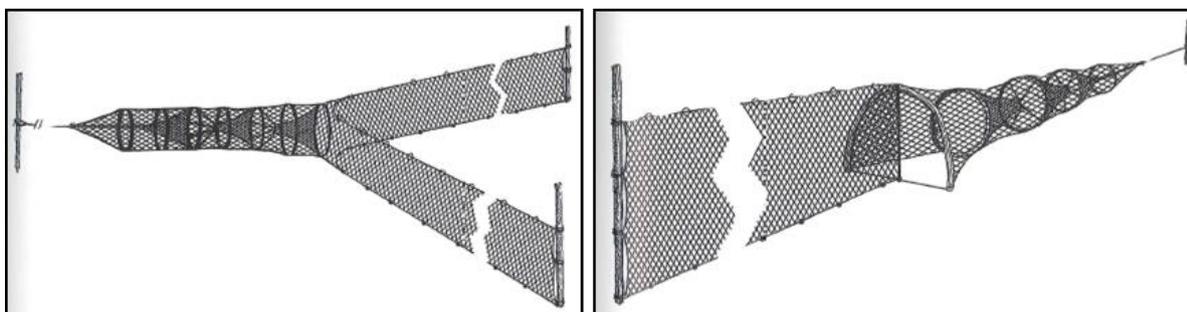


Figure 10. Verveux à deux ailes (gauche) et à une aile (droite). De part et d'autre du piège ou au centre de son entrée, les ailes orientent le poisson vers le piège (Luneau, Mertens & Changeux 2003).

Les nasses sont des engins en structure rigide (Figure 11 ; Luneau, Mertens & Changeux 2003). Contrairement aux verveux, leur maille n'est donc pas étirable. Le terme de nasse comprend des engins très divers dans leur forme, leur taille, leur matériau. Elle présente souvent un entonnoir (Adam 1997), mais jamais de paradère.

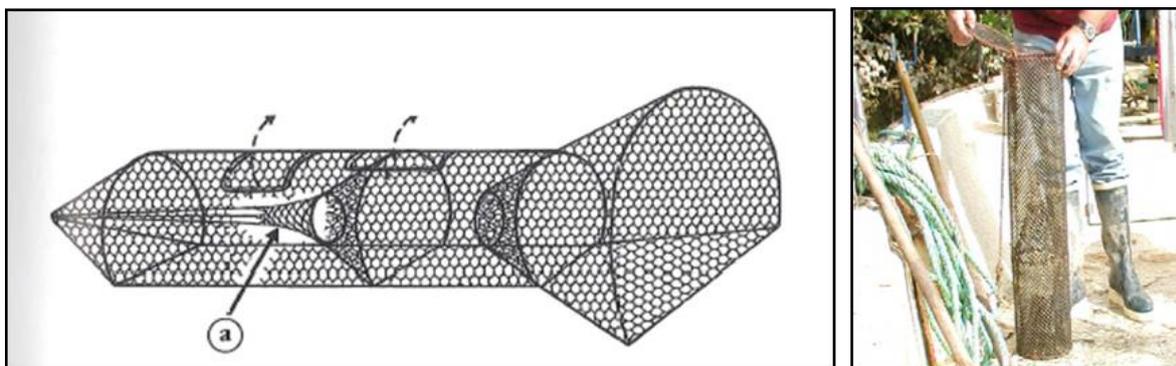


Figure 11. Nasse avec entonnoir (gauche) et sans entonnoir (droite) à anguille. Le corps et les manchons sont construits avec du grillage métallique ou plastique (Luneau, Mertens & Changeux 2003 ; Beaulaton 2008).

La principale différence entre ces deux engins est la technique de capture des individus. Les verveux permettent de capturer des individus en déplacement. Lorsque ces derniers rencontrent la paradère, ils vont être guidés vers l'entrée de l'engin pour y être capturés. Les nasses vont capturer des individus présentant un comportement plus exploratoire (recherche d'abris ou de nourriture).

Que ce soit les verveux ou les nasses, ces engins de pêche peuvent être associés pour aboutir à des structures plus complexes. Deux verveux peuvent être reliés à une même paradière pour piéger tous les poissons la rencontrant (Figure 12). Deux nasses peuvent être installées tête à tête afin de piéger dans deux directions opposées (Figure 12). 10 à 20 nasses peuvent être également être associées en cordée. Cette dernière est ancrée pour résister aux courants de marée (Adam 1997 ; Luneau, Mertens & Changeux 2003).

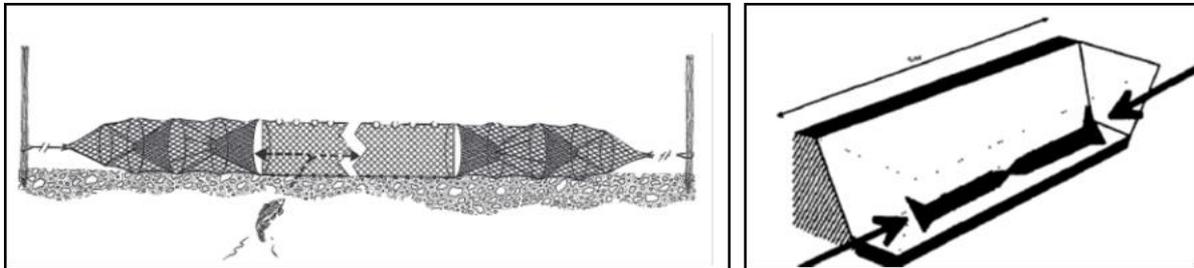


Figure 12. Association de deux verveux (gauche) et de deux nasses (droite). Le verveux barrière à deux poches : tendu entre deux piquets, le filet détourne le poisson vers les pièges situés à chaque extrémité (gauche ; flèches pointillées, Luneau, Mertens & Changeux 2003). Schéma du protocole de piégeage des anguilles à l'aide de nasses au sein d'un site (droite ; Baisez 2001).

De même, trois à quatre engins (verveux ou nasses) peuvent être associés au sein d'une même structure (Figure 13).

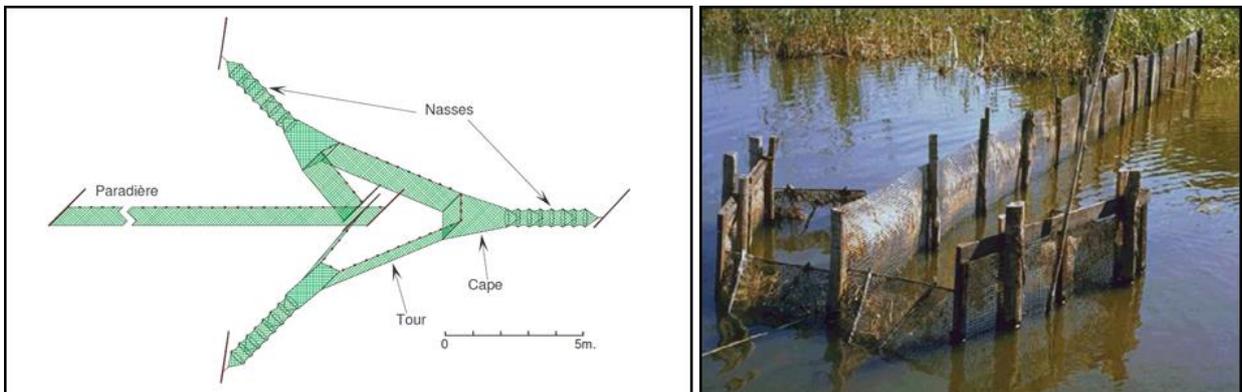


Figure 13. Schéma d'une capêchade ou verveux à trois poches (gauche) et barrage à bosselles (droite), utilisés par la pêche professionnelle du lac de Grand-Lieu (Adam 1997)

Enfin, une nouvelle technique d'échantillonnage de l'anguille a été développée (par Ubl & Dorow 2015 ; Figure 14). Elle associe 6 chaînes de 5 verveux barrières à deux poches, ancrées au sein d'un enclos de 100 m par 100 m. Cet enclos est délimité par des filets associés à chaque coin par un verveux. Ce dispositif a par ailleurs été testé en juillet 2015 par une équipe irlandaise (Tréguier *et al.* 2016).

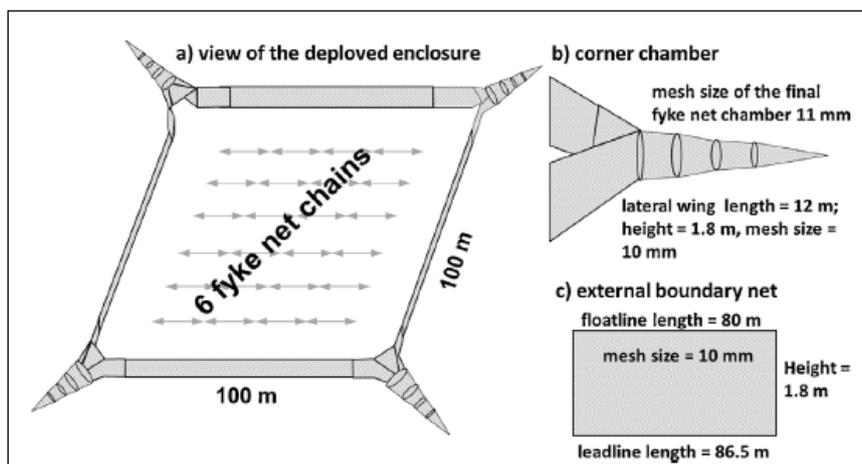


Figure 14. Système d'enclos délimité par un filet et quatre chambres en coin dans lequel sont installées six chaînes de 5 double verveux ; en se basant sur la connaissance de la taille de l'enclos, la capture peut être exprimée en nombre d'anguilles jaunes / ha (Ubl & Dorow 2015).

//.3. La technologie au service du suivi piscicole

Différentes technologies peuvent être utilisées pour mieux comprendre le comportement et le déplacement des poissons. Elles peuvent notamment préciser l'efficacité d'engins passifs, afin d'affiner le protocole et de fiabiliser les résultats. C'est le cas des antennes RFID, des sonars et des émetteurs acoustiques, des caméras aquatiques...

Dans le cadre de cette étude, une méthode de capture-marquage-recapture a été mise en place, utilisant la technologie RFID pour ajouter des données de détection d'anguilles au modèle.

//.3.1. La méthode de Capture-Marquage-Recapture

La méthode de Capture - Marquage - Recapture (CMR) est une méthode couramment utilisée en écologie pour estimer la taille d'une population animale. Elle consiste d'abord à capturer et marquer individuellement une partie de la population étudiée. Ces individus marqués sont relâchés dans leur milieu naturel. Une campagne de recapture permettra ensuite de capturer un échantillon de la population totale. L'effectif de la population totale est calculé à l'aide du ratio entre les individus marqués et non marqués.

La méthode de CMR mise en place pour établir le protocole de quantification des anguilles porte sur le stade « anguille jaune », majoritairement sédentaire. Les différentes sessions de terrain sont appelées « occasions de capture » et les données collectées renseignent également sur la présence et les caractéristiques de ces individus lors de chaque occasion. L'utilisation d'un marquage individuel permet de connaître les traits d'histoire de vie des anguilles (croissance...) mais surtout des modalités de leurs déplacements dans le cours d'eau (pour leur alimentation ou leur reproduction). Ces informations annexes sont précieuses pour affiner le protocole de quantification des anguilles.

//.3.2. La technologie RFID

Cette partie a été rédigée à partir de la synthèse des informations fournies sur le site du fournisseur www.oregonrfid.com (onglet Important Links, cf. Bibliographie) et sur le site (M. Madegard) :

http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/mmadegar_rfid/technologies_transpondeur.html.

Des informations complémentaires sont disponibles en Annexe 1.

//.3.2.1. Qu'est-ce que la technologie RFID ?

La RFID (radio-frequency identification - identification par radiofréquence) est une technologie utilisant des ondes du spectre radio pour identifier des objets porteurs de radio-étiquettes lorsqu'ils passent à proximité d'un interrogateur. Dans le cadre d'étude sur les poissons, elle permet de :

- ▶ marquer des animaux de manière individuelle,
- ▶ suivre les déplacements d'individus marqués à l'aide de recapture ou d'antennes fixes,
- ▶ suivre la répartition des individus marqués à l'aide d'antennes mobiles.

La technologie RFID fait intervenir deux éléments : un transpondeur, le PIT-tag (Passive Integrated Transponder ; transpondeur intégré passif), qui va être implanté dans l'animal à suivre, et un système de détection à courte portée, l'interrogateur.

//.3.2.2. Le PIT-tag

Un PIT-tag est un transpondeur exprimant un numéro d'identification unique (Figure 16). Il contient une puce électronique ou tag et une antenne en bobine de cuivre, enfermés dans une

capsule de verre. Une fois implanté dans un individu, le PIT-tag permet de l'identifier et de le suivre lors de captures successives et/ou de détections par des détecteurs fixes ou mobiles. Chez les poissons, ils peuvent être insérés au niveau dorsal ou au niveau ventral, dans la cavité abdominale.



© INRA U3E ; Anne Tréguier ; MNHN CRESCO

Figure 16 : Photographies de PIT-tags 12 mm comparés à une pièce d'un euro, d'un PIT-tag seul et de son insertion dans la cavité abdominale d'une anguille

Les PIT-tag utilisés sont des transpondeurs passifs, c'est-à-dire qu'ils ne nécessitent pas de source d'énergie embarquée pour fonctionner, contrairement aux émetteurs radio (transpondeurs actifs). Très résistants, ils peuvent être opérationnels pendant des décennies mais nécessitent d'être alimentés par une source d'énergie extérieure pour être détectés. L'interrogateur de PIT-tag produit un champ électromagnétique qui charge le PIT-tag en énergie tout en lui envoyant un signal d'interrogation. Le Pit-tag renvoie ensuite un signal électromagnétique plus faible, codant son numéro unique, qui peut être détecté. Dans le cas des applications aquatiques, la communication transpondeur-interrogateur se fait par de basses fréquences (< 135 kHz). Seules ces dernières permettent une communication subaquatique, mais leur portée de détection est relativement faible.

Lorsque le marquage vise l'identification à courte portée des individus, il est préférable d'utiliser de petits PIT-tags, moins invasifs. Les PIT-tags de 12 mm sont fréquemment utilisés pour marquer diverses espèces de poissons (saumons, truites, anguilles ; Marchand *et al.* 2015) dans le cadre d'expérimentation de capture-marquage-recapture. Une identification à plus longue portée reste possible afin de suivre les déplacements des poissons et/ou leur répartition sans manipuler les individus, grâce à des interrogateurs fixes ou mobiles. Des tailles de PIT-tags plus importantes peuvent être envisagées afin d'optimiser la détection à distance. Dans tous les cas, la « règle des 2 % » (Winter 1996) détermine qu'un PIT-tag ne peut être implanté que si son poids est inférieur à 2 % du poids de l'individu. Le tableau 1 présente les caractéristiques de trois tailles de PIT-tags couramment utilisées.

Tableau 1. Caractéristiques de trois tailles de PIT-tags HDX

Longueur PIT-tag	DIAMETRE (mm)	POIDS (g)	POIDS MINIMUM DU POISSON A MARQUER (règle des 2 %)
12 mm	2.12	0.1	5 g
23 mm	3.65	0.6	30 g
32 mm	3.65	0.8	40 g

© Anne Tréguier

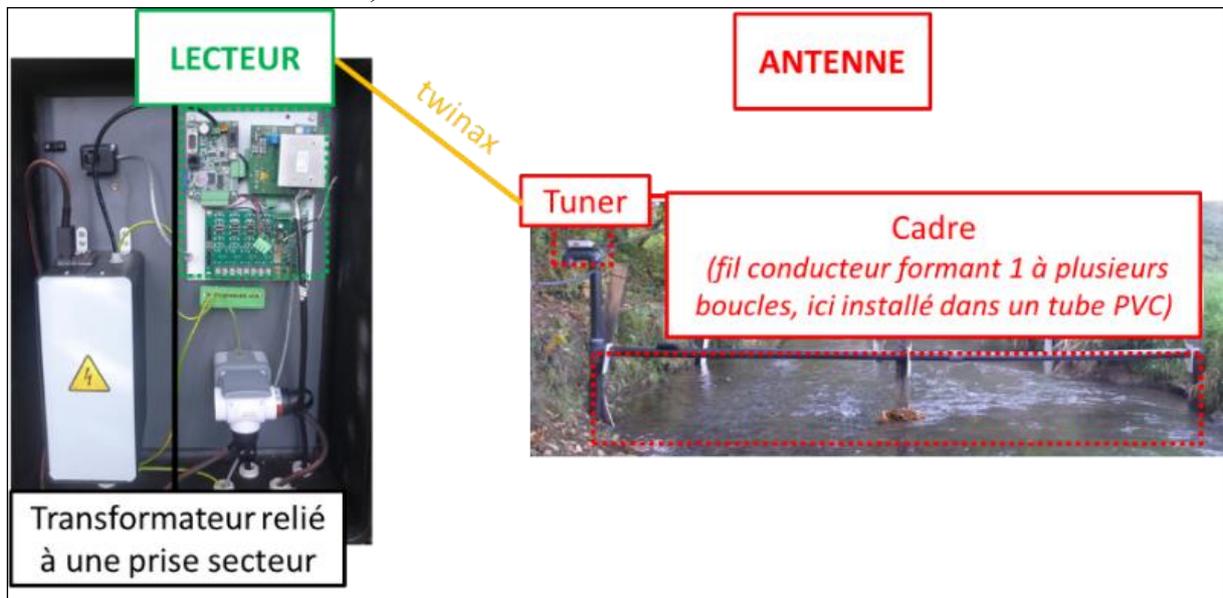
Source des données : www.oregonrfid.com

//.3.2.3. L'interrogateur

La RFID nécessite un système couplé « lecteur / antenne(s) » appelé interrogateur. Ce système permet de charger l'antenne du PIT-tag pour lui permettre de renvoyer un signal, puis de détecter ce signal émis (un numéro unique) et de l'enregistrer.

L'interrogateur est composé d'un lecteur (ou reader) alimenté par une source d'énergie et de 1 à 4 antennes. Chacune de ces antennes est composée de deux éléments (Figure 17). Le cadre de l'antenne est constitué d'une ou de plusieurs boucles formée(s) à partir d'un fil conducteur,

généralant un champ électromagnétique qui va charger l'antenne du PIT-tag. Ces boucles de fil sont appelées des spires et peuvent être installées à l'intérieur de tubes en PVC pour procurer une structure rigide à la / aux boucle(s). Ce fil conducteur, constituant le cadre, est relié à un second élément de l'antenne, la tuner box.

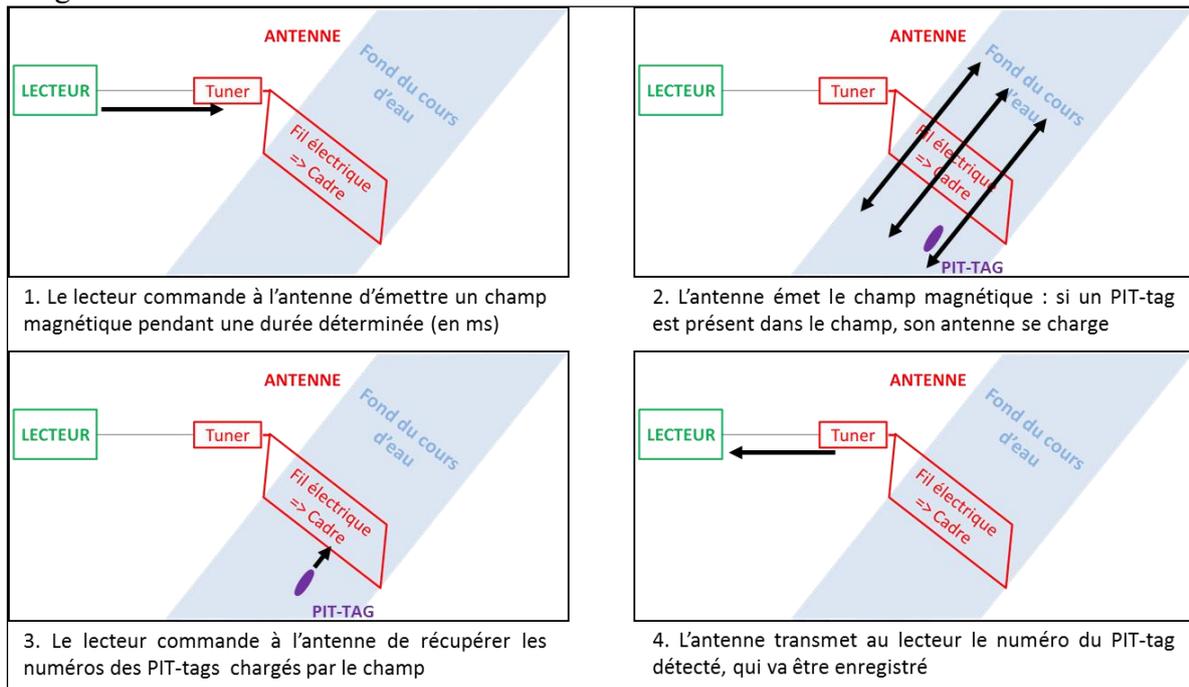


© Anne Tréguier
Figure 17 : L'interrogateur constitué d'un lecteur et d'une antenne, sa source d'énergie et les connexions

Le lecteur et l'antenne sont reliés par un câble blindé contenant deux fils conducteurs, le twinax. Ce câble permet de conduire l'alimentation du reader vers la tuner box, et d'envoyer le signal du PIT-tag reçu par l'antenne jusqu'au reader. Le blindage permet d'éviter que le câble d'alimentation perturbe le bon transfert du numéro de PIT-tag.

II.3.2.4. La détection des PIT-tags par l'interrogateur

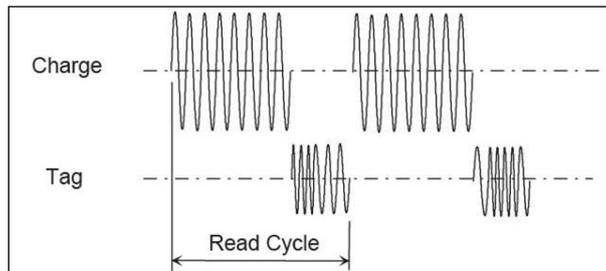
Les différentes étapes de la détection des PIT-tags par un interrogateur fixe sont illustrées dans la figure 18 suivante :



© Anne Tréguier

Figure 18 : Schématisation des étapes de la détection d'un PIT-tag par un interrogateur (système de détection couplé « reader / antenne »), dans le cas d'un système fixe HDX (voir différences entre systèmes FDX et HDX ci-dessous)

Une antenne peut émettre le champ magnétique et écouter les signaux émis de façon simultanée et donc en continu (technologie FDX = Full duplex, Tableau 2) ou en alternance (technologie HDX = Half duplex, Tableau 2). Dans ce dernier cas, un cycle de lecture se répète (Figure 19), comprenant une phase d'émission du champ (ou phase de charge du PIT-tag correspondant aux étapes 1 et 2 de la figure 18) et une phase d'écoute (étapes 3 et 4 ; Figure 18).



© www.oregonrfid.com (important links / HDX and FDX)

Figure 19 : Schématisation de la décomposition du cycle de lecture d'un interrogateur pour la technologie HDX

La norme ISO 11784/11785 permet la compatibilité entre des PIT-tags et des antennes provenant de fabricants différents. En revanche, les antennes peuvent détecter soit uniquement les PIT-tags HDX, soit uniquement les PIT-tags FDX, soit les deux types de PIT-tags. En effet, ces deux technologies utilisent des fréquences différentes (Tableau 2).

Tableau 2. Description simplifiée du fonctionnement et des fréquences des technologies FDX et HDX

	FONCTIONNEMENT			FREQUENCES		EXEMPLES DE FABRICANTS
	Etapes	Charge du PIT-tag	Récupération du numéro	Charge du PIT-tag	Emission du signal	
HDX	1 - 2	X		134.2 kHz		OREGON, CIPAM
	3 - 4		X			
FDX	1 - 2	X	X	128 kHz	64 kHz	TROVAN
	3 - 4	X	X			

Source des données : www.oregonrfid.com (important links / HDX and FDX) ; www.cipam.com ; www.dorset.nu

La technologie HDX utilise une « Frequency Shift Keying » qui permet une meilleure immunité contre les perturbations électromagnétiques et permet de construire des antennes simples et plus grandes. En effet, le cadre des antennes HDX sont de simples boucles de fils isolés qui peuvent être placées directement dans l'eau sans structure rigide. Ils peuvent ainsi être 10 fois plus larges qu'avec une technologie FDX.

La technologie FDX comprend différents types de structures : l'un génère le champ magnétique en continu, l'autre écoute les PIT-tags chargés en continu. Le PIT-tag répète alors son signal tant qu'il est chargé, jusqu'à 30 fois par seconde. La technologie FDX utilise une « Amplitude Shift Keying » qui est sensible aux perturbations électromagnétiques environnantes, ce qui limite la taille des cadres d'antennes.

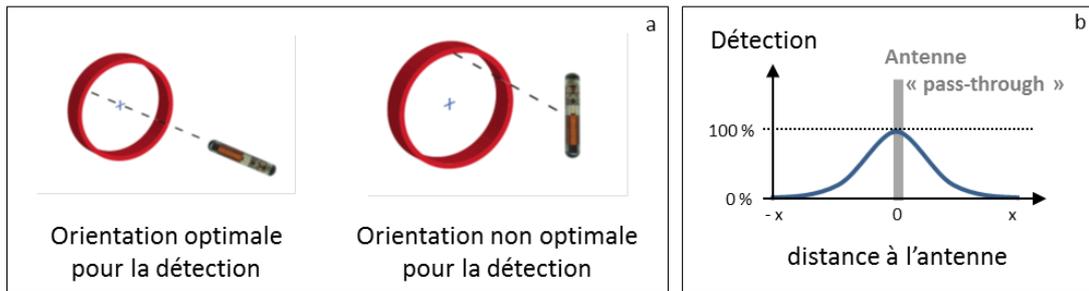
La suite de ce chapitre sur la RFID se focalise sur la technologie utilisée par OREGON RFID, à savoir la technologie HDX. Par ailleurs, par soucis de simplification du discours, l'interrogateur (système couplé reader / antenne(s)) sera nommé **antenne** dans le reste du rapport. Des informations complémentaires sur les antennes, les branchements ainsi que sur les limites de ce matériel sont présentées dans le paragraphe 5.2.

//.3.2.5. Les limites de la RFID

La probabilité de détection d'un PIT-tag dépend notamment :

- de la taille de ce dernier,

- ▶ de l'angle de passage du PIT-tag dans le cadre de l'antenne (Figure 20a) : le chargement de l'antenne du PIT-tag est optimisé lorsque ses spires ont la même orientation que les spires du cadre de l'antenne,
- ▶ de la vitesse de passage du PIT-tag dans le champ magnétique de l'antenne, et du nombre de cycle par seconde (temps de charge et d'écoute paramétrés sur le reader ; Figure 20b),
- ▶ du nombre de PIT-tags passant simultanément dans le champ magnétique : si les signaux de plusieurs PIT-tags sont simultanément émis, ils ne sont pas obligatoirement tous reçus par l'antenne, il se peut même qu'aucun ne soit détecté, ce phénomène est appelé « tag collision ».
- ▶ du design de l'antenne



© www.oregonrfid.com ; Anne Tréguier

Figure 20. Quelques limites dans la détection des PIT-tags par l'interrogateur : l'orientation du PIT-tag par rapport au cadre de l'antenne (gauche) et schématisation de la variabilité de l'efficacité de détection selon la distance du PIT-tag à l'antenne (droite)

Encadré 1: Quantification d'une population d'anguilles en milieu profond : problématique et objectifs

En réponse à la forte diminution du stock d'Anguille européenne (*Anguilla anguilla*) depuis plusieurs décennies, l'union européenne a adopté le règlement (CE) N°1100/2007, dit règlement anguille, avec pour objectif la reconstitution du stock de l'espèce. A ce titre, chaque État Membre doit évaluer les stocks d'anguilles s'échappant de son territoire, conformément aux Plans de Gestion Anguilles (PGA) nationaux.

Le PGA français, approuvé en février 2010, présente notamment l'évaluation de ses stocks d'anguilles à travers un modèle de prédiction nommé Eel Density Analysis (EDA). Plusieurs ajustements ont fait évoluer le modèle depuis sa version EDA 1.3 présentée dans le PGA, jusqu'au modèle le plus récent EDA 2.2. Cette dernière version, limite particulièrement l'incertitude de l'état de la population d'anguilles argentées en milieux profonds. Pour les anguilles jaunes, le modèle se base sur les données collectées sur le terrain, actuellement obtenues par pêche électrique. Cette méthode classique de pêche électrique par épuisement n'est pas réalisable sur l'ensemble des milieux, notamment les milieux profonds. A partir de 70 cm d'eau, les milieux ne sont plus considérés comme totalement prospectables et au-delà d'1,50 m de profondeur, la pêche électrique n'est plus efficace. Un milieu est donc considéré comme profond, dans le cadre de notre étude lorsque sa profondeur est supérieure à 70 cm. Aucune autre méthode ne permet actuellement d'obtenir des données de densité sur ces milieux profonds pour l'anguille alors que ces milieux peuvent représenter une part importante du stock.

Cette étude étalée sur trois années a pour objectif de mieux connaître les anguilles de ces milieux et de mettre au point un protocole de quantification des populations d'anguilles adapté aux milieux profonds. Ce protocole permettra d'expertiser une large gamme d'habitats profonds adaptés à l'anguille, afin d'alimenter plus finement le modèle EDA. Ce protocole de quantification est basé sur la méthode de capture – marquage – recapture (CMR). Il fait appel à des engins passifs de capture optimisés spécialement pour l'anguille jaune ainsi qu'à des antennes RFID, apportant des informations complémentaires sur les individus marqués. Par ailleurs, un protocole de quantification à l'aide d'un enclos a été testé sur la Vilaine.

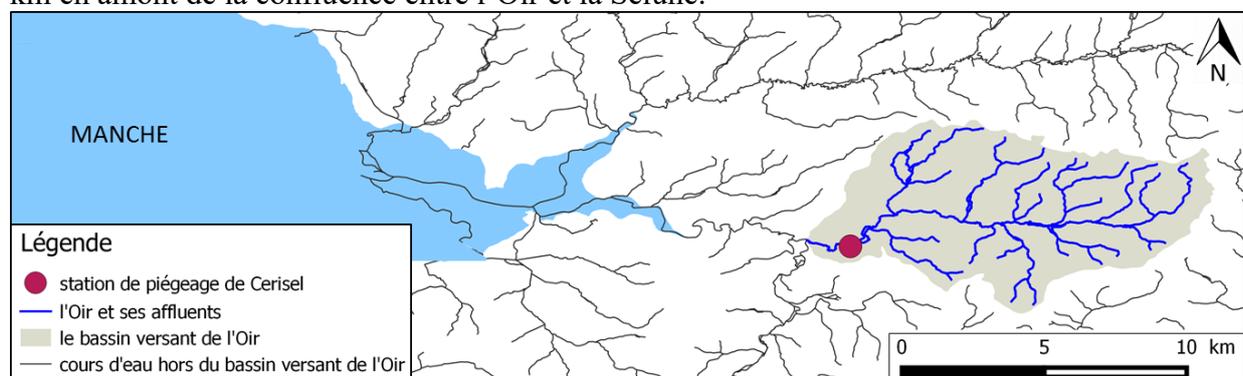
Démarrée en 2015, cette action a permis une première mise en œuvre d'expérimentations en milieu naturel au cours de l'année, dont les méthodes et résultats sont présentés dans le premier rapport d'avancement. Un second rapport d'étape présente les avancées réalisées en 2016, deuxième année de recherche. Il s'articule autour de différents protocoles mis en œuvre en milieux naturels et en milieux contrôlés. Le présent rapport final inclut les résultats des différentes expérimentations menées lors des trois années 2015-2017, ainsi que les analyses de données permettant de se rapprocher d'un protocole de quantification des anguilles en milieux profonds.

III. Sites de l'étude et calendrier

III.1. L'Oir et la station de piégeage de Cerisel : site d'études en milieu naturel

III.1.1. L'Oir : rivière d'expérimentation

La Sélune, un petit fleuve côtier situé dans le sud du département de la Manche, se jette dans la baie du Mont Saint-Michel (Figure 21). Un de ses affluents, l'Oir est un des sites de l'ORE DiaPFC (Observatoire de Recherche sur les Poissons diadromes dans les Fleuves Côtiers) focalisé sur les poissons grands migrateurs amphihalins (saumon, truite, anguille...). Il constitue l'un des observatoires de suivi sur long terme du Pôle AFB-INRA. Il est notamment très étudié en raison de sa productivité en salmonidés (Marchand *et al.* 2015). Les anguilles y sont également suivies. Par ailleurs, une station de piégeage de Cerisel est située sur l'Oir, à 3.5 km en amont de la confluence entre l'Oir et la Sélune.



© Anne Tréguier
Figure 21. Localisation de l'Oir et de la station de piégeage de Cerisel
Source des données : BD-Carthage

Le cours de l'Oir, long de 21 kilomètres, orienté est-ouest, a une pente moyenne de 11‰ et une largeur moyenne à l'aval d'environ 5m (Marchand *et al.* 2015). Il draine un bassin versant de 87 km² constitué principalement de terrains agricoles. L'eau y est proche de la neutralité, sa qualité est correcte mais les taux de nitrates y sont élevés (Marchand *et al.* 2015).

III.1.2. La station de piégeage de Cerisel

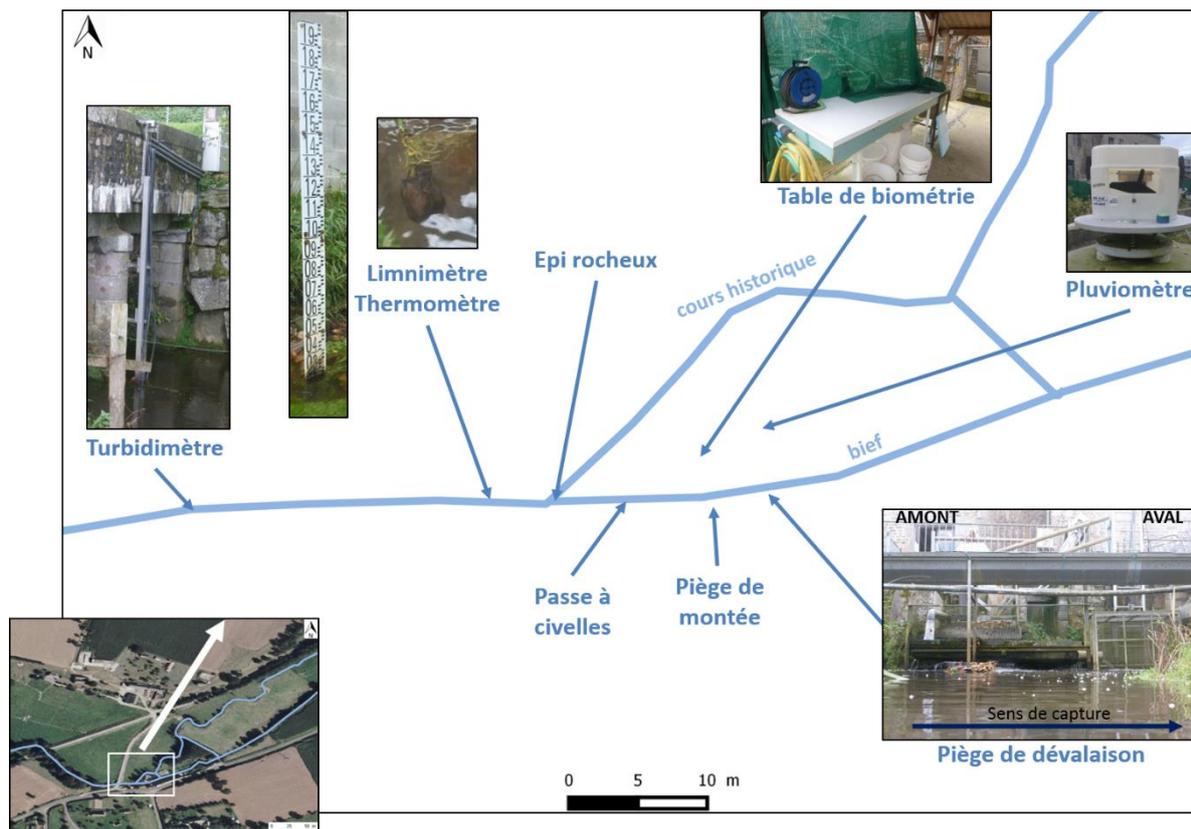
Au niveau de la station de Cerisel, l'Oir se divise en deux cours d'eau (Figure 22) : le cours historique de l'Oir (au Nord) et l'ancien bief du moulin (au Sud). Ils se rejoignent à divers endroits. Notamment :

- ▶ à l'Ouest, au niveau de l'épi rocheux. Ce dernier dirigeait, à ce moment-là, une partie des poissons vers le piège de montée. Il a été enlevé à la fin des expérimentations.
- ▶ à l'Est au niveau de piège de dévalaison. Ce dernier permet de capturer des individus dévalants depuis l'amont du bief.

Ils se rejoignent également plus en amont au niveau d'un chenal visible sur la Figure 22 (carte en bas à gauche).

La station de Cerisel est équipée de trois types de pièges (Figure 22). Un piège de montée et un piège de dévalaison assurent la collection des données depuis plusieurs décennies. Une passe à civelles a été installée plus récemment.

Elle est également munie d'appareils de mesures environnementales (habitat et météo ; Figure 22 ; Tableau 3). Par ailleurs, le débit à l'exutoire de l'Oir est relevé par la DREAL Basse-Normandie (station I9253020 ; <http://www.hydro.eaufrance.fr>)



© Anne Tréguier
 Figure 22. Localisation des pièges et des appareils de mesure de la station de piégeage de Cerisel
 Source des données : Géoportail

Tableau 3. Les appareils de mesure présents à la station de Cerisel et leurs caractéristiques

APPAREIL	MODELE	PRECISION DONNEES	RELEVÉ (pas de temps)
Thermomètre	enregistreurs de températures autonomes TidBit v01 et v02 de marque Hobo	0.1 °C	1 h
Turbidimètre	sonde SOLITAX	1 NTU	6 min
Limnimètre		1 cm	journalier
Pluviomètre	type "à auget basculant" (modèle Précis mécanique) installé à 1.5 m du sol	0.2 mm	enregistreur d'évènement

Source des données : Frédéric Marchand ; Nicolas Gilliet

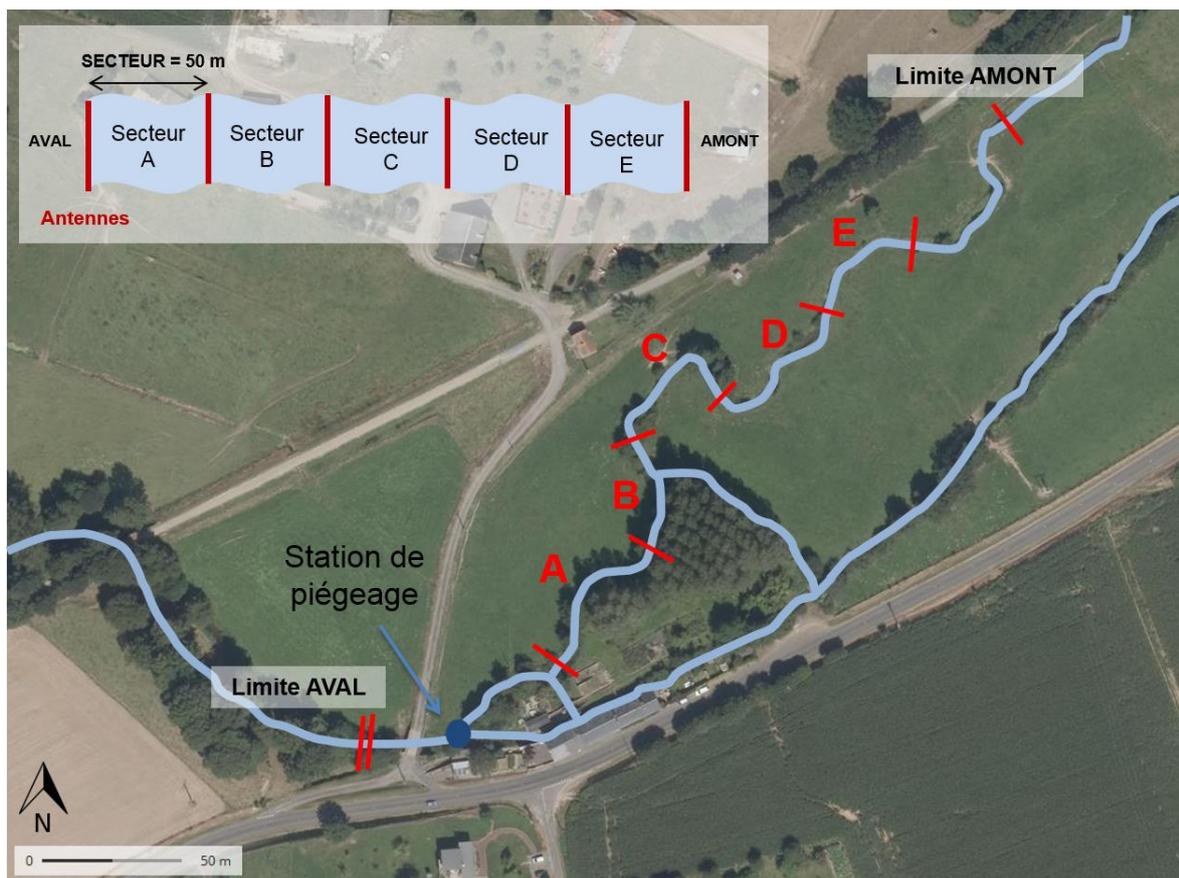
III.1.3. Le site test sur l'Oir

Le site utilisé pour cette expérimentation au cours des trois années est présentée ci-dessous. Il s'agit d'un tronçon de 250 m sur le cours naturel de l'Oir, divisé en 5 secteurs de piégeage de 50 m chacun, notés d'A à E de l'aval vers l'amont (Figure 23). Sa largeur moyenne est de 4,2 m et sa profondeur moyenne de 86 cm.

Ces secteurs sont relativement hétérogènes et ont fait l'objet d'une description d'habitats précise en Juin 2015 (Tréguier *et al.*, 2016).

Depuis cette date, deux opérations ont entraîné de profondes modifications des habitats :

- ▶ La modification de l'épi rocheux en aval du secteur, le 16 septembre 2015, a conduit à une augmentation des niveaux d'eau et un envasement conséquent sur les secteurs A et B.
- ▶ La coupe rase des peupliers, le 5 septembre 2016, a modifié la ripisylve des secteurs A et B.



© Sabine Allou
 Figure 23. Localisation du site test sur l'Oir. Les secteurs sont délimités par des antennes fixes RFID (traits rouges).
 Source des données : Géoportail

Afin de caractériser physiquement le tronçon dans sa configuration actuelle, la largeur, la profondeur et les vitesses de courant ont été de nouveau mesurées le 21 mars 2017 (Figure 24 ; Tableau 4). La hauteur au limnimètre était de 40mm.

Tableau 4. Profondeur, largeur et vitesse moyennes des secteurs de test

	Secteurs du site test				
	A	B	C	D	E
Profondeur moyenne (m)	0.92	0.87	0.74	0.97	0.80
Largeur mouillée moyenne (m)	4.9	4.6	4.0	4.2	3.3
Vitesse moyenne du courant* (m/s)	0.27	0.28	0.55	0.33	0.45

* Vitesse enregistrée par un courantomètre au milieu du cours d'eau et à mi-hauteur.

A cette date, la profondeur variait entre 0.60 et 1.4 m, avec une moyenne de 0.85 m (hauteur au limnimètre de 40 mm). La largeur mouillée variait entre 2.8 m et 5.6 m, avec une moyenne de 4.2 m.

Les secteurs A et B, les plus en aval, sont les plus larges du tronçon et sont caractérisés par un envasement important. Leurs rives se distinguent également par des sous-berges importantes (différence positive entre la largeur mouillée et la largeur plein bord). De plus, la vitesse moyenne du courant y est la plus faible du tronçon (0.27 et 0.28 m.s⁻¹).

Juste en amont, le secteur C est la partie du tronçon la moins profonde et à l'écoulement le plus rapide (0,55 m.s⁻¹). Le substrat y est sableux avec une forte présence de pierres et d'herbiers. La zone peut s'apparenter à un radier lorsque les hauteurs d'eau sont très faibles.

Enfin, les secteurs D et E, en amont du tronçon, présentent un substrat sableux, un courant moyen (0.33 et 0.45 m.s⁻¹) et des rives structurées en « plages » (différences négatives entre la largeur mouillée et la largeur plein bord).

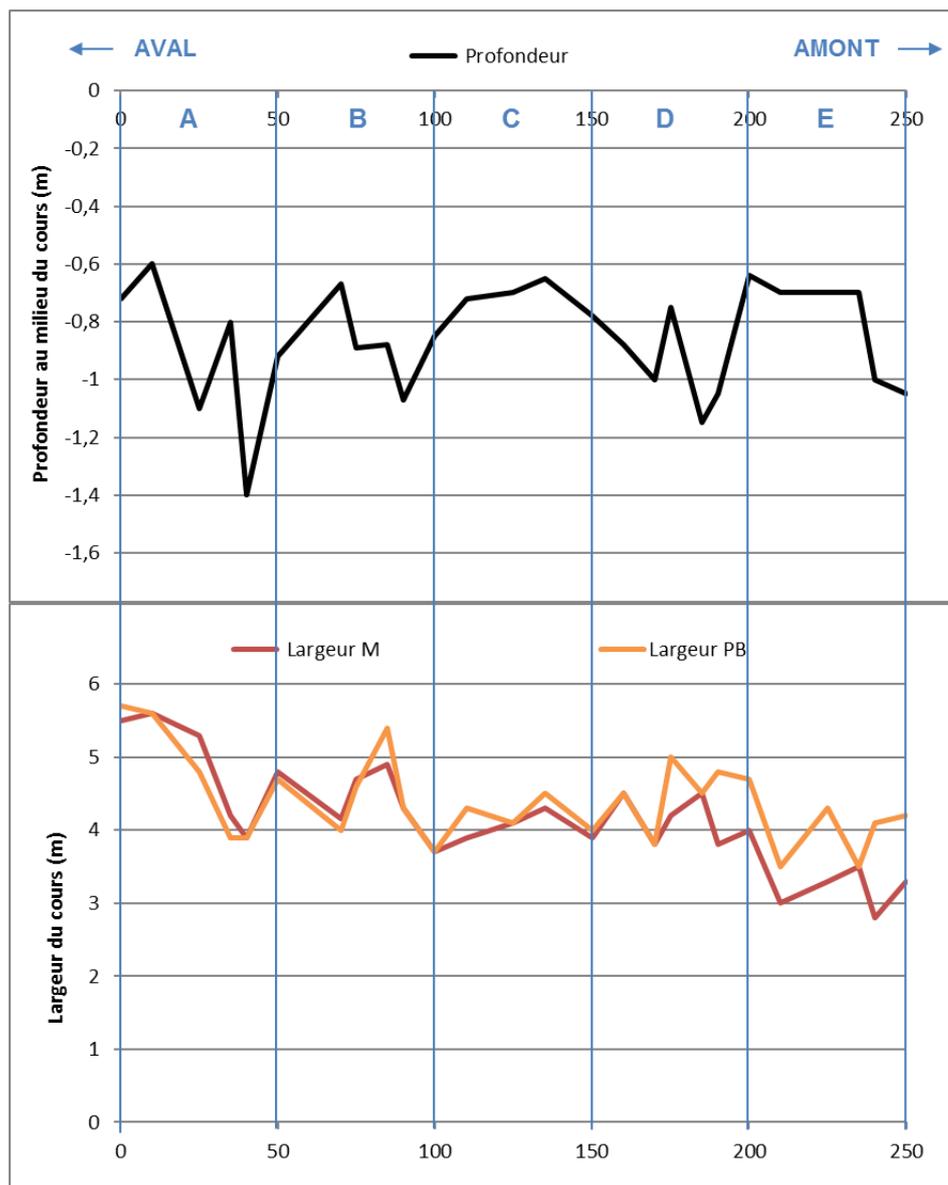


Figure 24. Evolution de la profondeur (au milieu) et de largeur du cours d'eau (largeur mouillée M et largeur plein bord PB) pour chaque secteur depuis l'aval vers l'amont de la zone de piégeage. Les données ont été relevées le 21 mars 2017 pour une hauteur d'eau au limnimètre de 40 mm

III.2. La plateforme expérimentale : site des études en milieux contrôlés

Afin de maîtriser certaines variables de test comme l'optimisation des engins de capture et l'anesthésie des anguilles, plusieurs expérimentations ont été conduites en milieu contrôlé. Elles se sont déroulées sur la plateforme expérimentale aquatique de Rennes - Le Rheu (PEARL). Cette plateforme appartenant à l'U3E de Rennes est agréée pour l'expérimentation animale, la détention et l'élevage d'animaux non domestiques. Plusieurs dispositifs ont servi au déroulement de nos expérimentations sur l'anesthésie et le marquage des anguilles, l'étude de la sélectivité et de l'efficacité des engins de capture :

- ▶ Les halls, compartimentés en une quinzaine de salles techniques ou expérimentales avec des aquariums,
- ▶ Le plateau des mésocosmes qui regroupe une centaine de bassins extérieurs de 0,5 m³ à 30 m³ (Figure 25). L'ensemble est soumis aux variations climatiques locales (précipitations, température...),
- ▶ Les étangs : Une trentaine de bassins extérieurs de 100 m² à 1000 m² ainsi que 6 rigoles d'environ 50 x 5 m.



Figure 25. Photographie de mésocosmes extérieurs de la plateforme PEARL à Rennes utilisés pour l'expérimentation du suivi de marquage PIT-tag à court terme.

III.3. La Vilaine

Un protocole de quantification de populations d'anguilles en milieux profonds de grande étendue, à l'aide de filets, a été testé et est décrit dans ce rapport. Le site pilote de l'Oir ne permettait pas cette expérimentation, par manque de surface en eau. Il a donc été testé sur la Vilaine, en partenariat avec l'EPTB de la Vilaine.

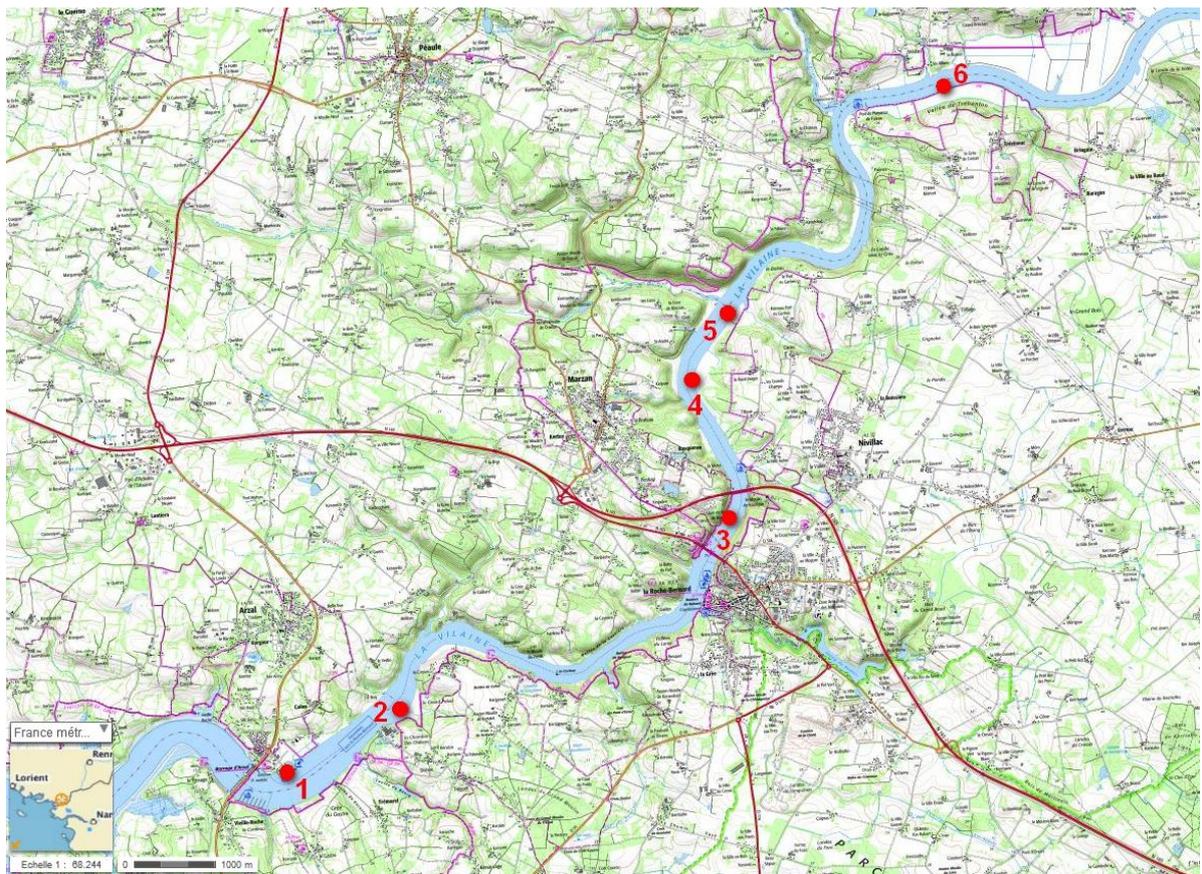
Ce fleuve de 225 km prend sa source dans les collines du département de la Mayenne et se jette dans l'Océan Atlantique, dans le département du Morbihan. Il draine ainsi un bassin versant de 10 536 km². Sa partie aval est caractérisée par le barrage estuarien d'Arzal-Camoël situé à 12 km de l'embouchure. Ce barrage est équipé de trois passes à poissons, dont deux pour les anguilles (une en rive gauche et une en rive droite du barrage).

Six secteurs en amont de ce barrage ont été identifiés pour mettre en œuvre l'expérimentation (Figure 26).

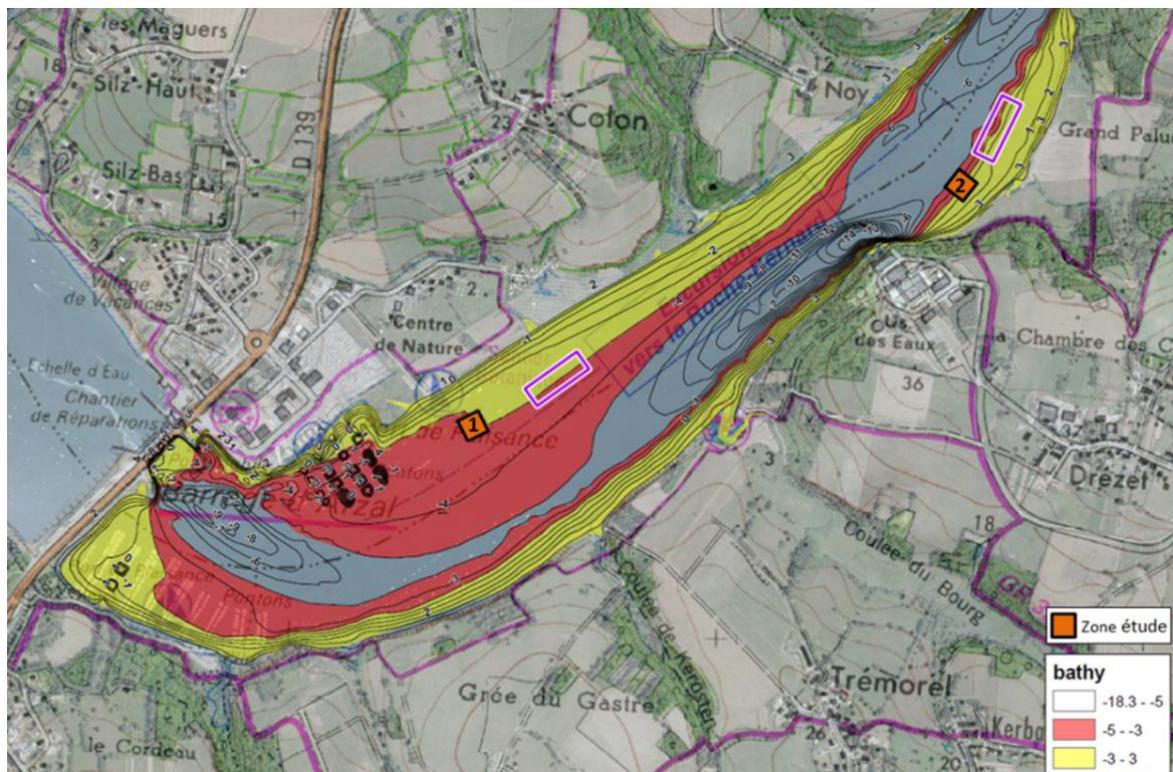
Une première visite et des essais de capture d'anguilles ont été réalisés avec l'aide d'un pêcheur professionnel sur les sites 1, 2 et 5, les 11 et 12 Mai 2016. Le secteur 1, proche du barrage d'Arzal, a été retenu pour tester le protocole lors de la première session de pêche. Sa proximité avec le port de plaisance simplifie l'accès pour la pose du dispositif. Néanmoins, il s'est avéré que cette proximité avec le port rendait également la zone d'étude peu sécurisée. Il a donc été décidé de déplacer la zone d'étude au secteur 2 lors de la deuxième campagne de 2016 ainsi que la campagne 2017 (Figure 29). Les caractéristiques des deux sites ayant servi pour l'expérimentation sont recensées dans le tableau 5.

Tableau 5. Caractéristiques des sites de l'étude

Secteurs	n°1	n°2
Distance au barrage	1 000 m	2 200 m
Largeur cours d'eau	460 m	380 m
Profondeur	3,1 à 6,7 m	Environ 4 à 6 m
Substrat	rochers / vase	vase
Végétation	nulle	nulle



© EPTB Vilaine
 Figure 26. Localisation des secteurs d'étude potentiels sur la Vilaine
 Source des données : Géoportail



© EPTB Vilaine
 Figure 27. Localisation des secteurs d'étude. Les rectangles violets représentent les sites potentiels identifiés en mai et les carrés orange les zones d'étude réellement pêchées. Le secteur n°1 est proche du port de plaisance et le secteur n°2, plus en amont, est proche de la zone de prélèvement d'eau potable.

III.4. Calendrier général des expérimentations

Durant les 3 années de cette étude, les principales expérimentations se sont organisées de la manière suivante (Figure 28):

Sur le secteur d'étude principal de l'Oir :

► Le piégeage par engins passifs a débuté dans la partie aval du secteur d'étude, de février à juillet 2015. Pendant ces 6 premiers mois, différents type d'engins ont été testés, pour représenter différents efforts d'échantillonnage. Ces premières sessions ont permis de commencer à marquer des individus à l'aide des PIT-tags et de mettre en place un protocole standardisé. Ce protocole de comparaison des engins de capture a ensuite été mené sur le secteur de piégeage anguille (secteurs A à E). Un piégeage quotidien d'août à novembre 2015 puis de mai à octobre 2016 a permis la capture et le marquage régulier de nouveaux individus. Fin 2016, un protocole final a été mis en place, avec un seul type d'engin. Le piégeage a repris de mars à août 2017 pour la dernière année d'échantillonnage.

► La mise en place des antennes fixes permettant de détecter les individus marqués à l'aide des PIT-Tags a commencé début 2015. Leur mise en route a été perturbée par des problèmes de synchronisation entre l'ensemble des antennes du secteur. Quelques détections ont été enregistrées, notamment sur la double antenne en aval du pont de Cerisel. Les enregistrements en continu ont été pleinement opérationnels à partir de mai 2016. Mis à part deux antennes-double de part et d'autre du piège de Cerisel, elles ont toutes été démontées et stockées à la fin des expérimentations.

► Plusieurs sessions de PIT-tracking ont été réalisées à l'aide d'une antenne mobile à la fin de l'année 2015. Deux sessions ont été renouvelées en 2016, dont la dernière a été couplée à une pêche électrique, le 13 octobre 2016. Le tracking a été réalisé de manière hebdomadaire en 2017. Comme en 2016, une dernière session été couplée à une pêche électrique le 28 septembre 2017. Au total, 39 PIT-tracking ont été menées sur le secteur anguille durant ces 3 années.

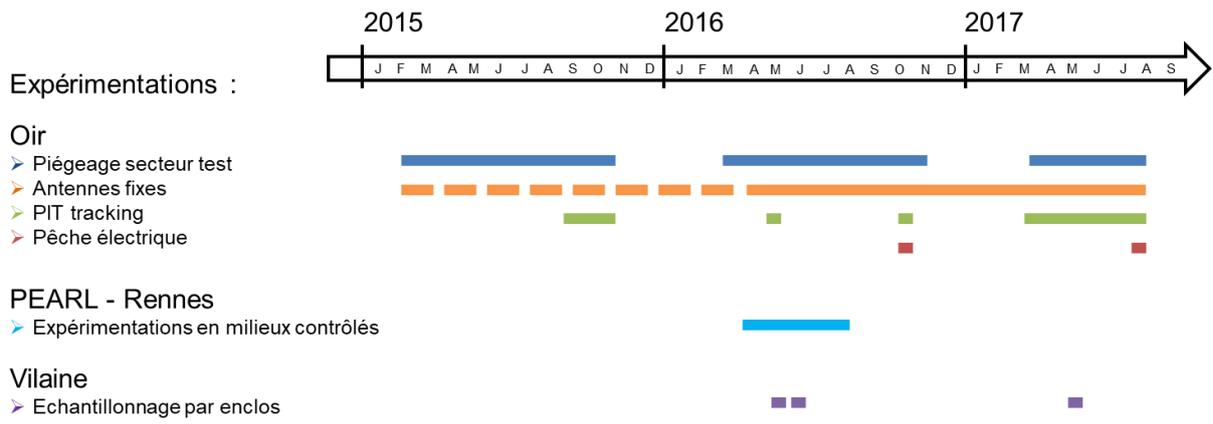
► Deux opérations de pêche électrique ont été réalisées sur ce secteur. Une première à mi-parcours en octobre 2016, permettant de marquer un grand nombre de nouvelles anguilles et d'obtenir une estimation correction de la densité grâce à un niveau d'eau particulièrement faible. La seconde opération s'est déroulée en septembre 2017 pour clore l'expérimentation.

Sur la plateforme PEARL de Rennes :

Des expérimentations ont été menées en parallèle en milieux contrôlés d'avril à août 2016. Quatre étapes clés d'un protocole d'échantillonnage sont testées : l'anesthésie, le marquage, le choix des engins par rapport à la sélectivité et l'efficacité de capture. Ces expérimentations complémentaires ont eu pour but d'ajuster le protocole d'échantillonnage et de fiabiliser les résultats obtenus in situ sur l'Oir (Tréguier et al, 2016).

Sur la Vilaine :

Le dispositif développé par Ubl & Dorow (2015) a été testé sur la Vilaine lors de deux sessions en juin 2016. Les résultats peu probants de cette première campagne ont conduit à renouveler l'expérimentation en mai 2017, en doublant le dispositif.



© Sabine Allou
 Figure 28. Calendrier général des expérimentations sur les 3 ans du projet, sur tous les sites

IV. Test et optimisation d'engins passifs pour la capture d'anguille

En milieu profond, il est impossible de quantifier une population d'anguilles par pêche électrique, du fait de sa faible efficacité dans ce milieu. Afin de créer un protocole simple et aisément reproductible, les engins passifs de capture ont été privilégiés.

Leur facilité d'utilisation et leur coût abordable sont des atouts importants pour les acteurs qui désirent réaliser ce protocole de quantification en milieu profond. Plusieurs types d'engins passifs existent, avec des caractéristiques qui leur sont propres. Des expérimentations ont été menées afin de connaître l'efficacité de chacun de ces engins, en terme de capture et de rétention des anguilles. Ces expérimentations visent à choisir et optimiser un engin passif, afin qu'il puisse servir de standard pour cette méthode de quantification.

IV.1. Protocole d'échantillonnage des anguilles par engins passifs

IV.1.1. Les différents engins testés

Trois types d'engins ont été utilisés lors des différentes expérimentations *in situ*: les nasses, les bourgnes et les verveux. Les différentes fiches techniques sont présentées dans Tréguier et al (2016) ainsi que dans l'Annexe 2 de ce rapport.

Plusieurs modalités ont été testées pour les engins de type verveux ou bourgnes sans entonnoir. Quatre maillages différents pour les verveux (de 6 à 11 mm dans la chambre terminale). Cinq prototypes de bourgnes ont été réalisés et testés, dont l'entonnoir central était modifié pour limiter la sortie des poissons (Tableau 6, Figure 29).

Tableau 6. Comparaison succincte des caractéristiques des pièges utilisés

Engin	L x l x h	Nombre de chambres	Matériau	Maillage (mm)	Modification entrée	Test in situ	Test en milieu contrôlé
Nasse avec entonnoir	140 x 44 x 34	2	plastique	7,3 x 34	/	x	x
Bourgnes sans entonnoir extérieur	80 x 17 x 17	2	métalliques	6	Non modifiée	x	x
					Filet		x
					Filet chaussette		x
					Bec PVC	x	x
					Elastique noir	x	x
					Elastique pêche		x
Verveux	320 x 107 x 80	3	filet souple	6	/		x
				8			x
			nylon	10		x	x
				11			x

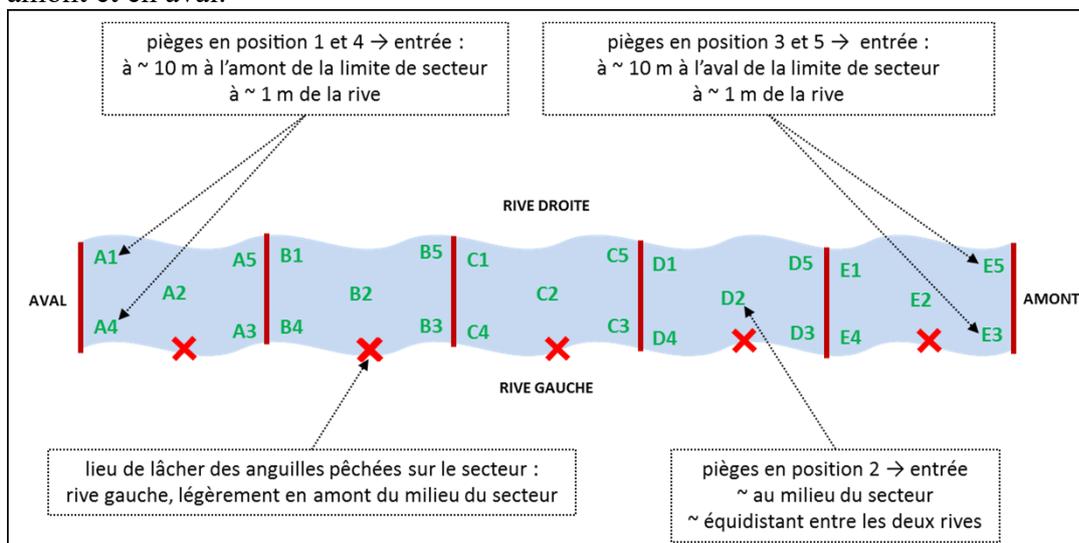


Figure 29. Bourgne à « bec PVC »

En 2016, un effet appât fut testé sur plusieurs semaines d'expérimentations. L'appât testé est le ver canadien (*Lumbricus terrestris*), couramment utilisé par les pêcheurs. Coupé en deux, il est placé dans une boîte percée, puis installé dans le compartiment final de l'engin pour y attirer les anguilles.

IV.1.2. Protocole de Capture – Marquage – Recapture

Chaque début de semaine, les engins sont positionnés sur un des emplacements du secteur (1 à 5 ; Figures 30 et 31), placés parallèlement à la rive, l'entrée en direction de l'aval. Pour des raisons pratiques, les nasses et les bourgnes sont installées et fixées depuis la rive gauche alors que l'installation des verveux s'effectue en descendant dans l'eau. L'emplacement de ces derniers est repéré à l'aide de piquets métalliques, qui permettent également de les fixer en amont et en aval.



Les engins sont installés le lundi matin et relevés quotidiennement jusqu'au vendredi. A la relève de chaque engin, le nombre d'individus de chaque espèce est noté, permettant d'obtenir des CPUE (en nombre d'individus / engin / jour). Les espèces autres que l'anguille sont immédiatement relâchées à l'endroit de capture.

Lorsqu'une anguille est capturée (Figure 32), elle est passée au lecteur de PIT-tag. Si l'anguille n'est **pas marquée** par PIT-tag, il s'agit de sa capture initiale. Elle subit alors une anesthésie et un marquage par PIT-tag, qui lui assignera un numéro de suivi individuel. Ces protocoles d'anesthésie et de marquage ont été dûment testés et optimisés en milieu contrôlé (voir § 5.1). L'anguille fait également l'objet d'un protocole de mesures biométriques. On renseigne alors : la longueur totale de l'individu et de sa nageoire pectorale, son poids, ses diamètres oculaires horizontal et vertical, la largeur de sa tête, la détermination (ou non) de la ligne latérale et la couleur de l'anguille (jaune, argentée...). L'anguille est également examinée visuellement afin de déterminer ses pathologies éventuelles, selon le code défini par Beaulaton & Pénil (2009). Si l'anguille est déjà **marquée**, sa date de précédente capture est vérifiée. Si elle a fait l'objet d'une capture assortie de mesures biométriques il y a moins d'un mois, elle est directement relâchée. Dans le cas contraire, l'anguille est anesthésiée et l'étape complète de biométrie est renouvelée, avec la description de la pathologie. Toutes les anguilles sont relâchées en rive gauche, au milieu de leur secteur de capture.

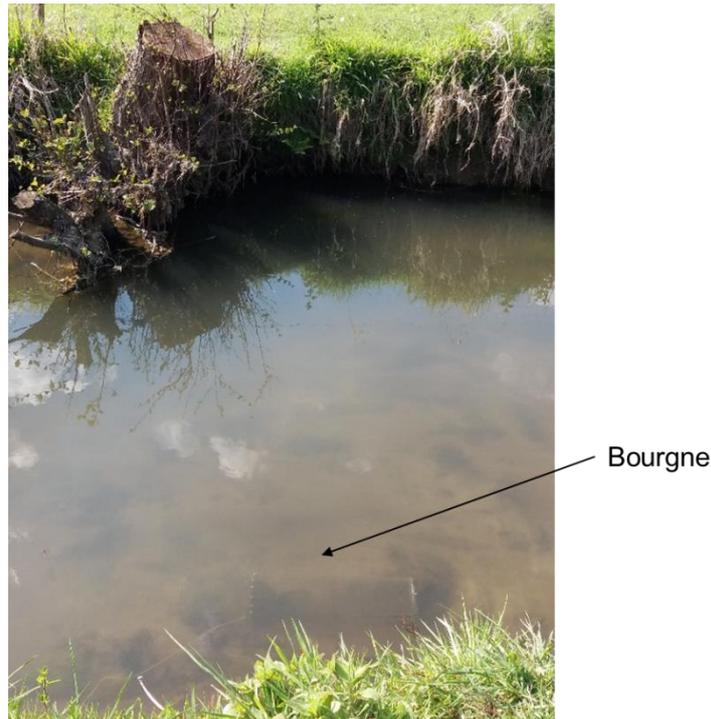


Figure 31. Bourgne installée à l'emplacement A3 : secteur A, rive gauche



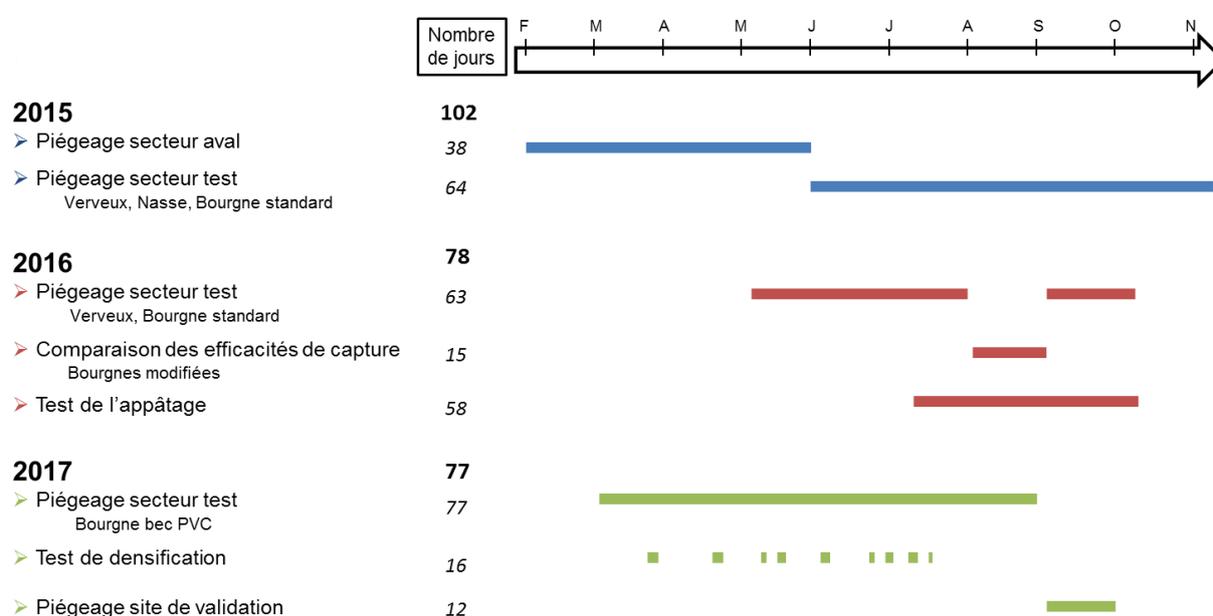
Figure 32. Capture d'anguille jaune dans une bourgne à bec PVC

IV.1.3. Calendrier détaillé des campagnes de piégeage

En 2015, une première session de piégeage a été mise en place à partir de février, principalement en aval du secteur de piégeage A (Figure 33). L'objectif était de tester différents types d'engins de captures d'anguilles, et de commencer à marquer des individus, tout en travaillant à la mise en place des antennes. Lors de cette session, quatre types de verveux, les nasses avec entonnoir et le modèle de bourgne sans entonnoir d'origine ont été utilisés. Une session de capture dure 24h, avec la pose et le relevé des pièges le matin. D'un à vingt-trois engins étaient posés, selon la disponibilité des pièges et le travail à fournir sur les antennes. A partir de mi-juillet 2015, un protocole-type a été mis en place sur le secteur de piégeage du site test principal sur l'Oir. Ce protocole ne varie entre les sessions qu'au niveau du nombre et du type d'engins posés.

En 2016, le protocole mis en œuvre est détaillée dans Allou et al (2017). On note l'arrêt de l'utilisation de la nasse avec entonnoir. Ses grandes dimensions rendent son installation complexe et son maillage trop grand n'est pas assez sélectif sur les petites anguilles jaunes. Quant aux bourgues, qui semblent laisser échapper une grande quantité d'anguilles par l'entonnoir d'entrée, deux modèles sont testés en milieu naturel. L'entrée en filet souple a été soit fermée par un élastique, soit par un bec PVC et l'efficacité de capture des différents engins en milieu naturel a été testé lors de la campagne d'Août 2016. Trois à cinq engins sont ainsi posés chaque jour par secteur. Dans les secteurs à verveux, deux bourgues complètent l'échantillonnage. Dans les autres secteurs, cinq bourgues sont posées quotidiennement. D'autre part, à partir du 5 juillet 2016, un effet appât a été testé.

En 2017, suite aux résultats des expérimentations d'efficacité et de sélectivité, mais également pour des raisons pratiques, seule la bourgne bec PVC a été utilisée pour le piégeage en 2017. Cinq engins sont quotidiennement posés dans chaque secteur piégé. Lors de six semaines de test, une densification des engins de pêche a été mis à l'essai sur les deux secteurs A et B avec 5, 10 ou 15 engins déployés sur 50 mètres de cours d'eau.



© Sabine Allou
Figure 33. Calendrier des campagnes de piégeage, suivant les sites et les engins de capture

IV.2. Résultats général des captures en milieu naturel

IV.2.1. Effort d'échantillonnage par années et par secteurs

Durant les 3 années de piégeage, les divers engins passifs n'ont pas été utilisés de façon uniforme (Tableau 7). Les verveux, les nasses avec entonnoir et les bourgues standard ont principalement été installés lors de la première année de piégeage. Ces dernières ont continué d'être utilisées en 2016 comme témoin en parallèle des bourgues modifiées par un bec PVC ou un élastique. Enfin, en 2017, seules les bourgues bec PVC ont été utilisées.

L'effort d'échantillonnage est défini ici comme le nombre de fois où un engin a été posé, c'est-à-dire le nombre d'engins posés x le nombre de jours de piégeage. L'effort total sur ces 3 années est équivalent à 4648 engins.jours. L'utilisation des verveux et des nasses représente respectivement 3% de l'effort total déployé, la bourgne standard 38% alors que les bourgues modifiées par un bec PVC atteignent 53% et 2,5% pour la bourgne fermée par élastique.

Tableau 7. Effort d'échantillonnage en nombre d'engins.jours pour chaque type d'engin par année

	2015	2016	2017	TOTAL
Nasse	156	0	0	156
Bourgne standard	937	824	0	1761
Bourgne bec PVC	0	394	2072	2466
Bourgne Elastique	0	113	0	113
Verveux	107	45	0	152
TOTAL	1200	1376	2072	4648

Sur les différents secteurs que composent le tronçon à anguille (A à E), l'effort d'échantillonnage a été réparti de façon homogène sur les 3 années (Tableau 8).

Tableau 8. Effort d'échantillonnage en nombre d'engins.jours pour chaque type d'engin par secteur

	AVAL	A	B	C	D	E	TOTAL
Nasse	132	8	0	8	0	8	156
Bourgne standard	152	313	335	314	336	311	1761
Bourgne bec PVC	0	504	452	475	477	558	2466
Bourgne élastique	0	0	0	36	38	39	113
Verveux	75	24	25	9	10	9	152
TOTAL	359	849	814	841	860	925	4648

Les nasses ont été principalement utilisées début 2015 sur le secteur aval. Leur utilisation s'est vite révélée inadaptée à l'objectif de notre échantillonnage. Pour le verveux, le nombre d'engins.jours est plus faible car seul un engin peut être posé par secteur, contrairement aux bourgnes pour lesquels l'effort va de 3 à 15 engins par secteur par jour.

IV.2.2. Résultats des captures toutes espèces

Sur les 3 années d'échantillonnage par engins passifs, 6126 poissons ont été capturés (Tableau 9). En terme d'abondance, les vairons représentent 71% des captures. La loche franche est la seconde espèce capturée en nombre avec 13,7% du total. Les anguilles représentent seulement la 3^{ème} espèce avec 12,6% du nombre total capturé. Les chabots, gardons, goujons, et les salmonidés sont considérés comme des prises occasionnelles avec une abondance relative inférieure à 1%.

Tableau 9. Abondance, abondance relative et fréquence d'occurrence pour chaque espèce

Espèces	Anguille	Chabot	Gardon	Goujon	Loche	Saumon	Truite	Vairon
Total général	773	15	1	61	845	46	43	4342
Abondance relative	12,6%	0,3%	0,0%	1%	13,8%	0,8%	0,7%	70,9%
Fréquence d'occurrence	16,6%	0,2%	0,0%	1,2%	12,6%	0,9%	0,8%	27,1%

On peut également considérer la fréquence d'occurrence de chaque espèce, c'est-à-dire le nombre d'engins relevés où l'espèce est présente sur le nombre total d'engins relevés (4648 engins.jours). Cette fréquence d'occurrence renseigne sur la régularité avec laquelle un taxon est capturé mais ne tient pas compte de son abondance.

On remarque alors que les vairons ne représentant plus que 27,1% en fréquence. En effet, pour cette espèce, il est fréquent de capturer beaucoup d'individus dans chaque engin (4 individus en moyenne, jusqu'à 58 comptés). Pour les anguilles, dont les captures sont en moyenne d'un

seul individu par engin, la fréquence d'occurrence de cette espèce cible est de 16,6%. Plus explicitement, 16,6% des engins relevés ont piégé une anguille. Il faut donc relever au moins 6 engins pour espérer capturer une anguille par jour.

On peut également observer une variation saisonnière importante de la composition spécifique des captures (Tableau 10). On observe par exemple, pour la loche et le vairon, des captures qui s'étalent sur toute l'année à partir de février, avec une légère diminution de la fréquence d'occurrence à partir de septembre/octobre. Pour les anguilles, la saison préférentielle des captures court de juin à août avec une fréquence d'occurrence moyenne de 21%. Au mois de juin, le plus favorable, la relève de 4 engins par jour suffirait pour capturer au moins une anguille.

Tableau 10. Fréquence d'occurrence de chaque espèce en fonction des mois de capture

	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	octobre	novembre
Effort (engins.jours)	35	238	454	311	787	757	985	528	230	323
Espèces	Fréquences d'occurrence									
Anguille	0%	10%	11%	16%	25%	20%	19%	14%	7%	9%
Chabot	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gardon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Goujon	0%	0%	0%	1%	1%	1%	3%	1%	2%	1%
Loche	0%	24%	12%	23%	16%	11%	14%	6%	3%	4%
Saumon	0%	0%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%
Truite	0%	1%	0%	1%	0%	1%	0%	2%	3%	1%
Vairon	0%	43%	22%	30%	23%	33%	34%	23%	16%	14%

IV.2.3. Résultats des captures anguilles

IV.2.3.1. Captures totales des anguilles avec les différents engins

Au cours des diverses sessions de piégeage de 2015 à 2017, 773 captures d'anguilles ont été réalisées par engins passifs (Tableau 11), représentant 343 individus identifiés par leur numéro PIT-tag et 14 individus non identifiés. Parmi les individus non identifiés, un individu a été marqué juste avant une panne du lecteur de PIT-tag. Cela n'a pas permis d'identifier le numéro de sa puce. Il semblerait qu'il n'ait pas été recapturé par la suite, dans la mesure où aucun individu déjà marqué, correspondant à ses dimensions et pour lequel le numéro de PIT-Tag était inconnu, n'a été capturé. Par ailleurs, le reste des individus capturés, d'une longueur totale inférieure à 200mm, n'a pas été marqué.

296 anguilles ont été marquées à la suite de leur capture dans les engins. De plus, suite à la pêche électrique du 13 octobre 2016, 186 nouvelles anguilles ont été marquées sur le secteur. De même, 49 anguilles ont été capturées au piège de Cerisel, marquées et relâchées à proximité du secteur anguille. Enfin, certains individus recapturés sur le secteur ont pu faire l'objet de marquage lors des Indices Abondance Anguilles réalisés sur l'Oir depuis 2009.

Le graphique ci-après (Figure 36), illustre les captures journalières d'anguilles dont la marque est posée ou lue au cours des 3 années d'échantillonnage.

On observe que le nombre de PIT-tags lus (barres vertes) augmente dans le temps, mais également que le nombre de nouveaux individus (nombre de marques posées (barres jaunes)) est croissant au cours du temps. Malgré un effort d'échantillonnage intensif, on observe la capture régulière de nouveaux individus sur le secteur. Ce flux d'immigration possible dans le système est un élément essentiel pour considérer l'hypothèse d'une population "ouverte" dans les analyses de capture-marquage-recapture.

Tableau 11. Effort d'échantillonnage (engins.jours) et résultats des captures d'anguilles par type d'engin et par année

Année	Engin	Nombre de jours de capture	Effort (engins.jours)	Nombre de captures d'anguille	Nombre d'anguilles marquées (PIT-tag posé)	Nombre d'anguilles recapturées (PIT-tag lu)
2015	Bourgne standard	68	937	162		
	Nasse	46	156	41		
	Verveux	34	107	31		
	TOTAL	102	1200	234	146	85
2016	Bourgne standard	78	824	69		
	Bourgne élastique	20	113	33		
	Bourgne bec PVC	38	394	76		
	Verveux	20	45	28		
	TOTAL	78	1376	206	91	114
2017	Bourgne bec PVC	77	2072	333		
	TOTAL	77	2072	333	59	266
TOTAL		257	4648	773	296	465

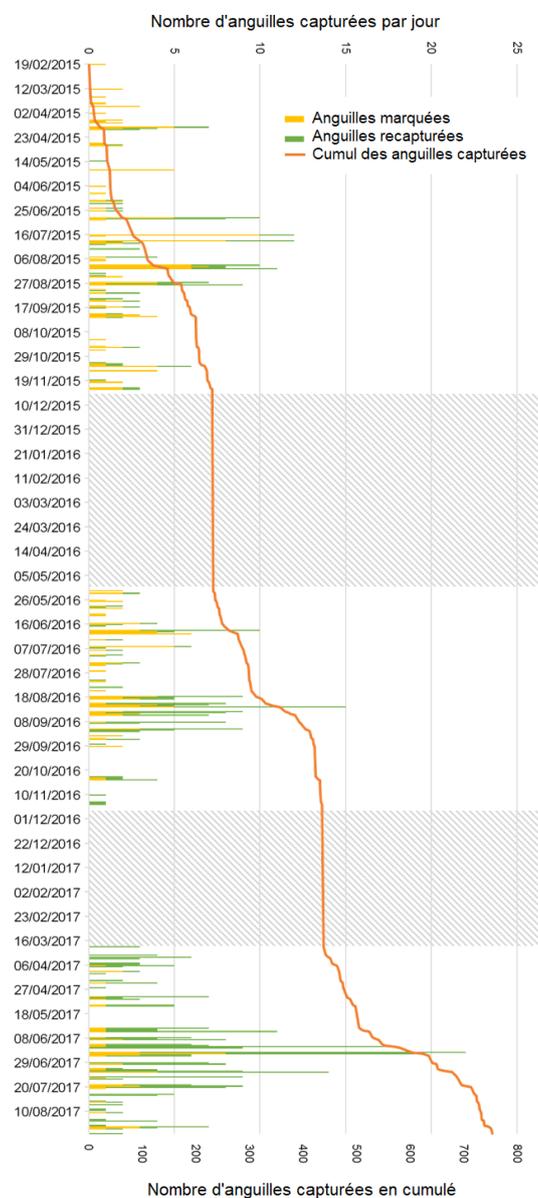


Figure 34. Graphique du nombre de captures et recaptures d'anguilles journalière de 2015 à 2017 lors des différentes sessions d'échantillonnage (périodes grisées = pas de piégeage)

IV.2.3.2. CPUE par engin par jour

Afin de prendre en compte l'effort d'échantillonnage dans l'analyse, les captures sont rapportées à l'effort. On calcule ainsi des Captures Par Unité d'Effort (CPUE) en nombre d'anguilles capturées par engin et par jour (24 heures de pêche). Cette analyse est à considérer avec prudence puisque les CPUE sont faibles, inférieures à 1 anguille par engin et par jour, à l'exception des verveux.

La Figure 35 décompose les CPUE par engin et par date. Elle met de nouveau en évidence une certaine variabilité des captures selon les dates mais également entre deux types d'engins pour une même date. On observe notamment que les verveux et les nasses avec entonnoirs ont souvent une plus forte CPUE que les nasses sans entonnoirs pour les deux premières années de piégeage où ces engins sont utilisés ensemble.

Pour les bourgnes, les CPUE sont plus régulières par jour avec une légère augmentation pour les bourgnes modifiées en PVC ou élastique.

On peut enfin relever une certaine saisonnalité des captures avec des CPUE qui sont plus importante pour tous les engins pour les mois d'été.

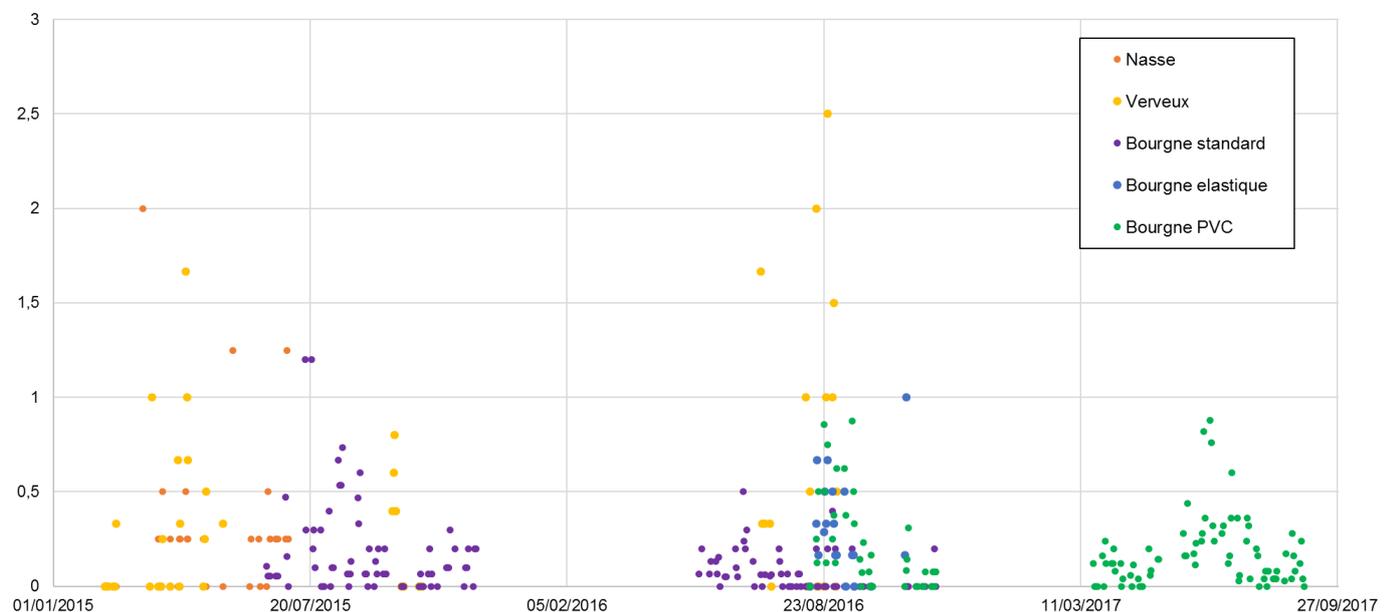


Figure 35. CPUE moyenne par engin et par jour (24h de pêche)

IV.2.3.3. CPUE par engin par secteur

Les CPUE des différents engins par secteur de capture et l'erreur standard associée sont représentés figure 36. Ces CPUE sont globalement faibles avec moins d'une anguille capturée par engin et par jour pour tous les engins. Les verveux et les nasses affichent des CPUE importantes dans tous les secteurs, et notamment les secteurs Aval et C pour les deux engins, et les secteurs A et E pour les verveux seulement. Les bourgnes modifiées par un bec PVC ou un élastique ont des CPUE plus grandes que la bourgne standard, non modifiée, qui semble l'engin le moins efficace. La bourgne PVC a une efficacité régulière autour de 0,2 anguilles capturées par engin et par jour quel que soit le secteur. Cela signifie qu'avec 5 bourgnes posées dans un secteur de 50 m, il est probable de capturer au moins une anguille.

Pour une même CPUE moyenne, les bourgnes standard et les bourgnes PVC ont une erreur standard plus faible que les verveux, les nasses ou les bourgnes élastiques. Cette moindre variabilité de l'efficacité de capture entre les secteurs est préférée dans un protocole qui a pour but d'être reproduit dans différents sites.

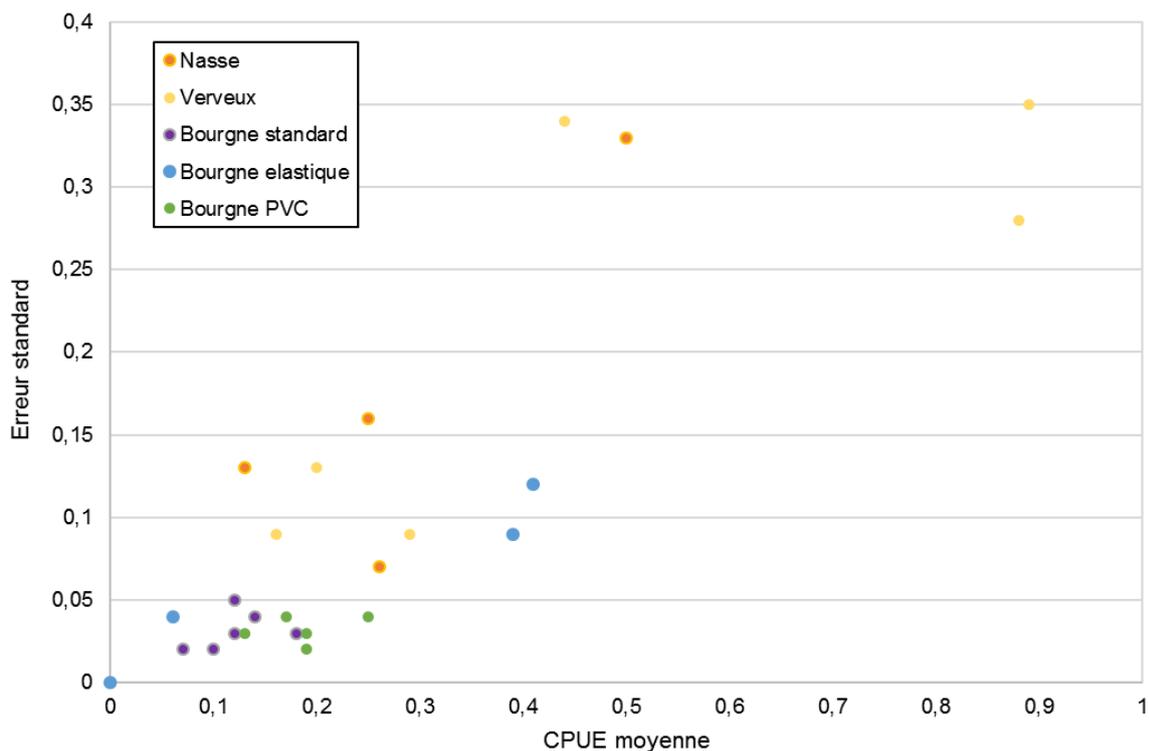


Figure 36. CPUE moyenne et Erreur standard par engin et par secteur

IV.2.4. Les recaptures d'anguilles

Les anguilles recapturées sont reconnues grâce à leur marquage par PIT-tag. Une phase d'exploration des données a été nécessaire pour cerner le comportement général de la population d'anguilles et choisir un modèle de simulation adapté.

IV.2.4.1. Nombre de recapture par individu

Sur les 343 anguilles capturés, 187 n'ont été capturées qu'une seule fois (54%), alors que 157 individus ont été recapturés au moins 1 fois (46% ; Figure 37). Au maximum, un individu a été capturé 30 fois, soit 29 recaptures (PIT-tag numéro «982000402941800 » capturé la 1^{ère} fois le 16/07/2015).

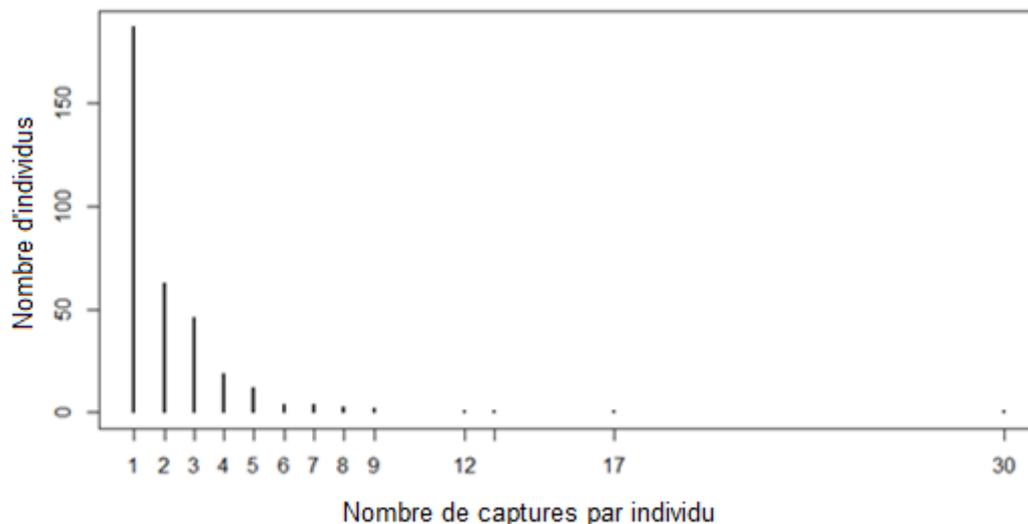


Figure 37. Diagramme du nombre de captures d'anguilles

IV.2.4.2. Délais de recapture

Le délai de recapture est défini ici comme le nombre de sessions de piégeage entre deux recaptures. Le nombre de sessions entre deux recaptures n'est pas strictement égal au nombre de jours, et même parfois très inférieur. En effet, le pas de temps entre deux sessions de piégeage n'est pas régulier. Il peut varier de 1 jour lorsque le protocole est répliqué quotidiennement, jusqu'à plusieurs mois, lors de l'arrêt du protocole entre les deux années d'échantillonnage. Les délais entre les recaptures sont variables (Figure 38). Pour les individus recapturés plus d'une fois, une recapture a majoritairement lieu dans les 10 sessions suivantes (52%) et 38% des recaptures ont même lieu dans les 5 sessions suivantes soit un peu plus d'une semaine de piégeage.

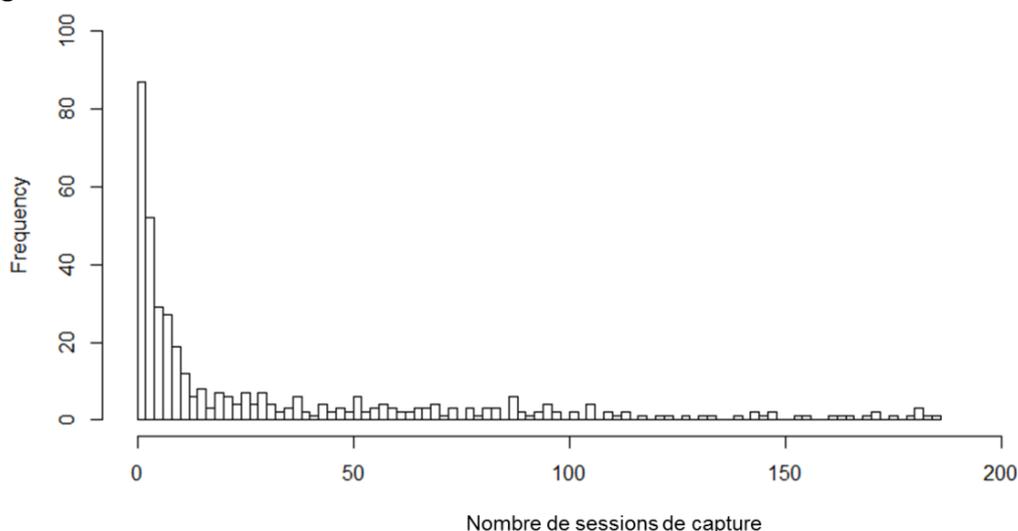


Figure 38. Histogramme des délais de recapture, en nombre de sessions

Si l'on considère le délai en jours calendaires, 50% des recaptures se passent dans les 20 jours suivants et 35% des recaptures se passent dans les 10 jours suivant la dernière capture. Cependant, dans le cas de la première recapture, 20% des individus ont été recapturés plus de 3 mois après la première capture (Tableau 12).

Tableau 12. Nombre de jours entre une recapture et la capture précédente depuis la 1ère capture jusqu'à la 10^e recapture. Les informations pour les individus recapturés plus de 10 fois ne sont pas reportées dans ce tableau.

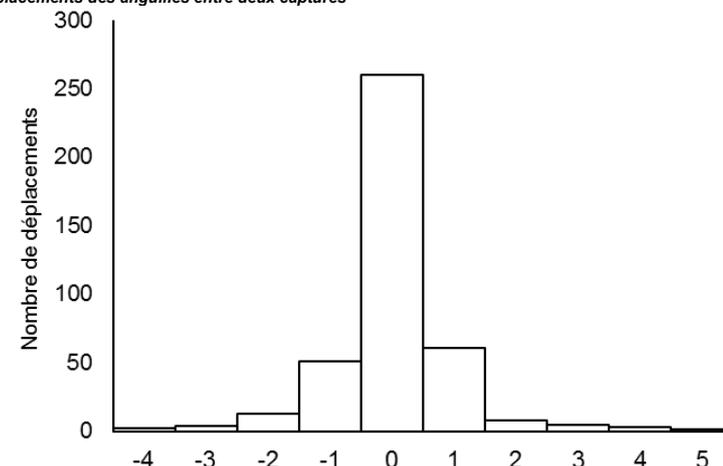
	Pourcentage d'anguilles non recapturées	Pourcentage d'anguilles recapturées					
		<10 sessions	10-20 session	20-30 sessions	30-40 sessions	40-50 sessions	+50 sessions
Capture – 1ère recapture	54%	13%	6%	3%	2%	1%	20%
1-2 ème	39%	32%	4%	3%	5%	2%	14%
2-3 ème	49%	29%	5%	6%	1%	2%	6%
3-4 ème	40%	48%	2%	6%	0%	2%	2%
4-5 ème	45%	38%	10%	0%	7%	0%	3%
5-6 ème	19%	44%	13%	6%	0%	0%	19%
6-7 ème	31%	46%	0%	8%	8%	8%	0%
7-8 ème	33%	67%	0%	0%	0%	0%	0%
8-9 ème	33%	33%	17%	17%	0%	0%	0%
9-10 ème	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%

D'une recapture à l'autre, en moyenne plus d'un tiers des anguilles sont recapturées dans les 10 sessions suivantes.

IV.2.4.3. Déplacements de recapture

On appelle déplacement, le nombre de secteur de différence entre deux captures. Par exemple, un déplacement de « +4 » signifie que l'anguille a été recapturée 4 secteurs en amont de la dernière capture (Tableau 13). Un « 0 », signifie que l'anguille a été recapturée dans le même secteur que la capture précédente.

Tableau 13. Tableau et Histogramme des déplacements des anguilles entre deux captures



Sens et distance de déplacements	Vers l'aval					Même secteur	Vers l'amont				
	-5	-4	-3	-2	-1		0	+1	+2	+3	+4
Nombre de secteurs de départ possibles	1	2	3	4	5	6	5	4	3	2	1
Pourcentage de déplacements	0	0,5%	1%	3,2%	12,5%	63,6%	14,9%	2%	1,2%	1%	0,25%

On observe que la majorité des recaptures (64%) se font dans le même secteur que la capture précédente, même si cette estimation est augmentée par le nombre de secteurs d'origine possibles. Les anguilles sont relâchées au milieu de chaque secteur, et 28% d'entre elles restent dans un secteur délimité de 25 m, voire 75 m (± 1 secteur). Les plus grands déplacements (≥ 100 m) sont moins fréquents (9%), mais également moins identifiables par cette méthode. D'autre part, pour 70 individus, soit 45% des PIT-Tags recapturés, 100% des recaptures par engin passif ont été faites dans leur secteur de 1ère capture.

IV.2.5. Biométrie des anguilles capturées

Tous engins passifs confondus, 549 captures (338 individus) ont fait l'objet de mesures de biométrie. En moyenne, un individu a été manipulé (anesthésie + mesures de biométrie) un peu moins de 2 fois. L'anguille la plus capturée (numéro de PIT-tag 982000402941800, 30 captures en trois ans), n'a été manipulée que 7 fois, en raison du mois de latence entre deux anesthésies imposé par le protocole.

Une dizaine de points « extrêmes » ont été identifiés grâce au calcul de l'indice de condition. La régression quantile (tau = 0.75) permet d'estimer le poids standard W_s afin de calculer le coefficient de condition, selon la méthode de Blackwell *et al.* (2000). Les individus ayant un

coefficient de condition inférieur à 0,5 ou supérieur à 1,5 sont examinés. Les données issues d'erreurs de saisie ont pu être corrigées. Dans l'impossibilité de corriger les données, les individus sont ignorés dans l'analyse de la biométrie (7 individus).

A quelques exceptions près, les anguilles mesurent entre 150 et 650 mm (Figure 39, gauche). La classe de taille majoritaire se situe entre 350 mm et 400 mm.

Une relation a été également testée à l'aide d'un modèle linéaire (lm, logiciel R). Le coefficient de détermination (r^2) est de 0.99, traduisant une forte relation de type $P = aL^b$ entre le poids et la taille des individus capturés sur le secteur (Tableau 14).

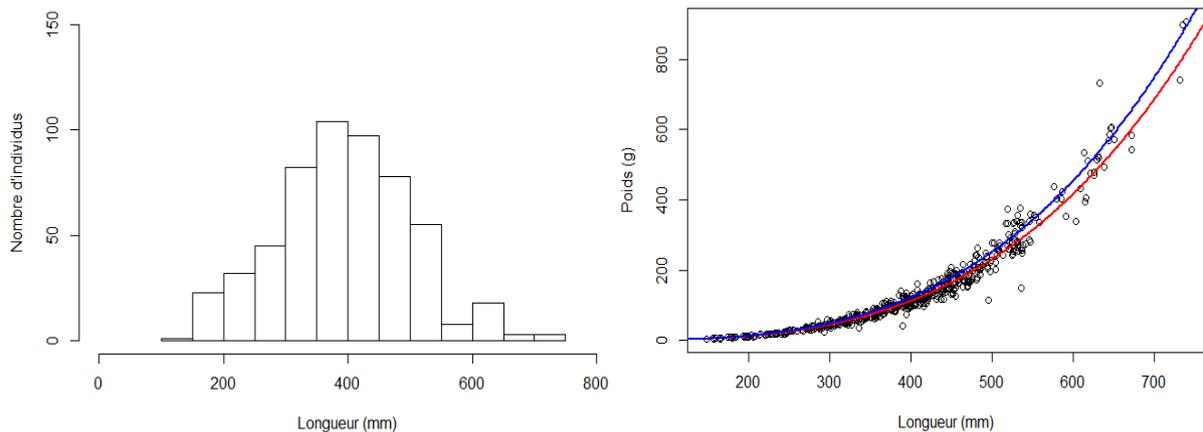


Figure 39. Histogramme de taille (gauche) et relation taille poids (droite) des 1500 anguilles capturées. La ligne rouge représente la relation issue du modèle linéaire et la ligne bleue correspond au modèle de régression quantile (0.75). Les indices sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14. Indices issus des deux types de régressions construite visant à tester les relations taille (mm) – poids (g) des individus

Poids = a x Longueur b		a	b	R ²
Régression linéaire	rouge	4,49.10 ⁻⁷	3.235	0.99
Régression quantile 0.75	bleu	4,64.10 ⁻⁷	3.236	0.89 (pseudo R ²)

L'ampleur du marquage et du suivi individuel lors de cette expérimentation est relativement exceptionnel. Des analyses complémentaires sur les données de biométrie permettraient d'estimer la croissance individuelle des anguilles marquées sur le secteur.

IV.3. Comparaison des engins de capture

IV.3.1. Etude de la sélectivité des engins de pêche passifs

IV.3.1.1. Objectifs

La sélectivité d'un engin de pêche peut se définir comme son efficacité à capturer un poisson d'une taille donnée. Les différentes caractéristiques d'un engin influencent leur capacité à capturer puis à retenir les individus. Cette sélectivité varie donc pour chaque type d'engin et pour chaque maillage d'un même engin. Pour mesurer la sélectivité, il faut connaître la taille des poissons retenus par le piège. Ces tailles permettent d'obtenir une courbe de sélectivité, c'est-à-dire un taux de rétention en fonction de la taille (Baisez, 2001).

L'objectif de cette étude est ainsi de décrire la capacité de rétention de trois engins différents (verveux, nasses et bourgnes) selon la taille des anguilles. Dans ces engins, le poisson est guidé dans des chambres, dont il ne peut théoriquement sortir qu'en franchissant le vide de mailles ou les entonnoirs d'entrée.

Les données de capture en milieu naturel ont été utilisées pour évaluer la sélectivité des engins *in situ*, avec une pose de 24h dans le cours d'eau. En parallèle, des expérimentations en milieu contrôlé ont permis d'étudier différents types d'échappement : la sortie par les vides de mailles et la sortie par les entonnoirs d'entrée.

IV.3.1.2. Protocoles expérimentaux

Trois types d'engins sont comparés : des verveux, des nasses et des bourgnes. De plus, différentes modifications influençant la sélectivité des engins ont été testées : rétrécissement des entonnoirs d'entrée pour les bourgnes et différents maillages pour les verveux (Tableau 16).

Tableau 15. Caractéristiques des différents engins testés dans l'expérimentation « Sélectivité »

Engin	L x l x h	Nombre de chambres	Matériau	Maillage (mm)	Modification entrée	Sortie étudiée
Nasse avec entonnoir	140 x 44 x 34	2	plastique	7,3 x 34	/	Toutes
Bourgnes sans entonnoir	80 x 17 x 17	2	métalliques	6	Non modifiée	Toutes
					Filet	
					Chaussette	
					Bec PVC	
					Elastique noir	
Elastique pêche						
Verveux	320 x 107 x 80	3	filet souple	6	Entrée fermée par un élastique	Vide de maille seulement
				8		
			nylon	10		
				11		

En parallèle des données de capture *in situ*, une expérimentation en milieu contrôlé a été menée sur la plateforme expérimentale de Rennes à l'U3E (PEARL). Elle s'est déroulée du 31 mai au 11 août 2016, dans les bassins intérieurs et extérieurs. Les protocoles utilisés sont décrits en détails dans le rapport d'avancement n°2 (Allou *et al.* 2017).

Une première expérimentation s'est déroulée dans les bassins extérieurs de la station, dans lesquels les engins sont totalement immergés (Figure 40). Des filets de rétentions sont installés autour des nasses et des bourgnes, pour récupérer les anguilles qui sortiraient par les entonnoirs d'entrée ou par les vides de maille. Pour les verveux, fermés au niveau de la poche terminale, l'échappement est étudié seulement au niveau du vide de maille.



© Anne Tréguier

Figure 40. Bassin 1 équipé d'une antenne horizontale dans le sens de la longueur. La nasse test avec filets de recapture est positionnée perpendiculairement avec l'entrée proche de l'antenne. Deux nasses témoin sans filet sont installées le long du bassin à gauche.

Une seconde étude a été mise en place pour les anguilles de moins de 30 cm, dans des bassins intérieurs. Les bourgnes sont installés à la verticale et l'entrée des verveux est fermée par une ficelle afin d'éviter les sorties par les entonnoirs d'entrée (Figure 41). Seul l'échappement par le vide de maille est ainsi observé pour tous les engins, sur une durée de 15 minutes.



© Anne Tréguier

Figure 41. Bourgne sans entonnoir placée à la verticale dans le bassin intérieur E au début de la seconde étude. Toutes les anguilles sont placées dans la dernière chambre de l'engin.

IV.3.1.3. Comparaison des tailles capturées en milieu naturel

D'après les résultats des captures réalisées sur l'Oir entre 2015 et 2016, on peut comparer les gammes de tailles des anguilles capturées par chaque type d'engin (Tableau 16, Figure 42).

Tableau 16. Estimateurs de tailles d'anguilles capturées sur l'Oir depuis 2015 pour chaque type d'engin

Engin	Bourgne			Nasse	Verveux
Caractéristique	standard	élastique	Bec pvc	standard	non modifié
Maille (mm)	6	6	6	7,3 x 34	10
Nb d'anguilles capturées	231	33	76	41	59
Gamme de taille capturée	[149 ; 672]	[181 ; 528]	[197 ; 559]	[316 ; 740]	[330 ; 735]
Moyenne	405,5	372,3	386,7	448,4	466,4
Erreur standard	7,7	25,3	19,6	19,1	16,3

La bourgne standard permet de capturer la plus large gamme de taille (de 149 à 672 mm). La nasse et le verveux ont une sélectivité semblable par rapport aux tailles capturées. Aucun individu de moins de 300 mm n'a été capturé par ces deux engins depuis 2015 qui semblent plus efficaces que les bourgnes pour la capture des grandes anguilles (>650 mm).

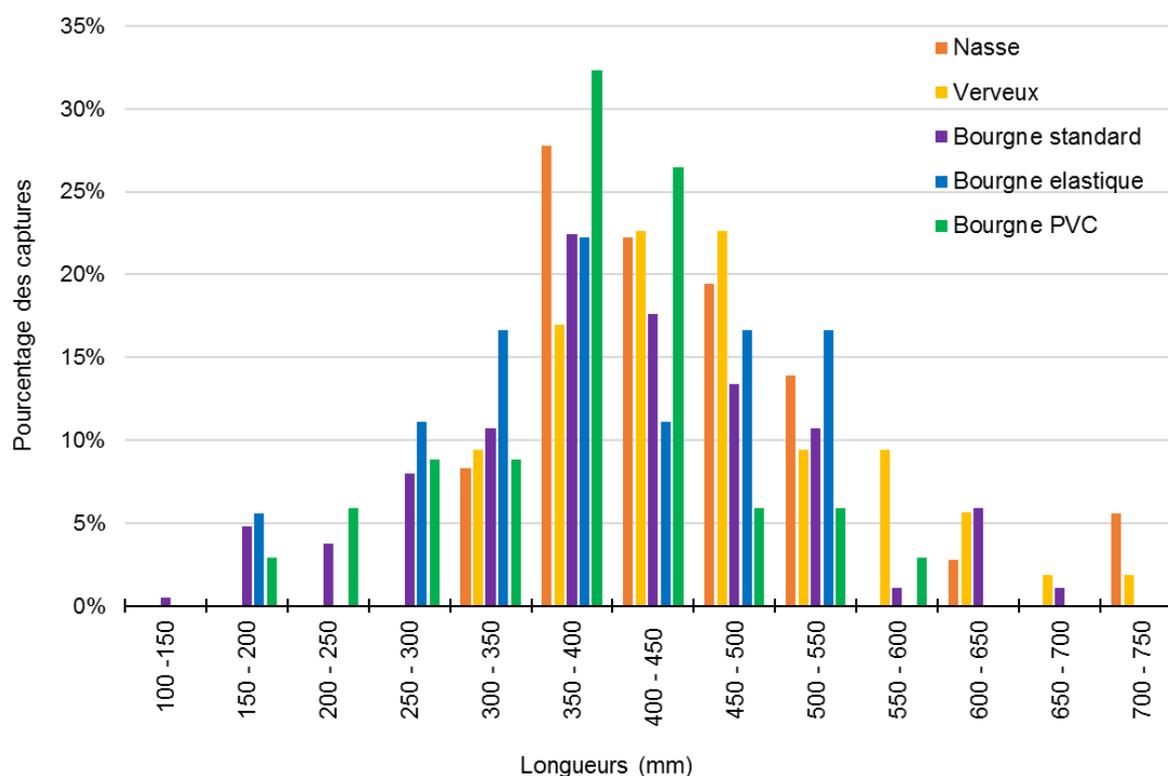


Figure 42. Pourcentage des tailles d'anguilles capturées en milieu naturel pour chaque type d'engin

On compare ainsi la distribution des tailles de chaque engin afin de savoir s'il existe ou non une différence statistique. L'utilisation d'un test paramétrique permettrait une comparaison plus robuste mais il est impossible de l'appliquer dans notre cas car l'hypothèse d'égalité de la variance (homoscédasticité) n'est pas vérifiée (Test de Bartlett, p-value = 0,1532). On utilise alors le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis afin de déterminer s'il existe des différences entre les 5 échantillons. La p-value est de 0,00039. On peut alors considérer qu'au moins un engin de capture présente une distribution de taille des anguilles capturées différente des autres engins.

Pour déterminer quels engins capturent des classes de tailles différentes, on effectue le test post-hoc de Wilcoxon. Il permet de comparer les moyennes de tailles des anguilles capturées, pour les différents engins de capture, deux à deux (Tableau 17).

Tableau 17. Comparaison deux à deux par le test de somme de rangs de Wilcoxon, avec la correction de Bonferroni

	Bourgne	Bourgne Elastique	Bourgne bec PVC	Nasse
Bourgne Elastique	1,00	/	/	/
Bourgne PVC	1,00	1,00	/	/
Nasse	0,6144	0,2514	0,1936	/
Verveux	0,0051	0,0246	0,0035	1,00

La correction de Bonferroni utilisée ici pour les comparaisons multiples affiche des coefficients qui sont des approximations des p-values. Plus précisément, un indice égal à 1 signifie qu'il n'y a aucune différence significative entre les deux engins. Si l'indice est strictement inférieur à 1, alors la distribution des tailles des anguilles capturées par les deux engins est significativement différente.

Ainsi, on remarque que les trois types de bourgnes, malgré la modification de l'entonnoir d'entrée, capturent et retiennent des gammes de tailles similaires. La nasse et le verveux capturent également des gammes de tailles équivalentes, mais toutes deux différentes de celles des bourgnes.

IV.3.1.4. Étude de la sélectivité des engins de capture en milieu contrôlé

Une partie des anguilles capturées dans les engins passifs de capture est susceptible de s'échapper par l'entrée du piège ou par les mailles. L'étude de cet échappement permet de décrire la sélectivité de chaque type d'engin passif de capture.

Lors de la première étude en bassin extérieur, tous les types d'engins ont été testés et 93 anguilles ont été utilisées, d'une longueur totale allant de 166 à 525 mm. La gamme de taille la plus représentée est de 300 à 350 mm.

Lors de la seconde étude de la sélectivité des engins, l'échappement de «petites» et «moyennes» anguilles par le vide de maille a été testé en 15 minutes dans les aquariums. Les 39 individus utilisés ont une longueur totale de 102 à 304 mm, avec majorité de moins de 200 mm (Figure 43).

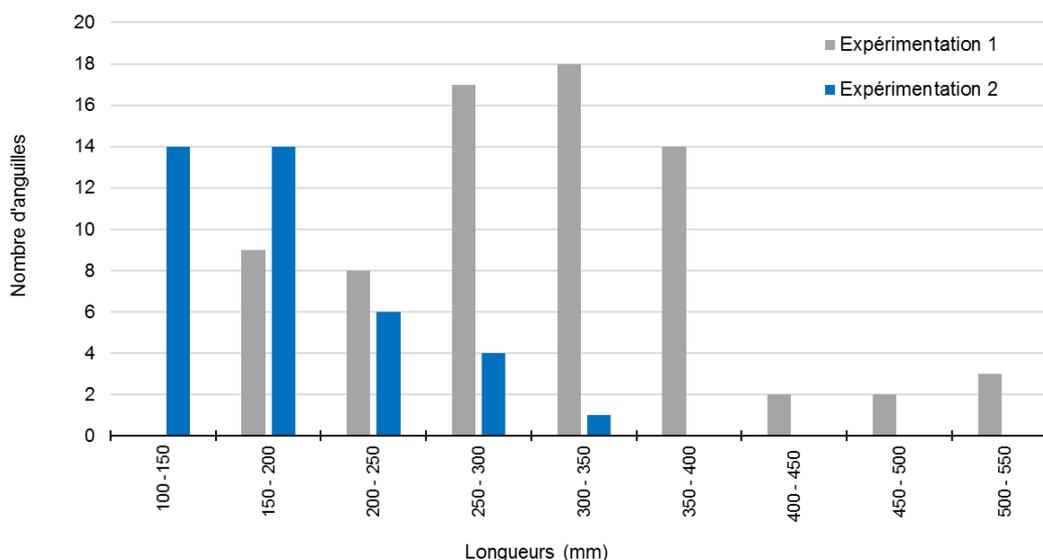


Figure 43. Histogramme des tailles d'anguilles utilisées pour les deux études de sélectivité en milieu contrôlé

Etude de l'échappement par le vide de maille

Les résultats des études de l'échappement par le vide de maille des différents engins sont présentés dans le tableau ci-après (Tableau 18).

Tableau 18. Tableau des résultats des études de l'échappement par le vide de maille

Engin	Maillage (mm)	Expérimentation 1		Expérimentation 2	
		Nombre d'anguilles initiales	Echappement	Nombre d'anguilles initiales	Echappement
Bourgne	6	0	/	38	63%
Nasse	7.3 x 34	81	27%	0	/
Verveux	6	35	26%	31	63%
	8	61	18%	49	67%
	10	64	13%	49	88%
	11	57	25%	49	94%

L'échappement observé est plus important dans la seconde étude. Le temps d'expérimentation est plus court (15min contre 24h dans l'expérimentation 1) mais les anguilles utilisées sont plus petites (Figure 43). Dans cette seconde expérimentation, l'échappement le plus faible est observé pour la bourgne et le verveux de maillage 6 mm. On observe également que l'échappement par le vide de maille des verveux augmente avec le maillage. En comparaison, dans la première expérimentation, l'échappement est équivalent entre les maillages de 6 mm et 11 mm. Le nombre de plus faible de sorties observées est pour le verveux de maillage 10 mm (13% d'échappement).

Un modèle linéaire généralisé de type régression logistique (glm, lien=logit, famille=binomiale, R) a permis l'estimation de la proportion des anguilles capturées en fonction de leur longueur, pour chaque type d'engin et pour chaque expérience (Figure 44). On calcule les coefficients de la régression logistique pour chaque engin en fonction de l'expérience n°1 pour laquelle l'échappement est testé en 24 heures (Tableau 19). Pour cette expérience, la durée et les tailles des anguilles étudiées correspondent aux conditions d'utilisation de ces engins en rivière. Pour la bourgne, les données d'échappement de la seconde expérimentation seront utilisées (engin non testé lors de la première expérimentation).

A partir de ce modèle, les paramètres de sélectivité L_{50} et L_{75} ont également été calculés. Ces deux points remarquables indiquent les longueurs pour lesquelles respectivement 50% et 75% des anguilles sont retenues par l'engin.

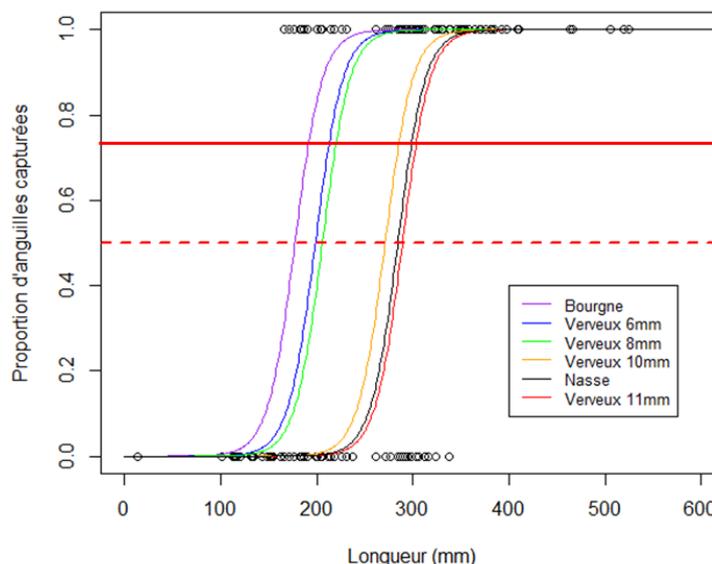


Figure 44. Courbe de sélectivité des différents engins testés ; la ligne pointillée rouge indique la L_{50} et la ligne continue rouge indique la L_{75}

Tableau 19. Résultats de la modélisation de la sélectivité de chaque engin, pour le modèle « Etude » où l'échappement par le vide de maille est testé en 24h

Engin	Maille (mm)	N ang	Gamme de taille (mm)	Logit(y)= a + b*x	L ₅₀ (mm)	SE	L ₇₅ (mm)	SE
Bourgne	6	38	102 ; 231	-12,60 + 0,071x	164	0	164	0
Verveux	6	93	102 ; 313	- 14,11 + 0,071x	192,1	4,3	203,0	5,5
Verveux	8	109	102 ; 409	- 14,63 + 0,071x	200,1	5,2	214,4	7,0
Verveux	10	113	102 ; 520	- 19,26 + 0,071x	262,1	8,6	286,3	8,0
Nasse	7,3 x 34	81	199 ; 525	- 20,20 + 0,071x	281,2	7,6	303,4	6,9
Verveux	11	106	102 ; 520	- 20,54 + 0,071x	288,1	5,4	304,8	6,3

Comme le montre la figure 44, les courbes de sélectivités sont peu étirées, avec une différence faible entre la L₅₀ et la L₇₅ (de 0 à 24 mm).

La plus petite valeur de L₅₀ est obtenue avec la bourgne de maillage 6 mm (L₅₀ = 164 mm). Pour un maillage équivalent (6 mm de côté), le verveux affiche une plus grande sélectivité que la bourgne, avec un L₅₀ plus grande de 28 mm.

Pour un même type d'engin, le verveux, l'augmentation du maillage augmente la sélectivité et la L₅₀ : Les verveux de maille 6 mm et 8 mm ont une sélectivité similaire, mais elle augmente avec la taille de la maille pour le verveux 10 mm et 11 mm.

La nasse, au maillage rectangulaire de 7 mm de largeur, affiche une sélectivité similaire à un verveux de maille 11 mm et non pas équivalente au 6 à 8 mm. Les anguilles peuvent s'échapper par les mailles en se tortillant (voir photo et blessures). En effet, on a pu observer que les anguilles échappées avaient des lésions sur la partie antérieure du corps et laissaient du mucus sur les mailles (Figure 45).



© Anne Tréguier

Figure 45. En haut : Les traces sur les flancs gauche et droit de l'anguille seraient le résultat de sa sortie, en forçant, par les mailles de la nasse. En bas : Traces de mucus laissées par une ou des anguilles s'étant échappées par le vide de maille d'une nasse.

Etude de la sortie par les entonnoirs d'entrée

L'échappement des anguilles par les entonnoirs d'entrée des engins est ensuite étudié (Annexe – Fiches techniques). Cette étude est réalisée à partir de la comparaison des engins témoin et de type « filet » pour les nasses et les bourgnes et de type « clos » pour les verveux (Tableau 20). Seules les détections d'anguilles réalisées par les antennes placées à l'entrée des engins sont utilisées dans cette étude.

Pour les bourgnes témoin de type standard et entrée filet souple, respectivement 90% et 78% des anguilles se sont échappées. Lorsque les engins sont munis de filets de recaptures, 63% des anguilles sont recapturées dans le filet à l'entrée (100% ont été détectées par l'antenne). L'échappement par les entonnoirs d'entrée semble être une des principales causes de l'échappement de ces engins.

Pour les bourgnes dont l'entonnoir d'entrée a été modifié par des élastiques (Elastique de pêche ou Elastique noir) ou un bec PVC, l'échappement des engins témoins est respectivement de 0, 2.5 et 5%. Pour les mêmes engins munis de filet de recapture, aucune anguille n'est recapturée dans le filet à l'entrée. Néanmoins, toutes les anguilles échappées des bourgnes de types bec PVC, Elastique, Chaussette et Standard Témoin ont été détectées par une antenne à proximité de l'entrée. La sortie par les entonnoirs d'entrée semble être privilégiée par les anguilles. Cet échappement est toutefois limité par la modification des entonnoirs (par rapport aux bourgnes standards ou filet souple).

Tableau 20. Résultats de l'étude sur la sélectivité des différents engins

CARACTERISTIQUES			CAPTURE			ECHAPPEMENT			ANTENNE	SORTIE ETUDIEE		
Engin	Modalité	Type	CH1	CH2	CH3	Filet entrée	Filet maillage	SOR	(Individus détectés)	Vide de maille	Vide de maille et entonnoir d'entrée	
Bourgne	Standard	Témoin	1	9	/	/	/	36 (36)	oui		78%	
		Filet	1	6	/	/	/	61			90%	
	Filet	Filet	0	16 (11)	/	28 (28)	0	0	oui		63%	
		Chaussette	Témoin	1 (0)	18 (0)	/	/	/	16 (16)	oui		46%
	Elastique pêche	Elastique pêche	Témoin	0	77 (0)	/	/	/	2 (2)	oui		2,50%
			Filet	0	23	/	0	0	0		0%	
		Elastique noir	Témoin	0	64	/	/	/	0			0%
			Filet	0	25	/	0	0	0		0%	
	Bec PVC	Témoin	0	71 (0)	/	/	/	4 (4)	oui		5%	
		Filet	1	23	/	0	0	0		0%		
Nasse	Standard	Témoin	0	38	/	/	/	38			50%	
		Filet	3 (1)	55 (11)	/	1 (1)	15 (8)	7 (7)	oui	27%		
Verveux	6 mm	Clos	0	0	26	/	/	9		26%		
		Témoin	0	0	0	/	/	10			100%	
	8 mm	Clos	0	0	50	/	/	11		18%		
		Témoin	0	0	25	/	/	34			57%	
	10 mm	Clos	0	0	56	/	/	8		12%		
		Témoin	0	0	34	/	/	26			43%	
11 mm	Clos	0	0	43	/	/	14		24%			

IV.3.2. Etude de l'efficacité d'engins de pêche passifs

IV.3.2.1. Objectifs

Pour une stratégie d'échantillonnage optimale, il faut utiliser des engins de capture adaptés au comportement de l'animal étudié et connaître le type de répartition des individus (Baisez, 2001). Les anguilles sont lucifuges et se déplacent au fond de l'eau à la recherche d'abris potentiels. Elles montrent également des comportements de défense de l'abri qui peuvent avoir pour effet d'empêcher la capture des autres.

Différents engins passifs de pêche peuvent être utilisés pour piéger l'anguille (Luneau, Mertens & Changeux 2003 ; Tréguier *et al.* 2016). Les verveux et les nasses, de couleur sombre et disposés au fond, possèdent des caractéristiques qui répondent aux exigences de recherche d'abri de l'anguille (Baisez 2001). Ces engins présentent néanmoins des particularités (longueur, largeur, taille des mailles, nombre de chambres, paradière...), qui influencent leur capacité à capturer une anguille passant à proximité. Par exemple, les nasses, qui n'ont pas de paradière pour guider le poisson dans le piège, capturent les anguilles au comportement plus exploratoire, comme la recherche de nourriture (Tréguier *et al.* 2016).

Ainsi, l'objectif de cette dernière expérimentation est de comparer les captures de trois types d'engins passifs en termes de nombre et de variabilité de captures, en milieu naturel et pour différentes densités en milieu contrôlé.

IV.3.2.2. Protocole

Dans cette expérience, trois types d'engin ont été testés (Tableau 21) : un verveux, des bourgnes standards non modifiées (Bourgne standard) et des bourgnes modifiées par un bec PVC qui ferme l'entonnoir souple d'entrée de la chambre terminale (Bourgne PVC). Pour ce dernier modèle, un engin peut être appâté (Bourgne PVC appâté). Une bourgne au bec PVC a également été placée dans une rigole témoin (Bourgne PVC témoin). Au total 5 modalités ont été testées.

Tableau 21. Caractéristiques des engins passifs testés sur l'efficacité de capture

Engin	Verveux	Bourgnes		
		Standard	Modifiée	
Caractéristiques	Standard	Standard	Modifiée	
Nombre d'engins	1	1	3	
Longueur x largeur x hauteur	320 x 107 x 80	80 x 17 x 17	80 x 17 x 17	
matériau	filet souple	grillage rigide	grillage rigide	
Présence d'une paradière	oui	non	non	
Présence d'un pavillon	oui	non	non	
Présence d'un bec au dernier entonnoir	non	non	oui	
Nombre de chambres	3	2	2	
Taille des mailles des chambres	10 mm	6 mm	6 mm	
Test d'un appât	non	non	non	oui

En août 2016, les 4 types d'engin ont été posés en parallèle sur le tronçon de l'étude de l'Oir. Il est donc possible d'intégrer les résultats de cette campagne pour étudier l'efficacité de capture de ces engins.

Une autre expérimentation a été menée sur 5 rigoles d'environ 50 m x 5 m de la plateforme expérimentale aquatique de Rennes - Le Rheu du 3 octobre au 24 novembre 2016 (Figure 46). Dans ces rigoles, différentes densités d'anguilles précédemment marquées au PIT-tag 12 mm ont été déversées : de 1,2 anguilles/100 m² à 15,6 anguilles/100 m² (Tableau 22). La rigole R54 sert de témoin : la densité en anguilles y est moyenne (10 anguilles/100 m²) et l'engin témoin (Bourgne PVC témoin) est identique chaque jour. Le protocole utilisé est décrit en détails dans le rapport d'avancement n°2 (Allou *et al.* 2017).

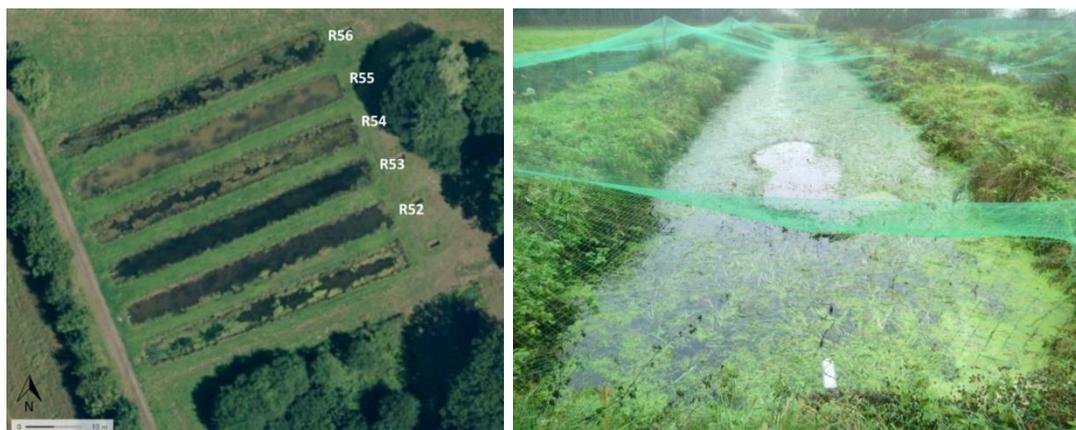


Figure 46. A gauche : vue aérienne des rigoles d'expérimentation de la PEARL. A droite : la rigole recouverte d'un filet de protection contre la prédation. Source des données : IGN

Malgré 27 PIT-tag non retrouvés et 9 PIT-tag détectés par radiopistage sans avoir pu capturer l'anguille ensuite, les écarts de densité entre les rigoles restent suffisants pour garantir la validité des résultats de l'expérimentation (Tableau 22).

Tableau 22. Densités réelles calculées sur les individus recapturés après vidange et PIT-tracking

Notation rigoles	Nombre d'individus recapturés (N final)	Nombre d'individus déversés (N initial)	Surface (m ²)	Densité * (N anguilles / 100 m ²)
R52	23	39	250	9,2 – 15,6
R53	21	21	250	8,4
R54 (Témoin)	20	21	250	8 – 8,4
R55	12	12	250	4,8
R56	2	3	250	0,8 – 1,2

* Intervalle de confiance entre la densité calculée à partir du nombre d'anguille réellement recapturées et du nombre d'individu initialement déversé.

IV.3.2.3. Résultats de l'efficacité de capture en milieu naturel

Lors de la campagne d'août 2016, les différents secteurs ne présentent pas le même effort d'échantillonnage (Tableau 23).

Tableau 23. Nombre d'engins posés par secteur lors de la campagne d'août 2016 de piégeage sur l'Oir

Secteur	A	B	C	D	E	Total
Verveux	15	15	0	0	0	30
Bourgne standard	19	19	21	22	21	102
Bourgne bec élastique	0	0	23	23	24	70
Bourgne bec PVC	11	11	23	23	22	90
Tous types	45	45	67	68	67	292

On distingue les secteurs dit « à verveux », c'est-à-dire les secteurs A et B, pour lesquels 45 engins ont été posés par secteur dont 15 verveux, 19 bourgnes standard et 11 bourgnes à bec pvc. Aucune bourgne élastique n'a été posée dans ces secteurs. Pour les secteurs « à bourgnes », les secteurs C, D et E, 67 à 68 engins ont été posés par secteur, dont 21 ou 22 bourgnes standard témoin, 23 ou 24 bourgnes élastiques, et 22 ou 23 bourgnes à bec pvc (en fonction de la disponibilité des engins).

On cherche également à connaître l'effet de l'appâtage sur l'efficacité de piégeage des engins. Lors de cette campagne, 20% des engins (bourgnes ou verveux) ont été appâtés (Tableau 24).

Tableau 24. Effort d'échantillonnage en engin.jour de chaque type d'engin, appâté ou non

Engin	Sans appât	Avec appât
Verveux	22	8
Bourgne standard	87	15
Bourgne bec élastique	55	15
Bourgne bec PVC	74	16

Lors de cette campagne, 83 anguilles ont été capturées. Les CPUE (nombre d'anguilles/engin/jour) sont indiquées par secteur, type d'engin et selon l'appâtage éventuel (Tableau 25).

Tableau 25. Résultats des captures en CPUE sur l'Oir en août 2016

	A	B	C	D	E	TOTAL
Verveux	1,13	0,07				0,60
Sans appât	1,36	0,00				0,68
Avec appât	0,50	0,25				0,38
Bourgne standard	0,00	0,00	0,10	0,05	0,10	0,05
Sans appât	0,00	0,00	0,06	0,05	0,06	0,03
Avec appât	0,00	0,00	0,33	0,00	0,25	0,13
Bourgne bec élastique			0,09	0,48	0,50	0,36
Sans appât			0,00	0,47	0,48	0,33
Avec appât			0,40	0,50	0,67	0,50
Bourgne bec PVC	0,18	0,45	0,23	0,58	0,10	0,31
Sans appât	0,20	0,30	0,25	0,57	0,14	0,30
Avec appât	0,00	2,00	0,14	0,63	0,00	0,33
TOTAL	0,42	0,13	0,15	0,39	0,23	0,26

On construit alors un modèle linéaire généralisé (glm, lien=log, famille=poisson, R) afin d'expliquer le nombre d'anguilles capturées en fonction de l'engin et du secteur de capture ainsi que de l'effet appât (Tableau 26). On réalise un test de Chi² afin de connaître la significativité de chaque facteur testé.

Tableau 26. Résultat du test de significativité de chaque facteur testé

Facteur	Degré de liberté	Déviance	Statistique de test	Significativité du test
Secteur	4	13,109	0,01075	*
Engin	3	45,982	5,72 x 10 ⁻¹⁰	***
Appât	1	1,003	0,31663	
Engin x appât	3	3,987	0,26292	

Les secteurs B et C apparaissent particulièrement peu favorables à la capture d'anguilles par rapport aux autres secteurs du tronçon, avec des CPUE moyennes autour de 0,15 anguilles par engin par jour sur ces secteurs-là. Le secteur A semble également moins propice à la capture d'anguille pour les bourgnes standards et celles avec bec PVC, alors que les verveux y enregistrent la meilleure CPUE.

Si l'on compare les CPUE obtenues pour chaque engin, les verveux affichent la meilleure efficacité avec en moyenne 0,6 anguilles capturées par engin par jour, alors que les bourgnes modifiées en PVC ou élastique ont des CPUE moyennes respectives de 0,31 et 0,36 anguilles par engin par jour. La bourgne standard est l'engin passif de capture le moins efficace avec une CPUE moyenne de seulement 0,05.

Pour le test de l'appât, il n'y a pas de tendance significative entre les captures pour les engins appâtés ou non. Cependant, le verveux appâté semble deux fois moins efficace alors que pour les trois types de bourgnes, il y a une augmentation moyenne des captures, mais non systématique et non significative au regard des différents secteurs.

IV.3.2.4. Résultats de l'efficacité de capture en milieu contrôlé

Au cours des 24 jours de piégeage de cette expérimentation, l'effort d'échantillonnage a été réparti entre les différentes rigoles. Chaque engin a donc été posé 6 fois pendant 24 heures dans chacune des rigoles, à l'exception de la bourgne PVC témoin, exclusivement posée dans la rigole témoin R54 (Tableau 27).

Tableau 27. Effort de piégeage par rigole, en nombre d'engins.jours

	R52	R53	R54	R55	R56
Verveux	6	6	0	6	6
Bourgne standard	6	6	0	6	6
Bourgne PVC témoin	0	0	24	0	0
Bourgne PVC	6	6	0	6	6
Bourgne PVC appâté	6	6	0	6	6

Au total, seules 22 anguilles ont été capturées durant l'expérimentation (Tableau 28). Ce faible nombre s'explique en partie par une période de températures froides, ne favorisant pas l'activité des anguilles. La moitié d'entre elles ont été capturées dans la rigole R52, à la densité en anguille maximale. La bourgne au bec PVC appâtée a capturé 11 individus, toutes rigoles confondues. La bourgne standard n'a enregistré aucune capture.

Le taux d'entrée est certainement similaire, mais la bourgne standard permet la sortie des anguilles, contrairement à la bourgne au bec PVC, comme cela a été montré lors des tests d'échappements.

Tableau 28. Résultats des captures par rigole

	R52	R53	R54	R55	R56	Total
Verveux	2	3	/	1	0	6
Bourgne standard	0	0	/	0	0	0
Bourgne PVC témoin	/	/	3	/	/	3
Bourgne PVC	1	0	/	1	0	2
Bourgne PVC appâté	8	1	/	0	2	11
Total	11	4	3	2	2	22

L'efficacité de capture ou en d'autres termes, la probabilité de capture est définie par la proportion m/N du nombre m d'individus capturés par rapport à la population d'effectif total N (Philippart 1979). Les efficacité moyenne de capture ont été calculées pour chaque engin (Tableau 30).

A la fin de l'expérimentation, seules 78 anguilles sur 96 ont été recapturées (Tableau 29). Certaines anguilles pouvant être sorties du système (échappement, prédation...). Deux hypothèses sont donc possibles. L'hypothèse « optimiste » considère le nombre total d'anguilles par rigole égal au nombre déversé (N initial). L'hypothèse « pessimiste » postule que le nombre total d'anguilles par rigoles est égal au nombre recapturé (N final).

Tableau 29. Nombre d'anguilles déversées et recapturées par rigole

	R52	R53	R54	R55	R56
Anguilles déversées (N initial)	39	21	21	12	3
Anguilles recapturées (N final)	23	21	20	12	2

On calcule alors une efficacité moyenne des engins selon ces deux hypothèses (Tableau 30):

Tableau 30. Efficacité moyenne de capture (en pourcentage) et erreur standard pour chaque engin suivant les deux hypothèses d'effectif total

Scénario	Optimiste (N=Ni)		Pessimiste (N=Nf)	
	Efficacité moy	SE	Efficacité moy	SE
Verveux	1,4 %	0,0021	1,7 %	0,0024
Bourgne standard	0	0	0	0
Bourgne PVC témoin	0,60 %	0,0011	0,63 %	0,0012
Bourgne PVC	0,45 %	0,0013	0,53 %	0,0013
Bourgne PVC appâtée	3,8 %	0,0067	5,8 %	0,010

Si l'on considère le scénario « pessimiste », le nombre d'anguille étant plus faible dans les rigoles, l'efficacité est logiquement plus grande pour tous les engins.

On observe dans les efficacités calculées pour chaque engin, des tendances similaires obtenues par ces mêmes engins en milieu naturel (§IV.3.2.3.). En effet, sans appât, le verveux affiche une meilleure efficacité que les bourgnes modifiées (environ 1,5% pour les verveux contre environ 0,5% pour les bourgnes au bec PVC), et la bourgne standard est également l'engin de capture le moins efficace. Cette dernière n'a capturé aucune anguille lors de cette expérimentation.

Dans cette expérimentation, l'appâtage semble avoir de son importance, puisque les bourgnes au bec PVC appâtées ont une efficacité de capture entre 3,8 et 5,8% alors que les bourgnes bec PVC sans appât ont une efficacité beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,5%. Cet écart, qui n'était pas significatif en milieu naturel, peut s'expliquer en partie par le milieu dans lequel s'est déroulé l'expérimentation. Les rigoles utilisées ont été remises en eau la semaine précédant le début de l'étude et le milieu était très pauvre en ressources. Les anguilles ne trouvant pas les ressources nécessaires et ne pouvant sortir du système pour s'alimenter ailleurs ont répondu à l'attrait de l'appât dans les engins de capture.

La comparaison des efficacités de la bourgne PVC et de la bourgne PVC de référence montre que l'efficacité ne dépend pas de la densité des anguilles dans le milieu. Cela indique une certaine stabilité dans l'efficacité de capture des bourgnes PVC.

Les expérimentations en milieu contrôlés ont eu pour avantage de connaître et de maîtriser certaines variables comme la quantité d'anguilles utilisées. Cependant, cette situation n'est pas tout à fait conforme à ce que l'on peut observer en réalité. Les expérimentations en milieu naturel, sur l'Oir, plus complexes à mettre en place, ont permis d'observer des comportements des anguilles dans leur environnement habituel et donc de refléter des résultats plus proches de la réalité.

IV.3.3. Etalonnage de l'effort d'échantillonnage par engins passifs

IV.3.3.1. Objectifs

Cette expérimentation menée en 2017, lors de la dernière année de l'étude, a permis d'étalonner un effort d'échantillonnage optimal pour une surface donnée. Il s'agit de chercher le nombre d'engins passifs posés par secteur et par jour, menant à un échantillon représentatif, c'est-à-dire lorsque le nombre d'individus capturés n'augmente plus par rapport à l'accroissement de l'effort d'échantillonnage.

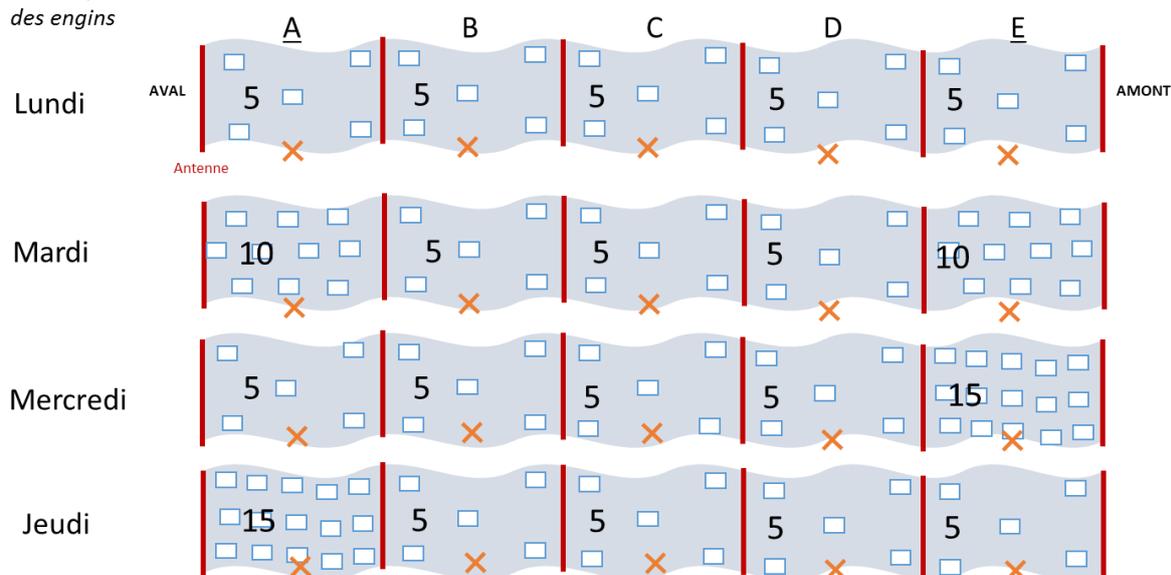
IV.3.3.2. Protocole

L'effort d'échantillonnage est défini ici par le nombre de bourgnes posées par jour dans un secteur. Plusieurs types d'engins ont été testés selon une densité, arbitrairement choisie, de 3 (en 2015) puis 5 engins par secteur (en 2016). En 2017, des efforts d'échantillonnages

supérieurs, portés à 10 ou 15 bourgues par secteur ont également été testés. Ceci dans le but d'établir l'effort échantillonnage optimal.

Celui-ci est évalué à l'aide d'un protocole spécifique de densification réalisé sur deux secteurs en 2017: le secteur A, en aval du tronçon et le secteur E en amont. Ces secteurs montrent des captures d'anguilles respectivement faibles (50 individus) et abondantes (101 individus) depuis 2015. Ce protocole de densification a été mis en place lors des semaines incomplètes du calendrier 2017, comportant par exemple un jour férié. Au total, il a été appliqué lors de 6 semaines réparties sur 5 mois, soit 16 jours d'expérimentation. Une rotation du nombre d'engins est effectuée chaque jour sur les deux secteurs testés. L'augmentation du nombre de bourgues à 10 et 15 est testée alternativement sur les secteurs A et E (Figure 47).

Jour de pose
des engins



© Sabine Allou
Figure 47. Protocole d'évaluation de l'effort d'échantillonnage optimal

IV.3.3.3. Effort d'échantillonnage optimal en milieu naturel

Durant ces 16 jours de piégeage, 65 anguilles ont été capturées sur tout le tronçon (5 secteurs), dont 7 ont été capturées sur le secteur A et 30 capturées sur le secteur E (Tableau 31).

Tableau 31. Effort d'échantillonnage par secteur et résultats des captures

	A	B	C	D	E
Nombre de jours de piégeage	16	16	16	16	16
Nombre de jours à 5 engins	5	16	16	16	5
Nombre de jours à 10 engins	7	0	0	0	7
Nombre de jours à 15 engins	4	0	0	0	4
Nombre total d'anguilles capturées	7	5	10	13	30

Pour rendre compte de l'effet du nombre d'engin sur le nombre d'anguilles capturées, les CPUE (ici en nombre d'anguilles capturées sur le nombre de jours de piégeage) sont indiquées par secteur et selon le nombre d'engins posés (Tableau 32).

Tableau 32. CPUE : Nombre d'anguilles capturées par jour pour chaque secteur et selon le nombre d'engins posés

	A	B	C	D	E
5 engins / secteur	0,2	0,3	0,6	0,8	3,0
10 engins / secteur	0,7				1,3
15 engins / secteur	0,3				1,8

Un modèle log-linéaire (glm, lien=log, famille=Poisson, R) a été utilisé afin de décrire le nombre d'anguilles capturées en fonction du secteur étudié, du nombre d'engins posés et de la semaine considérée. Un test de Chi² a été effectué pour vérifier la significativité de chaque facteur testé. Différentes comparaisons entre secteurs et paramètres ont été testées, en considérant à chaque fois le secteur B, C ou D comme témoin (effort constant à 5 engins par secteur). Les résultats ne diffèrent pas selon le secteur de référence.

Une différence significative entre les secteurs est observée (Tableau 33). Comme l'on pouvait s'y attendre, il y a significativement plus de captures dans le secteur E que dans le secteur de référence, et respectivement moins dans le secteur A.

Certaines semaines apparaissent plus favorables pour les captures d'anguilles, notamment pendant les mois de mai et juin où le protocole de densification s'appliquait. Elles correspondent certainement aux périodes d'activité de l'anguille, où elle se déplace le plus pour s'alimenter.

En revanche l'augmentation du nombre de bourgues ne semble pas accroître significativement les captures, notamment pour le secteur E où on observe un maximum de capture (CPUE égale à 3) pour 5 engins posés. Pour le secteur A, le plus grand nombre d'anguilles capturés est observé pour 10 engins posés. Pour ce secteur, dont la densité en anguilles semble plus faible, augmenter l'effort d'échantillonnage apparaît efficace pour augmenter les captures.

Tableau 33 : Résultat du test de significativité de chaque facteur testé (Le secteur C est pris comme témoin, à titre d'exemple)

	Degré de liberté	Déviante	Statistique de test	Significativité du test
Secteur	2	16.66	0.00024	***
Nombre d'engins	2	1.114	0.57	
Semaine	5	5.937	0.31	
Secteur x nb engin	2	5.889	0.052	.
Secteur x semaine	10	10.21	0.42	
Nb Engin x semaine	8	18.63	0.017	*

De manière logique, l'augmentation du nombre d'engins de capture devrait augmenter le nombre d'anguilles capturées. Puis, à partir d'un certain seuil d'augmentation des engins de captures, la capture des anguilles atteint un palier. La densité d'engins correspondant à l'atteinte de ce palier de captures est recherchée. Cette densité constitue l'effort d'échantillonnage optimal. Il quantifie avec une précision acceptable la population d'anguilles, avec un effort de piégeage réduit à l'essentiel.

Dans notre cas, l'augmentation du nombre de bourgues ne semble pas accroître significativement les captures. L'effort de capture optimal se porte à 5 bourgues par secteur, en considérant un secteur de 50 m x 4 m. Cela correspond à une densité de 2,5 engins /100 m².

Encadré 2 : Développement d'une méthode d'échantillonnage par engin passif

Cette action vise à mettre au point un protocole de quantification des anguilles en milieu profond. La pêche électrique y étant inopérante, il est nécessaire de mettre au point une méthode d'échantillonnage par Capture - Marquage - Recapture (CMR). La mise au point de cette méthode a fait appel à plusieurs sites d'essai sur trois années, de 2015 à 2017. L'écosystème ciblé est une rivière courante d'environ un mètre de profondeur, située en Basse Normandie.

L'ensemble des engins passifs de capture pouvant être utilisés en milieux profonds a été passé en revue. Les engins les plus adaptés aux caractéristiques de l'anguille (verveux, nasses et bourgnes) ont été retenus et testés. La capacité de rétention de chacun de ces engins a été caractérisée en milieu contrôlé. Pour obtenir une bonne rétention des anguilles jaunes, le maillage des bourgnes de 6 mm est optimal et limite l'échappement par le vide de maille. Afin de limiter la sortie des anguilles par l'entrée de l'engin, plusieurs types de modifications ont été réalisées sur l'entonnoir central de la bourgne et testées. Un entonnoir central modifié avec un filet fermé par élastique ou par un bec PVC permet d'éviter presque totalement l'échappement par le franchissement de ces entonnoirs.

Des campagnes d'échantillonnages ont été menées en milieu naturel, dans des rigoles expérimentales et sur la rivière Oir. Ces échantillonnages ont permis de décrire l'efficacité de capture de chaque engin et sa facilité d'utilisation. Ils ont également permis une première description de la population d'anguilles, en terme de biométrie et de comportement. L'effort d'échantillonnage nécessaire pour l'anguille a ainsi pu être calibré sur chaque type d'engin passif. L'effet de l'appâtage a également été testé, sans montrer d'effet significatif sur l'efficacité de capture des anguilles. Il a donc été abandonné.

En conclusion, la bourgne modifiée, dite « PVC bec de canard » est l'engin passif de capture retenu. Les détails de sa fabrication sont disponibles en Annexe 3. L'efficacité de capture de cette bourgne modifiée est supérieure à la bourgne standard, grâce à une capacité de rétention supérieure. L'utilisation de la bourgne est beaucoup plus aisée que les verveux et les grandes nasses. Son efficacité de capture est correcte, certes plus faible que le verveux mais plus homogène. Le coût réduit de cette bourgne, sa compacité et sa reproductibilité aisée en font un engin facile d'utilisation, répondant à nos besoins. Le protocole de CMR permettant de quantifier la population d'anguilles sera donc effectué à l'aide de cet engin.

Un protocole annexe adapté aux milieux profonds étendus et faisant appel à des filets est également testé sur la Vilaine, et détaillé dans le chapitre 8.

V. Utilisation de la RFID

La technologie RFID (radio-frequency identification) a été aménagée sur le secteur d'étude avec l'objectif de mieux comprendre le comportement et le déplacement des poissons afin de préciser l'efficacité des engins passifs de piégeage. Les résultats issus de cette expérimentation de Capture – Marquage - Détection nous permettront ainsi d'affiner la mise en place du protocole de quantification et de renforcer la robustesse des résultats.

V.1. L'anesthésie et le marquage PIT-tag

Le marquage nécessite d'anesthésier les individus, afin de réduire le risque de blessure de l'animal et le stress engendré (Neiffer & Stamper 2009). L'anesthésie et le marquage constituent deux étapes clés du protocole de suivi, sur lesquelles se sont portées deux expérimentations en milieu contrôlé. Ces expérimentations ont fait l'objet d'un stage de Master 1 (Beillard 2016). Le protocole complet est également détaillé dans le rapport d'avancement n°2 (Allou *et al.* 2017).

V.1.1. L'anesthésie des anguilles à la benzocaïne

L'anesthésiant que nous avons retenu pour ces expérimentations est la benzocaïne, souvent considérée comme l'un des anesthésiants les plus efficaces. Elle n'est pas toxique pour l'homme à la dose utilisée pour l'anesthésie des poissons (Walsh & Pease 2002), ni dangereuse pour les poissons eux-mêmes. Enfin, le règlement UE 37/2010 indique qu'aucune LMR (Limite Maximale de Résidus) n'est requise. La benzocaïne présente les avantages cités ci-dessus mais comme le suggèrent Walsh & Pease (2002) et Krejszeff *et al.* (2013), elle n'est pas optimale pour l'anguille. Une hypothèse d'explication est le cumul de la petite taille de ses branchies, qui réduit l'assimilation du produit, et sa forte teneur en graisse, qui rend laborieux le réveil (Ross & Ross, 2008). Concernant l'anguille, les doses préconisées dans la littérature sont extrêmement variables, de 30 à 150 mg.L⁻¹, sans véritable raison apparente. (e.g. Walsh & Pease 2002 ; Geoffroy 2012 ; Acou, Poizat & Crivelli 2006). Son efficacité est d'ailleurs remise en cause en dessous de 100 mg.L⁻¹ par quelques études récentes (Iversen *et al.* 2013 ; Krejszeff *et al.* 2013). Face à ces incertitudes nous avons-nous même testé l'efficacité de la benzocaïne afin de déterminer la dose de cet anesthésiant à utiliser en fonction de la taille des individus. Le protocole et les résultats sont détaillés dans le rapport d'avancement Allou *et al.* (2017) et le rapport de stage de Beillard (2016).

Cette expérimentation a permis de décrire les réponses de 4 classes de tailles d'anguilles face à 5 concentrations différentes d'anesthésiant. Une forte variabilité inter-individuelle a été mise en évidence. Globalement, on observe que la durée nécessaire d'exposition de l'anguille au bain anesthésiant pour la séduer correctement décroît lorsqu'on augmente la concentration en benzocaïne. Aucun réveil n'a été observé avant 3 min et peu de réveils étaient complets après 15 min. Ces observations sont à mettre en relation avec les faibles températures enregistrées sur la plateforme lors de l'expérimentation (de 9,5 à 15°C, voire 12°C dans la majorité des cas). En effet, en comparant avec d'autres études sur d'autres anesthésiants, la variabilité semble s'accroître avec une diminution des températures (10°C, Iversen *et al.* 2013 ; 17 et 25°C, Walsh & Pease 2002). L'anguille étant une espèce ectotherme, une faible température ralentit son activité biologique, dont la respiration qui peut être variable entre les individus (Walsh & Pease 2002). Le fait que la majorité des individus marqués avaient déjà subi une anesthésie quelques jours auparavant n'est pas non plus à négliger.

En conclusion, les résultats d'anesthésie et de réveil de cette expérience ne convergent pas. Il est difficile de déterminer précisément une dose optimale. Le protocole d'anesthésie choisi pour les anguilles est celui qui est déjà utilisé pour l'ensemble des poissons à la station de piégeage

de Cerisel. Les anguilles sont déposées dans un bain anesthésiant d'une concentration en benzocaïne de 28 mg.L⁻¹, durant quelques minutes. Elles sont marquées et manipulées lorsqu'elles sont inertes. Un mois de latence est préconisé entre deux anesthésies pour un même individu.

V.1.2. Le marquage PIT-tags des anguilles

Pour les poissons, l'implantation d'une puce électronique, le PIT-tag, est une méthode de marquage fréquemment utilisée. Nous l'utilisons en routine pour suivre les populations de salmonidés. Ce marquage a pour avantage d'être détecté à distance durant toute la durée de vie du poisson. Cependant, ces marques sont introduites dans l'animal, ce qui n'exclut pas des problèmes de blessures internes, le déplacement ou le rejet par l'organisme (Gibbons & Andrews 2004). Globalement, les effets du marquage par PIT-tag sur le taux de survie sont assez variables et dépendent de l'espèce, du stade de vie de l'individu, des conditions environnementales, de l'endroit et de la technique d'insertion (Hirt-Chabbert & Young 2012 ; Mazel *et al.* 2012). Enfin, la taille des PIT-tags doit être choisie suivant un compromis entre l'efficacité de détection et la taille de l'individu. La détection s'améliore conjointement avec la taille des marques. Cependant, la « règle des 2% » de Winter (1996) indique que le poids d'une marque doit être inférieur à 2% du poids de l'individu marqué.

Ainsi, pour marquer les anguilles jaunes, le PIT-tag de 12 mm est souvent utilisé (Marchand *et al.* 2015). Avec ces marques, les taux de rétention et de survie chez les anguilles sont généralement supérieurs à 95% (Hirt-Chabbert & Young 2012). Afin de connaître précisément l'efficacité de ce marquage des anguilles par PIT-tags, des expérimentations ont été menées par nos soins en milieu contrôlé. Le taux de rétention des PIT-tags de 12 mm, la cicatrisation et la survie des anguilles marquées ont été étudiés jusqu'à 15 jours (Beillard 2016). Le marquage de trois classes de tailles d'anguilles a permis de valider l'hypothèse d'un taux de rétention supérieur à 95%, 15 jours après marquage. Cependant, ce taux a pu être influencé par les conditions expérimentales plus favorables qu'en milieu naturel. En rivière, la probabilité de perte de la marque est plus élevée (Thomas 2006). Le taux de survie observé est supérieur à 95% à 24 et 48h. La mortalité due au marquage surviendrait majoritairement dans les 24h (Feunteun *et al.* 2000). De plus, les taux de survie ne diffèrent pas entre les anguilles marquées et les témoins. Nos résultats suggèrent donc que la mortalité n'est pas due à une perforation d'organes vitaux mais peut être la conséquence d'aggravation ou d'apparition de pathologies. La mortalité observée semble être principalement due à la part importante de pathologies graves au début de l'expérience (nécroses et hémorragie). Par ailleurs, les anguilles provenant du barrage d'Arzal ont, pour la majorité, été affectées par un protozoaire du genre *Ichthophthirius*, pathologie qui se détecte par la présence de points blancs sur le corps et engendre une hypersécrétion de mucus (Girard & Elie 2007).

En conclusion, le PIT-tag de 12 mm est retenu pour marquer les anguilles. Cette taille optimale autorise des taux de survie et de rétention élevés, pour une distance de détection raisonnable par les antennes. Pour marquer une anguille, une taille minimale de 20 cm est prescrite afin que le poids de la marque soit inférieur à 2% du poids de l'anguille. L'anguille doit être anesthésiée et inerte, suivant le protocole décrit ci-dessus (§ 5.1.1). Elle est déposée sur un plan de travail dégagé et propre. Un PIT-tag de 12 mm est implanté dans la cavité abdominale à l'aide d'un pistolet injecteur, 2-3 centimètres au-dessus de l'anus, légèrement décalé par rapport à l'axe antéro-postérieur.



© Sabine Allou

Figure 48. Implantation d'un PIT-Tag sur une petite anguille jaune à l'aide d'un pistolet injecteur Biomark

V.2. Les antennes fixes pour détecter les déplacements des anguilles

V.2.1. Construction et installation des antennes

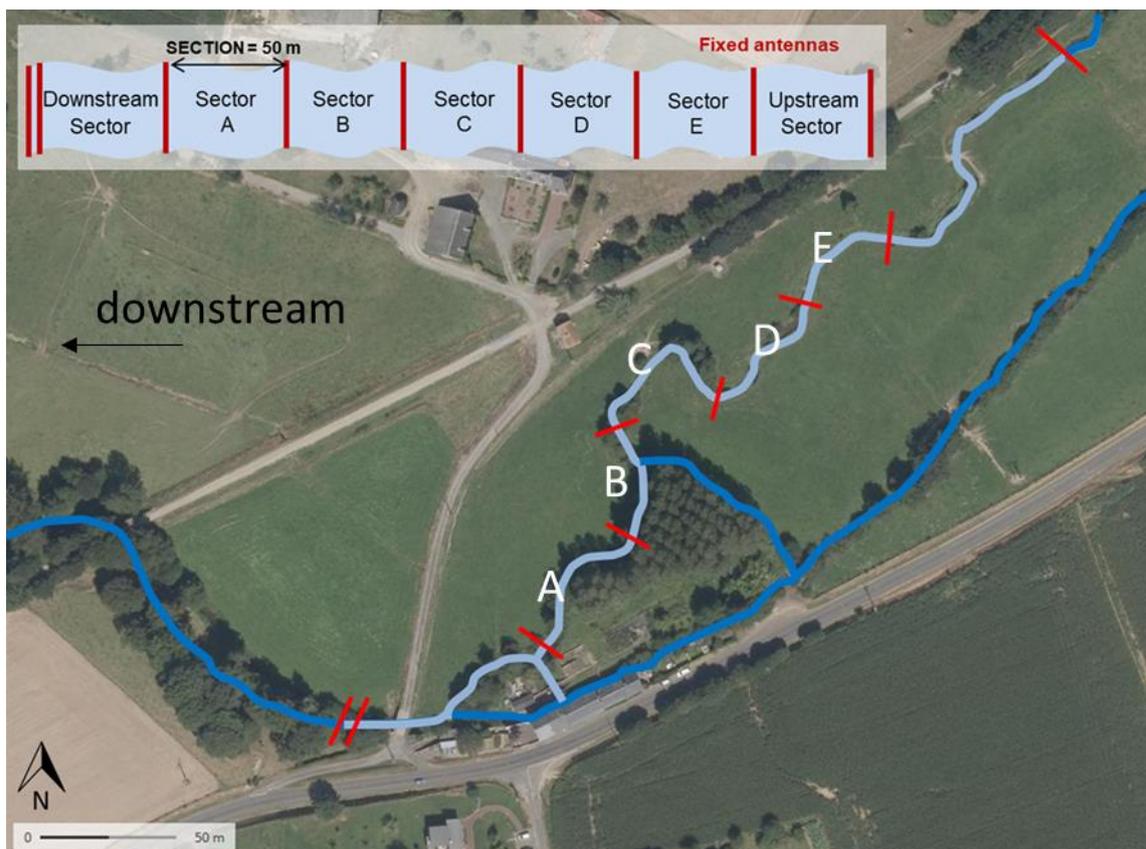
Construire une antenne nécessite de former une boucle de fil en cuivre gainé de bonne qualité. Il est possible d'ajouter des spires de câble afin de modifier les caractéristiques de l'antenne (inductance, résistance). Le système est cependant limité par ces caractéristiques. En effet, plus l'antenne est grande, plus le fil électrique doit avoir une section importante. L'induction électromagnétique créée par l'antenne doit être suffisante pour alimenter le PIT-tag. Il a été constaté que la bonne qualité du cuivre qui compose les câbles améliore le potentiel électromagnétique de l'antenne et augmente la possibilité de faire de grandes antennes (Sacre 2015).

Une fois l'antenne formée, il est nécessaire de l'équilibrer avec une carte de réglage appelée « Tuner Board » (Figure 4). La carte électronique est composée principalement d'un parc de condensateurs et d'une ferrite (bobine avec un noyau amovible). Il existe différentes cartes fabriquées par Texas Instrument® qui exploitent différentes gammes d'inductance. La carte standard permet une inductance de l'antenne entre 8 à 80 μH (microHenry).

En laboratoire, nos tests ont permis de réaliser des antennes de différentes tailles avec 100 % d'efficacité de lecture des PIT-tags de 12 mm. Cependant, il a été constaté à plusieurs reprises qu'en milieu naturel, les contraintes de terrain et l'environnement (alimentations électriques alentours, interférences) ne permettaient pas d'obtenir les mêmes résultats. La taille et la forme des antennes ont été ajustées pour limiter l'influence de ces contraintes sur l'efficacité de détection.

V.2.2. Mise en place d'un réseau d'antennes

Une antenne fixe a été installée en amont et en aval de chacun des secteurs, présentés dans le paragraphe 3.1.3., afin de les délimiter (Figure 49). En plus de ces 6 antennes dédiées à l'action Anguille, une antenne-double est installée à l'aval du piège de Cerisel depuis mars 2015, dans le cadre du suivi de la dévalaison de salmonidés. Afin d'obtenir des informations similaires sur les déplacements des anguilles marquées hors du secteur, une dernière antenne (antenne G) a été installée une centaine de mètres en amont, début avril 2016.

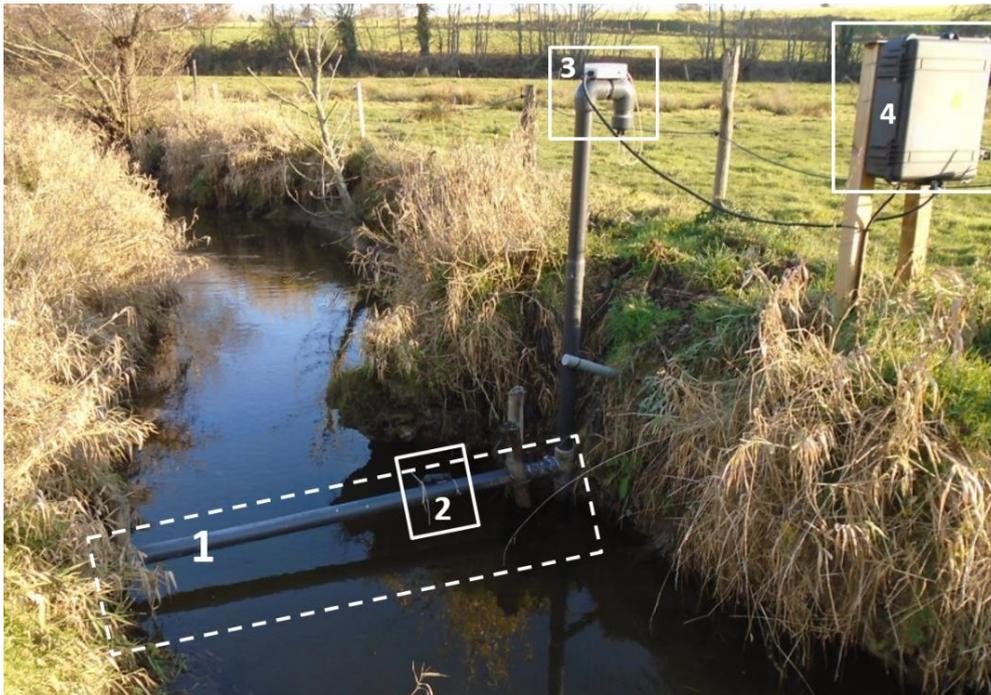


© Sabine Allou
 Figure 49. Localisation des antennes fixes (traits rouges) délimitant les secteurs de test

Durant la première année d'expérience, en raison des difficultés d'installation et de synchronisation des antennes de détection, seules les antennes en aval du piège de Cerisel ont pu collecter des données de détection (Tréguier *et al.* 2016). Le montage de deux antennes côte à côte afin de couvrir toute la largeur de la rivière créait des interférences, entraînant des difficultés de détection. Toutes les antennes ont donc été remplacées et sont à présent constituées d'un cadre unique. Le réseau d'antennes a été opérationnel à partir du 20 avril 2016. Les dimensions du cadre de chaque antenne sont adaptées à la largeur et la profondeur du cours d'eau (Tableau 35). La hauteur maximale de détection est de 70 cm pour les largeurs de plus de 4m, afin de ne pas avoir de zone sans détection dans le cadre (Tréguier *et al.* 2016). Le cadre est formé par un tube PVC de 90 mm de diamètre qui renferme le fil conducteur générant le champ magnétique. Ce câble audio en cuivre de 4 mm² est enroulé dans le cadre, formant deux spires, et relié à la tuner box et au reader (Figure 52). L'ensemble est maintenu par des poteaux en bois ou PVC, non conducteurs.

Tableau 34. Les caractéristiques de chaque antenne fixe installée sur l'Oir pour l'expérimentation Anguille

Antenne	Secteur de test						
	A	B	C	D	E	F	G
Mise en service (2016)	20/04	21/04	21/04	20/04	27/04	27/04	28/04
Largeur cours d'eau	4,7 m	4,1 m	2,7 m	3,3 m	3 m	3 m	3,6 m
Taille de l'antenne (l x h)	4,7 x 0,7	4,1 x 0,7	2,67 x 0,8	3,34 x 0,7	3,0 x 0,7	3,0 x 0,71	3,61 x 0,71



© Sabine Allou

Figure 50. Antenne fixe n°6. 1 : Cadre PVC contenant le fil conducteur, 2 : Boîtier du Tag-tracker, 3 : Tuner box, 4 : Boîtier étanche contenant le reader et l'alimentation électrique

La technologie HDX (Half duplex) est utilisée (Tréguier *et al.* 2016). L'interrogateur émet le champ magnétique et écoute les signaux émis en alternance. Un cycle de lecture comprend donc une phase d'émission du champ électromagnétique afin de charger le PIT-tag, et une phase d'écoute du signal renvoyé. Les temps d'émission et d'écoute étant de 50 millisecondes, un cycle de lecture dure 0,1 seconde.

Un PIT-tag test au numéro connu, est placé dans un système appelé « tag-tracker » ou Marker-tag. Ce système est positionné dans un boîtier étanche fixé sur l'antenne (Figures 50 et 51). Le PIT-tag test est placé dans une bobine de cuivre qui forme une protection contre le champ électromagnétique de l'antenne. Toutes les 30 secondes, un interrupteur désactive la protection du PIT-tag qui peut alors être détecté par l'antenne durant une seconde. Toute lacune dans la détection de ce tag indique une défaillance du système.



© Anne Tréguier

Figure 51. Boîtier du tag-tracker ; le cadre rouge indique le PIT-tag placé dans la bobine de cuivre

V.2.3. Fonctionnement des antennes fixes

V.2.3.1. Fonctionnement du réseau d'antennes : suivi du Tag-tracker

L'efficacité de fonctionnement des antennes peut être calculée comme le pourcentage de détection du tag-tracker de chaque antenne par jour. Un pourcentage de 100% indique que le tag test a été détecté par l'antenne toutes les 30 min pendant 24h. Le fonctionnement de l'antenne est donc supposé très bon. Au contraire, un pourcentage nul signifie que l'antenne n'a pas réussi à détecter le tag-tracker et donc qu'elle a mal fonctionné, voire pas du tout.

Il faut bien entendu tenir compte du nombre de jours où le tag-tracker était présent sur l'antenne. Par exemple, le tag-tracker de l'antenne C n'a été installé que début 2017, soit 337 jours après sa mise en fonctionnement (Tableau 35).

Tableau 35 : Nombres de jour de fonctionnement de chaque antenne avec un tag-tracker

Antenne	A	B	C	D	E	F	G	AMONT	AVAL
Date de mise en fonctionnement de l'antenne	20/04/2016	20/04/2016	20/04/2016	20/04/2016	27/04/2016	27/04/2016	28/04/2016	01/03/2015	01/03/2015
Date de pose du tag-tracker	21/04/2016	21/04/2016	05/04/2017	21/05/2016	27/04/2016	27/04/2016	28/04/2016	02/12/2015	02/12/2015
Nombre de jours de fonctionnement avec tag posé	491	491	154	460	454	454	453	607	607

Compte tenu du nombre de jours où les tag-tracker étaient posés sur chaque antenne, l'efficacité moyenne des antennes sur le système a été calculée (Tableau 36). En moyenne, pour un peu plus de 60% des jours, les antennes ont une efficacité de fonctionnement supérieure à 80% (c'est-à-dire plus de 37 détections de tag-tracker par jour). Néanmoins, pour 24% du temps de fonctionnement, l'efficacité des antennes du système était nulle.

Tableau 36 : répartition temporelle des différentes efficacités de fonctionnement

Efficacité moyenne des antennes	0%	0 – 20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%	100%
Nombre de jours	24%	4%	2%	4%	4%	32%	31%

Plus particulièrement, on peut regarder l'efficacité de détection journalière du tag-tracker pour une antenne. La figure 52 illustre l'histoire de fonctionnement de l'antenne A depuis sa mise en route le 20/04/2016 jusqu'au 30/08/2017, où elle a été débranchée.

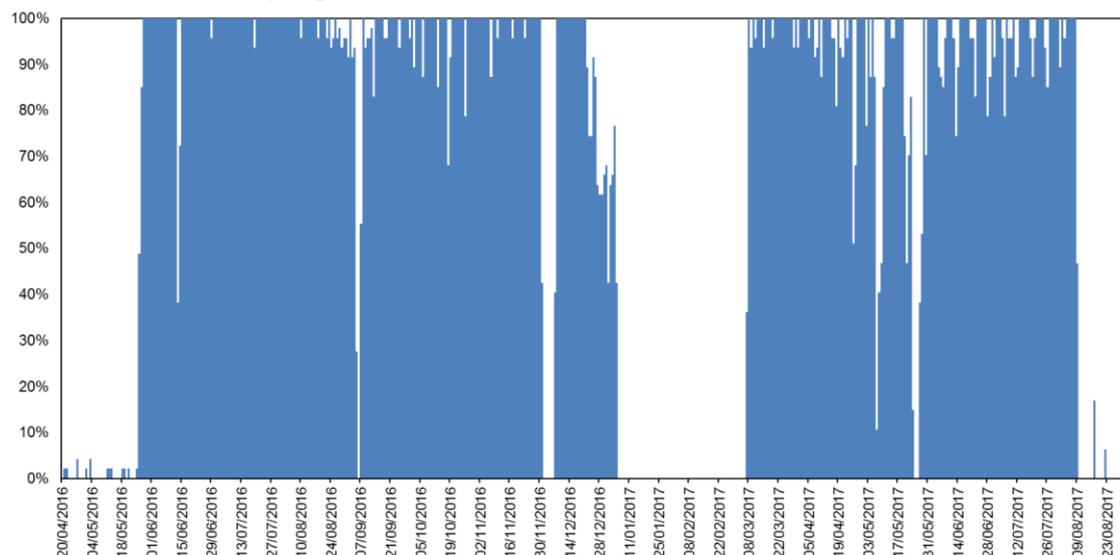


Figure 52. Pourcentage de détection journalier du tag-tracker de l'antenne A du 20/04/2016 au 30/08/2017

On observe alors qu'il a fallu quasiment un mois de réglages avant d'obtenir une antenne avec une bonne efficacité de fonctionnement. On constate également un arrêt d'un peu plus de 2 mois dans la détection du tag-tracker. En effet, suite à un orage début janvier 2017, les readers de plusieurs antennes, dont celui de l'antenne A, ont nécessité des réparations. Elles ont été remises en route début mars 2017. Depuis, on observe régulièrement des journées avec des efficacités de fonctionnement autour de 80% dues à l'arrêt temporaire des antennes (environ 3 heures) pour la réalisation des PIT-tracking hebdomadaires pour la dernière année d'étude.

Enfin, l'efficacité de fonctionnement observée pour les antennes n'est pas strictement équivalente à l'efficacité de détection de ces dernières. Ce dernier facteur rentre en compte dans l'estimation de la probabilité de détection d'un poisson marqué au PIT-tag qui passerait dans l'antenne fixe.

L'estimation de l'efficacité de fonctionnement fait appel à la détection d'un tag-tracker posé sur le cadre de l'antenne. Parfois, l'efficacité de détection est inférieure à l'efficacité de fonctionnement. En effet, il arrive parfois que le rayon de détection autour du cadre faiblisse et laisse apparaître une zone de non-détection au centre du cadre de l'antenne. La cause de ces variations de rayon de détection est inconnue.

V.2.3.2. Efficacité de détection : Approche à l'aide de l'antenne double

Les antennes sont dimensionnées selon la taille du cours d'eau à l'endroit où l'on souhaite les poser et selon la distance de détection que l'on souhaite obtenir. Plusieurs tests ont été réalisés pour connaître les dimensions maximales des antennes afin de ne pas avoir de zone sans détection dans le rideau de l'antenne. Lors de la construction de chaque antenne, la distance de détection est de nouveau testée en milieu naturel afin de prendre en compte les possibles interférences liées à l'environnement. Cependant, ces conditions peuvent évoluer (qualité de l'alimentation électrique, humidité de l'air ...) et modifier l'efficacité de détection des antennes. Pour appréhender cette efficacité de détection, nous avons utilisé les données issues de l'antenne double construite en aval du piège de descente de la station de Cerisel. Seules les données collectées du 07/03/2015 au 02/05/2015 sont considérées. 394 individus, de différentes espèces, marqués avec des PIT-tags de 12 mm ont été capturés dans le piège de dévalaison au cours de cette période puis relâchés. En partant de l'hypothèse que tous ces individus ont poursuivi leur dévalaison, l'antenne Cerisel Aval Pont, présente juste en aval de ce piège, aurait dû tous les détecter si son efficacité était de 100 %.

Le Tableau 38 résume les résultats des détections. Seuls 15 % des individus ayant probablement dévalés ont été détectés par les deux rideaux. Le rideau aval a détecté une fois et demie plus d'individus que le rideau amont, menant à une efficacité de détection malgré tout inférieure à 50 %.

Tableau 37 : Nombre d'individus détectés par l'antenne-double de Cerisel en aval du Pont entre le 17/03/2015 et le 02/05/2015

	Détection par l'antenne			Non détecté
	Que en Amont	Que en Aval	Les deux	
Nombre d'individus détectés	102	168	61	63
Pourcentage d'individus détectés	26 %	43 %	15 %	16 %

Il est également possible que l'efficacité de l'antenne varie selon les espèces (comportement de nage, rapidité de passage). Enfin, il pourrait être intéressant de faire un comparatif entre l'efficacité de détection de l'antenne et les débits observés sur l'Oir. Un fort débit risque de conduire à un passage plus rapide du poisson à travers le cadre des antennes et de réduire la probabilité de détection.

V.2.4. Résultats des détections par antennes fixes

V.2.4.1. Bilan des détections par les antennes fixes

Au cours des 3 années d'étude, 78 638 détections d'anguilles ont été enregistrées par les antennes fixes installées sur le site test (Tableau 38). Ces détections ont permis de suivre 474 individus.

En 2015, seule l'antenne double en aval du pont de Cerisel, hors du secteur d'étude a fonctionné. Les données enregistrées apportent des informations sur les anguilles capturées et marquées sur le site test mais détections une centaine de mètres en aval, hors du système.

En 2016 et 2017, les antennes ont globalement bien fonctionné et ont détections plus de 300 individus différents pour chaque année. Les détections ont été plus efficaces en 2017. On constate un plus grand nombre de détections et d'individus détections, malgré un nombre de jours de fonctionnement inférieur.

Tableau 38 : Bilan des détections par antennes fixes entre le 14/10/2015 et le 05/09/2017

Année	Antennes	Nombre d'antennes	Nombre de jours de fonctionnement	Nombre de détections enregistrés	Nombre de détections d'anguilles	Nombre d'anguilles détections
2015 (à partir du 14/10/2015)	Aval Pont AVAL/AMONT	2	64	589	260	21
	Antennes Ang (A-F)	0	0	0	0	0
	Antennes G AMONT	0	0	0	0	0
	TOTAL	2	64	589	260	21
2016	Aval Pont AVAL/AMONT	2	305	2 934	1 510	57
	Antennes Ang (A-F)	6	254	40 062	36 097	295
	Antenne G AMONT	1	235	2 097	1 729	102
	TOTAL	9	344	45 093	39 336	334
2017 (Jusqu'au 05/09/2017)	Aval Pont AVAL/AMONT	2	207	3 695	1 938	64
	Antennes Ang (A-F)	6	215	34 448	30 265	339
	Antennes G AMONT	1	207	7 319	6 839	181
	TOTAL	9	232	45 462	39 042	381
TOUT	TOUT	9	640	91 144	78 638	474

V.2.4.2. Les détections des antennes fixes par espèces

Sur les 2 années de fonctionnement des antennes, 91 144 détections, toutes espèces confondues, ont été enregistrées sur le secteur test ainsi que sur les antennes situées une centaine de mètres en amont et aval de ce secteur (Tableau 39). 86% de ces détections proviennent de 474 anguilles marquées. Les autres espèces sont les saumons et les truites capturées aux pièges de Cerisel. En particulier, les saumons représentent 6% des détections, alors que le nombre d'individus est presque deux fois supérieur aux anguilles (797 saumons identifiés).

Tableau 39 : Bilan des détections par espèce pour les années 2016-2017

	Anguille	Saumon	Truite	Truite de mer
Nombre de PIT-tags	474	797	471	79
Nombre de passages	78 638	5 691	6 555	260

V.2.4.3. Les détections d'anguilles par les antennes fixes

Le réseau d'antennes installées sur le secteur anguille ainsi que les antennes en aval et en amont de ce secteur ont détections 78 638 détections d'anguilles marquées (Tableau 39). Ces détections représentent 474 individus détections entre 1 et 281 jours différents sur les 3 années d'étude (Figure 53).

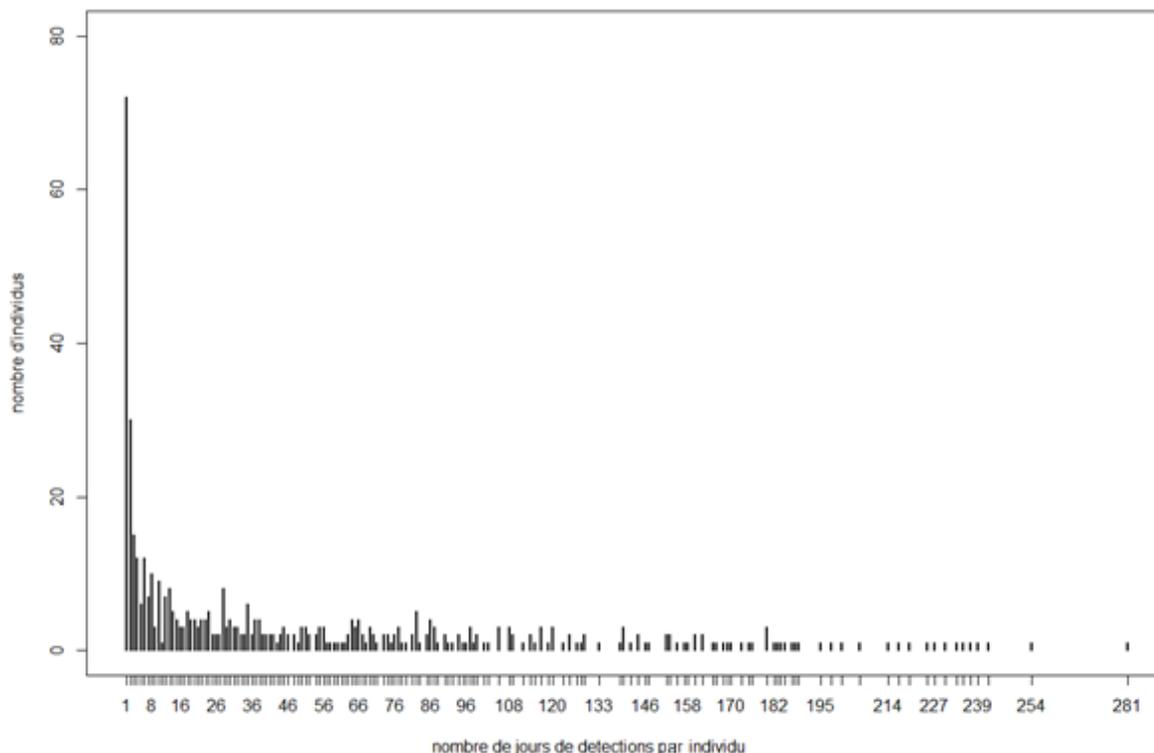


Figure 53. Histogramme du nombre de détections d'anguilles (en nombre de jours) par individu pour l'ensemble des antennes fixes

V.2.4.4. Les détections d'anguilles par jours

La figure 54 ci-dessous illustre le nombre de PIT-tags d'anguilles détections par jour sur la durée de l'étude. Ce nombre d'individus détections est mis en relation avec l'efficacité moyenne de fonctionnement des antennes sur le système.

En 2016, en moyenne 50 anguilles sont détections par jour, alors qu'en 2017, on est en moyenne autour de 80 PIT-tags d'anguilles détections. Cette augmentation traduit l'effort de marquage important réalisé pendant les 2 premières années ainsi que l'évènement de marquage lors de la pêche électrique du 13 octobre 2016.

D'autre part, le nombre de PIT-tags détections semble fortement corrélé à l'efficacité de fonctionnement des antennes. Les différences du nombre de PIT-tags détections pour une même efficacité de fonctionnement peuvent traduire une différence dans l'efficacité de détections ou dans l'activité des anguilles sur le site.

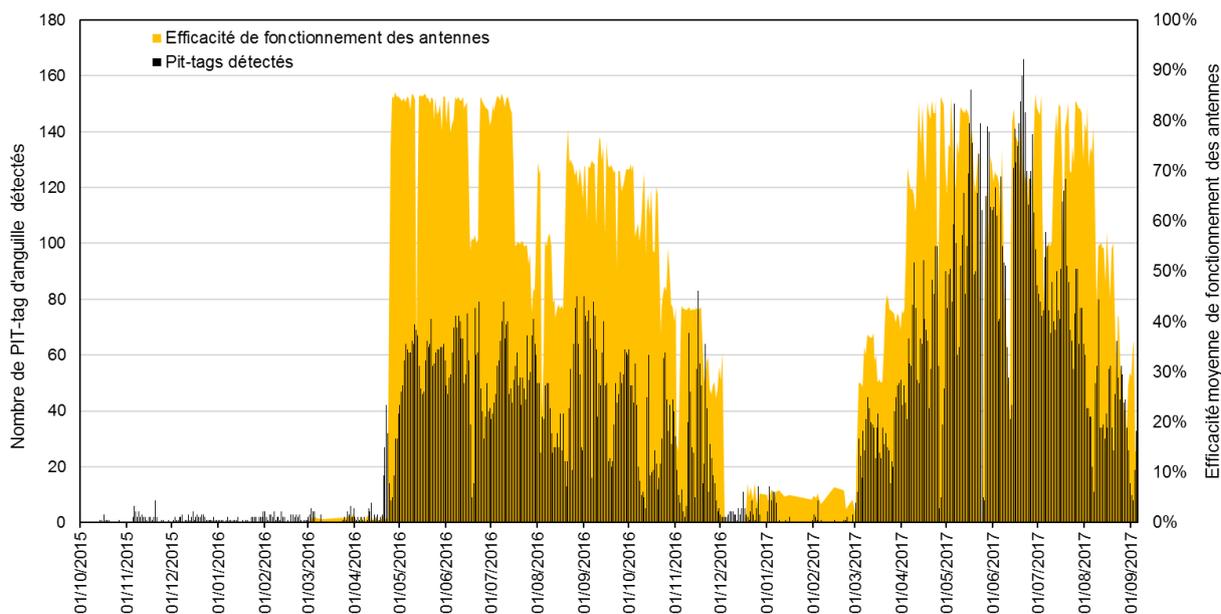


Figure 54. Nombre de détections de PIT-tags d'anguilles par jour et efficacité moyenne journalière des antennes sur le secteur

V.2.4.5. Les détections des anguilles par tranche horaire

Le nombre de détections d'anguilles par tranche horaire, toutes journées et secteurs confondus, permet d'observer un rythme jour-nuit caractéristique chez l'anguille (Figure 57) (Neveu 1981 ; Jellyman et Sykes 2003). En effet, dans notre système, le nombre de détections augmente sensiblement à partir de 19h (heure universelle), avec plus de 6 000 détections enregistrées sur les plages horaires de 20h à 3h, puis diminue en journée avec moins de 1 000 détections.

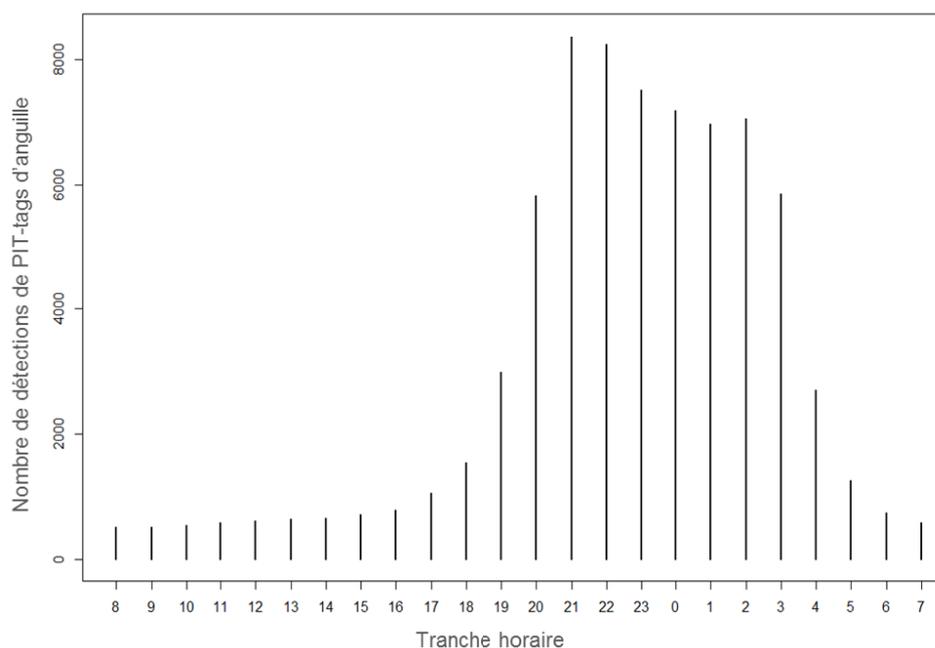


Figure 55. Nombre de détections enregistrées par tranche horaire

Il existe cependant quelques individus, pour lesquels le rythme nyctéméral est moins marqué, avec un comportement diurne bien affirmé (Tableau 40).

Tableau 40 : Exemple du nombre de détections par tranche horaire pour des anguilles au comportement plus diurne

	LT (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
982_000360957734	374	49	48	49	50	49	46	46	49	49	48	46	44	45	44	44	47	49	49	49	48	48	47	47	46
982_000402940636	246	11	13	19	26	36	33	24	19	15	11	13	17	17	14	25	19	24	21	21	22	26	13	11	13
982_000402940651	228	1	2	5	22	24	16	12	9	7	7	16	14	18	18	22	22	25	27	29	24	44	14	2	4
982_000402941462	177	24	25	24	32	40	34	37	36	32	28	26	34	42	44	51	52	62	57	61	38	39	27	22	22

V.2.4.6. Les détections des anguilles par les différentes antennes

Pour les 474 anguilles détections par toutes les antennes du secteur, il est possible de connaître le nombre d'antennes ayant détectés chaque individu et ainsi se rendre compte d'une taille de secteur prospecté (Figure 58). On remarque que 19% des anguilles marquées n'ont été détections que par une seule des antennes du système.

Le plus grand nombre d'anguilles (23%) ont été détections par deux antennes fixes. On peut alors suspecter que ces anguilles ont prospecté au moins deux secteurs.

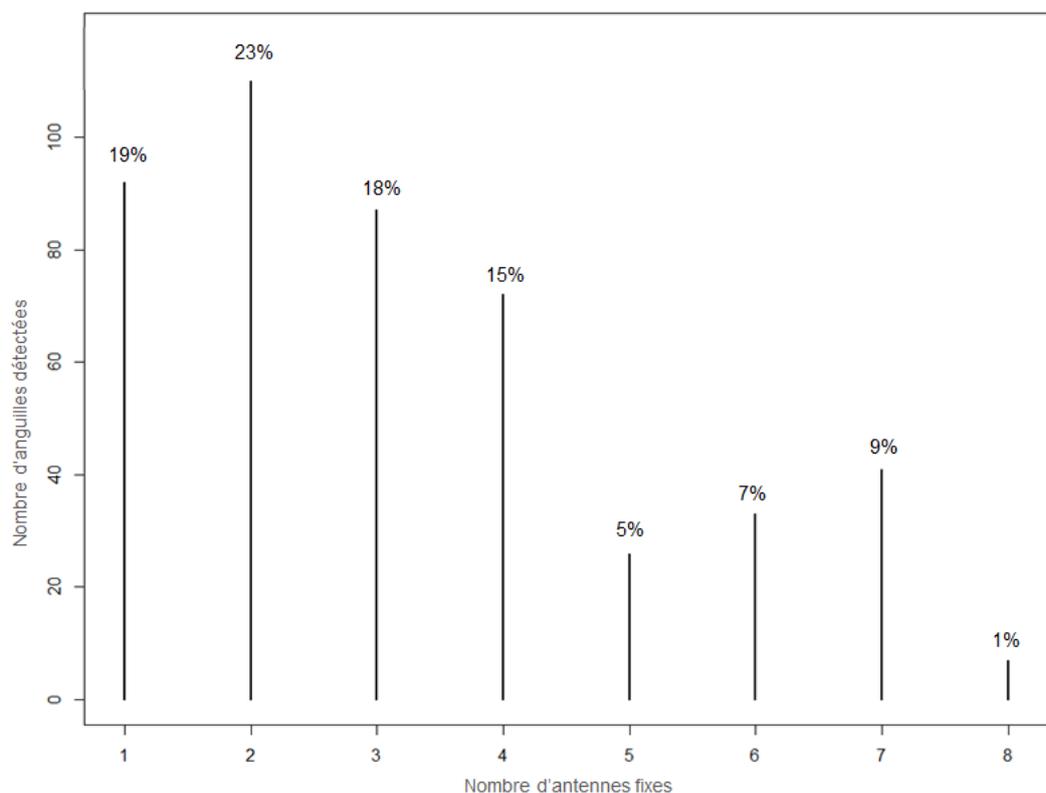


Figure 56. Nombre de détections par nombre d'antennes fixes

V.2.4.7. Facteurs spatio-temporels d'influence sur l'activité de l'anguille jaune

Un modèle log-linéaire (glm, lien=log, famille=Poisson, R) a été utilisé afin de décrire l'activité des anguilles marquées et détections aux antennes fixes en fonction de différents facteurs : la tranche horaire, le mois, l'année, l'antenne (le secteur), la période de la journée (aube, jour, crépuscule, nuit). Le nombre total d'anguilles marquées par jour et le taux de détections du tag-tracker ont également été pris en compte pour ne pas biaiser les estimations (-1 : tag-tracker non fonctionnel et 0,1 ou 2 pour le nombre de détections du tag-tracker par tranche horaire).

Un test de Chi² a été effectué et tous les facteurs apparaissent hautement significatifs (Tableau 41).

Tableau 41 : Résultat du test de significativité de chaque facteur testé pour décrire l'activité des anguilles détectées aux antennes

	Degré de liberté	Déviante	Statistique de test	Significativité du test
Tranche horaire	23	1487.8	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Mois	11	7449.4	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Année	2	542.4	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Antenne / Secteur	8	9299.2	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Période de la journée	3	2076.9	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Nombre d'anguilles marquées	1	450.8	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***
Détection tag-tracker	3	3640.1	< 2.2 10 ⁻¹⁶	***

Les tranches horaires ainsi que les périodes de la journée mettent en évidence l'activité nocturne significative des anguilles, observée précédemment (V.2.4.5.) Le couplage de ces deux facteurs semble montrer une activité plus intense au début et à la fin de nuit, certainement liée aux changements de luminosité.

La détection du tag-tracker permet de tenir compte des dysfonctionnements sur le réseau d'antennes que l'on a connu en hiver. Connaissant cela, les détections apparaissent tout de même significativement plus nombreuses pour les mois d'avril, mai et juin.

Spatialement, ce sont les antennes B et C qui enregistrent le plus de détections. Ce sont les antennes qui délimitent le secteur B, le secteur le plus profond de notre site d'étude avec des habitats en sous berge pouvant servir de refuge aux anguilles.

L'année 2017 enregistre un peu moins de détections relativement au nombre d'anguilles marquées au total sur le site. Ce résultat laisse penser qu'il y a pu avoir une baisse d'activité des anguilles en rapport aux conditions environnementales de cette année ou à l'intensification du protocole de capture et de détection sur le site d'étude. Certaines anguilles comptabilisées dans le nombre total d'anguilles marquées peuvent également être sorties du secteur.

V.2.4.8. Les antennes fixes pour détecter les sorties du site d'étude

Le site d'étude est un environnement naturel seulement délimité par des antennes fixes franchissables. Il est donc ouvert à l'entrée et à la sortie des anguilles. Les anguilles jaunes sont principalement sédentaires mais Feunteun en 2003, souligne l'existence de différentes tactiques d'anguille : la résidence ou la migration. Sachant cela, nous avons regardé le comportement des anguilles 15 jours après leur marquage pour définir 3 groupes d'individus: les résidentes, les migrantes, les inconnues.

Si l'anguille est détectée plus de 15 jours après le marquage, nous la considérons comme résidente. En cela, 90% de nos anguilles sont considérées comme résidentes (419 individus ; Lt= [149;672] mm).

Si l'anguille est détectée pour la dernière fois dans les 15 jours suivant le marquage et qu'elle a été détectée à une antenne externe (amont ou aval), nous considérons qu'elle a quitté le système. 9 anguilles ont alors rapidement quitté le site d'étude (Lt =[188;505] mm). 7 d'entre elles ont été détectées par l'antenne amont, ce qui suggère qu'elles n'étaient que de passage sur le site d'étude.

Enfin, 33 anguilles n'ont pas été détectées après 15 jours après leur marquage sans être détectées par une des antennes aux extrémités du site d'étude (Lt=[222 ;740] mm). L'hypothèse la plus probable est qu'elles n'ont pas été détectées par notre système lorsqu'elles se sont échappées, puisque si elles étaient mortes ou si elles avaient perdu leur PIT-tag, nous les aurions probablement détectées lors de PIT-tracking ultérieurs.

V.3. Le suivi des anguilles par radiopistage : le PIT-tracking

V.3.1. Principe du PIT-tracking

Les antennes fixes sont conçues pour détecter des poissons en mouvement. L'inconvénient de détecter uniquement des individus en déplacement a été compensé par un protocole de « PIT-tracking ». Ce protocole permet de rechercher activement les anguilles marquées en parcourant le cours d'eau à l'aide d'une antenne de détection mobile. Cela permet de réaliser un état ponctuel de la répartition des anguilles marquées sur la zone d'étude.

Chaque détection de PIT-tag ne correspond pas nécessairement à une anguille vivante. Les PIT-tags détectés peuvent correspondre à des PIT-tags balises pour tester l'efficacité de notre protocole, des PIT-tags portés par d'autres espèces, rejetés par les poissons, ou encore obsolètes car le porteur est mort.

Malgré tout, les prospections par PIT-tracking ne permettent pas de quantifier le nombre d'anguilles par secteurs. En effet, les anguilles non marquées par PIT-tag ne sont pas détectées. Pour pallier à ce défaut, deux sessions de pêches électriques ont été réalisées en 2016 et 2017. Pêcher un échantillon suffisant d'anguilles permet de déterminer la proportion d'anguilles marquées par rapport aux anguilles présentes sur le secteur. On peut également déterminer si les PIT-tags détectés lors du PIT-tracking correspondent à des anguilles vivantes et non à des marques obsolètes. Enfin, les individus non marqués, capturés par pêche électrique en 2016, ont été marqués afin d'augmenter le nombre d'individus suivis.

V.3.2. Fabrication de l'antenne mobile

Il s'agit d'une antenne formant une petite boucle portative de 40 cm de diamètre, reliée à un reader. La détection se fait jusqu'à 15 – 20 cm latéralement à la boucle, et jusqu'à 35 cm en dessous et au-dessus. Le système électronique est placé dans un caisson étanche et portatif visible sur la figure 57. Le système est alimenté par une batterie au lithium dont l'autonomie permet environ 4 - 5h de fonctionnement. Un PDA (Personnal Digital Assistant) connecté au système par câble permet d'afficher le numéro du PIT-tag détecté par l'antenne en temps réel, grâce à une application développée par OREGON RFID (Tag Tracker). A partir de mi-2017, le PDA a été remplacé par un émetteur Bluetooth branché sur l'antenne, transmettant les données sur une tablette à un opérateur en berge, qui prend les notes.



© Sabine Allou

Figure 57. Aperçu du système mobile de PIT-tracking en fonctionnement sur l'Oir, montrant le boîtier étanche au dos, l'antenne circulaire avec son manche et le PDA permettant la lecture des numéros de PIT-tags

V.3.3. Mise en œuvre du PIT-tracking sur la zone étudiée

Afin de renseigner au mieux les positions des anguilles marquées, un PIT-tracking complet s'effectue sur le tronçon de l'Oir compris entre l'antenne double Aval et l'antenne G. Ce tronçon déborde des secteurs A à E afin de suivre le mouvement des anguilles dans les secteurs d'études et à leurs alentours immédiats.

Deux opérateurs sont nécessaires. Le premier est dans l'eau. Il détecte les anguilles à l'aide de l'antenne portative et prend les points GPS. Un point GPS est pris pour chaque PIT-tag détecté et pour chaque antenne afin de délimiter chaque secteur. Le deuxième opérateur reste sur la berge et remplit une feuille d'expérimentation permettant de mettre en relation les points GPS avec les antennes et les PIT-tags détectées.

Pour chaque radiopistage, la durée d'expérimentation, la météo, le niveau d'eau et la pluviométrie des 24 dernières heures sont notées. Pour décrire l'efficacité de l'antenne mobile, 7 PIT-tags « balise » aux numéros connus ont été déposés aléatoirement sur chacun des 7 secteurs en octobre 2015. L'efficacité de chaque session de tracking est évaluée par le taux de détection de ces PIT-tags balise. Une fois la session de PIT-tracking terminée, les fichiers de données de l'antenne mobile et du GPS sont récupérés. Les données de ces fichiers sont ensuite mises en relation et bancarisées, à l'aide de la feuille terrain.

V.3.4. Résultats des détections par PIT-tracking

V.3.4.1. Les différentes sessions de PIT-tracking

Au cours des 3 années d'expérimentation sur le site test de l'Oir, 39 sessions de PIT-tracking ont été effectuées (Tableau 42). 17 sessions ont été menées de septembre à novembre 2015, seulement 2 sessions en 2016, dont une associée à une pêche électrique, et enfin, en 2017, des PIT-tracking ont été effectués de manière hebdomadaire sur tout le secteur.

Tableau 42: Bilan des sessions de PIT-tracking pour les trois années d'expérimentation

Année	Nombre de sessions	Temps total échantillonné	Nombre de détections	Nombre de détections d'anguilles	Nombre d'anguilles détections
2015	17	34h24	664	568	106
2016	2	4h42	161	103	89
2017	20	51h04	3451	3077	369
TOTAL	39	90h11	4276	3748	414

La session moyenne de PIT-tracking se déroule en 2h15. Moins de 50 anguilles étaient en moyenne détections pour les sessions de 2015. A partir de mai 2017, une modification de l'antenne mobile et un effort de marquage des anguilles plus important ont permis d'identifier 150 à 200 anguilles par PIT-tracking (Figure 58).

V.3.4.2. Efficacité de détection des PIT-tags balise par l'antenne mobile

Sept PIT-tags balises ont été posés, un dans chacun des 7 secteurs étudiés. Aucune session de PIT-tracking n'a permis de détecter 100% des balises. L'intervalle de détection est compris entre 2 et 6 balises par session, avec une moyenne de 65% d'efficacité de détection (Figure 59).

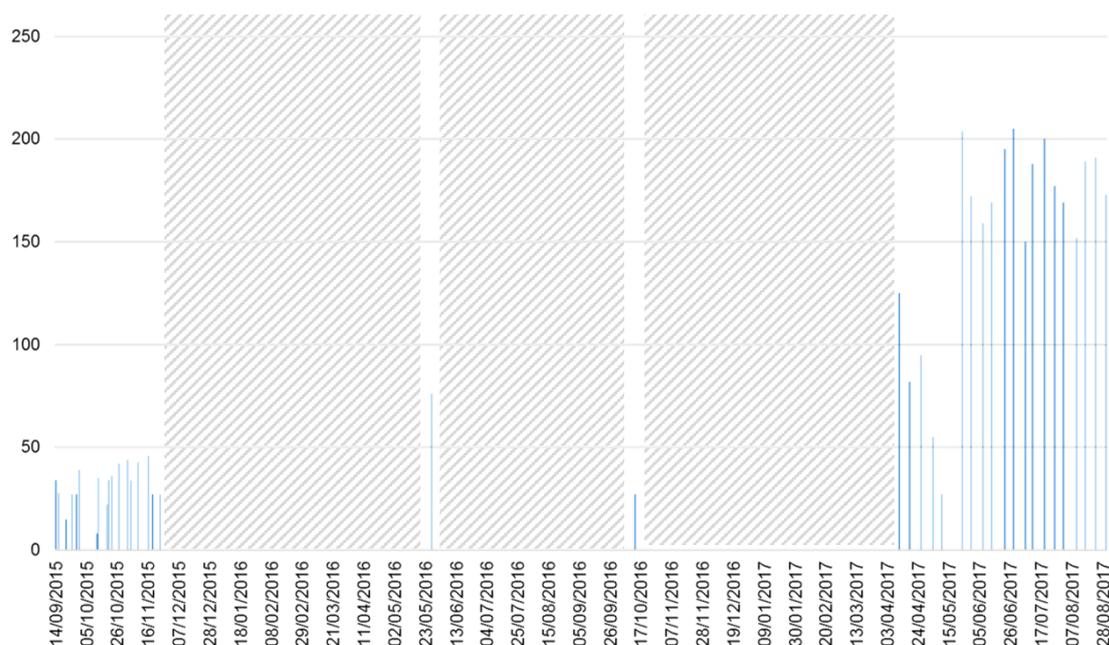


Figure 58. Nombre de détections d'anguilles par session de PIT-tracking (périodes grisées = pas de PIT-tracking)

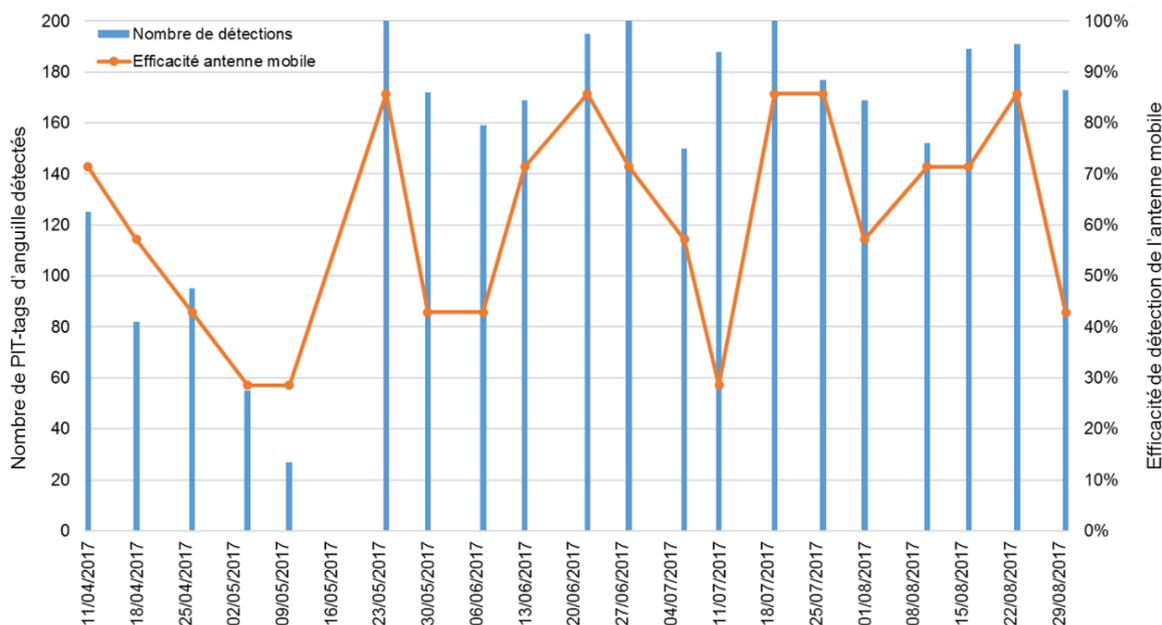


Figure 59. Détections des PIT-tags d'anguilles et efficacité de détection des PIT-tags balises par l'antenne mobile pour l'année 2017

V.3.4.3. Les PIT-tags détectés par antenne mobile

Sur les 3 années de mise en œuvre de PIT-tracking sur le site test, 4 276 détections ont été enregistrées sur le secteur test ainsi que sur les secteurs d'une centaine de mètres situés en amont et aval (Tableau 43). 90% de ces détections proviennent de 414 anguilles marquées. Comme pour les antennes fixes, les autres détections sont celles des saumons et des truites capturées et marquées aux pièges de Cerisel.

Tableau 43 : Nombre de détections par espèce

	Anguille	Saumon	Truite	Truite de mer
Nombre de PIT	414	31	45	1
Nombre de détections	3809	83	360	24

V.3.4.4. Détections des anguilles par PIT-tracking

Sur les 39 sessions de PIT-tracking, on remarque qu'il n'est pas rare de revoir les individus (Figure 60). En effet, seulement 0,8% des anguilles n'ont été détectées que lors d'une session, alors que 50% des individus ont été détectés lors de plus de 5 sessions différentes. Une anguille a été détectée jusqu'à 28 fois, soit plus de 70% du temps.

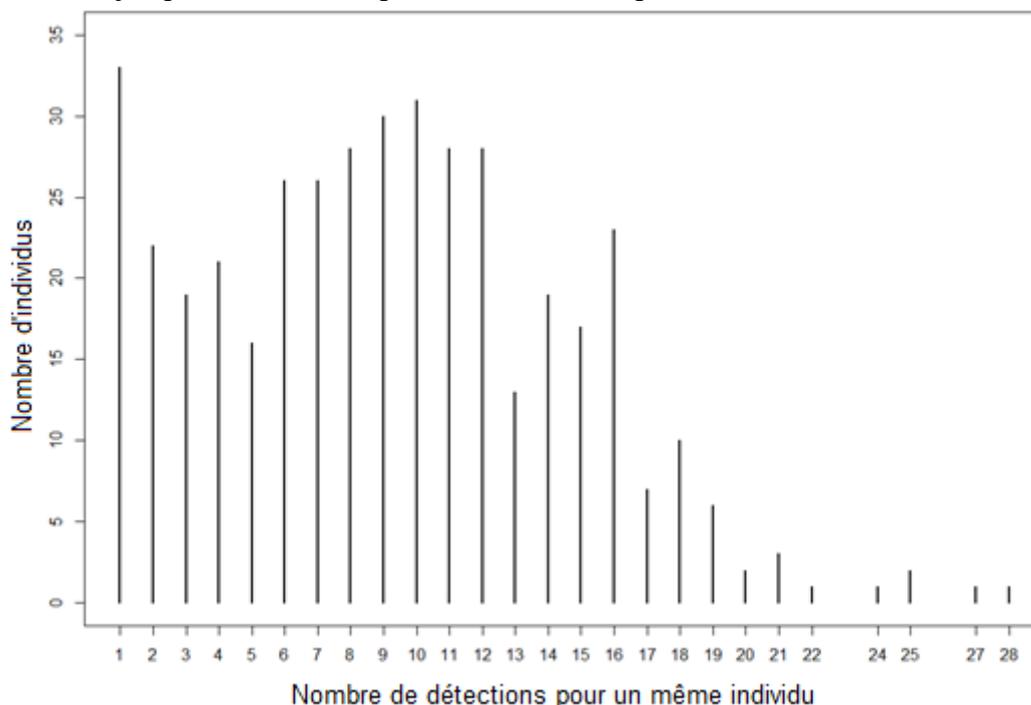


Figure 60. Nombre de détections (=sessions de PIT-tracking) par individu

V.3.4.5. Répartition et déplacements des anguilles

Pour les 414 anguilles détectées lors des différentes sessions de PIT-tracking depuis 2015, il est possible de connaître le nombre de détections localisées dans chacun des secteurs (Tableau 44). On peut ainsi s'apercevoir que 190 anguilles marquées sur le site test ont été détectés hors de ce site, en amont pour 105 anguilles ou en aval pour 85 d'entre-elles.

Sur le site test, c'est le dans le secteur C que l'on a enregistré le plus de détections (731 détections de PIT-tag d'anguilles) pour seulement 103 individus identifiés. Les secteurs A et B, où l'on capture peu d'anguilles par engin passif, ne sont pas équivalents en nombre de détection lors de PIT-tracking. En effet, seulement 73 anguilles pour 243 détections ont été localisées dans le secteur A, alors que le secteur B semble plus propice à la réalisation du PIT-tracking, avec 87 anguilles détectées pour 507 détections.

Tableau 44 : Nombre de détections d'anguilles par secteur

	AVAL	A	B	C	D	E	AMONT
Nombre de PIT-tags d'anguilles détectés	85	73	87	103	101	89	105
Nombre de détections	411	243	507	731	480	505	835

Pour ce qui est des déplacements, 57% des anguilles ont été détectées dans 1 seul secteur et 84% dans 2 secteurs maximum entre les différentes sessions de PIT-tracking (Figure 61). Les PIT-tracking sont réalisés de jour, lorsque les anguilles se trouvent dans le secteur d'habitat. Il est donc normal d'observer moins de mouvements entre les secteurs par PIT-tracking qu'avec les antennes fixes.

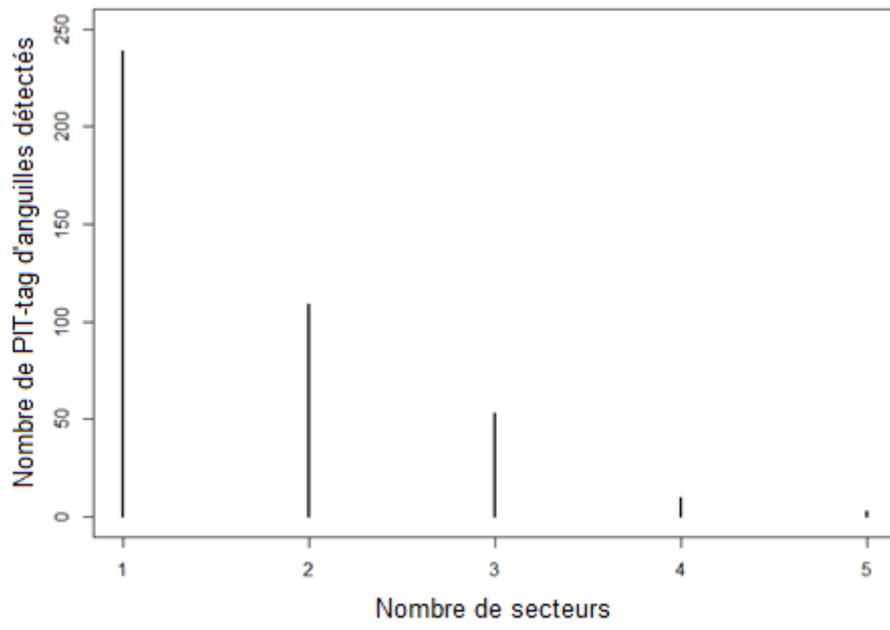


Figure 61 : Nombre de PIT-tags d'anguilles détectés par nombre de secteurs sur les 3 années de PIT-tracking

Encadré 3 : Association de la technologie RFID à la capture-recapture

Un protocole de Capture – Marquage – Recapture visant à quantifier la population d’anguilles a été mis en place à l’aide d’engins passifs de capture adaptés. La robustesse de ces données est renforcée par un suivi télémétrique des anguilles. La télémétrie a constitué une révolution dans l’étude de la faune sauvage. Les techniques évoluent rapidement, en terme de précision et de coûts. Une étude préalable a été donc entreprise afin de déterminer le type d’équipement le plus approprié à cette expérimentation. Le marquage par puce RFID est couramment utilisé sur les populations piscicoles. Relativement invasif, il nécessite une implantation dans l’organisme de l’animal. Cependant, il présente l’avantage de pouvoir être détecté à distance, durant toute la durée de vie de l’animal. L’anesthésie et le marquage des animaux sont donc des phases indispensables du suivi télémétrique. Cette étape permet également de récolter des données biométriques afin d’améliorer la connaissance de la population et de faciliter les suivis individuels.

Un protocole d’anesthésie a été mis en place et optimisé pour répondre à ces besoins. Un bain anesthésiant de benzocaïne à 28 mg.L-1 permet de marquer l’anguille dans de bonnes conditions, en autorisant un réveil rapide. Le marqueur optimal retenu pour les anguilles est le PIT-tag de 12 mm. Cette puce RFID est insérée dans la cavité abdominale de l’anguille, à l’aide d’un pistolet injecteur. La taille limite de marquage des anguilles est de 20 cm, afin que le PIT-tag n’excède pas 2% du poids de l’animal. Pour cette gamme de taille, le taux de survie est supérieur à 95%.

Afin de suivre la population d’anguille, un site de test, comprenant 5 secteurs a permis de calibrer l’effort d’échantillonnage nécessaire avec les engins passifs de capture durant plusieurs mois et de tester la télémétrie. Le réseau d’antennes de détection fixes déployé le long de la rivière Oir comprend 9 unités. Le protocole de montage et d’installation est décrit, et comprend l’installation d’un Tag-tracker sur chaque antenne. Ce tracker permet d’estimer l’efficacité de détection de chaque antenne, sachant qu’elles ne détectent que les individus en mouvement, qui passent dans le cadre de l’antenne. Afin de compléter ce réseau, une antenne de détection mobile a permis de parcourir périodiquement l’ensemble des sites et de détecter les individus peu mobiles. L’efficacité de détection de cette antenne mobile est également connue à l’aide de PIT-tags balises déposés au fond de la rivière dans chaque secteur.

L’ampleur de cette étude, tant sur le nombre d’anguilles marquées que sur la durée du suivi, quasiment en continu grâce à l’utilisation des antennes fixes, est une approche qui a été peu utilisée jusque-là.

Les résultats de ces détections font apparaître des détections d’anguilles et de salmonidés marqués pour d’autres programmes de recherches du pôle INRA-AFB. Les détections d’anguilles obtenues permettent de mieux connaître leur comportement. L’exploration de ces données est très utile pour connaître le comportement local des anguilles. Ces données peuvent également permettre de mettre au point des modèles pour quantifier l’utilisation de l’espace par les anguilles et estimer la taille de la population qui occupe le site. Ces modèles ont pour but de renforcer et valider les résultats de la quantification de la population d’anguilles en milieu profond par Capture – Marquage - Recapture.

VI. Analyse d'un protocole de couplage des données de capture et RFID

VI.1. Protocole de capture-marquage-recapture et de suivi par RFID

VI.1.1. Apport de la RFID dans les études CMR

La capture par engins passifs et l'usage de la RFID sont des méthodes directes qui permettent d'apporter des informations sur les individus en temps réel. Ces deux types de données, exploitées séparément, sont très largement utilisées dans les modèles CMR afin de quantifier l'utilisation de l'espace par les individus.

Le couplage de la capture et de la RFID permet de marquer individuellement un grand nombre d'individus et de multiplier les moyens de les suivre au cours du temps. Les modèles CMR calculent ou tiennent compte de la probabilité de détection pour estimer les paramètres démographiques, comme la taille de la population. Le meilleur moyen de réduire l'incertitude autour de ces estimations est d'augmenter la probabilité de détection. En ce sens, pour des espèces rares, c'est-à-dire à faibles effectifs ou à faible détectabilité comme l'anguille, les suivis utilisant la RFID semblent être avantageux.

En effet, pour notre expérimentation, le suivi RFID permet d'augmenter le nombre de détections des anguilles marquées. Sur 559 anguilles identifiées depuis le début des expérimentations sur le site test de l'Oir, 94% d'entre elles ont été vues plus d'une fois, toutes méthodes confondues. 37% d'entre elles (196 individus) ont été revues au moins une fois par toutes les méthodes de détection (capture, antennes fixes et PIT-tracking) (Figure 62). L'utilisation de la RFID a toutefois permis de détecter 55% de ces anguilles sans qu'elles ne soient recapturées par engins passifs.

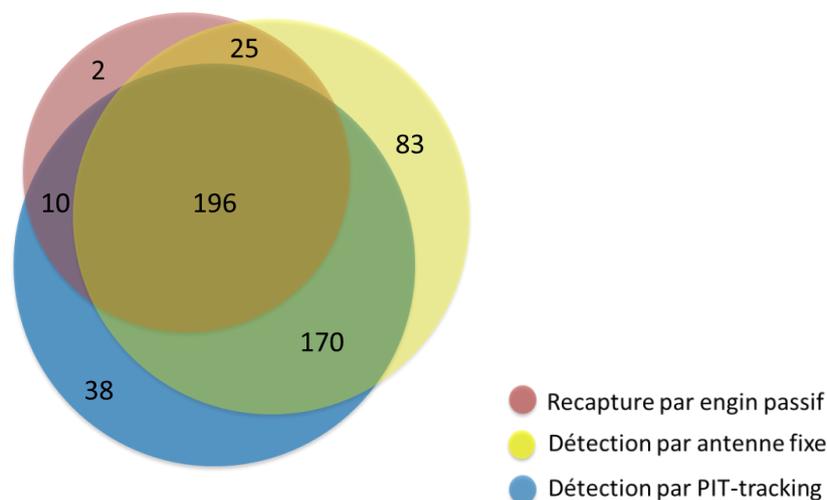


Figure 62 : Diagramme de Venn des différentes méthodes de détection des individus

Ainsi, dans notre étude, intégrer les données RFID aux modèles de CMR semblerait être un moyen intéressant pour augmenter la probabilité de revoir les individus et renforcer les résultats de la quantification de la population d'anguilles en milieu profond.

VI.1.2. Protocole et données récoltées

Depuis le début des expérimentations sur l'Oir en février 2015, de nombreuses opérations de marquage ont été réalisées sur le site test à la suite de capture par divers engins passifs, mais aussi des opérations de pêche électrique et de capture au piège de Cerisel.

Du 13 juin 2017 au 9 juillet 2017, 4 semaines d'expérimentation ont été sélectionnées durant lesquelles le protocole optimisé de piégeage par engin passif (Encadré 2) a été mis en place, ainsi que des PIT-tracking hebdomadaires et une fonctionnalité optimale des antennes fixes pour chacun des secteurs (Tableau 45).

Tableau 45 : Moyens mis en œuvre sur chacun des secteurs

Secteur	Fréquence	Aval		A		B		C		D		E		Amont
Piégeage	Semaine ouverte			X		X		X		X		X		
PIT-tracking	Hebdomadaire	X		X		X		X		X		X		X
Antenne fixe	Quotidien	X	X		X		X		X		X		X	X

Le tableau 46 fait le bilan des données récoltées sur tout le site d'étude (secteurs Aval à Amont) lors de ces 4 semaines d'expérimentations en tenant compte de tous les individus marqués lors des occasions précédentes.

Tableau 46 : Bilan des données récoltées lors des 4 semaines d'expérimentations en juin et juillet 2017 en tenant compte des marquages précédents

Occasions	Marquage	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Total
Dates (en 2017)	< 13 juin	13 – 19 juin	20 - 26 juin	27 juin – 3 juillet	4 – 9 juillet	13 juin – 9 juillet
Nombre d'anguilles capturées et marquées	451	3	14	2	6	25
Nombre d'anguilles recapturées	/	34	35	15	21	76
Nombre d'anguilles détectées par PIT-tracking	/	170	196	205	187	305
Nombre d'anguilles détectées par les antennes fixes	/	217	226	177	163	281
Total du nombre d'anguilles capturées et / ou détectées	/	291	308	292	270	367

Le tableau 47 ci-après, fait le bilan des données récoltées sur le site d'étude sur lequel nous cherchons à connaître la densité d'anguilles, c'est-à-dire des secteurs A à E, et pour ces 4 semaines d'expérimentation seulement :

Tableau 47 / Bilan des données récoltées sur les secteurs A à E et lors des 4 semaines d'expérimentation seulement

Occasions	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Total
Dates (en 2017)	13 – 19 juin	20 - 26 juin	27 juin – 3 juillet	4 – 9 juillet	13 juin – 9 juillet
Nombre de captures	35	34	9	15	93
Nombre de recaptures	5	18	8	14	45
Nombre d'anguilles détectées par PIT-tracking	4	28	26	29	49
Nombre d'anguilles détectées par les antennes fixes	33	55	52	42	79
Total du nombre d'anguilles capturées et / ou détectées	35	61	63	60	312

VI.2. Intégration des données de télémétrie dans un modèle de CMR multi-états multi-événements pour l'estimation de la survie et des déplacements

VI.2.1. Introduction aux modèles multi-états multi-événement

Les modèles multi-états (Lebreton *et al.* 2009) se basent sur le fait qu'un état peut être attribué à chaque individu capturé (stade, âge, localisation...) et que ces individus peuvent transiter d'un état à un autre entre chaque occasion. Dans notre étude, les états sont définis en fonction de la position géographique des individus sur le site test. À chaque secteur (Aval, A, B, C, D, E et Amont) est attribué un état « Vivant dans le secteur ». Grâce à ce type de modèles, il est possible d'estimer les probabilités de transition entre les états au cours du temps, c'est-à-dire ici, suivre les déplacements des anguilles entre les secteurs. Un cas particulier de ces modèles, un modèle de type multi-événement (Pradel 2005) a été construit permettant de pallier l'incertitude sur l'attribution d'un état à un individu.

Les analyses suivantes ont été réalisées à l'aide des logiciels E-SURGE 2.1.2 et U-CARE (Choquet *et al.* 2009 a ; Choquet *et al.* 2009 b)

VI.2.2. Construction du modèle multi-états, multi-événements

VI.2.2.1. Les hypothèses en CMR

L'utilisation des modèles de CMR nécessite les hypothèses théoriques suivantes (Pollock *et al.*, 1990):

- ▶ *Le marquage ne peut être perdu et ne doit influencer, ni la survie, ni le comportement des animaux pendant toute la durée du protocole de CMR.* Les résultats des expérimentations de marquage (§5.1.2) nous permettent de valider cette hypothèse.
- ▶ *L'échantillonnage est instantané, c'est-à-dire que l'animal est relâché immédiatement.* Pour le suivi RFID (fixe ou mobile), les anguilles ne sont pas retenues. En revanche, la capture par engins passifs peut retenir les individus durant 24h.

D'autre part, certaines hypothèses ne sont pas systématiquement vérifiées et elles seront testées pour notre jeu de données à l'aide du logiciel U-Care :

- ▶ *Tout animal marqué dans la population à l'instant t à la même probabilité de capture*
- ▶ *Tout animal dans la population a la même probabilité de survie entre t et $t+1$*

VI.2.2.2. Données utilisées et hypothèses spécifiques

Les données utilisées dans ce modèle sont celles présentées dans le paragraphe 6.1.2. Pour créer des histoires de détection, il est nécessaire de définir les occasions, c'est-à-dire les pas de temps durant lesquels les individus pourront être détectés. La première occasion rencontrée correspond à l'évènement de marquage. Cette occasion se distingue donc des autres puisqu'elle court sur 2 années d'étude. Les autres occasions correspondent aux journées où le protocole de piégeage et de suivi RFID a été appliqué. Pour tenir compte du rythme journalier des anguilles, enregistré par les antennes fixes (Figure 63), une occasion commence à 7h (heure universelle) jusqu'à 6h59 du jour suivant. La capture est ainsi le premier évènement de la journée, suivi du PIT-tracking les cas échéants.

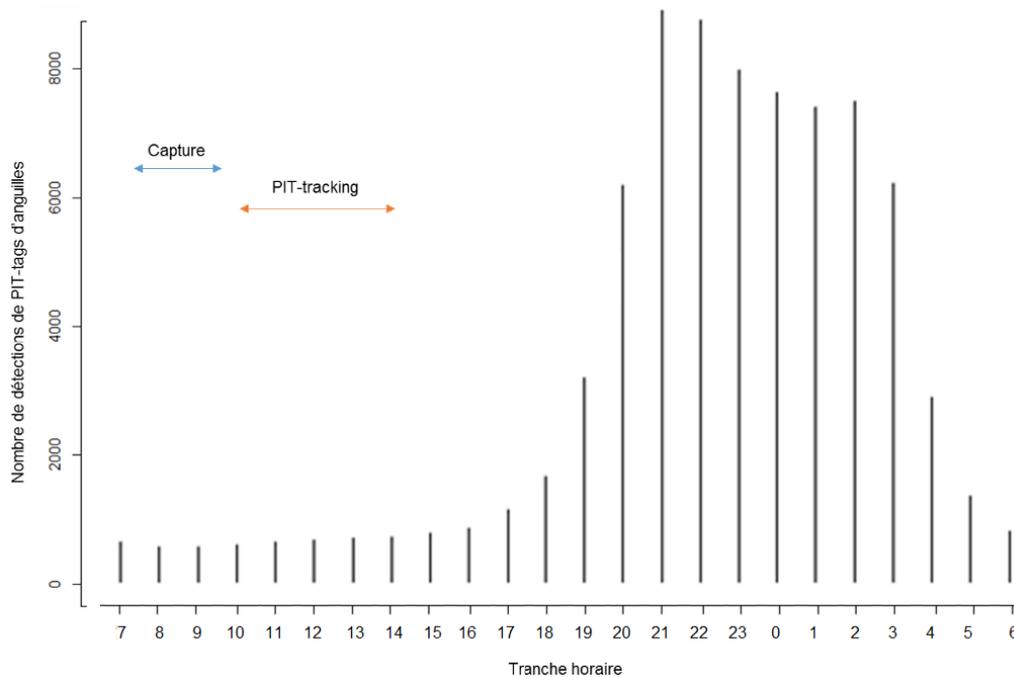


Figure 63 : Nombre de détections de PIT-tags d'anguilles aux antennes fixes par tranche horaire et plages horaires utilisées par les différents moyens de détections : capture, PIT-tracking et antennes fixes

Lorsque plusieurs détections dans différents secteurs sont disponibles pour une anguille à une occasion donnée, il est nécessaire de conserver l'élément le plus informatif sur l'état réel de l'individu (vivant ou mort, et dans quel secteur). Les données conservées dépendent de la méthode de détection : la capture est prioritaire sur les autres moyens de détection (PIT-tracking et antennes fixes) car, lors d'une capture par engin passif, son état est parfaitement connue. Si un individu est PIT-Tracké et détecté à une antenne lors de la même occasion, l'évènement de PIT-tracking est conservé puisque sa position exacte est connue, alors qu'une détection à une antenne, c'est-à-dire au borne d'un secteur, connaît une incertitude sur le secteur occupé. Enfin, il est possible qu'une anguille soit détectée à plusieurs antennes. Dans ce cas, la position conservée est la dernière détection enregistrée. Ce dernier choix favorise le retour les individus à leur secteur d'habitat.

Enfin, le modèle ne pouvant gérer l'incertitude du secteur d'attribution d'une détection au niveau d'une antenne fixe, nous avons tester deux configurations : un individu détecté à une antenne fixe est présent dans le secteur en aval de celle-ci, ou il est présent en amont de celle-ci. Les résultats présentés ci-dessous sont issus des données de la première configuration.

VI.2.2.3. Analyse de la qualité d'ajustement

Avant de construire les différents modèles, le jeu de données est soumis à une analyse préliminaire de la qualité d'ajustement (Goodness of Fit, GOF). Ce test permet de vérifier si un modèle où tous les paramètres varient dans le temps décrit de façon convenable le processus ayant généré les données (Nevoux 2008) et permet de détecter d'éventuels biais par rapport aux hypothèses de base des modèles (§6.2.2.1.). En effet, certains individus détectés peuvent être de passage dans la zone d'étude (phénomène de transience) ou encore éviter ou être attirés par les pièges (phénomène de trap-dépendance). Il est alors nécessaire de prendre en compte ces phénomènes dans la construction des modèles afin de réduire les biais dans les estimations.

Les histoires de détection en multi-états ont été analysées en utilisant le programme U-CARE – multistate data (version 2.3.2; Choquet *et al.* 2009 b). Les résultats des tests indiquent qu'il n'y a pas de phénomène de transience significative pour ces données. Le test met cependant en évidence un défaut d'ajustement du modèle Cormack-Jolly-Seber dû à un phénomène de « trap-

happiness » immédiat et à long terme très significatif ($P < 0.001$). Ce biais apparaît dès lors que les individus ont plus de chance d'être détectés d'autres. Dans notre cas, ce biais peut être dû à des anguilles plus actives que d'autres qui auront une probabilité plus importante d'être capturées aux engins et une forte probabilité d'être détectées aux antennes fixes. Les anguilles les moins mobiles peuvent tout de même être détectées par le PIT-tracking. Afin de prendre en compte ce comportement individuel hétérogène, Pradel & Sanz-Aguilar (2012) recommandent l'utilisation d'états supplémentaires indiquant si chaque individu a été détecté ou non à l'occasion précédente.

VI.2.2.4. Définition des états et des événements

Nous avons considéré des états physiologiques et géographiques : vivant dans chacun des secteurs ou mort. Ces états ont été décomposés pour chaque secteur : « + » si l'individu a été détecté à t-1 et « - » s'il n'a pas été détecté à t-1 pour tenir compte de la trap-dépendance (Tableau 47).

Tableau 48 : Description des états pour le modèle CMR

Etat	Description de l'état
V AVAL -	Vivant et dans le secteur Aval et non détecté à t-1
V AVAL +	Vivant et dans le secteur Aval et détecté à t-1
V A -	Vivant et dans le secteur A et non détecté à t-1
V A +	Vivant et dans le secteur A et détecté à t-1
V B -	Vivant et dans le secteur B et non détecté à t-1
V B +	Vivant et dans le secteur B et détecté à t-1
V C -	Vivant et dans le secteur C et non détecté à t-1
V C +	Vivant et dans le secteur C et détecté à t-1
V D -	Vivant et dans le secteur D et non détecté à t-1
V D +	Vivant et dans le secteur D et détecté à t-1
V E -	Vivant et dans le secteur E et non détecté à t-1
V E +	Vivant et dans le secteur E et détecté à t-1
V AMONT -	Vivant et dans le secteur Amont et non détecté à t-1
V AMONT +	Vivant et dans le secteur Amont et détecté à t-1
MORT	Mort

Les événements sont les observations que l'on fait sur le terrain. De notre cas, un événement est codé selon le secteur dans lequel l'observation a été faite, sans distinguer les méthodes de détection. Ces événements sont codés en chiffre (Tableau 48). Ce sont ces chiffres que l'on retrouve dans les histoires de détection du jeu de données.

Tableau 49: Description des événements pour le modèle CMR

Numéro de l'évènement	Description de l'évènement
0	Non vu
1	Détecté dans le secteur Aval
2	Détecté dans le secteur A
3	Détecté dans le secteur B
4	Détecté dans le secteur C
5	Détecté dans le secteur D
6	Détecté dans le secteur E
7	Détecté dans le secteur Amont

Par exemple, l'histoire « 2 0 2 1 » correspond à une anguille marquée la première fois dans le secteur A, non vue à la deuxième occasion, détecté dans le secteur A à la troisième occasion, puis détectée dans le secteur Aval à la dernière occasion.

VI.2.2.5. Paramétrisation du modèle multi-évènement

La détermination des paramètres biologiques est la dernière étape nécessaire à la construction des modèles. Dans le cadre de cette étude, les paramètres étudiés sont : le taux de survie des individus, les probabilités de déplacement entre les secteurs et les probabilités de détection prenant en compte la trap-dépendance.

► Etats initiaux : Un individu détecté pour la première fois est forcément capturé par les engins passifs (secteurs A à E). On connaît alors sa position et donc son état initial, avec une probabilité i .

Tableau 50: Matrice des états initiaux

V AVAL	V A	V B	V C	V D	V E	V AMONT	MORT
0	i	i	i	i	*	0	0

La transition d'un état à un autre entre t et $t+1$ peut se découper en trois étapes : 1/ La survie, 2/ Le déplacement entre les secteurs, 3/ Le processus de trap-dépendance.

Ces étapes sont conditionnées par les précédentes : un individu ne peut se déplacer que s'il a survécu. Il peut ensuite être détecté ou non. Pour paramétrer ces étapes, on utilise des matrices pour lesquelles les lignes correspondent au temps $t-1$ et les colonnes au temps t .

► Etape 1, la survie : Un individu peut survivre entre le temps $t-1$ et t avec une probabilité de ϕ ou peut mourir avec une probabilité de $1-\phi$ (notée *) (Tableau 50).

► Etape 2, le déplacement : Les individus qui ont survécu au temps $t-1$ peuvent changer de secteur entre $t-1$ et t avec une probabilité de ψ ou rester dans le même secteur avec une probabilité $1-\sum\psi$ (noté*) (Tableau 51).

► Etape 3, le processus de trap-dépendance : Enfin, les individus peuvent être détectés à t avec une probabilité p selon s'ils ont été détectés ou non à $t-1$. Ils peuvent ne pas être détectés à t avec une probabilité $1-p$ (noté*) (Tableau 52).

► Les évènements : la dernière matrice fait le lien entre les états et les évènements. Dans notre cas, si un individu est « + », cela signifie qu'il vient juste d'être détecté. L'évènement correspond donc à son secteur de détection. S'il est « - » ou mort, il n'a pas été détecté à cette occasion et l'évènement est noté « 0 » (Tableau 53). Par principe, un individu qui est détecté aux antennes est en mouvement. Il est donc considéré comme vivant et sa probabilité d'être mort est nulle. Lors d'un PIT-tracking, un PIT-tag détecté peut identifier un individu vivant ou mort (PIT-tag libre dans la rivière). La paramétrisation du modèle ci-dessus nous oblige à faire l'hypothèse qu'un individu mort ne peut pas être détecté.

Tableau 51 : Matrice des probabilités de survie entre t-1 et t

	V AVAL -	V AVAL +	V A -	V A +	V B -	V B +	V C -	V C +	V D -	V D +	V E -	V E +	V AMONT -	V AMONT +	MORT
V AVAL -	φ														*
V AVAL +		φ													*
V A -			φ												*
V A +				φ											*
V B -					φ										*
V B +						φ									*
V C -							φ								*
V C +								φ							*
V D -									φ						*
V D +										φ					*
V E -											φ				*
V E +												φ			*
V AMONT -													φ		*
V AMONT +														φ	*
MORT															1

Tableau 52 : Matrice des probabilités des déplacements entre les secteurs entre t-1 et t

	V AVAL -	V AVAL +	V A -	V A +	V B -	V B +	V C -	V C +	V D -	V D +	V E -	V E +	V AMONT -	V AMONT +	MORT
V AVAL -	*		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		
V AVAL +		*		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ	
V A -	ψ		*		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		
V A +		ψ		*		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ	
V B -	ψ		ψ		*		ψ		ψ		ψ		ψ		
V B +		ψ		ψ		*		ψ		ψ		ψ		ψ	
V C -	ψ		ψ		ψ		*		ψ		ψ		ψ		
V C +		ψ		ψ		ψ		*		ψ		ψ		ψ	
V D -	ψ		ψ		ψ		ψ		*		ψ		ψ		
V D +		ψ		ψ		ψ		ψ		*		ψ		ψ	
V E -	ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		*		ψ		
V E +		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		*		ψ	
V AMONT -	ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		*		
V AMONT +		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		ψ		*	
MORT															1

Tableau 53 : Matrice des probabilités de changement d'état selon le processus de trap-dépendance

	V AVAL -	V AVAL +	V A -	V A +	V B -	V B +	V C -	V C +	V D -	V D +	V E -	V E +	V AMONT -	V AMONT +	MORT
V AVAL -	*	p													
V AVAL +	*	p													
V A -			*	p											
V A +			*	p											
V B -					*	p									
V B +					*	p									
V C -							*	p							
V C +							*	p							
V D -									*	p					
V D +									*	p					
V E -											*	p			
V E +											*	p			
V AMONT -													*	p	
V AMONT +													*	p	
MORT															1

Tableau 54 : Matrice des événements de détection

	0	1	2	3	4	5	6	7
V AVAL -	1							
V AVAL +		1						
V A -	1							
V A +			1					
V B -	1							
V B +				1				
V C -	1							
V C +					1			
V D -	1							
V D +						1		
V E -	1							
V E +							1	
V AMONT -	1							
V AMONT +								1
MORT	1							

VI.2.3. Résultats des estimations des paramètres démographiques : survie, déplacements, probabilité de détection

VI.2.3.1. Sélection du meilleur modèle

Plusieurs combinaisons d'hypothèses ont été testées sur les paramètres biologiques déterminés précédemment. Comme la première occasion est l'évènement de marquage, le taux de survie et la probabilité de détection sont différents entre cette occasion et les autres occasions de recapture. Pour les autres occasions, les différentes hypothèses testées sont les suivantes :

Pour la survie :

- ▶ Les probabilités sont différentes entre les secteurs dans lesquels se trouvent les anguilles
- ▶ Les probabilités de survie sont hétérogènes entre les individus selon leur statut de capture

Pour les déplacements :

- ▶ Les probabilités de rentrer ou de sortir de chaque secteur sont différentes
- ▶ Les probabilités de déplacements dépendent du statut de capture des individus

Pour la recapture :

- ▶ La probabilité d'être détecté à t s'il a été vu à t-1 est différente s'il n'a pas été vu à t-1
- ▶ Ces deux probabilités sont différentes en fonction des secteurs

En plus de ces hypothèses, chaque paramètre peut varier en fonction des occasions ou être constant dans le temps. Un modèle est produit pour chaque combinaison d'hypothèses.

Ainsi 20 modèles ont été construits en partant du modèle le plus complexe et en simplifiant les hypothèses au fur et à mesure. Les probabilités de capture ont été ajustées en premières puis les déplacements et enfin la survie. Le meilleur modèle est sélectionné à l'aide du Critère d'Information d'Akaike (AIC). Ce critère de parcimonie permet de sélectionner le modèle qui décrit le mieux les données avec le moins de paramètres estimés (Burnham & Anderson 2004).

Le meilleur modèle sélectionné (Tableau 54) prend en compte :

- ▶ une probabilité de survie différente entre l'occasion 1 (évènement de marquage) puis constante au cours du temps et homogène entre les individus

- ▶ des probabilités de déplacements différentes entre chaque secteur mais homogène selon les individus
- ▶ une probabilité de détection constante dans le temps mais tenant compte de la trap-dépendance.

Tableau 55 : Bilan du meilleur modèle sélectionné

Nombre d'occasions	28
Nombre d'états	15
Nombre d'évènements	8
Fonction de lien	logitgen
Nombre de paramètres	51

VI.2.3.2. Estimation de la probabilité de survie journalière

Pour des études sur l'anguille à court terme comme celle-ci, le taux de survie n'est pas un paramètre démographique incontournable. En effet, sur ce pas de temps (quelques semaines), la mortalité de cette espèce est négligeable. Cependant, dans les modèles CMR, la survie apparente exprime également la probabilité de rester dans le système. Ce paramètre est ainsi intéressant à modéliser.

Le modèle multi-événements retenu pour les estimations du taux de survie est celui qui estime un taux de survie différent entre l'évènement de marquage et la 1ère occasion puis constant pour le reste des occasions et homogène entre les individus. En effet, la survie n'est pas positivement corrélée avec la probabilité de détection et ne diffère pas entre les individus.

Entre l'évènement de marquage et le 1er jour du protocole, la survie est estimée à 0,74 (IC 95% : 0,69 - 0,78) et pour le reste des occasions, la survie journalière est estimée à 0,99 (IC 95% : 0,98 - 0,99) (Figure 64).

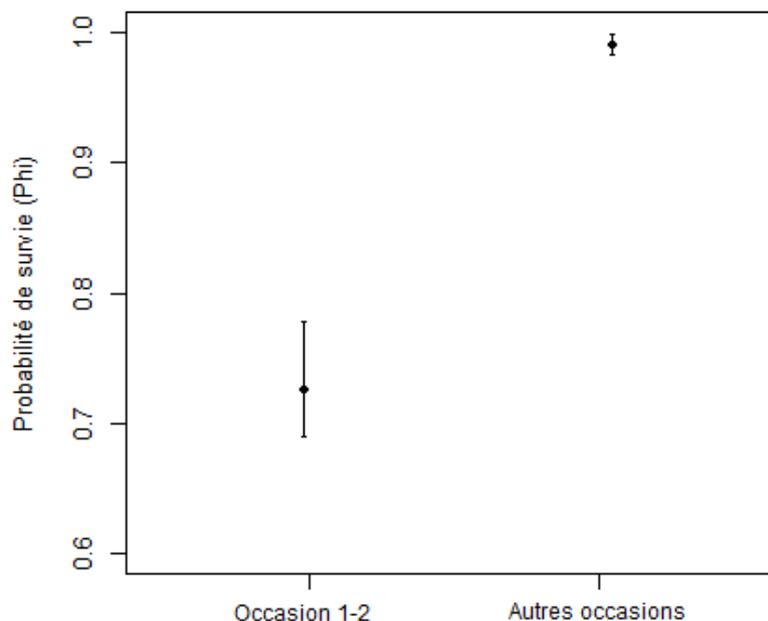


Figure 64 : Probabilité de survie (\pm IC) journalière des anguilles en fonction des occasions

Entre le premier marquage et début juin 2017, il y a donc 74% de chance que les anguilles marquées soit toujours vivantes et sur le secteur d'étude. D'un jour à l'autre, la probabilité qu'une anguille sorte définitivement du système est de 1% seulement.

VI.2.3.3. Estimation de la probabilité de déplacement entre les secteurs

Les probabilités de se déplacer d'un secteur à l'autre entre deux occasions sont renseignées dans le tableau 55 et la figure 65 ci-après.

Dans notre système, où les secteurs représentent 50 m de cours d'eau, une anguille a une probabilité d'environ 0,80 (de 0,76 dans le secteur A à 0,89 dans le secteur C) de rester dans le secteur où elle a été vue à l'occasion précédente. Lorsqu'elles en sortent, elles ont une probabilité moyenne de 15% d'être détectées dans un des deux secteurs adjacents. Les mouvements les plus fréquents sont enregistrés entre le secteur E et le secteur Amont avec une probabilité de 0,20 (IC 95 % : 0,14 – 0,27).

Tableau 56 : Estimation des probabilités de déplacement d'un secteur à un autre entre t-1 et t

Arrivée Départ	AVAL	A	B	C	D	E	AMONT
AVAL	0,86	0,094	0,030	0,004	0,005	0,005	0
A	0,11	0,76	0,12	0,004	0	0	0,004
B	0,017	0,067	0,84	0,043	0,013	0,002	1,1
C	0,004	0,009	0,035	0,89	0,054	0,003	0,004
D	0,006	0	0,018	0,081	0,82	0,044	0,031
E	0	0,002	0,003	0,009	0,067	0,80	0,12
AMONT	0	0	0	0,001	0,011	0,20	0,79

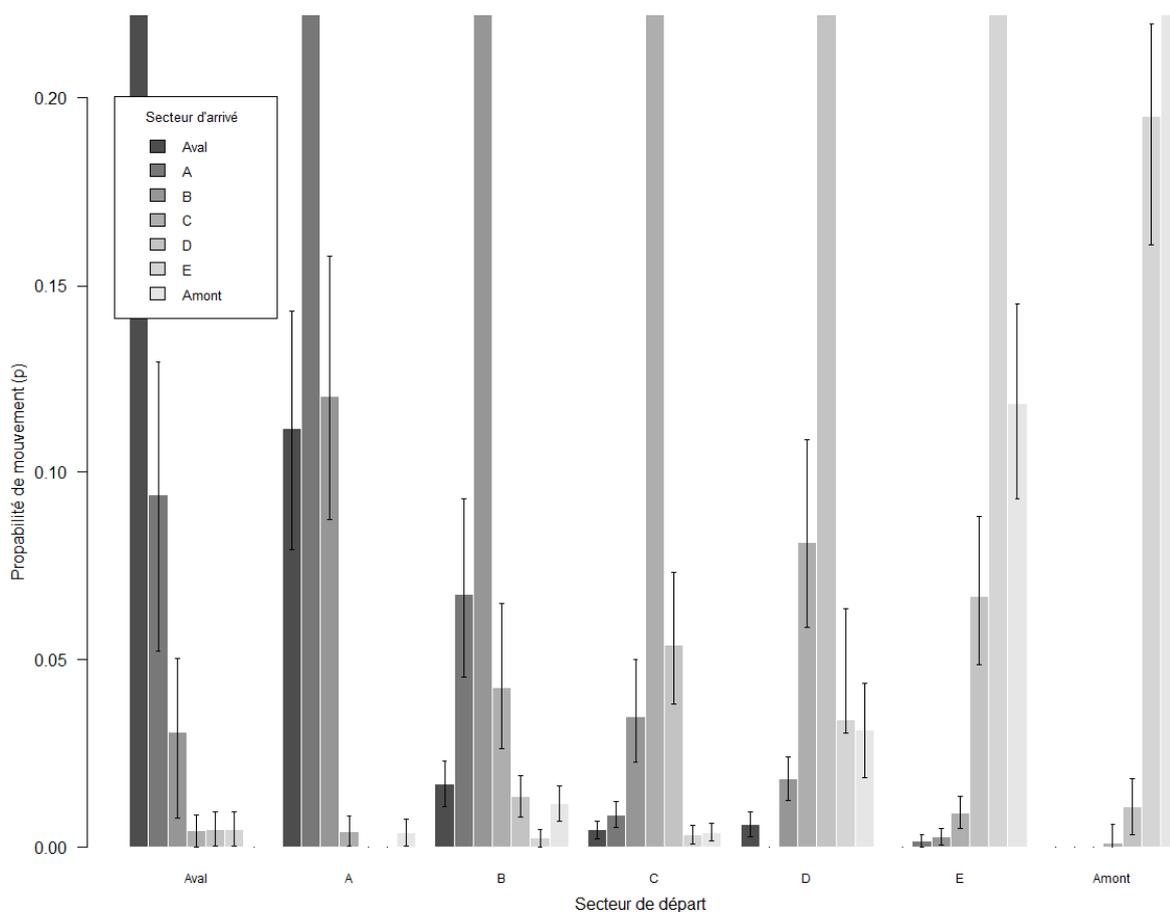


Figure 65 : Graphique des probabilités de déplacement ($p \pm IC$) des anguilles d'un secteur à un autre entre deux occasions

VI.2.3.4. Probabilité de détection selon le processus de trap-dépendance

La figure 66 représente les probabilités de détection toutes méthodes confondues selon ce processus de trap-dépendance. La probabilité de détecter un individu déjà détecté à l'occasion précédente est estimée à 0,70 (IC 95% = 0,68 – 0,72). Ainsi, à la forte probabilité de rester sur le secteur, s'ajoute la forte probabilité d'y être détecté par notre système. Au contraire, si un individu n'a pas été détecté à t-1, à cause d'un système de détection imparfait, de mouvements plus en aval ou plus en amont de nos secteurs d'étude ou d'un comportement moins actif, il a moins de chance d'être détecté à t. La probabilité de détecter ces anguilles est tout de même estimée à 0,23 (IC 95% = 0,22 – 0,25) illustrant que ces individus ne sont que temporairement indisponibles à la détection.

Les erreurs standards autour des estimations sont faibles, traduisant que cette discrimination en deux groupes explique bien l'hétérogénéité de détection.

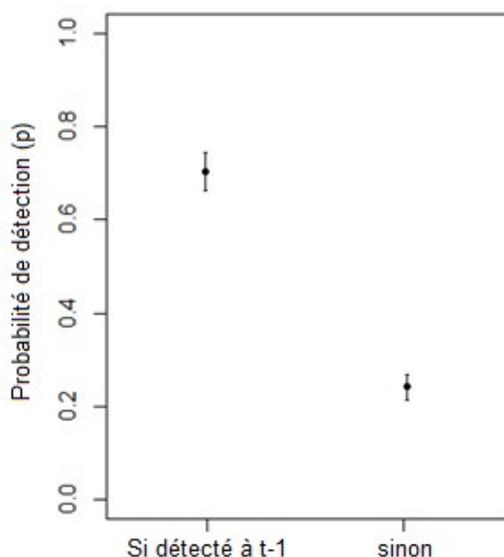


Figure 66 : Probabilité de détection ($p \pm IC$) si un individu est détecté à t-1 ou non

VI.2.4. Apports du modèle multi-états multi-événements dans l'étude des anguilles en milieux profonds

Le modèle retenu dans cette étude estime une survie journalière de 0,99 (IC 95% : 0,98 – 0,99), sans mettre en évidence d'hétérogénéité individuelle. A très court terme, les anguilles ont peu de chance de quitter le système, par mort ou émigration définitive. Les anguilles ciblées dans cette étude sont les anguilles jaunes de plus de 20 cm considérées comme sédentarisées, ce qui explique qu'on n'observe peu d'échappement ou d'individus en transition sur le secteur d'étude (Imbert 2008) (cf § V.2.4.8.).

Avec ce modèle, on observe néanmoins une forte probabilité de se déplacer hors d'un secteur de 50m. Les anguilles ont une probabilité de changer de secteur d'environ 0,20 d'un jour à l'autre. Ces anguilles ont notamment une probabilité moyenne de 0,15 de se déplacer sur les secteurs adjacents. Dans le cas des anguilles jaunes, les mouvements enregistrés quotidiennement sont principalement dû à une prospection alimentaire autour de leur habitat refuge, dépassant ici les 50 m de linéaire. Ces résultats correspondent aux estimations faites par Ovidio *et al.* (2013), où il démontra un home-range de 33 à 341 m (valeur médiane = 62 m). De plus, l'importance de ces mouvements ne semble pas varier au cours du temps, mais pourrait dépendre de caractéristiques individuelles comme la taille (Baisez 2001). Connaissant ces

déplacements fréquents, les anguilles étudiées peuvent ne pas être disponibles dans leurs secteurs à certains moments. Ce phénomène, appelé « émigration temporaire », est difficile à appréhender et peut parfois mener à des biais dans les estimations (Whitehead 1990). Étudier un secteur de 50 m, très soumis à ce phénomène, ne semble ainsi pas être judicieux pour appliquer un protocole de quantification. Néanmoins, augmenter la taille du secteur d'étude implique de déployer plus de matériel pour le suivi des individus. Un secteur de 100 à 150 m pourrait être un bon compromis entre l'adaptation du protocole au comportement des anguilles et une mise en œuvre abordable du protocole.

Les résultats du modèle multi-événement retenu suggèrent d'autre part que certains individus sont plus disposés à être régulièrement détectés. En effet, la probabilité de détection d'un individu est estimée à 0,70 (IC 95% = 0,68 – 0,72) s'il a été détecté à l'occasion précédente et à 0,23 (IC 95% = 0,22 – 0,25) s'il n'a pas été vu. Cette différence significative démontre l'existence d'une hétérogénéité de détection entre les anguilles. Cependant, le modèle ainsi construit n'apporte pas d'explication sur cette hétérogénéité. En cela, il pourrait être intéressant de construire d'autres modèles sur ce schéma, intégrant des covariables individuelles qui pourraient potentiellement expliquer des différences de comportements vis-à-vis des méthodes de détection. Dans tous les cas, cette hétérogénéité de détection, dû au phénomène de trap-dépendance, existe et doit être prise en compte dans nos modèles CMR. En effet, les modèles d'évaluations d'abondance sont très sensibles à ces phénomènes (Péron *et al.* 2010), et l'hétérogénéité de détection peut induire une sous-estimation importante de la taille de la population si elle n'est pas considérée lors de la construction des modèles (Cubaynes *et al.* 2010).

VI.3. Estimation de la densité à l'aide des données de capture-marquage-recapture

VI.3.1. Introduction aux modèles de population

Les modèles de population sont des types de modèles CMR qui permettent d'estimer la taille des populations et ses variations au cours du temps en tenant compte de la probabilité de détection des individus. Ces méthodes permettent d'obtenir des estimations d'abondance ou parfois directement de densité.

Le choix du modèle de population repose sur plusieurs hypothèses. Certaines ont pu être vérifiées par les résultats du modèle multi-événement précédent.

D'une part, connaissant les estimations de survie et de mouvements journaliers, l'hypothèse de population ouverte est préférée. Il est supposé, qu'entre chaque occasion journalière, le recrutement et la mortalité des anguilles soient négligeables mais que des phénomènes de migrations dans et hors du système soient possibles. Certaines de ces anguilles peuvent ainsi se rendre indisponible à la capture ou la détection si elles dépassent temporairement les limites fixées par nos antennes qui ne constituent pas de barrière physique. L'impossibilité de distinguer la survie réelle de l'émigration temporaire peut entraîner un biais dans la survie estimée.

D'autre part, les analyses préliminaires avec U-CARE ont mis en évidence une réponse à la capture positive avec un phénomène de trap-dépendance significatif. Le modèle ensuite construit a souligné une hétérogénéité de détection où tous les individus n'ont pas la même probabilité d'être identifiés par les méthodes de détection utilisées dans notre protocole (capture, détection aux antennes fixes et mobiles). En effet, certaines anguilles semblent être plus mobiles que d'autres et donc être plus facilement capturable par les engins passifs ou détectables par les antennes fixes. Enfin et surtout, lorsque les méthodes de détection RFID sont couplées à la capture, les anguilles marquées ont une probabilité plus forte d'être revue par notre système (capture et antennes) que les anguilles non marquées (capture seulement).

Certains modèles de type « Robust design » (Pollock 1982, Kendall, Nichols and Hines 1997, Kendall and Bjorkland 2001) permettent à la fois d'estimer les paramètres démographiques et la taille de la population sans biais malgré les absences temporaires. Cette méthode permet de combiner des données issues de populations ouvertes et fermées. Elle fait appel à un plan d'échantillonnage particulier qui comprend des séries d'occasions de capture secondaires avec un pas de temps réduit pour que la population soit considérée fermée, au sein d'occasions de capture primaires où la population est considérée ouverte. Toutefois, dans nos cas, des estimations fiables peuvent être difficile à obtenir puisque les anguilles peuvent se déplacer hors du site même lors d'intervalles de temps courts (à la journée).

Ainsi, pour une population ouverte, Schwarz et Arnason (1995) ont développé une méthode qui permet de paramétrer le modèle d'estimation de la taille de population Jolly-Seber selon cette hypothèse (Jolly 1965, Seber 1965). Cette paramétrisation, dite « POPAN » pour POPulation ANalysis, rend compte de la notion de « super population » et de la probabilité d'entrée dans cette « super population » à chaque occasion. Pour ce type de modèle, la détectabilité doit être la même pour tous les individus (marqués et non marqués) à chaque occasion. Dans notre cas, un tel modèle ne peut être construit qu'à partir des données de capture puisque que l'utilisation des antennes RFID augmente la probabilité de détection des individus marqués seulement. De plus, pour une population ouverte, le modèle fournit un effectif de population qu'il faut ensuite transformer en densité en estimant les limites de la zone d'étude.

L'enjeu est donc d'inclure les données de détection RFID disponibles pour estimer la densité à partir des données de capture-recapture.

Les données de radiotélémetrie auxiliaire sont souvent utilisées comme un moyen d'aborder l'ouverture géographique. Par exemple, le modèle « Density with Telemetry » (Ivan 2008) offre une alternative dans laquelle la télémetrie est utilisée pour surveiller les animaux pendant ou immédiatement après le protocole de capture-marquage-recapture afin d'estimer la proportion du temps qu'ils passent sur le site d'étude. Cette méthode ne fait pas d'hypothèse concernant la distribution et les mouvements des individus ou leur home-ranges. En revanche, il doit être possible d'assigner une position géographique précise et sans biais par rapport aux limites du site d'étude. Cette dernière hypothèse implique qu'il est possible de connaître la position des individus marqués à chaque interrogation, ce qui est permis par l'utilisation de marques actives en radiotélémetrie ou télémetrie acoustique mais pas par nos méthodes de suivis RFID (fixe ou mobile). Plus récemment, des techniques de capture-recapture spatialement explicite (SECR) ont été introduites comme alternative (Efford 2004, Efford 2011, Efford 2016). Cette méthode utilise l'information de localisation des individus capturés pour modéliser leurs mouvements à l'intérieur et au-delà de la zone d'échantillonnage. Les positions détectées permettent d'estimer les paramètres d'un modèle d'observation dans lequel la probabilité de détection diminue en fonction de la distance entre le centre du domaine vital d'un animal et un détecteur donné (Efford 2004). Le modèle intègre ensuite ce mouvement à l'estimation de la densité. Un des avantages par rapport à notre protocole est la possibilité d'utiliser plusieurs types de détecteurs. Toutefois, cette méthode se base sur l'indépendance et la distribution aléatoire des détecteurs pour enregistrer les mouvements des individus dans la zone d'échantillonnage et dans notre étude, nos différents détecteurs (capture et antennes fixes) ne correspondent pas à ce plan d'échantillonnage.

Ainsi, à notre connaissance, il ne semblerait pas exister de modèle préétabli qui conviendrait pour l'exploitation de nos données.

Une première étape a alors été de tester un modèle simpliste, utilisant seulement les données de capture (modèle POPAN) et de comparer l'estimation de densité obtenue aux estimations faites lors de deux opérations de pêche électrique effectuées sur le même secteur.

VI.3.2. Construction du modèle « POPulation ANALysis »

VI.3.2.1. Paramètres démographiques estimés par le modèle POPAN

Le modèle POPAN permet d'estimer les paramètres suivants :

- ▶ ϕ : La survie apparente
- ▶ p : La probabilité de capturer un animal vivant
- ▶ $pent$: « Probability of Entrance » ou probabilité d'entrer dans la population
- ▶ La taille de la « super-population » N : Elle représente le nombre total d'animaux présents durant la période d'étude

VI.3.2.2. Hypothèses du modèle POPAN

Comme pour le précédent modèle CMR, certaines hypothèses doivent être vérifiées :

- ▶ *Les animaux conservent leurs marques dans l'étude et celles-ci ne sont pas mal interprétées ou perdues* : Les résultats des expérimentations de marquage PIT-tag (§V.1.2) nous permettent de valider cette hypothèse.
- ▶ *L'échantillonnage est instantané, les individus sont relâchés immédiatement après le relevé*
- ▶ *Le taux de survie est supposé le même pour tous les animaux (marqués ou non) entre chaque session*
- ▶ *La détectabilité est la même pour tous les animaux (marqués et non marqués) à chaque session* : Dans notre cas, un tel modèle ne peut être construit qu'à partir des données de capture, puisque que l'utilisation des antennes RFID augmente la probabilité de détection des individus marqués seulement.
- ▶ *La zone d'étude est constante* : La zone d'étude est fixe, délimitée par les antennes.

VI.3.2.3. Données utilisées et hypothèses spécifiques

Les données utilisées dans ce modèle sont également celles présentées dans le paragraphe 6.1.2, avec une mise en forme spécifique au modèle de population.

Pour ce type de modèle, à chaque occasion est renseignée la présence, si un individu est capturé ou détecté, ou l'absence des individus. Les histoires de détection contiennent alors des 0 pour « non vu » et de 1 pour « vu », sans distinction sur le secteur où il a été détecté ou la méthode d'observation. Un individu qui n'aurait pas été vu lors d'une occasion peut être présent dans zone d'étude mais pas observé, vivant mais absent de la zone d'étude ou mort.

La première occasion rencontrée correspond toujours à l'évènement de marquage. En revanche, les autres occasions correspondent aux journées où les pièges de capture sont relevés. Il n'y a donc plus que 17 occasions de capture, avec un pas de temps irrégulier (Tableau 56)

Tableau 57 : Définition des intervalles de temps entre chaque occasion

Numéro de l'occasion	1	2	3	4	8	9	10	11	15	16	17	18	22	23	24	25
Pas de temps entre cette occasion et la suivante	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	/

De plus, les anguilles ne peuvent être capturées par les engins passifs que sur les secteurs A à E. Afin de limiter les effets des émigrations temporaires, tout le secteur de 250m sera considéré comme zone d'étude pour l'estimation de la taille de la population.

La qualité d'ajustement (GOF) des histoires de capture (voir § VI.2.2.3.) ainsi construites sont analysées à l'aide du logiciel U-CARE et le programme single-state data. Les résultats des tests (Test GOF: $\chi^2=22,57$ et $P = 0,89118$) indiquent qu'il n'y a pas de phénomène de transience significative pour ces données ($P = 0,714$) et le biais de trap-dépendance n'est cette fois pas significatif ($P = - 0,774$).

Le modèle « POPAN » a été testé à l'aide du logiciel MARK (Cooch & White 2001).

VI.3.2.4. Paramétrisation du modèle POPAN

Les modèles sont paramétrés suivant les résultats du modèle multi-événement précédent :

- ▶ la probabilité de survie est constante au cours du temps
- ▶ les probabilités de détections sont constantes au cours du temps
- ▶ la probabilité d'entrée dans le système est différente entre la première occasion puis constante au cours du temps

Le modèle n'est pas choisi en fonction du meilleur QAIC. Cependant, il est nécessaire de vérifier que les estimations du modèle ainsi construit soient cohérentes. En effet, certains paramètres peuvent être mal estimés (égaux à 0 ou 1, ou présentant des intervalles de confiance centrés sur 0 ou 1). Le modèle serait alors trop complexe pour le nombre de données disponibles.

VI.3.2.5. Estimation des paramètres du modèle et de la taille de la population

Les résultats des estimations du modèle de population sont regroupés dans le tableau 57 ci-après. La survie apparente journalière est estimée à 0,94 (IC 95% : 0,909 – 0,959). Par comparaison, la probabilité de survie journalière estimée par le modèle multi-événement précédent était de 0,994 (IC 95% : 0,98 - 0,99). La probabilité de capturer une anguille à l'aide des engins passifs est de 0,042 (IC 95% : 0,032 – 0,055). Cette probabilité est très faible et met en évidence que la capture-recapture seule n'est pas optimale dans ce protocole. En effet, précédemment, lorsque les données RFID étaient couplées aux données de capture, la probabilité de détecter les individus était au minimum de 0,23 (IC 95% = 0,22 – 0,25) pour les individus les moins facilement détectables et jusqu'à 0,70 (IC 95% = 0,68 – 0,72) pour les individus les plus facilement détectables. La probabilité pour une nouvelle anguille d'entrer sur le site d'étude par immigration est de 0,096 (IC95% : 0,032-0,254) entre l'évènement de marquage (du début des expérimentations au début de la campagne finale de 2017) et la première occasion. Ensuite, elle est constante et bien plus faible au cours du temps autour de 0,011 (IC 95% : 0,005-0,026).

L'abondance totale sur le site (secteurs A à E) est alors estimée à 390 anguilles (IC 95% : 358 – 447). Il est possible d'utiliser cette estimation d'abondance pour estimer la densité sur le site test. La densité est simplement définie comme $D = N / A$ avec N, l'abondance d'anguilles et A, l'aire de piégeage des anguilles. Dans notre étude, l'abondance est calculée comme le nombre d'anguilles présentes sur le site test. Le site représente 250 m de linéaire (secteurs A à E, délimité par les antennes A et F) pour 4,2 m de largeur moyenne, soit 1050 m². Ainsi, la densité estimée sur le site serait de : 37 ang / 100 m². Elle correspond à la gamme de densité la plus forte définie par Chancerel en 1994. Cette forte densité n'est néanmoins pas surprenante au regard de la position du site à l'aval du bassin versant de l'Oir, zone favorable à la sédentarisation des anguilles jaunes (Ibbotson *et al.* 2002).

Tableau 58 : Résultats des estimations du modèle de population POPAN lorsque que l'évènement de marquage est pris en compte

Paramètres	Estimation	Erreur standard	Intervalle de confiance à 95%
Survie entre chaque occasion	0,939	0,012	0,909 – 0,959
Probabilité de capture à chaque occasion	0,042	0,006	0,032 – 0,055
Probabilité d'entrée dans le système à l'évènement de marquage	0,096	0,052	0,032 – 0,254
Probabilité d'entrée dans le système à chaque occasion	0,011	0,005	0,005 – 0,026
Taille de la population	390	22,17	358 - 447

VI.3.2.6. Estimation des paramètres du modèle et de la taille de la population lorsque que l'évènement de marquage est ignoré

Dans un second temps, les anguilles marquées lors de l'évènement de marquage (du début des expérimentations au début de la campagne finale de 2017) ont été ignorées. Seule les anguilles vues pendant la campagne finale ont été prises en compte dans les données, leur première détection lors de cette campagne correspondant à leur « première capture ». Cela permet de simuler la réalisation du protocole dans des conditions simplifiées d'utilisation (sans évènement de marquage). Le jeu de données sans évènement de marquage a permis d'identifier 92 anguilles différentes capturées lors de 16 occasions de capture, dont 27 qui ont été recapturées au moins une fois.

Un nouveau modèle POPAN est construit à partir de ces données selon la même paramétrisation que celui du paragraphe précédent. Les résultats des estimations sont renseignés dans le tableau 58 ci-dessous :

Tableau 59 : Résultats des estimations du modèle de population POPAN lorsque que l'évènement de marquage est ignoré

Paramètres	Estimation	Erreur standard	Intervalle de confiance à 95%
Survie entre chaque occasion	0,996	0,010	0,55 – 0,99
Probabilité de capture à chaque occasion	0,092	0,012	0,071 – 0,119
Probabilité d'entrée dans le système à chaque occasion	0,013	0,008	0,004 – 0,041
Taille de la population	108	7,212	99 – 130

Avec ce second modèle, les estimations de la survie apparente et de la probabilité d'entrée dans le système sont équivalentes à celles faite avec le premier modèle prenant en compte toutes les données de capture disponible.

Cependant, la probabilité de capture est significativement meilleure avec ce second modèle. Elle est estimée à 0,092 (IC 95% 0,071-0,119) alors qu'elle n'était que de 0,042 (IC 95% : 0,032 – 0,055) précédemment.

Ainsi, l'estimation de la taille de la population est largement sous-estimée avec seulement 108 anguilles (IC 95% : 99-130) estimées présentes sur le site d'étude lors de cette campagne. En effet, la probabilité de survie est comparable alors que la probabilité de détection plus grande et que le nombre d'individus marqués est plus faible.

Cette sous-estimation est principalement due à une probabilité de capture trop faible et donc un nombre d'individus marqué trop faible pendant les 4 semaines de protocoles. Les engins passifs, même optimisés pour la capture des anguilles jaunes, ici les bourgues avec bec PVC, ont des faibles efficacités de capture avec en moyenne 0,23 anguilles capturées pour la première fois par engin et par semaine. Ainsi, seulement 92 individus ont été identifiés sur le site durant la campagne soit 25% des anguilles identifiées lorsque l'évènement de marquage est considéré (368 individus).

VI.3.3. La pêche électrique : point de repère pour l'estimation de la densité

L'automne 2016 a été marqué par des niveaux d'eau exceptionnellement bas sur l'Oir. Le site de test normalement considéré comme profond était alors échantillonnable par pêche électrique. Ce protocole réalisé en 2016 puis renouvelé en 2017 a permis plusieurs apports. D'une part, la pêche de 2016, à la fin de la deuxième année d'expérimentation, a permis d'augmenter considérablement l'effort de marquage des anguilles, et donc le nombre d'anguilles marquées sur le site d'étude. D'autre part, l'abondance des anguilles sur le secteur a pu être estimée par la méthode de Carle et Strub (1978).

La pêche d'octobre 2016 s'est déroulée dans de bonnes conditions car le débit de l'Oir était faible. Une prospection complète par pêche électrique est réalisée en continu sur l'ensemble du site de test, depuis le secteur aval jusqu'au secteur amont. Trois passages successifs ont été menés sur le secteur C, propice à la pêche électrique par épuisement, dans le but de mesurer le taux d'efficacité de la pêche. Ensuite, à la fin de l'opération de pêche électrique, on prospecte une seconde fois tout le tronçon avec le matériel de PIT-tracking. A chaque PIT-tag détecté, l'anode de pêche électrique est mise à l'eau pour tenter de capturer l'individu détecté. Tous les individus capturés et marqués lors de ces deux opérations sont identifiés et font l'objet du protocole de biométrie complet (voir § 4.1.2). Les anguilles non marquées sont anesthésiées, font l'objet du protocole de biométrie et sont marquées par PIT-tags. Tous les individus capturés sont relâchés à la fin de l'expérimentation au centre de leurs secteurs respectifs. Cette pêche a permis de capturer 308 anguilles de plus de 20 cm sur l'ensemble du site test, dont 108 déjà marquées (Tableau 59). Le taux de recapture est donc de 35%. Sur le secteur C, la probabilité de capture est estimée à 0,52 (IC 95% : 0,38-0,68) et une abondance de 81 anguilles. Par extrapolation, l'abondance totale sur les 5 secteurs de piégeage à cette date est estimée à 360 individus (IC 95% : 281 – 506).

En septembre 2017, une deuxième et dernière pêche électrique devait permettre de réaliser un état des lieux final sur le site de test, clôturant l'ensemble des expérimentations. Cependant, le niveau de l'eau lors de la pêche était haut, dépassant largement 70 cm de profondeur par endroits. Le milieu non adapté a rendu l'échantillonnage difficile, certains endroits profonds n'ont pas pu être prospectés correctement. Seulement 118 anguilles ont été capturées, soit 38% de l'effectif capturé en 2016 (Tableau 59). Dans ces conditions normales de hauteur d'eau, l'abondance est estimée à 95 individus (IC 95% : 73-130]. Par expérience, cette estimation, bien inférieure à celle de l'année précédente, ne semble pas provenir d'un échappement massif des anguilles mais plutôt du fait de la prospection incomplète du site test. Cette pêche électrique en milieu profond ne remplit pas les conditions nécessaires à une prospection complète du site pour une estimation correcte de l'abondance.

Tableau 60 : Résultats des opérations de pêche électrique en 2016 et 2017

Dates	Oct. 2016	Sep. 2017
Limnimètre	20 cm	34 cm
anguilles > 20 cm non marquées	7	14
Anguilles marquées (PO)	108	0 (car pêche finale)
Anguilles recapturées (LU)	80	56
Total PIT-tags posés et lus	188	56
Total anguilles pêchées	195	70
Probabilité de capture* (\pm SE) * calculée sur le secteur C	0,52 \pm 0,078	0,78 \pm 0,11
Abondance (IC 95%)	360 [280-506]	95 [73-130]

La pêche électrique s'étant déroulée en octobre 2016, il se peut que l'estimation ne reflète pas la taille de la population en juin 2017. Lors de cette pêche, 13 anguilles ont présenté des signes d'argenture et ont pu dévaler au cours de l'hivers suivant. Au contraire, de nouvelles anguilles ont pu entrer dans le système. A défaut d'une meilleure estimation lors de la pêche électrique de septembre 2017, on supposera que cette estimation est la plus réaliste.

VI.3.4. Discussion

Le choix de l'utilisation d'un modèle de type POPAN repose sur plusieurs hypothèses, dont certaines ont pu être vérifiées par le modèle multi-événement construit précédemment. C'est le cas notamment de la survie et des déplacements entre les secteurs qui amènent à considérer la population ouverte. Or, ce système ouvert admet également des émigrations temporaires des anguilles hors du secteur. Cependant, le modèle ne distingue pas ces individus de ceux qui sont présents sur le site d'étude tout le temps. Ainsi, l'estimation de la taille de la population présente sur le site durant la période d'étude est probablement biaisée. Ce biais est néanmoins limité par le fait de considéré le site d'étude comme les 5 secteurs de capture, limitant les émigrations temporaires aux sorties en aval et en amont des 250m de linéaire.

Les résultats précédents présentent quatre estimations de l'abondance des anguilles sur un même secteur. Deux de ces estimations ont été obtenues à l'aide d'un modèle de type POPAN qui utilise les histoires de capture des individus. Enfin, les deux autres estimations ont été produites par pêche électrique, l'une réalisée dans les conditions optimales d'une pêche complète et l'autre s'est déroulée avec une hauteur d'eau bien supérieure à 70cm, correspondant à un milieu profond.

Pour ce même secteur, la pêche électrique réalisée en milieu peu profond ainsi que le modèle qui utilise toutes les données de capture depuis le début de l'expérimentation donnent des estimations de l'abondance d'anguilles significativement plus élevées que les deux autres méthodes. Malgré un possible échappement des anguilles sur le secteur entre juin 2017 et septembre 2017, la prospection incomplète du site d'étude en milieux profond témoigne que la quantification des individus par pêche électrique dans ces conditions est inenvisageable. De même, le fait d'ignorer les données de capture avant le protocole final de 4 semaines en juin 2017 démontre d'une probabilité de capture trop faible pour un tel protocole et qu'il est nécessaire de marquer beaucoup plus d'individus.

Il semblerait donc que les estimations les plus probables soient celles obtenues grâce aux deux premières méthodes (pêche électrique en milieu plu profond, et modèle POPAN avec toutes les données de capture) et que la taille de la population soit plutôt autour de 350 individus sur les 250m de linéaire.

Le protocole de capture ainsi construit ne permet pas de marquer suffisamment d'individus pour obtenir une estimation de la taille de la population correcte, ni d'une densité.

C'est pour cela qu'il avait été pensé d'utiliser des données de détection via la RFID pour ajouter de l'information sur les individus marqués. En effet, d'un point de vue statistique, il est intéressant de construire des estimateurs optimaux qui utilisent, au mieux, toute l'information disponible. L'utilisation de ces données auxiliaires permettrait d'améliorer les inférences à partir de l'estimation de la taille de la population. Certaines techniques récentes utilisent approches Bayésiennes de CMR qui possèdent de nombreux avantages (Ivan *et al.* 2013, Bird *et al.* 2014). Par contre, la programmation par l'approche Bayésienne est plus longue et fastidieuse et l'analyse des sorties du modèle est moins intuitive. Cela semblerait néanmoins être la solution pour intégrer des données de télémétrie RFID pour une estimation non biaisée de la densité d'anguilles sur notre secteur d'étude.

Encadré 4 : Analyse des données par modélisation CMR avec intégration des données de capture et RFID

Le couplage de la capture et de la RFID permet de marquer individuellement un grand nombre d'individus et de multiplier les moyens de les suivre au cours du temps. Des modèles CMR peuvent alors estimer certains paramètres démographiques en tenant compte de la probabilité de détection des individus.

Un premier type de modèle, multi-état multi-événement, a été développé sous E-SURGE afin de mieux connaître le comportement des anguilles dans le système. On observe ainsi qu'à court terme, les anguilles ont peu de chance de quitter le système, par mort ou émigration définitive. Par contre, elles ont une forte probabilité de se déplacer hors d'un secteur de 50m. L'hypothèse d'une population ouverte est ainsi préférée. Il est supposé, qu'entre chaque occasion, le recrutement et la mortalité des anguilles soient négligeables mais que des phénomènes de migrations dans et hors du système soient possibles, principalement due à une prospection alimentaire autour de leur habitat refuge. D'autre part, un test d'ajustement sous U-CARE a mis en évidence une hétérogénéité individuelle dans le comportement des anguilles face aux méthodes de détection, confirmée par des estimations différentes de la probabilité de détection avec le modèle multi-événement. Ce comportement peut entraîner des biais dans les estimations des paramètres démographiques mais cet impact peut toutefois être modéré par l'élaboration de modèles appropriés.

A cause des hypothèses nécessaires à la construction des modèles de population, il ne semblerait pas exister, à notre connaissance, de modèle préétabli qui conviendrait pour l'exploitation de nos données. Une première étape a alors été de tester un modèle simpliste, utilisant seulement les données de capture et de comparer l'estimation de densité obtenue aux estimations faites lors de deux opérations de pêche électrique effectuées sur le même secteur. Le modèle POPAN retenu permet de paramétrer le modèle d'estimation de la taille de population Jolly-Seber en population ouverte à l'aide du logiciel MARK. L'abondance sur le site test est estimée à 390 anguilles. Dans un second temps, les données utilisées dans le modèle de population ont été dégradées afin de simuler la réalisation du protocole dans des conditions simplifiées d'utilisation (quatre semaines de piégeage, sans événement de marquage au préalable). L'estimation de la taille de la population est cette fois largement sous-estimée avec seulement 108 anguilles. Cette sous-estimation est principalement due à une probabilité de capture trop faible et donc un nombre d'individus marqués trop faible pendant les 4 semaines de protocoles.

En comparaison à cette méthode d'estimation, deux sessions de pêche électrique ont été réalisées sur le même secteur, l'une réalisée dans les conditions optimales d'une pêche complète et l'autre s'est déroulée avec une hauteur d'eau bien supérieure à 70cm, correspondant à un milieu profond. Pour ce même secteur, la pêche électrique réalisée en milieu profond donne une estimation de l'abondance d'anguilles significativement plus faible, et semble moins réaliste comparée aux estimations du modèle de population, témoignant que la quantification des individus par pêche électrique dans ces conditions est inenvisageable.

Le modèle simple permet, dans une certaine mesure, d'obtenir les estimations souhaitées. Toutefois, l'effort de marquage du protocole tel qu'il est actuellement n'est pas assez efficace par rapport à la taille de la population. Dans les milieux étudiés, les bourgnes, même optimisées pour la capture d'anguilles jaunes, ont des efficacités limitées. Il en résulte une mauvaise estimation de la taille de la population par les modèles CMR, dépendants du nombre d'individus initialement marqués.

Les techniques récentes utilisant les approches Bayésiennes de CMR, plus fastidieuses et moins intuitives, sembleraient être une solution pour intégrer des données de télémétrie RFID pour une estimation non biaisée de la densité d'anguilles sur notre secteur d'étude.

VII. Protocole de quantification en milieu profond de grande étendue

VII.1. Objectifs de l'expérimentation

L'objectif de cette dernière expérimentation en milieu naturel est de tester le protocole développé par Ubl & Dorow (2015). Cette technique, adaptée pour les eaux côtières, semble également appropriée pour évaluer la densité d'anguilles dans les eaux profondes de nos rivières de grande étendue. Le système de capture associe deux éléments principaux : un filet extérieur créant un enclos et des rangées de verveux en son centre. La méthode de capture-marquage-recapture doit permettre d'estimer le nombre d'anguilles présentes dans l'enclos. Ainsi, connaissant les captures de chaque engin de pêche et la surface de l'enclos, on peut obtenir la densité recherchée.

VII.2. Description du dispositif

VII.2.1. Méthode développée par Ubl et Dorow

Cette méthode est une nouvelle technique d'échantillonnage de l'anguille développée par Ubl & Dorow en 2015 (Figure 67). Elle associe 6 chaînes de 5 verveux barrières à deux poches, ancrées au sein d'un enclos de 100 m par 100 m. Cet enclos est délimité par des filets associés à chaque coin par un verveux. En se basant sur la connaissance de la taille de l'enclos, la capture peut être exprimée en nombre d'anguilles jaunes/ha.

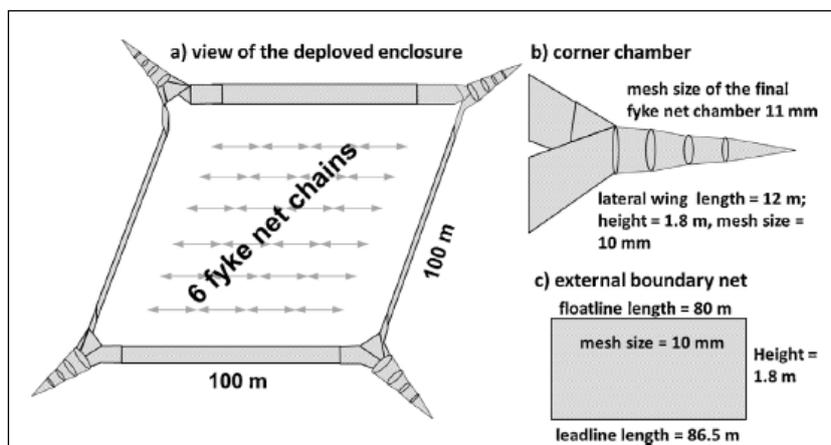


Figure 67. Système d'enclos délimité par un filet et quatre chambres en coin dans lequel sont installées six chaînes de 5 double verveux (Ubl & Dorow 2015).

VII.2.2. Adaptation du dispositif

Le dispositif expérimental a été adapté à notre expérimentation, selon le modèle suivant (Figure 68) : l'enclos est créé à partir d'un filet droit de 200 m de long pour une hauteur de 10 m (7 m efficace), représentant une surface de 2500m². Il est fabriqué avec un fil de 0,20mm, pour une maille de côté de 10mm. Sur le haut du filet, une tresse flottante de 11mm équipée de flotteurs tous les 5 m permet de délimiter l'enclos et sur le fond, une tresse plombée de 200 gr/m le maintien au sol. Ce système permet de fermer totalement la colonne d'eau afin d'empêcher les mouvements des anguilles dans et hors du système. L'enclos mesure ainsi 50 m par 50 m et ne dispose pas de verveux dans les angles. Cet agencement a été choisi afin de limiter les coûts liés à la fabrication du filet sur-mesure. A l'intérieur de l'enclos, sont installées plusieurs lignes de double-verveux standards (maillage dégressif de 18 mm dans la paradière à 12 mm dans dernière poche). Différentes densités de verveux ont été testées (de 0,36 à 0,64 verveux/100m²), en fonction également de la disponibilité en verveux.

Enfin, pour tester la reproductibilité de l'expérimentation, lors de la seconde campagne, deux enclos ont été posés à quelques mètres d'écart afin de créer un duplicat.

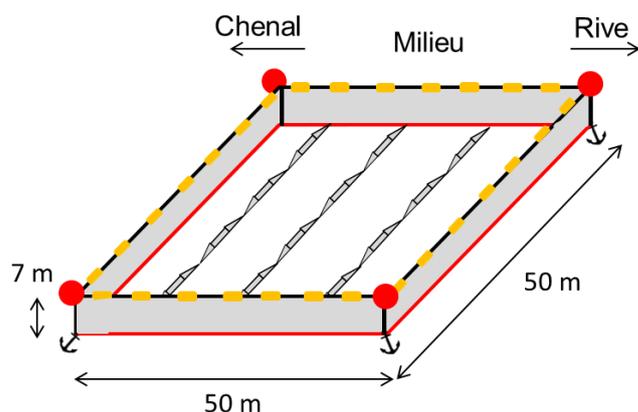


Figure 68 : Schéma du dispositif expérimental avec 12 verveux-double, testé lors de la première session d'étude sur la Vilaine, en juin 2016

VII.3. Mise en œuvre du dispositif expérimental

VII.3.1. Protocole expérimental

En début de session, l'enclos est positionné dans le cours d'eau et les verveux sont posés à l'intérieur. Les engins de pêche sont relevés quotidiennement jusqu'à la fin de la session, où le dispositif entier est retiré de l'eau. A chaque relève, le nombre d'anguilles est noté, et chaque individu capturé est identifié (marquage PIT-tag ou VIE), mesuré et les pathologies sont observées. Les anguilles non marquées sont marquées et les anguilles déjà marquées sont notées et toutes sont relâchées dans l'enclos.

Chaque opération nécessite l'utilisation d'un bateau afin d'accéder au site et procéder à la pose ou la relève des engins, ainsi que la présence de minimum 4 opérateurs, pour manipuler les engins et réaliser les mesures de biométrie des anguilles capturées (Figure 60).



Figure 69 : A gauche : bateau utilisé pour déployer le filet servant d'enclos et pour la pose et la relève des verveux. A droite, en haut : mise à l'eau du filet enclos par le côté du bateau. Le filet doit être tendu, bien posé au sol et l'enclos doit former un carré de 50m de côté. A droite, en bas : pose des verveux dans l'enclos. Les verveux sont accrochés entre eux permettant une relève dans la continuation.

VII.3.2. Première campagne d'expérimentation en 2016

En juin 2016, le débit et le courant de la Vilaine ne sont pas trop fort et les concentrations en oxygène sont correctes, permettant la bonne mise en œuvre de l'expérimentation. Le site n°1 (§III.3.) est choisi pour son accessibilité et ses habitats favorables aux anguilles.

Le dispositif expérimental de pêche est d'abord mis en place pendant une semaine, soit quatre nuits de pêche effective, selon le protocole suivant (Tableau 60):

Tableau 61 : Organisation de la semaine d'expérimentation pour les deux sessions de juin 2016

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi
Pose de l'enclos	X				
Pose des verveux	X	X	X	X	
Relève des verveux		X	X	X	X
Biométrie / marquage		X	X	X	X
Relève de l'enclos					X

Une deuxième session d'échantillonnage s'est déroulée fin juin 2016 dans les mêmes conditions. Cependant, pour des raisons de sécurité, l'enclos a été posé sur le site n°2, protégé par les équipements de l'usine d'eau.

VII.3.3. Deuxième campagne d'expérimentation en 2017

Il a été choisi de renouveler l'expérimentation en 2017 avec l'achat d'un second filet dans le but de dupliquer l'expérience. Plusieurs modifications ont également été apportées à ce nouveau filet, dans le but d'adapter le dispositif à notre étude.

Afin de prévoir un peu de marge sur la longueur du filet lorsque l'enclos est refermé en ramandant les deux côtés ensemble, le nouveau filet commandé mesure 210 m de long. De plus, ce nouveau modèle est équipé de petits flotteurs tous les 2 mètres et des bouées de plus grande taille disposées tous les 50 mètres. L'ajout de flotteurs et de bouées permet de maintenir le filet en surface mais également de rendre le dispositif plus visible et donc plus sécurisé.

Concernant la réalisation du protocole, le temps de pêche d'une semaine n'apparaissait pas suffisant pour obtenir des résultats exploitables de capture-recapture. Un temps d'acclimatation des anguilles est envisagé entre la pose de l'enclos et le début du piégeage. Il est également envisagé de doubler le nombre de jours de piégeage, pour arriver à la diminution du nombre de nouvelles anguilles capturées, attendue pour cette étude.

Ainsi, en mai 2017, le dispositif expérimental de pêche est mis en place sur le site n°2 pendant 10 jours, soit 8 nuits de pêche effectives, selon le protocole suivant (Tableau 61):

Tableau 62 : Organisation de la semaine d'expérimentation

	Vendredi 12	Dimanche 14	Lundi 15	Mardi 16	Jeudi 18	Vendredi 19	Lundi 22	Mardi 23
Pose des enclos	X							
Pose des verveux		X	X	X	X	X		
Relève des verveux			X	X	X	X	X	
Biométrie / marquage			X	X	X	X	X	
Relève des enclos								X

VII.4. Résultats

VII.4.1. Résultats de la campagne de 2016

Deux sessions d'échantillonnage ont été organisées au mois de juin 2016. La première s'est déroulée du 07 au 10 juin, durant laquelle 12 verveux ont été posés par jour. Les captures ont été croissantes sur la semaine, pour un total de 30 anguilles capturées, soit 1,2 anguilles / 100m². Seulement une anguille a été recapturée lors de la dernière relève (Tableau 62, Figure 70).

La seconde session s'est déroulée du 28 juin au 01 juillet, pour laquelle l'effort d'échantillonnage a été augmenté à 16 verveux. Néanmoins, sur ce site, les captures ont été plus faibles, avec seulement 19 anguilles capturées pendant la semaine, soit une densité de 0,76 anguilles / 100m². Aucune anguille marquée n'a été recapturée (Tableau 62).

Tableau 63: Résultats des captures lors des deux sessions d'échantillonnage

Numéro de session	1				2			
	N°1				N°2			
Date	07/06	08/06	09/06	10/06	28/06	29/06	30/06	01/07
Numéro de relève	1	2	3	4	1	2	3	4
Nombre d'engins posés	12	12	12	12	16	16	16	16
Nombre d'anguilles capturées	3	7	9	11	2	4	6	7
CPUE	0,25	0,58	0,75	0,92	0,13	0,25	0,38	0,44
Nombre d'anguilles recapturées	0	0	0	1	0	0	0	0

Les données de capture sont rapportées à des CPUE (Capture par unité d'effort), soit le nombre d'anguilles capturées par engin par 24h de pêche (Figure 70). On observe une évolution croissante des captures d'anguilles au cours de chaque session, contrairement aux résultats de déplétion attendus lors d'une expérience de capture-marquage-recapture.

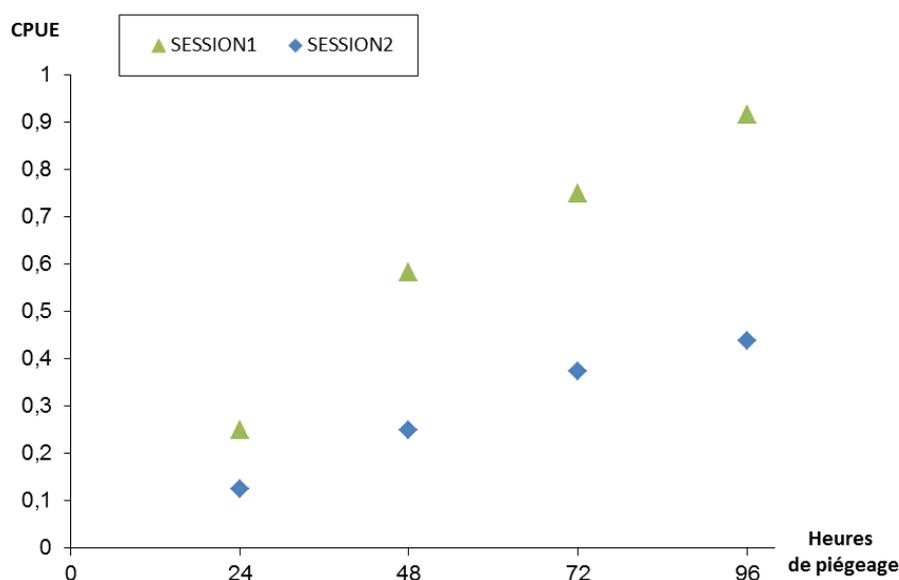


Figure 70 : Graphique des CPUE (nombre d'anguille/verveux/24h de pêche) des verveux dans l'enclos

Il est également possible de comparer les captures selon l'emplacement des engins dans l'enclos (chenal, milieu ou rive) (Figure 71). Lors de la première session, la CPUE moyenne augmente lorsqu'on se rapproche de la rive (rive droite), alors que pour la seconde session, la CPUE augmente en s'éloignant de la rive (rive gauche).

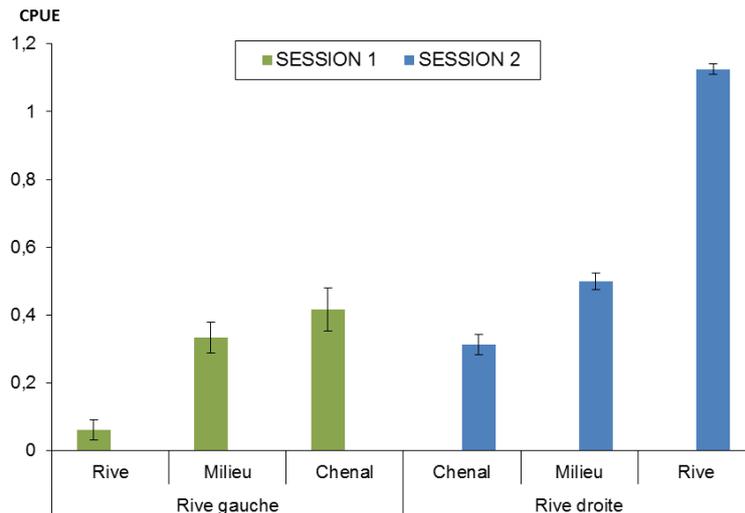


Figure 71 : CPUE des verveux en fonction de leur position dans l'enclos pour les deux sessions d'échantillonnage

Les données de biométrie ont été mesurées sur toutes les anguilles capturées par les verveux de taille standards. Lors des deux sessions d'échantillonnage en 2016, les anguilles mesurent entre 273 et 743 mm (Figure 72). La classe de taille majoritaire se situe entre 400 et 450 mm (10 individus).

Sur les 49 anguilles capturées, il y avait 29 anguilles jaunes, 3 anguilles argentées et 17 individus dont le stade n'a pas été déterminé.

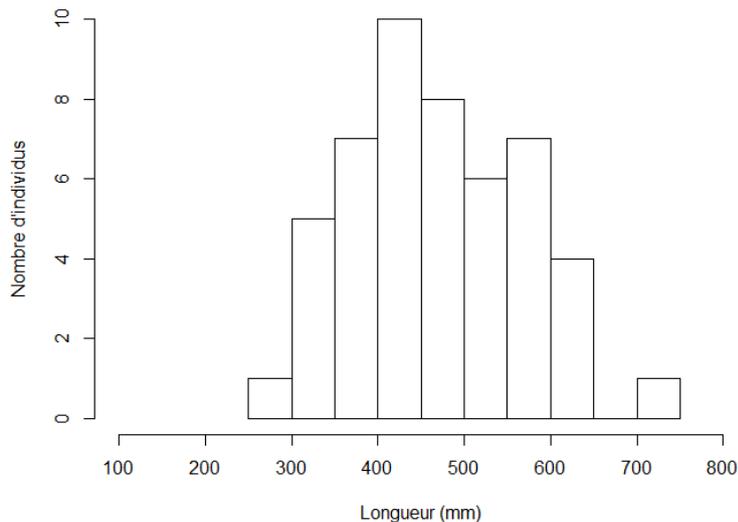


Figure 72 : Histogramme des tailles des anguilles capturées dans les deux sessions de l'expérimentation sur la Vilaine en 2016

VII.4.2. Résultats de la campagne de 2017

Lors de cette seconde campagne, 9 verveux-doubles ont été posés par jour dans chaque enclos sur le site d'étude n°2. Dans l'enclos aval, 9 anguilles ont été capturées au total, soit une densité de 0,36 anguilles / 100m². Aucune anguille n'a été recapturée. Dans l'enclos amont, aucune anguille n'a été capturée lors des 4 premières relèves (Tableau 63). Nous avons constaté le passage d'un bateau dans le filet en amont dans la nuit du dimanche 21 mai, qui a sérieusement endommagé le filet et compromis son étanchéité. Le lendemain, à la 5^{ème} relève, 6 anguilles ont été capturées dans cet enclos (Tableau 63).

Tableau 64 : Résultats des captures dans les deux enclos sur le site n°2

Date	15-mai		16-mai		17-mai		18-mai		19-mai		20-mai		21-mai		22-mai	
Numéro de relève	1		2				3		4						5	
Enclos	aval	amont														
Nombre d'anguilles capturées	1	0	0	0			5	0	0	0					3	6

Les données de biométrie ont été mesurées sur toutes les anguilles capturées. Lors de cette campagne de pêche, les anguilles capturées mesurent entre 321 et 690 mm (Figure 73), avec plus de grand individus capturés par rapport aux sessions de 2016.

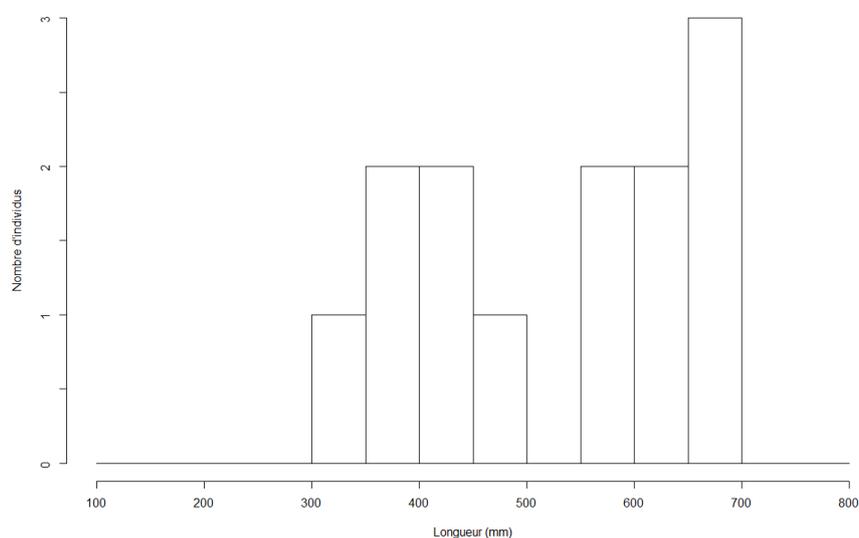


Figure 73 : Histogramme des tailles des anguilles capturées lors de la campagne sur la Vilaine en mai 2017

VII.5. Discussion

Le protocole développé par Ubl et Dorow (2015) a déjà été appliqué sur les zones côtières ou en lac (Tréguier et al, 2016 : Annexe 1). Néanmoins, dans ces zones de plusieurs mètres de profondeurs, la question de la perméabilité de l'enclos, formé à partir d'un filet 1,8 mètre de profondeur, peut à juste titre se poser. En cela, des modifications ont été apportées au système, permettant au filet enclos de se déployer sur toute la colonne d'eau. Malgré cela, il n'est pas certain qu'il n'y ait pas d'entrée ou de sortie d'anguilles. Aucun moyen de surveillance n'a été mis en place pour confirmer que le filet était bien posé au sol, ou qu'il n'y avait pas de trous dans l'enclos qui permettraient aux anguilles d'aller et venir. D'une part, la maille de 10 mm choisie comme compromis entre les dimensions du filet et l'échappement des petites anguilles (<30cm) a entraîné un colmatage important du filet par les poissons maillés et les débris végétaux. Celui-ci a alors rapidement coulé sous le poids des débris, permettant des ouvertures potentielles. D'autre part, lors de la première campagne, plusieurs déchirures ont été observées dans le filet enclos lors de sa relève. Il est difficile de savoir si ces déchirures proviennent de la force exercée sur le filet pour le tendre lors de la pose, ou si la présence de rochers et d'embâcles ont pu l'abîmer à sa relève. Le nombre de nouvelles anguilles capturées croissant lors des deux sessions pourrait provenir de la perméabilité manifeste de l'enclos. Lors de la seconde

campagne, en 2017, un premier passage avec un échosondeur a permis de repérer une large zone sans obstacles pouvant endommager les enclos. La pose des filets a été réalisée avec une certaine précaution pour garantir leur fonctionnalité. Durant les 7 premiers jours de capture, moins d'anguilles ont été capturées dans l'enclos aval qu'en 2016, et aucune dans l'enclos amont. Toutefois, aucune anguille marquée n'a été recapturée. La 8^{ième} nuit, un bateau de plaisance est passé sur le site en accrochant le filet extérieur de l'enclos amont. Le lendemain 6 individus ont été capturés dans les verveux. La déchirure engendrée sur plusieurs mètres de filet a certainement permis l'entrée de nouvelles anguilles.

Enfin, le choix des sites d'expérimentation juste en amont du barrage d'Arzal a permis de faciliter l'accès des opérateurs. Cette proximité s'est cependant révélé défavorable par rapport à la circulation des bateaux de plaisance à proximité des sites. Malgré un balisage conséquent du site, plusieurs bateaux sont entrés dans la zone, dégradant le matériel et remettant en cause l'expérimentation.

Par la suite, il est envisagé de reconduire le protocole en mettant en place plusieurs expérimentations afin de tester l'efficacité d'un filet-enclos. Une première expérimentation impliquant un grand enclos encerclant un autre dans lequel des anguilles sont marquées et un protocole de recapture à l'extérieur de ce dernier, pourrait permettre de connaître sa perméabilité. D'autre part, un marquage acoustique des anguilles pourrait également permettre d'obtenir des informations sur le comportement des anguilles face au filet.

VIII. Conclusion

Cette étude conduite sur trois années avait pour objectif de mieux connaître les anguilles des milieux profonds et de mettre au point un protocole de quantification des populations d'anguilles adapté à ces milieux. Démarrée en 2015, cette action a permis la mise en œuvre d'expérimentations en milieux naturels et en milieux contrôlés qui ont permis de se rapprocher de plusieurs méthodes de quantification des anguilles pour certains milieux profonds.

Le premier protocole développé est basé sur la méthode de capture – marquage – recapture (CMR) sur une rivière courante d'environ un mètre de profondeur, située en Basse Normandie. Il nécessite l'utilisation d'engins passifs de capture optimisés spécialement pour l'anguille jaune ainsi que l'utilisation d'antennes RFID, apportant des informations complémentaires sur les individus marqués.

L'ensemble des engins passifs de capture pouvant être utilisés en milieux profonds a été passé en revue. La bourgne modifiée, dite « PVC bec de canard » est l'engin passif de capture retenu. L'efficacité de capture de cette bourgne modifiée est supérieure à la bourgne standard, grâce à une capacité de rétention des anguilles supérieure. L'utilisation de la bourgne est beaucoup plus aisée que les verveux et les grandes nasses. Son efficacité de capture est correcte, certes plus faible que le verveux mais moins variable entre les différents secteurs étudiés. De plus, le coût réduit de cette bourgne, sa compacité et sa reproductibilité aisée en font un engin facile d'utilisation, qui peut compenser sa plus faible efficacité de capture par un nombre plus important déployable sur les sites d'étude et répondant ainsi à nos besoins.

Les anguilles capturées par engins passifs ont été marquées à l'aide de tag RFID et l'installation d'antennes a permis le suivi individuel des anguilles tout au long de l'étude. L'anesthésie et le marquage des animaux sont donc des phases indispensables du suivi télémétrique. Cette étape permet également de récolter des données biométriques afin d'améliorer la connaissance de la population et de faciliter les suivis individuels. Afin de suivre la population d'anguille, un réseau d'antennes de détection fixes déployé le long de la rivière Oir comprend 9 unités. Le protocole de montage et d'installation est décrit, et comprend l'installation d'un Tag-tracker sur chaque antenne pour le contrôle du fonctionnement en continu. Afin de compléter ce réseau, une antenne de détection mobile a permis de parcourir périodiquement l'ensemble des sites et de détecter les individus peu mobiles. L'efficacité de détection de cette antenne mobile est également connue à l'aide de PIT balises déposés à intervalles réguliers au fond de la rivière.

Le couplage de la capture et de la RFID permet de marquer individuellement un grand nombre d'individus et de multiplier les moyens de les suivre au cours du temps. Ces données permettent également de mettre au point des modèles CMR pour quantifier l'utilisation de l'espace par les anguilles et estimer la taille de la population qui occupe le site. Un premier type de modèle multi-événements a été développé afin de mieux connaître le comportement des anguilles dans le système. On observe ainsi qu'à court terme, les anguilles ont peu de chance de quitter le système, par mort ou émigration définitive. Par contre, elles ont une forte probabilité de se déplacer hors d'un secteur de 50m. L'hypothèse d'une population ouverte est ainsi préférée. Entre chaque occasion, le recrutement et la mortalité des anguilles sont négligeables mais des phénomènes de migrations dans et hors du système sont possibles, principalement due à une prospection alimentaire autour de leur habitat refuge. D'autre part, un test d'ajustement a mis en évidence une hétérogénéité individuelle dans le comportement des anguilles face aux méthodes de détection, confirmée par des estimations différentes de la probabilité de détection avec le modèle multi-événement. Ce comportement peut entraîner des biais dans les estimations des paramètres démographiques mais cet impact peut toutefois être modéré par l'élaboration de modèles appropriés. A cause des hypothèses nécessaires à la construction des modèles de population, il ne semblerait pas exister, à notre connaissance, de modèle préétabli qui conviendrait pour l'exploitation de nos données. Une première étape a alors été de tester un

modèle simpliste, utilisant seulement les données de capture et de comparer l'estimation de densité obtenue aux estimations faites lors de deux opérations de pêche électrique effectuées sur le même secteur. Le modèle POPAN retenu permet de paramétrer le modèle d'estimation de la taille de population Jolly-Seber en population ouverte. Dans un second temps, les données utilisées dans le modèle de population ont été dégradées afin de simuler la réalisation du protocole dans des conditions simplifiées d'utilisation. L'estimation de la taille de la population est cette fois largement sous-estimée, principalement due à une probabilité de capture trop faible et donc un nombre d'individus marqué trop faible pendant les 4 semaines de protocoles. En comparaison à cette méthode d'estimation, deux sessions de pêche électrique ont été réalisées sur le même secteur, l'une réalisée dans les conditions optimales d'une pêche complète et l'autre s'est déroulée avec une hauteur d'eau bien supérieure à 70cm, correspondant à un milieu profond. Pour ce même secteur, la pêche électrique réalisée en milieu profond donne une estimation de l'abondance d'anguille significativement plus faible, et semble moins réaliste comparée aux estimations du modèle de population, témoignant que la quantification des individus par pêche électrique dans ces conditions est inenvisageable. Le modèle simple permet, dans une certaine mesure, d'obtenir les estimations souhaitées. Toutefois, l'effort de marquage du protocole tel qu'il est actuellement n'est pas assez efficace par rapport à la taille de la population. Dans les milieux étudiés, les bourgues, même optimisées pour la capture d'anguilles jaunes, ont des efficacités limitées (environ 2%). Il en résulte une mauvaise estimation de la taille de la population par les modèles CMR, dépendants du nombre d'individus initialement marqués. Il pourrait s'avérer intéressant de continuer à rechercher des moyens de capture adaptés à l'anguille et sa faible détectabilité pour améliorer cette base de protocole. De plus, les techniques récentes utilisant les approches Bayésiennes de CMR, plus fastidieuses et moins intuitives, sembleraient être une solution pour intégrer des données de télémétrie RFID pour une estimation non biaisée de la densité d'anguilles sur notre secteur d'étude.

Par ailleurs, un partenariat avec l'EPTB de la Vilaine et un pêcheur professionnel a permis de tester un protocole de quantification à l'aide d'un enclos sur la Vilaine. Ce protocole adapté aux milieux profonds de grandes étendues a déjà été appliqué sur les zones côtières ou en lac, mais son application en rivière est plus complexe. Des difficultés liées aux débits et au vent se sont rapidement relevés limitant pour le bon déroulement du protocole. La taille du dispositif expérimental et la maille fine du filet choisie pour limiter les échappements d'anguilles rend sa mise en place très complexe. La pose et la relève de l'enclos sont des opérations très délicates, susceptibles de déchirer le filet. De même, le colmatage par des poissons maillés et les débris végétaux est important et un nombre suffisant de flotteurs est nécessaire pour empêcher le filet de couler. Cela permet également de rendre le dispositif plus visible et donc plus sécurisé, d'autant plus que le site d'étude est exposé à la circulation importante des bateaux de plaisance. Cette technique, adaptée pour les eaux côtières et aux lacs, pourrait être appropriée pour évaluer la densité d'anguilles dans les eaux profondes de nos rivières de grande étendue. Cependant, sa mise en œuvre est très complexe et coûteuse et nécessiterait notamment une phase d'expérimentation plus poussée pour valider l'imperméabilité de l'enclos aux anguilles.

Ce projet présente une nouvelle approche de la recherche de connaissance sur les anguilles dans les eaux continentales par le suivi intensif de plus de 550 anguilles marquées PIT-tag sur 3 années. Malgré le travail effectué pour explorer le potentiel des engins passifs comme méthode d'évaluation de l'abondance de l'anguille dans différents milieux profonds, cette fiche-action n'a pas mené à un protocole abouti. Néanmoins, des progrès ont été réalisés, des expérimentations complémentaires sont envisagées et une grande partie des données récoltées n'a pas ou peu été exploitée pour l'instant, laissant entrevoir de nombreuses pistes de recherche (croissance, comportement ...).

IX. Glossaire

Anadromes : espèces qui vivent en mer et remontent en eau douce pour se reproduire (type saumon) (<http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire>, consulté le 20/07/2018)

Catadromes : espèces qui vivent en eau douce et se reproduisent en mer (type anguille) (<http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire>, consulté le 20/07/2018)

Diadrome : Qualifie les espèces dont le cycle de vie se déroule en partie en eau douce et en partie en eau de mer (<http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire>, consulté le 20/07/2018)

Génésique : on définit une migration génésique comme étant une migration dont le but est de se rendre sur les lieux de reproduction (www.cnrtl.fr, consulté le 04/01/2016)

Hydroacoustique : technique utilisant les vibrations acoustiques en milieu liquide (www.cnrtl.fr, consulté le 04/01/2016).

Inductomètre : appareil permettant de mesurer une induction produite par la rotation d'une bobine excitée par un champ magnétique extérieur (*définition du Larousse*, consulté le 04/01/2016)

Leptocéphale : on donne le nom de leptocéphales aux larves de poissons de l'ordre des anguilliformes (Crivelli & Hermeloup, 2013)

Lucifuge : [En parlant d'un animal] Qui fuit, évite la lumière (www.cnrtl.fr, consulté le 04/01/2016).

Passe-piège : structure artificielle qui facilite le franchissement d'un obstacle à la migration vers l'amont. Elle permet de quantifier son utilisation par les organismes qui la franchissent (Crivelli & Hermeloup, 2013)

X. Bibliographie

- Acou, A. (2006)** Bases Biologiques D'un Modèle Pour Estimer La Biomasse Féconde de L'anguille Européenne En Fonction Des Recrues Fluviales et Du Contexte de Croissance : Approche Comparative À L'échelle de Petits Bassins Versants. Thèse de doctorat, Université de Rennes I, Rennes
- Acou, A., Poizat, G. & Crivelli, A.J. (2006)** Errors in ocular index measurements in European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Ecology of Freshwater Fish*, 15, 15, 578–582.
- Adam, G. (1997)** L'anguille Européenne (*Anguilla anguilla* L. 1758): Dynamique de La Sous-Population Du Lac de Grand-Lieu En Relation Avec Les Facteurs Environnementaux et Anthropiques. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Toulouse.
- Adam, G., Feunteun, E., Prouzet, P. & Rigaud, C. (2008)** L'anguille Européenne : Indicateurs D'abondance et de Colonisation, Savoir-faire. QUAE.
- Allou, S., Tréguier A., Houdouin N., Destouches J-P, Beaulaton L., Marchand F. & Azam D. (2016)** Mise au point d'une méthode de quantification des anguilles en milieu profond. Rapport intermédiaire n°2. Etat, fonctionnement et services des écosystèmes aquatiques – Action n°16. Pôle AFB-INRA Rennes, France.
- anonyme (2010)** Plan de Gestion Anguille de La France. Application Du Règlement R(CE) n°1100/2007 Du 18 Septembre 2007. Volet National. Ministère de l'écologie, du développement durable et de la mer; Onema; Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche.
- Aranda, A. (1991)** L'étang de Bages-Sigean. La Pêche et Les Activités Sur Le Plan D'eau. Ifremer.
- Baisez, A. (2001)** Optimisation Des Suivis D'abondances et Des Structures de Taille de L'anguille Européenne (*Anguilla anguilla*, L.) Dans Un Marais Endigué de La Côte Atlantique: Relation Espèce - Habitat. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse.
- Baldwin, L. & Aprahamian, M. (2012)** An evaluation of electric fishing for assessment of resident eel in rivers. *Fisheries Research*, 123-124, 4–8.
- Baltazar-Soares, M., Biastoch, A., Harrod, C., Hanel, R., Marohn, L., Prigge, E., Evans, D., Bodles, K., Behrens, E., Böning, C.W. & Eizaguirre, C. (2014)** Recruitment Collapse and Population Structure of the European Eel Shaped by Local Ocean Current Dynamics. *Current Biology*, 24, 104–108.
- Beaulaton, L. & Pénil, C. (2009)** Protocoles Spécifiques Anguille Pour l'Onema. Onema.
- Beaulaton, L. (2008)** Systèmes de Suivi Des Pêches Fluvio-Estuariennes Pour La Gestion Des Espèces : Construction de Indicateurs Halieutiques et Évaluation Des Impacts En Gironde. Toulouse.
- Beillard, A. (2016)** Etapes préliminaires d'un protocole de suivi de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) : expérimentations sur le dosage de benzocaïne et le type de marquage. Rapport de stage M1. INRA Rennes – Université de Rennes 1. Rennes, France.
- Belliard, J., Ditché, J.-M., Roset, N. & Dembski, S. (2012)** Guide pratique de mise en œuvre des opérations de pêche à l'électricité dans le cadre des réseaux de suivi des peuplements de poissons. Onema.
- Bevacqua, D., De Leo, G.A., Gatto, M. & Melià, P. (2009)** Size selectivity of fyke nets for European eel *Anguilla anguilla*. *Journal of Fish Biology*, 74, 2178–2186.
- Bird, T., Lyon, J., Nicol, S., McCarthy, M., & Barker, R. (2014)** Estimating population size in the presence of temporary migration using a joint analysis of telemetry and capture–recapture data. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(7), 615–625.
- Blackwell, B.G., Brown, M.L. & Willis, D. W. (2000)** Relative weight (W_r) status and current use in fisheries assessment and management. *Reviews in Fisheries Science* 8:1– 44.
- Brandt, A.V. (1971)** Eel fishing methods - an introduction. (ed C.J. McGrath), 15–25. FAO, Rome.
- Briand, C., Beaulaton, L., Chapon, P.-M., Drouineau, H. & Lambert, P. (2015)** Eel Density Analysis (EDA 2.2). Estimation de L'échappement En Anguilles Argentées (*Anguilla anguilla*) En France. Rapport 2015. IAV, Onema, Inra, Irstea.
- Burnham, K.P. & Anderson, D.R. (2004).** Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological methods & research*, 33(2), 261-304.
- Carle, F.L. & Strub, M.P. (1978)** A New Method for Estimating Population Size from Removal Data. *Biometrics* 34, 621-630
- Chancerel, F. (1994)** Note technique. La répartition de l'Anguille en France. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 335, 289-294

- Charrier, F., Mazel, V., Bonnaire, F., Knaebel, B. & Legault, A. (2014)** Suivi Des Migrations D'anguilles et Évaluation Des Stocks En Place Sur Le Frémur En 2013. Fish-Pass, Laille, France.
- Choquet, R., Rouan, L. & Pradel, R. (2009 a)** Program E-Surge : A Software Application for Fitting Multievent Models. Modeling Demographic Processes In Marked Populations. Environmental and Ecological Statistics. 845 – 865. New-York, Springer US.
- Choquet, R., Lebreton, J. D., Gimenez, O., Reboulet, A. M., & Pradel, R. (2009 b)** U-CARE: Utilities for performing goodness of fit tests and manipulating CAPture–REcapture data. *Ecography*, 32(6), 1071-1074.
- Conseil de l'Union Européenne (2007)** Règlement (CE) No 1100/2007 DU CONSEIL du 18 septembre 2007 instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes.
- Cooch, E. & White, G. (2001)** A gentle introduction Program MARK. Analysis of data from marked individuals. <http://www.phidot.org/software/mark/docs/book>.
- Cowx, I.G. & Lamarque, P. (1990)** Fishing with Electricity. Oxford.
- Crivelli, A.J. & Hermeloup, C. (2013)** L'anguille européenne, Sciences et gestion.
- Cubaynes, S., Pradel, R., Choquet, R., Duchamp, C., Gaillard, J.-M., Lebreton, J.-D., Marboutin, E., Miquel, C., Reboulet, A.-M. & Poillot, C. (2010)** Importance of Accounting for Detection Heterogeneity When Estimating Abundance: the Case of French Wolves. *Conservation Biology* 24, 621–626
- Daverat, F. (2005)** Tactiques D'utilisation Des Habitats et Dynamique de Population Des Anguilles de La Zone Aval Du Bassin Versant Gironde Garonne Dordogne. doctorat, University de Bordeaux 1.
- Dice, L.R. (1938)** Some census methods for mammals. *J. Wildfl. Mngmt.* 2: 119-130
- Efford, M. (2004)**. Density estimation in live-trapping studies. *Oikos*, 106(3), 598-610.
- Efford, M.G. (2011)** Estimation of population density by spatially explicit capture–recapture analysis of data from area searches. *Ecology*. 92:2202-2207.
- Efford, M. G. (2016)**. SECR: Spatially explicit capture-recapture models. R package version 2.10.3. <http://CRAN.R-project.org/package=secr>
- Feunteun, E., Acou, A., Laffaille, P., & Legault A. (2000)** European eel (*Anguilla anguilla*) : prediction of spawner escapment from continental population parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57, 1627 – 1635.
- Feunteun, E., Laffaille, P., Robinet, T., Briand, C., Baisez, A., Olivier, J.M. & Acou, A. (2003)** A review of upstream migration and movements in inland waters by anguillid eels. Towards a general theory. *Eel Biology* (eds K. Aida, K. Tsukamoto & K. Yamauchi), pp. 191–213. Springer-Verlag, Tokyo.
- Geoffroy, B. (2012)** Déterminisme Environnemental Du Sexe Chez L'anguille Européenne (*Anguilla anguilla* L.). Pau et des Pays de l'Adour.
- Germis, G. (2009)** Evaluation de L'état de La Population D'anguille En Bretagne Par La Méthode Des Indices D'abondance 'Anguille' de 2003 À 2008. Bretagne Grands Migrateurs.
- Gibbons, W.J. & Andrews, K.M. (2004)** PIT Tagging: Simple Technology at Its Best. *BioScience*, 54, 447–454.
- Girard, P. & Elie, P. (2007)** Manuel d'identification des principales lésions anatomomorphologiques et des principaux parasites externes des anguilles. Etude Cemagref n°10.
- Hirt-Chabbert, J.A. & Young, O.A. (2012)** Effects of surgically implanted PIT tags on growth, survival and tag retention of yellow shortfin eels *Anguilla australis* under laboratory conditions. *Journal of Fish Biology*. 1 : 314-319.
- Ibbotson, A., Smith, J., Scarlett, P., Aprahamian, P. (2002)** Colonisation of freshwater habitats by the European eel *Anguilla anguilla*, *Freshwater Biology* 47, 1696- 1706
- ICES (2000)** Report of the ICES Advisory Committee on Fisheries Management 1999. ICES cooperative research report, 236, 393–405.
- ICES (2014)** Report of the Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eel. Copenhagen, Denmark.
- Ivan, J. S. (2008)** Density estimation... In: Program MARK: a gentle introduction. Ed. by Cooch E, White G, 20–21, 20–19.
- Ivan, J. S., White, G. C. and Shenk, T. M. (2013)** Using auxiliary telemetry information to estimate animal density from capture -recapture data. *Ecology* 94:809-816
- Iversen, M.H., Okland, F., Thorstad, E.B. & Finstad, B. (2013)** The efficacy of Aquic-S vet. (isoeugenol) and metomidate as anaesthetics in European eel (*Anguilla anguilla* L.), and their effects on animal welfare and primary and secondary stress responses. *Aquaculture Research* 44: 1307-1316.

- Jellyman, D.J. & Sykes, J.R.E. (2003)** Diel and seasonal movements of radio-tagged freshwater eels, *Anguilla spp.*, in two New Zealand streams. *Environmental biology of fishes* 66: 143 – 166.
- Jolly, G.M. (1965)** Explicit estimates from capture-recapture data with both death and immigration - Stochastic model. *Biometrika* 52, 225-247.
- Jouanin, C., Briand, C., Beaulaton, L. & Lambert, P. (2012)** Eel Density Analysis (EDA 2.x). Un Modèle Statistique Pour Estimer L'échappement Des Anguilles Argentées (*Anguilla anguilla*) Dans Un Réseau Hydrographique. Onema, Irstea.
- Kendall, W.L., Nichols, J.D. and Hines, J.E. (1997)** Estimating Temporary Emigration Using Capture-Recapture Data with Pollock's Robust Design, *Ecology*, no Vol. 78, No. 2., p 563-578
- Kendall, W. L., & Bjorkland, R. (2001)** Using open robust design models to estimate temporary emigration from capture-recapture data. *Biometrics*, 57(4), 1113-1122.
- Krejszeff, S., Zarski, D., Gomulka, P., Nowosad, J., Palinska, Z.K. & Kucharczyk, D. (2013)** The efficacy of benzocaine as an anaesthetic for European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Aquaculture Europe*
- Laffaille, P., Briand, C., Fatin, D., Lafage, D. & Lasne, E. (2005)** Point sampling the abundance of European eel (*Anguilla anguilla*) in freshwater areas. *Archiv für Hydrobiologie*, 162, 91–98.
- Laffaille, P., Feunteun, E., Baisez, A., Robinet, T., Acou, A., Legault, A. & Lek, S. (2003)** Spatial organisation of European eel (*Anguilla anguilla*) in a small catchment. *Ecology of Freshwater Fish*, 12, 254–264.
- Lamarque, P. (1976)** Types de courant électrique à utiliser pour la capture optimale des poissons principalement les anguilles. *Pisciculture Français*, 47, 30–37.
- Lambert, P. & Rigaud, C. (1999)** Recherche D'éléments de Gestion de La Population D'anguilles Sur La Base Des Données Produites Par La RHP. CSP- Cemagref.
- Lambert, P., Feunteun, E. & Rigaud, C. (1994)** Etude de l'anguille en marais d'eau douce. Première analyse des probabilités de capture observées lors des inventaires par pêche électrique. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 111–121.
- Lasne, E. & Laffaille, P. (2008)** Analysis of distribution patterns of yellow European eels in the Loire catchment using logistic models based on presence-absence of different size-classes. *Ecology of Freshwater Fish*, 17, 30–37.
- Lebreton, J. D., Nichols, J.D., Barker, R.J., Pradel, R. & Spendelov J.A. (2009)** Chapter 3: Modeling Individual Animal Histories with Multistate Capture-Recapture Models. *Advances in Ecological Research*. 87- 173. Academic Press.
- Luneau, S., Mertens, D. & Changeux, T. (2003)** Guide de La Pêche Fluviale et Lacustre En France Métropolitaine. Conseil Supérieur de la Pêche.
- Marchand, F., Tremblay, J., Delanoë, R., Destouches, J.-P., Ollitrault, M., Beaulaton, L. & Azam, D. (2015)** Bilan Des Données de L'observatoire Sur Le Bassin Versant de l'Oir (Basse-Normandie) de 1985 À 2014. Inra, Onema, Rennes, France.
- Mazel V., Charrier F., Legault A. & Laffaille P. (2012)** Long-term effects of passive integrated transponder tagging (PIT tags) on the growth of the yellow European eel (*Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758)). *Journal of Applied Ichthyologie*. 29 : 906-908.
- Mohr, H. (1971)** The effect of some behaviour patterns on catching techniques for eel. (ed C.J. McGrath), 27–30. FAO.
- Neiffer, D.L. & Stamper, A. (2009)** Fish sedation, anesthesia, analgesia, and euthanasia: considerations, methods, and types of drugs. *ILAR J.* 50 : 343-360
- Neveu, A. (1981)** Variations saisonnières et journalières de l'alimentation de l'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans des conditions naturelles. *Oecol. Applic.* 2 : 99-116
- Nevoux, M. (2008)** Sensibilité des populations aux changements globaux, en fonction de leur stratégie démographique. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle
- Otis, D.L., Burnham, K.P., White, G.C. & Anderson, D.R. (1978)** Statistical inference from capture data on closed animal populations. *Wildlife Monographs* 3-135
- Ovidio, M., Seredynski, A., Philippart, J.-C. & Nzau Matondo, B. (2013)** A bit of quiet between the migrations: the resting life of the European eel during their freshwater growth phase in a small stream. *Aquatic Ecology* 47, 291 – 301.
- Péron, G., Crochet, P.-A., Choquet, R., Pradel, R., Lebreton, J.-D. & Gimenez, O. (2010)** Capture-recapture models with heterogeneity to study survival senescence in the wild. *Oikos* 119, 524-532.
- Philippart, J.C. (1979)** Observations concernant l'efficacité de la pêche à l'électricité dans une rivière

de la zone à barbeaux. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture 273 : 157-171

Pollock, K. H. (1982) A capture-recapture design robust to unequal probability of capture. The Journal of Wildlife Management, 46(3), 752-757.

Pollock, K. H., Nichols, J. D., Brownie, C. & Hines, J. E. (1990) Statistical-Inference for capture recapture experiments. Wildlife Monographs 1-97.

Pottier, G., Marchand, F. & Azam, D. (2016) Test D'efficacité Des Dispositifs de Pêche À L'électricité. INRA.

Powell, L.A. (2007) Approximating variance of demographic parameters using the delta method: a reference for avian biologists. Papers in Natural Resources. Paper 415.

Pradel, R. & Sanz-Aguilar, A. (2012) Modeling Trap-Awareness and Related Phenomena in Capture-Recapture Studies. PLoS ONE 7(3): e32666.

Pradel, R. (2005). Multievent: An Extension of Multistate Capture-Recapture Models to Uncertain States - Pradel2005Bcs.pdf. Biometrics 61, 442–447.

Rigaud, C. (2010) Anguille En Milieu Profond - Etat Des Connaissances et Perspectives. ONEMA-Cemagref.

Rigaud, C., Fontenelle, G., Gascuel, D. & Legault, A. (1988) Le Franchissement Des Ouvrages Hydrauliques Par Les Anguilles (*Anguilla anguilla*). Présentation Des Dispositifs Installés En Europe. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, Rennes.

Ross L.G. & Ross B. (2008) Anaesthetics and Sedative Techniques for Aquatic Animals (3rd edn). Blachwell Publishing, Oxford 222pp.

Sacre, B., Tremblay, J., Azam, D., Marchand, F. & Huteau, D. (2015) Système RFID de détection automatique de poissons. Cahiers techniques INRA.

Schmidt, J. (1923) The breeding places of the eel. Philosophical Transactions of the Royal Society, CCXI, 179–208.

Schwarz, C.J. & Arnason, A.N. (1995) A General Methodology for the Analysis of Capture-Recapture Experiments in Open Populations. Biometrics 52(3): 860 - 973

Seber, G. A. F. (1965) A note on the multiple recapture census. Biometrika 52. 249-259.

Thomas, J.C. (2006) American eel behavioral patterns in Silver Lake, Dover, Delaware. Master's Thesis; Delaware State University, Dover, Delaware.

Tréguier, A., Houdouin, N., Destouches, J.-P., Beaulaton, L., Marchand, F. & Azam, D. (2016) Mise au point d'une méthode de quantification des anguilles en milieu profond. Rapport intermédiaire n°1. Etat, fonctionnement et services des écosystèmes aquatiques – Action n°16. Pôle AFB-INRA Rennes, France.

Ubl, C. & Dorow, M. (2015) A novel enclosure approach to assessing yellow eel (*Anguilla anguilla*) density in non-tidal coastal waters. Fisheries Research, 161, 57–63.

Vecchio, Y. & Roussel, C. (2010) Sauvegarde de L'anguille. Le Plan de Gestion Français. ONEMA, ONEMA.

Walsh, C.T. & Pease, B.C. (2002) The use of clove oil as an anaesthetic for the longfinned eel, *Anguilla reinhardtii* (Steindachner). Aquaculture Research, 33, 627–635.

White, G., Anderson, D.R., Burnham, K.P. & Otis, D.L. (1982) Capture—Recapture and Removal Methods for Sampling Dosed Populations. Journal of Wildlife Management 48(1).

Whitehead, H. (1990) Mark-recapture estimates with emigration and reimmigration. Biometrics, 46,473-479

Winter, J.D. (1996) Advances in Underwater biotelemetry. Fisheries Techniques American Fisheries Society., 2nd edition 555–590. Murphy, B.R. & Willis, D.W. eds, Bethesda, Maryland.

Ximenes, M.C. (1986) L'anguille En Méditerranée Française : Aspects Écobiologiques et Halieutiques. Cemagref, Montpellier.

Les informations sur la RFID sont disponibles sur : www.oregonrfid.com et sur http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/mmadegar_rfid/technologies_transpondeur.html (Michaël Madegard, université Paris-Est Marne-la-Vallée).

Les informations concernant le logiciel MARK de modélisation CMR sont disponibles sur : <http://www.phidot.org/software/mark/docs/book>

XI. Table des illustrations

Liste des figures :

Figure 1. Séries temporelles du recrutement des civelles et des anguilles jaunes en Europe. Chacune des 45 séries ont été définies selon les moyennes observées dans les années 1979 à 1994. Les valeurs moyennes des séries combinées entre les deux stades et leurs intervalles de confiances (95%) sont représentés par des points noirs et des barres. Les lignes marron et bleue représentent respectivement les valeurs moyennes pour l'anguille jaune et la civelle. L'étendue des séries est représentée par un ombrage gris. La période 1900-1950 n'a pas été utilisée pour calculer la référence et est représentée par un ombrage en blanc. L'échelle logarithmique est à noter (ICES 2014).	13
Figure 2. Densité observée et prédite (densité estimée) d'anguilles jaunes pour la période 2003-2005 (PGA, 2010).....	14
Figure 3. Répartition des données de pêche électrique, par type de données utilisées (à gauche), et densités d'anguilles jaunes (en anguille.100m ⁻²) prédites en France métropolitaine par le modèle EDA 2.2 en 2012 (à droite). Les données correspondent à l'ensemble des années disponibles (d'après Briand et al. 2015).....	15
Figure 4. Le cycle de vie de l'anguille européenne <i>Anguilla anguilla</i> et son aire de répartition (Vecchio & Roussel 2010)	16
Figure 5. Probabilité de présence de l'anguille par classe de taille dans le bassin de la Loire (Lasne & Laffaille 2008).....	16
Figure 6. Préférence de micro-habitat des anguilles calculée à partir de diverses variables environnementales : la profondeur, la vitesse du courant, la composition du substrat, la couverture en végétation aquatique et la couverture en végétation riparienne. A : anguilles < 150 mm, B : anguilles de 150 à 300 mm, C : anguilles de 300 à 450 mm, D : anguilles > 450 mm (Laffaille et al. 2003).....	17
Figure 7. Schéma représentant la fraction capturable lors de l'échantillonnage de l'anguille par rapport au stock, dans le cas d'un échantillonnage par engins passifs (Ximenes 1986).....	18
Figure 8. Déroulement de la pêche électrique (gauche) et comportement de l'anguille en réponse au courant (droite). Exemple d'un matériel portatif : l'anode (+) attire le poisson, qui est capturé avec une époussette et stocké dans un seau (Luneau, Mertens & Changeux 2003). Comportements de nage normale, de nage forcée et de tétanie chez une anguille soumise à un courant électrique (Cowx & Lamarque 1990).	19
Figure 9. Passe et pièges sur le barrage de Pont Es Omnes (Charrier et al. 2014).....	20
Figure 10. Verveux à deux ailes (gauche) et à une aile (droite). De part et d'autre du piège ou au centre de son entrée, les ailes orientent le poisson vers le piège (Luneau, Mertens & Changeux 2003).	21
Figure 11. Nasse avec entonnoir (gauche) et sans entonnoir (droite) à anguille. Le corps et les manchons sont construits avec du grillage métallique ou plastique (Luneau, Mertens & Changeux 2003 ; Beaulaton 2008).	21
Figure 12. Association de deux verveux (gauche) et de deux nasses (droite). Le verveux barrière à deux poches : tendu entre deux piquets, le filet détourne le poisson vers les pièges situés à chaque extrémité (gauche ; flèches pointillées, Luneau, Mertens & Changeux 2003). Schéma du protocole de piégeage des anguilles à l'aide de nasses au sein d'un site (droite ; Baisez 2001).	22
Figure 13. Schéma d'une capéchade ou verveux à trois poches (gauche) et barrage à bosselles (droite), utilisés par la pêcherie professionnelle du lac de Grand-Lieu (Adam 1997).....	22
Figure 14. Système d'enclos délimité par un filet et quatre chambres en coin dans lequel sont installées six chaînes de 5 double verveux ; en se basant sur la connaissance de la taille de l'enclos, la capture peut être exprimée en nombre d'anguilles jaunes / ha (Ubl & Dorow 2015).	22
Figure 15. Profil du pourcentage d'individus retenus au sein d'un engin de maille définie, selon la taille des individus (Ximenes 1986)	23
Figure 16 : Photographies de PIT-tags 12 mm comparés à une pièce d'un euro, d'un PIT-tag seul et de son insertion dans la cavité abdominale d'une anguille	25
Figure 17 : L'interrogateur constitué d'un lecteur et d'une antenne, sa source d'énergie et les connexions	26
Figure 18 : Schématisation des étapes de la détection d'un PIT-tag par un interrogateur (système de détection couplé « reader / antenne »), dans le cas d'un système fixe HDX (voir différences entre systèmes FDX et HDX ci-dessous).....	27

Figure 19 : Schématisation de la décomposition du cycle de lecture d'un interrogateur pour la technologie HDX.....	27
Figure 20. Quelques limites dans la détection des PIT-tags par l'interrogateur : l'orientation du PIT-tag par rapport au cadre de l'antenne (gauche) et schématisation de la variabilité de l'efficacité de détection selon la distance du PIT-tag à l'antenne (droite).....	28
Figure 21. Localisation de l'Oir et de la station de piégeage de Cerisel	30
Figure 22. Localisation des pièges et des appareils de mesure de la station de piégeage de Cerisel	31
Figure 23. Localisation du site test sur l'Oir. Les secteurs sont délimités par des antennes fixes RFID (traits rouges).	32
Figure 24. Evolution de la profondeur (au milieu) et de largeur du cours d'eau (largeur mouillée M et largeur plein bord PB) pour chaque secteur depuis l'aval vers l'amont de la zone de piégeage. Les données ont été relevées le 21 mars 2017 pour une hauteur d'eau au limnimètre de 40 mm.....	33
Figure 25. Photographie de mésocosmes extérieurs de la plateforme PEARL à Rennes utilisés pour l'expérimentation du suivi de marquage PIT-tag à court terme.....	34
Figure 26. Localisation des secteurs d'étude potentiels sur la Vilaine.....	35
Figure 27. Localisation des secteurs d'étude. Les rectangles violets représentent les sites potentiels identifiés en mai et les carrés orange les zones d'étude réellement pêchées. Le secteur n°1 est proche du port de plaisance et le secteur n°2, plus en amont, est proche de la zone de prélèvement d'eau potable.	35
Figure 28. Calendrier général des expérimentations sur les 3 ans du projet, sur tous les sites.....	37
Figure 29. Bourgne à « bec PVC »	38
Figure 30. Emplacement schématique des engins au sein des secteurs	39
Figure 31. Bourgne installée à l'emplacement A3 : secteur A, rive gauche	40
Figure 32. Capture d'anguille jaune dans une bourgne à bec PVC	40
Figure 33. Calendrier des campagnes de piégeage, suivant les sites et les engins de capture	41
Figure 34. Graphique du nombre de captures et recaptures d'anguilles journalière de 2015 à 2017 lors des différentes sessions d'échantillonnage (périodes grisées = pas de piégeage).....	44
Figure 35. CPUE moyenne par engin et par jour (24h de pêche).....	45
Figure 36. CPUE moyenne et Erreur standard par engin et par secteur	46
Figure 37. Diagramme du nombre de captures d'anguilles	46
Figure 38. Histogramme des délais de recapture, en nombre de sessions	47
Figure 39. Histogramme de taille (gauche) et relation taille poids (droite) des 1500 anguilles capturées. La ligne rouge représente la relation issue du modèle linéaire et la ligne bleue correspond au modèle de régression quantile (0.75). Les indices sont présentés dans le tableau ci-dessous.....	49
Figure 40. Bassin 1 équipé d'une antenne horizontale dans le sens de la longueur. La nasse test avec filets de recapture est positionnée perpendiculairement avec l'entrée proche de l'antenne. Deux nasses témoin sans filet sont installées le long du bassin à gauche.....	51
Figure 41. Bourgne sans entonnoir placée à la verticale dans le bassin intérieur E au début de la seconde étude. Toutes les anguilles sont placées dans la dernière chambre de l'engin.....	51
Figure 42. Pourcentage des tailles d'anguilles capturées en milieu naturel pour chaque type d'engin	52
Figure 43. Histogramme des tailles d'anguilles utilisées pour les deux études de sélectivité en milieu contrôlé	53
Figure 44. Courbe de sélectivité des différents engins testés ; la ligne pointillée rouge indique la L ₅₀ et la ligne continue rouge indique la L ₇₅	54
Figure 45. En haut : Les traces sur les flancs gauche et droit de l'anguille seraient le résultat de sa sortie, en forçant, par les mailles de la nasse. En bas : Traces de mucus laissées par une ou des anguilles s'étant échappées par le vide de maille d'une nasse.	55
Figure 46. A gauche : vue aérienne des rigoles d'expérimentation de la PEARL. A droite : la rigole recouverte d'un filet de protection contre la prédation.	58
Figure 47. Protocole d'évaluation de l'effort d'échantillonnage optimal	62
Figure 48. Implantation d'un PIT-Tag sur une petite anguille jaune à l'aide d'un pistolet injecteur Biomark	67
Figure 49. Localisation des antennes fixes (traits rouges) délimitant les secteurs de test	68
Figure 50. Antenne fixe n°6. 1 : Cadre PVC contenant le fil conducteur, 2 : Boîtier du Tag-tracker, 3 : Tuner box, 4 : Boîtier étanche contenant le reader et l'alimentation électrique	69
Figure 51. Boîtier du tag-tracker ; le cadre rouge indique le PIT-tag placé dans la bobine de cuivre... 69	
Figure 52. Pourcentage de détection journalier du tag-tracker de l'antenne A du 20/04/2016 au 30/08/2017	70
Figure 53. Histogramme du nombre de détections d'anguilles (en nombre de jours) par individu pour l'ensemble des antennes fixes	73

Figure 54. Nombre de détections de PIT-tags d'anguilles par jour et efficacité moyenne journalière des antennes sur le secteur	74
Figure 55. Nombre de détections enregistrées par tranche horaire	74
Figure 56. Nombre de d'anguilles détectées par nombre d'antennes fixes	75
Figure 57. Aperçu du système mobile de PIT-tracking en fonctionnement sur l'Oir, montrant le boîtier étanche au dos, l'antenne circulaire avec son manche et le PDA permettant la lecture des numéros de PIT-tags	77
Figure 58. Nombre de détections d'anguilles par session de PIT-tracking (périodes grisées = pas de PIT-tracking)	79
Figure 59. Détections des PIT-tags d'anguilles et efficacité de détection des PIT-tags balises par l'antenne mobile pour l'année 2017	79
Figure 60. Nombre de détections (=sessions de PIT-tracking) par individu.....	80
Figure 61 : Nombre de PIT-tags d'anguilles détectés par nombre de secteurs sur les 3 années de PIT-tracking	81
Figure 62 : Diagramme de Venn des différentes méthodes de détection des individus	83
Figure 63 : Nombre de détections de PIT-tags d'anguilles aux antennes fixes par tranche horaire et plages horaires utilisées par les différents moyens de détections : capture, PIT-tracking et antennes fixes	86
Figure 64 : Probabilité de survie (\pm IC) journalière des anguilles en fonction des occasions	91
Figure 65 : Graphique des probabilité de déplacement ($p \pm$ IC) des anguilles d'un secteur à un autre entre deux occasions.....	92
Figure 66 : Probabilité de détection ($p \pm$ IC) si un individus est détecté à t-1 ou non.....	93
Figure 67. Système d'enclos délimité par un filet et quatre chambres en coin dans lequel sont installées six chaînes de 5 double verveux (Ubl & Dorow 2015).	102
Figure 68 : Schéma du dispositif expérimental avec 12 verveux-double, testé lors de la première session d'étude sur la Vilaine, en juin 2016	103
Figure 69 : A gauche : bateau utilisé pour déployer le filet servant d'enclos et pour la pose et la relève des verveux.	103
Figure 70 : Graphique des CPUE (nombre d'anguille/verveux/24h de pêche) des verveux dans l'enclos	105
Figure 71 : CPUE des verveux en fonction de leur position dans l'enclos pour les deux sessions d'échantillonnage.....	106
Figure 72 : Histogramme des tailles des anguilles capturées dans les deux sessions de l'expérimentation sur la Vilaine en 2016.....	106
Figure 73 : Histogramme des tailles des anguilles capturées lors de la campagne sur la Vilaine en mai 2017.....	107
Figure 74 : Un reader installé dans son boîtier et ses diverses connexions.	121
Figure 75 : Schématisation du fonctionnement des antennes verticales et horizontale	122
Figure 76 : Modèle large tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers pré-2015 (coin en haut à gauche). La photographie en haut à droite présente un exemple de réglage pour une inductance mesurée de 44.7 μ H.	123
Figure 77: Modèle remote tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers pré-2015 (coin en haut à gauche).	124
Figure 78: Modèle slim tuner. Ce modèle utilise des jumpers spécifiques.	124
Figure 79 Modèle large tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers spécifiques. La photographie en haut à droite présente un exemple de réglage pour une inductance mesurée de 40.5 μ H.	125
Figure 80 : les branchements effectués sur le reader si le démultiplexeur est utilisé (plusieurs antennes branchées, a) ou non (une seule antenne branchée, b). Les flèches vertes, rouges et violettes correspondent respectivement aux branchements usuels, ceux du twinax et ceux du câble de synchronisation.....	126
Figure 81 : Emplacement des jumpers à modifier selon le mode de synchronisation du reader	127
Figure 82 : Férite d'une remote tuner (orange). Selon le réglage, les LED (à gauche de la tuner box) clignotent plus ou moins fréquemment.....	128
Figure 83 : Fiche technique de l'un des 4 types de verveux. Ils ne diffèrent que par la taille de la maille de la chambre 3 (10 mm ici contre 8 mm, 6 mm et 4 mm pour les 3 autres), modifiant alors la taille de mailles étirée (20 mm ici contre 14 mm, 14 mm, 10 mm).	129
Figure 84 : Fiche technique des nasses plastiques avec entonnoir.....	130
Figure 85 : Fiche technique des nasses métalliques sans entonnoir avec peigne de non retour	131
Figure 86 : Fiche technique de l'un des deux premiers prototypes proposés par notre fournisseur, Ces	

deux prototypes ne diffèrent que par leur système d'assemblage : cette fiche correspond à celui dont l'assemblage est réalisé grâce à des serflex et non des anneaux.....	132
Figure 87 : Fiche technique du troisième prototype proposé par notre fournisseur.....	133
Figure 88 : Fiche technique de la bourgne modifiée type « bec PVC ».....	134

Liste des tableaux :

Tableau 1. Caractéristiques de trois tailles de PIT-tags HDX.....	25
Tableau 2. Description simplifiée du fonctionnement et des fréquences des technologies FDX et HDX.....	27
Tableau 3. Les appareils de mesure présents à la station de Cerisel et leurs caractéristiques	31
Tableau 4. Profondeur, largeur et vitesse moyennes des secteurs de test.....	32
Tableau 5. Caractéristiques des sites de l'étude	34
Tableau 6. Comparaison succincte des caractéristiques des pièges utilisés.....	38
Tableau 7. Effort d'échantillonnage en nombre d'engins.jours pour chaque type d'engin par année ...	42
Tableau 8. Effort d'échantillonnage en nombre d'engins.jours pour chaque type d'engin par secteur .	42
Tableau 9. Abondance, abondance relative et fréquence d'occurrence pour chaque espèce	42
Tableau 10. Fréquence d'occurrence de chaque espèce en fonction des mois de capture	43
Tableau 11. Effort d'échantillonnage (engins.jours) et résultats des captures d'anguilles par type d'engin et par année	44
Tableau 12. Nombre de jours entre une recapture et la capture précédente depuis la 1ère capture jusqu'à la 10° recapture. Les informations pour les individus recapturés plus de 10 fois ne sont pas reportées dans ce tableau.....	47
Tableau 13. Tableau et Histogramme des déplacements des anguilles entre deux captures	48
Tableau 14. Indices issus des deux types de régressions construite visant à tester les relations taille (mm) – poids (g) des individus	49
Tableau 15. Caractéristiques des différents engins testés dans l'expérimentation « Sélectivité »	50
Tableau 16. Estimateurs de tailles d'anguilles capturées sur l'Oir depuis 2015 pour chaque type d'engin	52
Tableau 17. Comparaison deux à deux par le test de somme de rangs de Wilcoxon, avec la correction de Bonferroni	53
Tableau 18. Tableau des résultats des études de l'échappement par le vide de maille	54
Tableau 19. Résultats de la modélisation de la sélectivité de chaque engin, pour le modèle « Etude » où l'échappement par le vide de maille est testé en 24h	55
Tableau 20. Résultats de l'étude sur la sélectivité des différents engins	56
Tableau 21. Caractéristiques des engins passifs testés sur l'efficacité de capture	57
Tableau 22. Densités réelles calculées sur les individus recapturés après vidange et PIT-tracking	58
Tableau 23. Nombre d'engins posés par secteur lors de la campagne d'août 2016 de piégeage sur l'Oir	58
Tableau 24. Effort d'échantillonnage en engin.jour de chaque type d'engin, appâté ou non.....	59
Tableau 25. Résultats des captures en CPUE sur l'Oir en août 2016	59
Tableau 26. Résultat du test de significativité de chaque facteur testé	59
Tableau 27. Effort de piégeage par rigole, en nombre d'engins.jours.....	60
Tableau 28. Résultats des captures par rigole	60
Tableau 29. Nombre d'anguilles déversées et recapturées par rigole	60
Tableau 30. Efficacité moyenne de capture (en pourcentage) et erreur standard pour chaque engin suivant les deux hypothèses d'effectif total	61
Tableau 31. Effort d'échantillonnage par secteur et résultats des captures.....	62
Tableau 32. CPUE : Nombre d'anguilles capturées par jour pour chaque secteur et selon le nombre d'engins posés.....	62
Tableau 33 : Résultat du test de significativité de chaque facteur testé (Le secteur C est pris comme témoin, à titre d'exemple)	63
Tableau 34. Les caractéristiques de chaque antenne fixe installée sur l'Oir pour l'expérimentation Anguille.....	68
Tableau 35 : Nombres de jour de fonctionnement de chaque antenne avec un tag-tracker	70
Tableau 36 : répartition temporelle des différentes efficacités de fonctionnement	70
Tableau 37 : Nombre d'individus détectés par l'antenne-double de Cerisel en aval du Pont entre le 17/03/2015 et le 02/05/2015.....	71
Tableau 38 : Bilan des détections par antennes fixes entre le 14/10/2015 et le 05/09/2017	72
Tableau 39 : Bilan des détections par espèce pour les années 2016-2017.....	72
Tableau 40 : Exemple du nombre de détections par tranche horaire pour des anguilles au comportement	

plus diurne	75
Tableau 41 : Résultat du test de significativité de chaque facteur testé pour décrire l'activité des anguilles détectées aux antennes	76
Tableau 42: Bilan des sessions de PIT-tracking pour les trois années d'expérimentation	78
Tableau 43 : Nombre de détections par espèce	79
Tableau 44 : Nombre de détections d'anguilles par secteur	80
Tableau 45 : Moyens mis en œuvre sur chacun des secteurs	84
Tableau 46 : Bilan des données récoltées lors des 4 semaines d'expérimentations en juin et juillet 2017 en tenant compte des marquages précédents	84
Tableau 47 / Bilan des données récoltées sur les secteurs A à E et lors des 4 semaines d'expérimentation seulement	84
Tableau 48: Description des états pour le modèle CMR	87
Tableau 49: Description des évènements pour le modèle CMR	87
Tableau 50: Matrice des états initiaux	88
Tableau 51 : Matrice des probabilités de survie entre t-1 et t	89
Tableau 52 : Matrice des probabilités des déplacements entre les secteurs entre t-1 et t	89
Tableau 53 : Matrice des probabilités de changement d'état selon le processus de trap-dépendance	89
Tableau 54 : Matrice des évènements de détection	90
Tableau 55 : Bilan du meilleur modèle sélectionné	91
Tableau 56 : Estimation des probabilités de déplacement d'un secteur à un autre entre t-1 et t	92
Tableau 57 : Définition des intervalles de temps entre chaque occasion	96
Tableau 58 : Résultats des estimations du modèle de population POPAN lorsque que l'évènement de marquage est pris en compte	97
Tableau 59 : Résultats des estimations du modèle de population POPAN lorsque que l'évènement de marquage est ignoré	98
Tableau 60 : Résultats des opérations de pêche électrique en 2016 et 2017	99
Tableau 61 : Organisation de la semaine d'expérimentation pour les deux sessions de juin 2016....	104
Tableau 62 : Organisation de la semaine d'expérimentation	104
Tableau 63: Résultats des captures lors des deux sessions d'échantillonnage	105
Tableau 64 : Résultats des captures dans les deux enclos sur le site n°2	107
Tableau 65 : Position des jumpers et branchements selon le mode de synchronisation du reader pour une synchronisation maître/esclave without acknowledgment (commande CGS4 pour le maître et CGS5 pour l'esclave)	128

XII. Annexes

• ANNEXE 1 : INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES SUR LA RFID

Cette partie a été rédigée à partir de la synthèse des informations fournies sur le site du fournisseur www.oregonrfid.com.

I. Le reader

Le reader doit être alimenté par une source d'énergie (de 7 à 20 V). Pour augmenter les performances du système, OREGON RFID préconise de régler le courant entre 12 et 14 V. Il peut être :

► branché sur le secteur, par l'intermédiaire d'un transformateur qui transformera le courant du secteur en un courant réduit ;

► alimenté par une batterie. Plusieurs batteries peuvent être associées pour augmenter le temps d'alimentation du reader et donc d'expérimentation ;

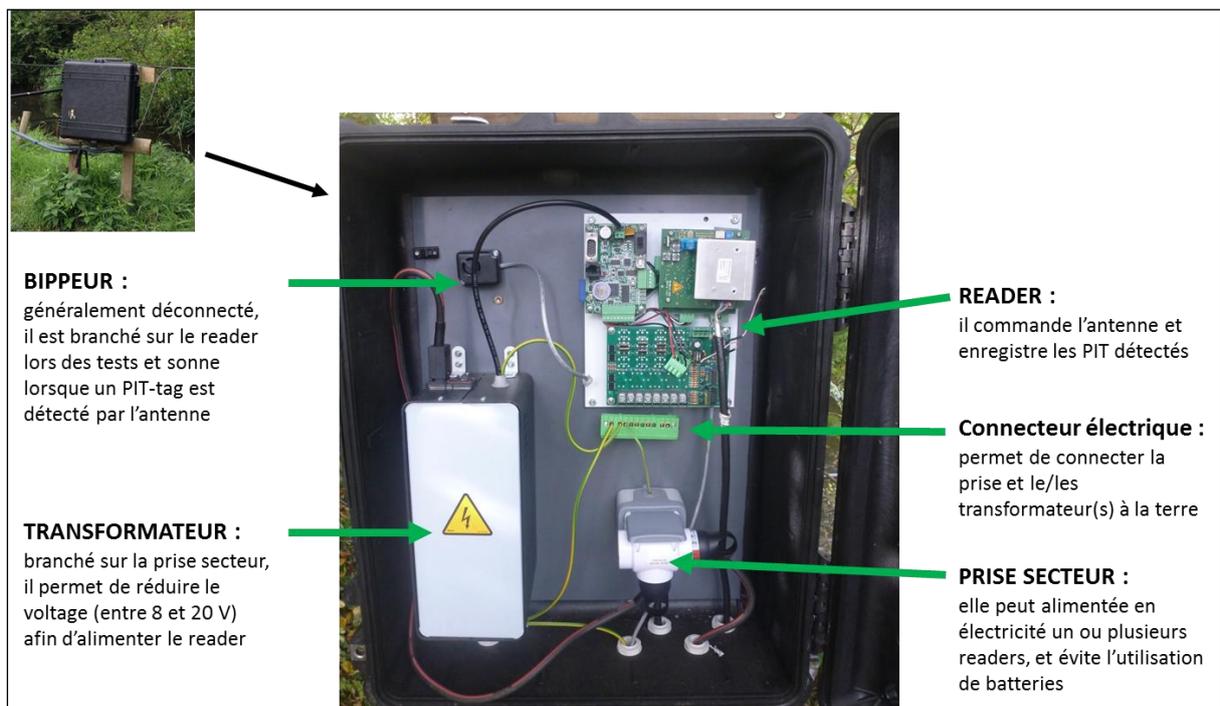
► alimenté par énergie solaire, générateur thermo-électrique ou générateur micro-hydraulique. Dans le cas de cette action, le reader est soit alimenté par une batterie lithium (antenne mobile), soit installé dans un boîtier étanche, avec un transformateur (réglable entre 8 à 20 V) et une prise, permettant de relier le reader au secteur (antenne fixe ; Figure 83). Un « bippeur » y est également installé. Branché au reader, il émet un signal sonore lorsqu'un PIT-tag est lu.

Le reader (fixé sur la plaque blanche ; Figure 83) est constitué de trois éléments :

► un générateur du signal RFID : il génère le signal et récupère les numéros de PIT-tags (en haut à droite ; Figure 83)

► un datalogger : il enregistre les données et distribue l'énergie entre les éléments (en haut à gauche ; Figure 83)

► un démultiplexeur : il permet de multiplier le signal pour installer 2 à 4 antennes au lieu d'une (en bas ; Figure 83)



© Julien Tremblay et Anne Tréguier

Figure 74 : Un reader installé dans son boîtier et ses diverses connexions.

Lorsqu'il est connecté à un ordinateur ou à un PDA, il est paramétrable et peut être ré-initialisé par un reset, soit en utilisant la commande FR, soit en actionnant un bouton présent au « verso » du reader. Il est alors paramétré selon la configuration par défaut.

II. Le design des antennes

Le cadre de l'antenne

Il existe différents types d'antennes :

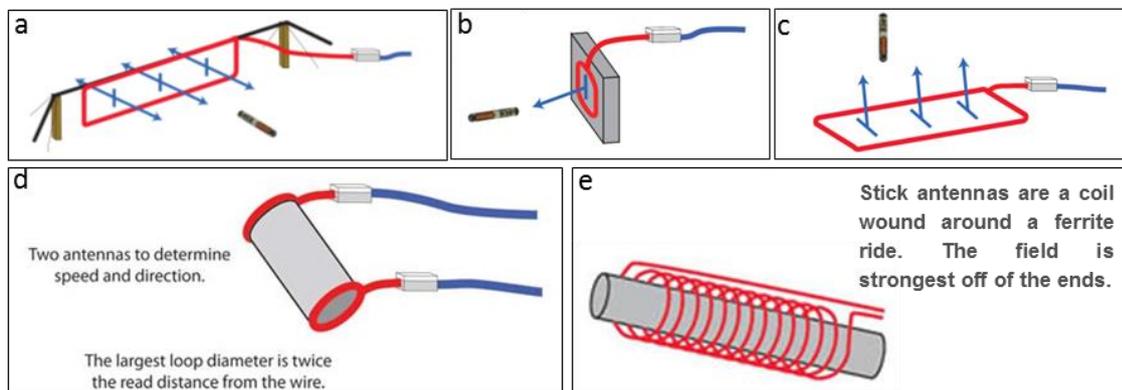
► verticale :

- pass-through (Figure 75 a) : le cadre est installé verticalement entre deux berges. Le PIT-tag est détecté lorsqu'il passe à travers. Le champ de détection est donc double (amont et aval). De plus, le PIT-tag a une plus grande probabilité d'être orientée perpendiculairement au cadre, ce qui maximise les chances de détection ;

- pass-by (Figure 75 b) : l'antenne est plaquée contre une berge. Le PIT-tag est détecté lorsqu'il passe à côté. Le champ de détection est donc simple ;

► horizontale (pass-over, Figure 75 c) : l'antenne est plaquée contre le fond. Le PIT-tag est détecté lorsqu'il passe au-dessus. Le champ de détection est donc simple ;

► d'autres types d'antennes plus complexes existent également (Figure 75 d et e).



© www.oregonrfid.com (Important Links / Antenna Types)

Figure 75 : Schématisation du fonctionnement des antennes verticales et horizontales

Divers facteurs déterminent également l'efficacité de détection de l'antenne :

► son design : sa forme et sa taille. Pour être efficace, le PIT-tag traversant l'antenne doit être détecté dans l'ensemble du cadre de l'antenne (il ne faut pas qu'il y ait de « blanc »). Mais il doit également être détecté en amont et en aval du cadre puisque les phases de charge et d'écoute sont dissociées dans le système HDX et que l'individu marqué peut passer rapidement dans le cadre. De plus, le design est à adapter selon la taille des PIT-tags à détecter : le « range » de détection de l'antenne est plus important pour les PIT-tags de 23 mm que pour les PIT-tags de 12 mm (60 cm contre 35 à 45 cm selon les indications fournies par OREGON).

► la qualité du fil conducteur constituant le cadre de l'antenne : le câble audio semble donner de meilleur résultat que du câble électrique

► le diamètre de ce fil conducteur, le nombre de spires et l'espacement entre les spires :

- plus l'antenne est grande, plus le diamètre du fil conducteur doit être grand,

- OREGON recommande une unique spire, ce qui nécessite que le diamètre du fil conducteur soit bien adapté au design de l'antenne, car c'est le diamètre de ce fil ainsi que le nombre de spires qui déterminent l'inductance de l'antenne

- si plusieurs spires sont nécessaires, leur espacement peut influencer sur la distance latérale de détection

► la longueur du twinax

► le temps de charge et d'écoute : un cycle de 50 ms / 20 ms (indiqué par OREGON) conduit

à 14 scans par seconde. Le temps d'émission peut être réduit pour augmenter le nombre de scans mais au risque que le PIT-tag ne soit pas complètement chargé.

La tuner box

Le cadre de l'antenne a une inductance, mesurable par un inductomètre. Selon l'inductance mesurée, les jumpers de la tuner box doivent être installés ou retirés selon une grille. Il existe 4 modèles de tuner box OREGON, présentant chacune leur grille de correspondance inductance mesurée / position des jumpers : large tuner, remote tuner, slim tuner et easy tuner. Les Figure 76, Figure 77, Figure 78 et Figure 79 présentent ces modèles ainsi que la grille de correspondance entre la position des jumpers et l'inductance mesurée de l'antenne. Cette dernière n'est pas présentée pour le modèle Slim tuner, qui n'a jamais été acheté par nos unités.

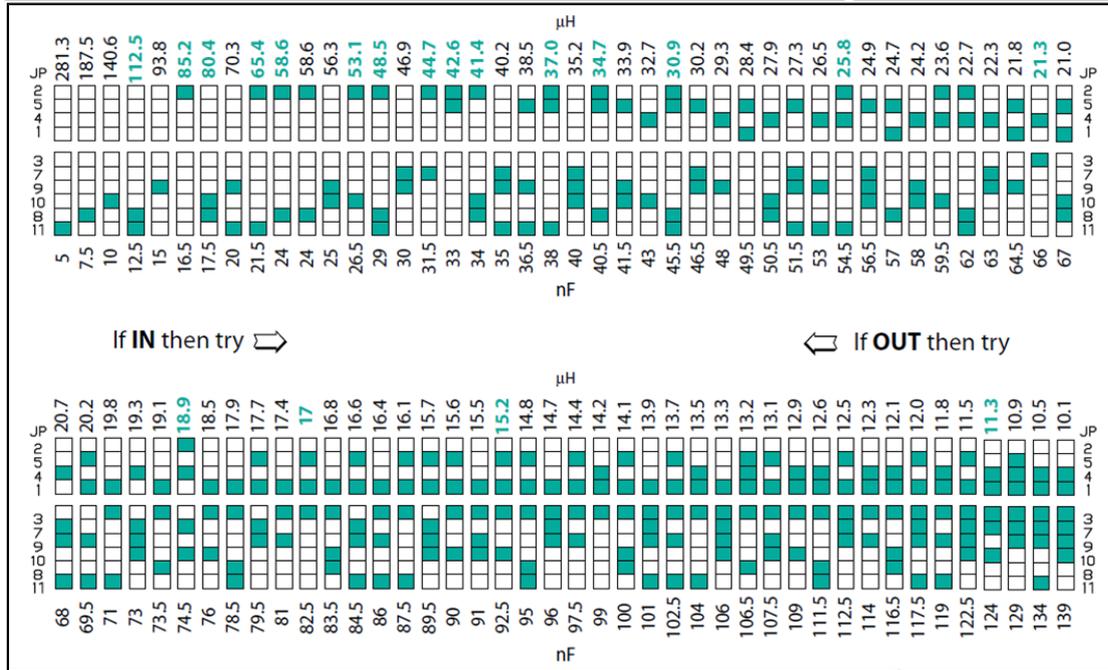
LARGE TUNER



© Anne Tréguier (haut) ; www.oregonrfid.com (bas)

Figure 76 : Modèle large tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers pré-2015 (coin en haut à gauche). La photographie en haut à droite présente un exemple de réglage pour une inductance mesurée de 44.7 µH.

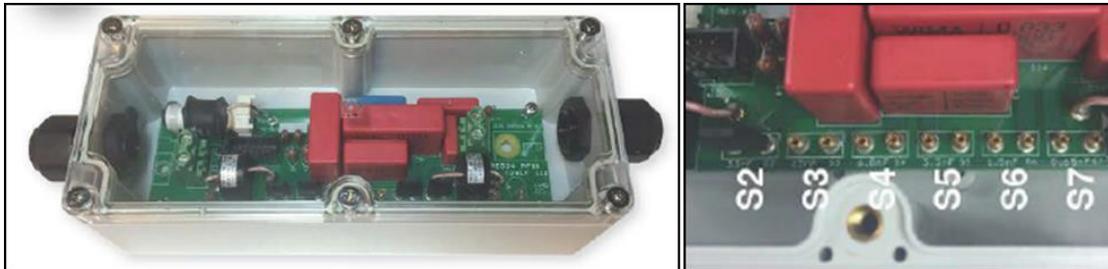
REMOTE TUNER



© Anne Tréguier (haut) ; www.oregonfid.com (Documents and Manuals ; bas)

Figure 77: Modèle remote tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers pré-2015 (coin en haut à gauche).

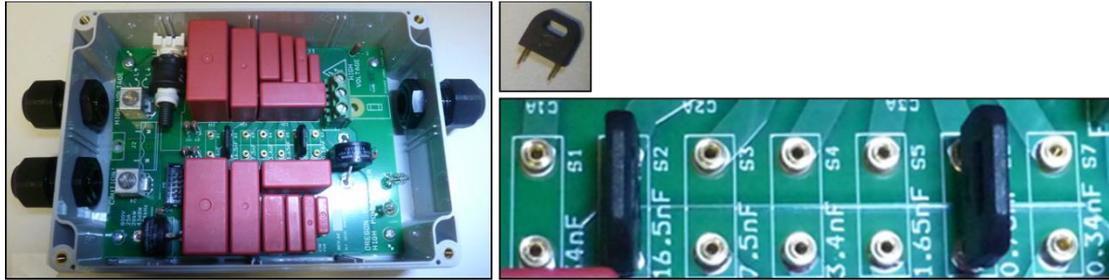
SLIM TUNER



© www.oregonfid.com (Documents and Manuals)

Figure 78: Modèle slim tuner. Ce modèle utilise des jumpers spécifiques.

EASY TUNER



nF	1	2	3	4	5	6	7	μH	nF	1	2	3	4	5	6	7	μH	nF	1	2	3	4	5	6	7	μH	nF	1	2	3	4	5	6	7	μH
0.34	□	□	□	□	□	□	□	4135.3	16.50	□	□	□	□	□	□	□	85.2	34.00	□	□	□	□	□	□	□	41.4	50.50	□	□	□	□	□	□	27.8	
0.75	□	□	□	□	□	□	□	1874.7	16.84	□	□	□	□	□	□	□	83.5	34.34	□	□	□	□	□	□	□	40.9	50.84	□	□	□	□	□	□	27.7	
1.09	□	□	□	□	□	□	□	1289.9	17.25	□	□	□	□	□	□	□	81.5	34.75	□	□	□	□	□	□	□	40.5	51.25	□	□	□	□	□	□	27.4	
1.65	□	□	□	□	□	□	□	852.1	17.59	□	□	□	□	□	□	□	79.9	35.09	□	□	□	□	□	□	□	40.1	51.59	□	□	□	□	□	□	27.3	
1.99	□	□	□	□	□	□	□	706.5	18.15	□	□	□	□	□	□	□	77.5	35.65	□	□	□	□	□	□	□	39.4	52.15	□	□	□	□	□	□	27.0	
2.40	□	□	□	□	□	□	□	585.8	18.49	□	□	□	□	□	□	□	76.0	35.99	□	□	□	□	□	□	□	39.1	52.49	□	□	□	□	□	□	26.8	
2.74	□	□	□	□	□	□	□	513.1	18.90	□	□	□	□	□	□	□	74.4	36.40	□	□	□	□	□	□	□	38.6	52.90	□	□	□	□	□	□	26.6	
3.40	□	□	□	□	□	□	□	413.5	19.24	□	□	□	□	□	□	□	73.1	36.74	□	□	□	□	□	□	□	38.3	53.24	□	□	□	□	□	□	26.4	
3.74	□	□	□	□	□	□	□	375.9	19.90	□	□	□	□	□	□	□	70.7	37.40	□	□	□	□	□	□	□	37.6	53.90	□	□	□	□	□	□	26.1	
4.15	□	□	□	□	□	□	□	338.8	20.24	□	□	□	□	□	□	□	69.5	37.74	□	□	□	□	□	□	□	37.3	54.24	□	□	□	□	□	□	25.9	
4.49	□	□	□	□	□	□	□	313.1	20.65	□	□	□	□	□	□	□	68.1	38.15	□	□	□	□	□	□	□	36.9	54.65	□	□	□	□	□	□	25.7	
5.05	□	□	□	□	□	□	□	278.4	20.99	□	□	□	□	□	□	□	67.0	38.49	□	□	□	□	□	□	□	36.5	54.99	□	□	□	□	□	□	25.6	
5.39	□	□	□	□	□	□	□	260.9	21.55	□	□	□	□	□	□	□	65.2	39.05	□	□	□	□	□	□	□	36.0	55.55	□	□	□	□	□	□	25.3	
5.80	□	□	□	□	□	□	□	242.4	21.89	□	□	□	□	□	□	□	64.2	39.39	□	□	□	□	□	□	□	35.7	55.89	□	□	□	□	□	□	25.2	
6.14	□	□	□	□	□	□	□	229.0	22.30	□	□	□	□	□	□	□	63.0	39.80	□	□	□	□	□	□	□	35.3	56.30	□	□	□	□	□	□	25.0	
7.50	□	□	□	□	□	□	□	187.5	22.64	□	□	□	□	□	□	□	62.1	40.14	□	□	□	□	□	□	□	35.0	56.64	□	□	□	□	□	□	24.8	
7.84	□	□	□	□	□	□	□	179.3	24.00	□	□	□	□	□	□	□	58.6	41.50	□	□	□	□	□	□	□	33.9	58.00	□	□	□	□	□	□	24.2	
8.25	□	□	□	□	□	□	□	170.4	24.34	□	□	□	□	□	□	□	57.8	41.84	□	□	□	□	□	□	□	33.6	58.34	□	□	□	□	□	□	24.1	
8.59	□	□	□	□	□	□	□	163.7	24.75	□	□	□	□	□	□	□	56.8	42.25	□	□	□	□	□	□	□	33.3	58.75	□	□	□	□	□	□	23.9	
9.15	□	□	□	□	□	□	□	153.7	25.09	□	□	□	□	□	□	□	56.0	42.59	□	□	□	□	□	□	□	33.0	59.09	□	□	□	□	□	□	23.8	
9.49	□	□	□	□	□	□	□	148.2	25.65	□	□	□	□	□	□	□	54.8	43.15	□	□	□	□	□	□	□	32.6	59.65	□	□	□	□	□	□	23.6	
9.90	□	□	□	□	□	□	□	142.0	25.99	□	□	□	□	□	□	□	54.1	43.49	□	□	□	□	□	□	□	32.3	59.99	□	□	□	□	□	□	23.4	
10.24	□	□	□	□	□	□	□	137.3	26.40	□	□	□	□	□	□	□	53.3	43.90	□	□	□	□	□	□	□	32.0	60.40	□	□	□	□	□	□	23.3	
10.90	□	□	□	□	□	□	□	129.0	26.74	□	□	□	□	□	□	□	52.6	44.24	□	□	□	□	□	□	□	31.8	60.74	□	□	□	□	□	□	23.1	
11.24	□	□	□	□	□	□	□	125.1	27.40	□	□	□	□	□	□	□	51.3	44.90	□	□	□	□	□	□	□	31.3	61.40	□	□	□	□	□	□	22.9	
11.65	□	□	□	□	□	□	□	120.7	27.74	□	□	□	□	□	□	□	50.7	45.24	□	□	□	□	□	□	□	31.1	61.74	□	□	□	□	□	□	22.8	
11.99	□	□	□	□	□	□	□	117.3	28.15	□	□	□	□	□	□	□	49.9	45.65	□	□	□	□	□	□	□	30.8	62.15	□	□	□	□	□	□	22.6	
12.55	□	□	□	□	□	□	□	112.0	28.49	□	□	□	□	□	□	□	49.4	45.99	□	□	□	□	□	□	□	30.6	62.49	□	□	□	□	□	□	22.5	
12.89	□	□	□	□	□	□	□	109.1	29.05	□	□	□	□	□	□	□	48.4	46.55	□	□	□	□	□	□	□	30.2	63.05	□	□	□	□	□	□	22.3	
13.30	□	□	□	□	□	□	□	105.7	29.39	□	□	□	□	□	□	□	47.8	46.89	□	□	□	□	□	□	□	30.0	63.39	□	□	□	□	□	□	22.2	
13.64	□	□	□	□	□	□	□	103.1	29.80	□	□	□	□	□	□	□	47.2	47.30	□	□	□	□	□	□	□	29.7	63.80	□	□	□	□	□	□	22.0	
									30.14	□	□	□	□	□	□	□	46.6	47.64	□	□	□	□	□	□	□	29.5	64.14	□	□	□	□	□	□	21.9	

© Anne Tréguier (haut) ; www.oregonfid.com (Documents and Manuals ; bas)

Figure 79 Modèle large tuner (haut), et position des jumpers selon l'inductance mesurée de l'antenne (bas). Ce modèle utilise des jumpers spécifiques. La photographie en haut à droite présente un exemple de réglage pour une inductance mesurée de 40.5 μH.

III. Les réglages de l'interrogateur

Lors de la mise en route du système, divers branchements et réglages doivent être effectués.

Le matériel

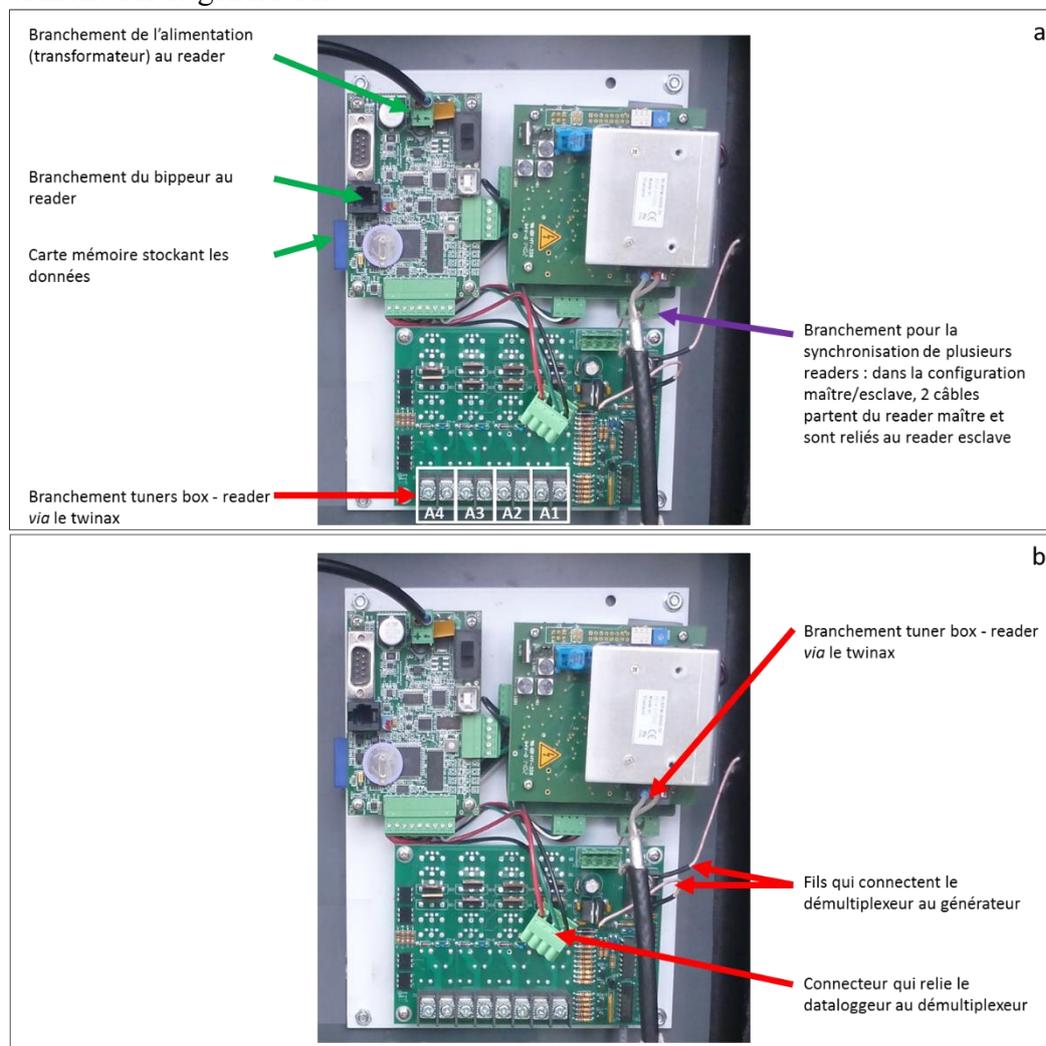
Pour construire un interrogateur, sont nécessaires :

- ▶ un boîtier étanche,
- ▶ des pictogrammes « Danger électrique »,
- ▶ une source d'énergie, communément :
 - une / des batteries ou
 - un transformateur, ainsi qu'un câble secteur et une prise secteur,
- ▶ un reader,
- ▶ un bippeur,

- ▶ un connecteur électrique avec des câbles de terre,
 - ▶ du twinax 100 OHMS,
 - ▶ une / des tuner boxes et un tournevis en céramique pour les réglages,
 - ▶ du câble audio (de diamètre 1.5, 2.5, 4 mm² par exemple ; selon la taille des antennes),
 - ▶ du tube PVC pression et de la colle,
 - ▶ des poteaux pour maintenir le cadre de l'antenne et positionner les tuner boxes, ainsi que des plaques en PVC pour bien maintenir le cadre de l'antenne en place.
- Et, en cas de synchronisation :
- ▶ du câble de sécurité 6 conducteurs blindé
 - ▶ des connecteurs électriques

Les branchements du reader

Le reader est branché à l'antenne grâce au twinax (Figure 80). Dans le cas où plusieurs antennes sont branchées sur le reader, le démultiplexeur est utilisé et le twinax de chaque antenne est branché sur chaque emplacement. Dans le cas où une seule antenne est branchée au reader, le démultiplexeur peut être débranché du datalogueur et du générateur. Le twinax est directement branché sur le générateur.



© Anne Tréguier

Figure 80 : les branchements effectués sur le reader si le démultiplexeur est utilisé (plusieurs antennes branchées, a) ou non (une seule antenne branchée, b). Les flèches vertes, rouges et violettes correspondent respectivement aux branchements usuels, ceux du twinax et ceux du câble de synchronisation.

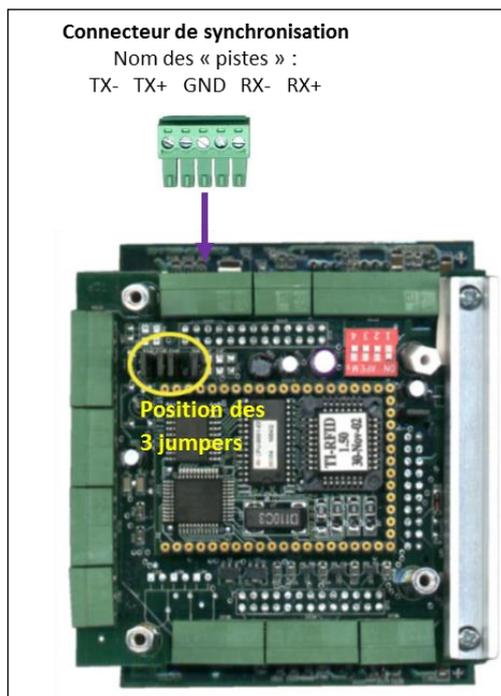
Le reader doit être paramétré selon le design du système global (nombre d'antennes, interrogation des antennes, ...). Pour cela, les commandes CG et MX sont utilisées.

La synchronisation de readers proches

Lorsque des antennes alimentées par différents readers sont proches les unes des autres (dans notre cas, distantes de moins de 100 m), les readers peuvent créer des interférences les uns envers les autres. Ces interférences causent du « bruit », qui est visuellement mis en évidence par l'allumage d'une diode orange du datalogger. Elles sont également enregistrables par la commande SS. Il est alors nécessaire de synchroniser les readers afin que leurs temps de charge et d'écoute soient synchrones.

Différents modes de synchronisation sont applicables selon les situations (wireless, wired, master/slave, master/slave with acknowledgment). Dans tous les cas :

- ▶ la position des jumpers situés au « verso » du reader (Figure 81) doit être vérifiée voire modifiée (Tableau 64) ;
- ▶ les readers doivent être configurés selon le mode de synchronisation sélectionné par la commande CGS;
- ▶ les readers doivent être reliés par un câble de synchronisation *via* un connecteur de synchronisation.



© Anne Tréguier
Figure 81 : Emplacement des jumpers à modifier selon le mode de synchronisation du reader

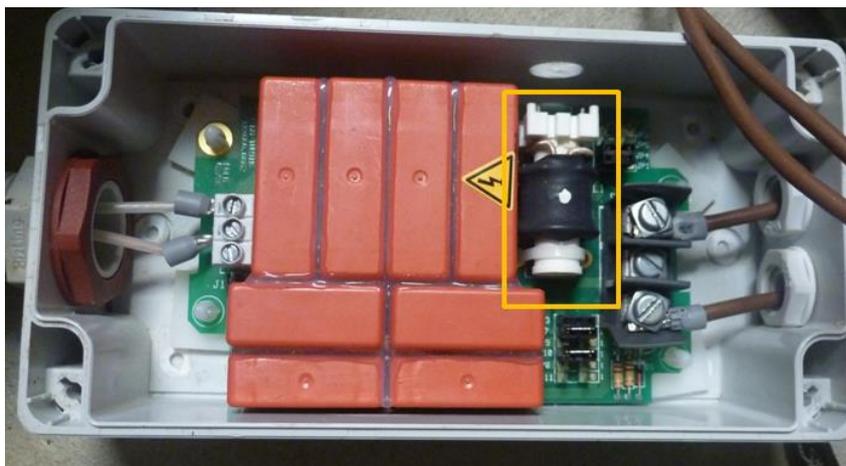
Tableau 65 : Position des jumpers et branchements selon le mode de synchronisation du reader pour une synchronisation maître/esclave without acknowledgment (commande CGS4 pour le maître et CGS5 pour l'esclave)

	MAITRE	ESCLAVES INTERMEDIAIRES	ESCLAVE TERMINAL
Position des jumpers	J12 → fermé J13 → ouvert J14 → fermé	J12 → ouvert J13 → ouvert J14 → ouvert	J12 → fermé J13 → fermé J14 → fermé
Jumpers observés au « verso » du reader			
Câble de synchronisation	TX- TX+	RX- RX+	RX- RX+
Connecteur de synchronisation observé au « recto » du reader			

© Anne Tréguier

Le réglage de l'antenne

Lorsque l'antenne est branchée sur le reader, la tuner box doit être réglée afin d'optimiser la détection. Ce réglage est effectuée à l'aide d'un tournevis en céramique afin d'éviter toute interférence. Il consiste à tourner la ferrite de la tuner box, jusqu'à ce que la LED clignote avec une fréquence maximale et que l'ampérage de l'antenne (Figure 82), renseignée par la commande SS du reader, est également maximal. Souvent, la position des jumpers selon l'inductance mesurée ne permet pas une optimisation du réglage de la tuner box à l'aide du tournevis. Il est donc nécessaire de positionner les jumpers selon une inductance voisine de celle mesurée et de régler de nouveau la tuner box à l'aide du tournevis.



© Anne Tréguier

Figure 82 : Ferrite d'une remote tuner (orange). Selon le réglage, les LED (à gauche de la tuner box) clignotent plus ou moins fréquemment.

• ANNEXE 2 : FICHES TECHNIQUES DES ENGIN DE PECHE



Fiche technique PIEGE



Verveux - maille 10 mm



	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Caractéristiques (cm)			Maille	
				Longueur	Largeur (étirée)	Hauteur (étirée)	(étirée)	
Paradière	filet	souple		460		75	2.0	4.0
Entonnoir	filet	souple	NON	80	107	80	2.0	4.0
Chambre 1	filet	souple	NON	80	50	50	2.0	4.0
	entrée	filet						
Chambre 2	filet	souple	NON	80	50	50	1.5	2.5
	entrée	filet						
Chambre 3	filet	souple	NON	80	50	50	1.0	2.0
	entrée	filet						
Total (sans paradière)	filet	souple	NON	32				

* variable

Caractéristiques particulières	<ul style="list-style-type: none"> - Les verveux sont "fait main", ce qui engendrent des irrégularités dans les dimensions (longueur) - Rétrécissement progressif du maillage de l'entrée vers la dernière chambre
--------------------------------	--

Figure 83 : Fiche technique de l'un des 4 types de verveux. Ils ne diffèrent que par la taille de la maille de la chambre 3 (10 mm ici contre 8 mm, 6 mm et 4 mm pour les 3 autres), modifiant alors la taille de mailles étirée (20 mm ici contre 14 mm, 14 mm, 10 mm).

Nasse plastique avec entonnoir



	Caractéristiques (cm)						
	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Longueur	Largeur	Hauteur	Maille
Paradière							
Entonnoir	grillage	rigide	NON	29	44	34	H 0.75 x 13.4
Chambre 1	grillage	rigide	OUI	39.5	25	25	H 0.75 x 13.4
	entrée grille	rigide		23	6.5	6.5	H 0.75 x 13.4
Chambre 2	grillage	rigide	OUI	69.5	25		H 0.75 x 13.4
	entrée grille	rigide		23	3	3	H 0.75 x 13.4
Chambre 3							
entrée							
Total (sans paradière)	grillage	rigide	OUI	138			

Caractéristiques particulières	- Peigne en plastique flexible à l'entrée de la seconde chambre - Maille rigide rectangulaire
--------------------------------	--

Figure 84 : Fiche technique des nasses plastiques avec entonnoir.

Nasse métallique sans entonnoir



	Caractéristiques (cm)						
	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Longueur	Largeur	Hauteur	Maille
Paradière							
Entonnoir							
Chambre 1	grillage	rigide		24	17	17	0.6
entrée	grillage	rigide	NON	11.5	4	4	0.6
Chambre 2	grillage	rigide		56	17	17	0.6
entrée	grillage	rigide	NON	13	5	5	0.6
Chambre 3							
entrée							
Total (sans paradière)	grillage	rigide	NON	80	17	17	0.6

Caractéristiques particulières	<ul style="list-style-type: none"> - Système de fermeture à élastique remplacé par de la chambre à air, plus solide dans le temps - Système d'anneaux métalliques et soudure des entonnements - Peigne de non retour métallique sur l'entrée de la seconde chambre
--------------------------------	---

Figure 85 : Fiche technique des nasses métalliques sans entonnoir avec peigne de non retour

Prototype Nasse métallique sans entonnoir - Filet 12 mm Serflex
(Nasse métallique sans entonnoir modifiée)



	Caractéristiques (cm)						
	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Longueur	Largeur (étirée)	Hauteur (étirée)	Maille
Paradière							
Entonnoir							
Chambre 1	grillage filet	rigide	NON	80	17	17	1.2
entrée		souple		10	7 10	7 10	1.0
Chambre 2							
entrée							
Chambre 3							
entrée							
Total (sans paradière)	grillage	rigide	NON	80	17	17	

Caractéristiques particulières	<ul style="list-style-type: none"> - 1 unique chambre - une entrée large - une maille large => demande d'un nouveau prototype - La bourgne est assemblée à l'aide d'anneaux métallique mais aussi de colliers de serrage type SERFLEX, permettant de limiter les blessures
---------------------------------------	--

Figure 86 : Fiche technique de l'un des deux premiers prototypes proposés par notre fournisseur. Ces deux prototypes ne diffèrent que par leur système d'assemblage : cette fiche correspond à celui dont l'assemblage est réalisé grâce à des serflex et non des anneaux.

Prototype Nasse métallique sans entonnoir - Filet 5 mm Soudures
(Nasse métallique sans entonnoir modifiée)



	Caractéristiques (cm)							
	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Longueur	Largeur (étirée)		Hauteur (étirée)	Maille
Paradière								
Entonnoir								
Chambre 1	grillage	rigide		24	17	17		0.6
entrée	grillage	rigide	NON	11.5	4	4		0.6
Chambre 2	grillage	rigide		56	17	17		0.6
entrée	filet	souple	NON	11.5	4.5 5	4.5 5		0.4-0.5
Chambre 3								
entrée								
Total (sans paradière)	grillage	rigide	NON	80	17	17		

Caractéristiques particulières	<ul style="list-style-type: none"> - L'entrée de la chambre 2 est conçu avec du filet tendu par 4 fils rejoignant l'extrémité de la chambre. Ce type de conception semble mieux adapté que le "peigne" pour le bien-être des anguilles. - Durée de vie du filet à contrôler
--------------------------------	---

Figure 87 : Fiche technique du troisième prototype proposé par notre fournisseur.

Prototype Bourgne filet 12 mm modifiée "bec de canard"



	Caractéristiques (mm)						
	Matière	Rigide - souple	"Ombrage"	Longueur	Largeur (étirée)	Hauteur (étirée)	Maille (diagonal étirée)
Paradière							
Entonnement							
Chambre 1 entrée	grillage	rigide	NON	240	170	170	6 7,3
	grillage	rigide		115	40	40	6 7
Chambre 2 entrée	grillage	rigide	NON	115	170	170	6 7,3
	filet	souple		575	45 50	45 50	4-5 10
Chambre 3 entrée							
Total (sans paradière)	grillage	rigide	NON	800	170	170	12 21

Caractéristiques particulières	2 chambres Le deuxième entonnement de la bourgne a été modifié avec un anchon PVC+2guideau plastique afin de pincer la fin de l'entonnement et du filet maille de 4mm.
---------------------------------------	---

Figure 88 : Fiche technique de la bourgne modifiée type « bec PVC »

• ANNEXE 3 : PROTOCOLE DE MODIFICATION DES BOURGNES A ANGUILES TYPE « BEC PVC »

Protocole de modification des bourgnes à anguilles

P. Rault, S. Allou

U3E, INRA, Pôle Gest'Aqua AFB-INRA, 65 rue de Saint Brieuc, CS, 35042 Rennes Cedex
AFB, Pôle Gest'Aqua AFB-INRA, 65 rue de Saint Brieuc, CS, 35042 Rennes Cedex

Objectifs :

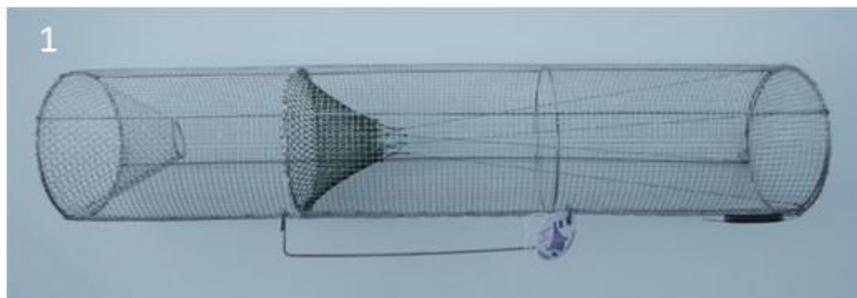
La fiche technique suivante présente la modification d'une bourgne à anguilles, utilisée dans le protocole de quantification des anguilles en milieu profond. Différentes étapes sont détaillées dans le but d'équiper l'entonnement central d'un système d'anti-retour permettant de limiter l'échappement des anguilles par cette sortie.

Matériel nécessaire :

1. Bourgne à anguilles métallique équipée avec un entonnement central en filet de maille 6 mm. Longueur 80 cm, diamètre 17 cm

Contact fournisseur :
SAS Auterie Devaud
10 rue d'Aquitaine, 24270 PAYZAC
Tél : 05.53.62.05.39 - Fax : 05.53.52.25.81
E-Mail : auterie-filets@wanadoo.fr
Site : www.auterie-devaud.com

Référence produit : Bourgnes SP 6mm





- 2. Tube PVC : section externe 40 mm ; section interne 36 mm
- 3. Baguettes PVC : section 3 mm
- 4. Filet à maille de 4-5 mm
- 5. 1 collier de serrage plastique : largeur 3,6 mm ; longueur 180 mm
- 6. 8 colliers de serrage plastique : largeur 3,6 mm ; longueur 140 mm
- 7. Ficelle, 8. mètre, 9. papier de verre, 10. pinces fines, 11. pinces coupantes, 12. ciseaux, 13. pistolet à colle et 14. scie

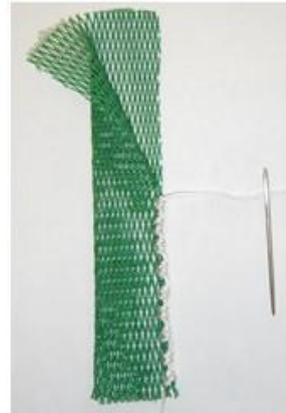
Etape 1

Couper à partir du tube PVC un manchon de 2 à 3 cm de hauteur avec la scie.
 Couper deux baguettes PVC de longueur 13 cm.
 Plier légèrement les baguettes PVC sur une des extrémités, sur un angle d'environ 10-15 degrés, afin qu'elles maintiennent le filet tendu.
 Poncer l'extérieur du manchon PVC avec du papier de verre pour favoriser l'adhérence de la colle.
 Coller le côté plié des deux baguettes PVC à l'extérieur du manchon PVC.



Etape 2

Découper un rectangle de filet de 5,5 cm de large et 16 cm de longueur (non tendu). Effectuer une jointure des deux bords, dans le sens de la hauteur du filet, pour constituer un tube. Pour cela, effectuer deux nœuds simples à chaque nouvelle maille à l'aide d'un fil et une aiguille.



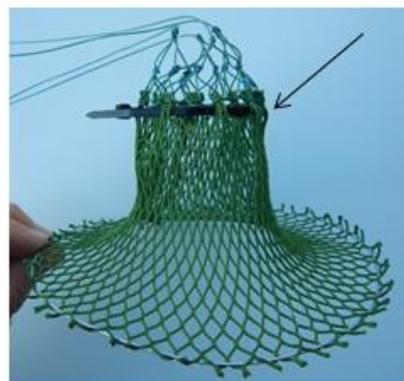
Etape 3

Enfiler ce tube de filet sur le manchon PVC puis sur les baguettes. Coller le filet au manchon PVC. Fixer également le filet au haut des baguettes PVC par quelques points de colle.



Etape 4

Démonter l'entonnoir central de la bourgne en coupant les colliers de serrage d'origine. Laisser intacts les quatre fils de maintien du filet sur la bourgne. Sortir l'entonnoir en filet de la bourgne. Insérer le collier de serrage long dans le filet, sans le serrer.



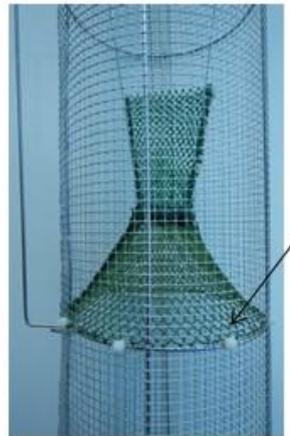
Etape 6

Raccorder le manchon à l'embout du filet et serrer le collier plastique pour que le raccord soit solide.



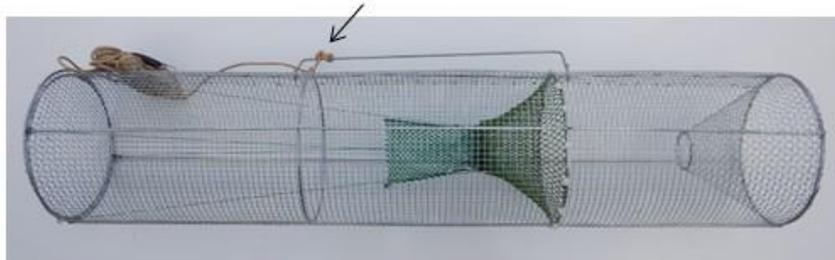
Etape 7

Remettre l'arceau du filet au contact de l'armature circulaire la plus proche de l'entonnoir grillagé.
Fixer l'arceau et l'armature ensemble à l'aide des 8 petits colliers de serrage.
Serrer progressivement les colliers pour répartir la tension sur le pourtour et que l'armature de l'entonnoir s'adapte bien à celle de la bourgne.
Vérifier la tension correcte du filet par les ficelles.



Etape 8

Fixer une cordelette à la poignée pour pouvoir attacher la bourgne à la rive et la récupérer sans problème.
La bourgne est maintenant prête à servir.



Avec le soutien financier de

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

www.afbiodiversite.fr



www.inra.fr