CFR Rennes

Mémoire de fin d'études

D'ingénieur de l'institut national supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement

Spécialisation sciences halieutiques et aquacole, preparée à AgrocampusOuest

(Option Ressources et Ecosystème Aquatiques)

2020-2021



Caractérisation de la dynamique de dévalaison de l'anguille européenne dans un canal de drainage camarguais

Esther Mollier

Président du jury et enseignant référent : Etienne Rivot

Maîtres de stages : Delphine Nicolas et Colin Bouchard

Membres du jury : Louis Day, enseignante dans l'UMR Ecologie et santé des écosystèmes (Agrocampus) Ouest et Laurent Beaulaton, chef du pôle R&D pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement (OFB, INRAE, Institut Agro, UPPA)

Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie mes encadrants de stage Delphine NICOLAS, chargée de recherche à la Tour du Valat, et Colin BOUCHARD, chercheur post-doctorant dans l'UMR ECOBIOP, pour m'avoir guidé dans ce travail. Merci à Delphine pour sa disponibilité, sa confiance et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion tout au long de ce stage. Merci à Colin pour son aide, ses conseils et ses précieuses connaissances en modélisation. J'en profite aussi pour saluer sa patience sans faille face à mes codes parfois un peu fouillis.

Je tiens à remercier Etienne RIVOT, professeur principal de la spécialité REA, pour l'aide qu'il m'a fournie et les connaissances qu'il a su me transmettre. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils.

Merci à Emmanuelle MIGNE, chargée de mission scientifique à la SNPN, pour sa collaboration en me fournissant une partie des données environnementales nécessaires à mes modèles.

Je souhaite particulièrement remercier Emilie LUNALAURANT pour sa bienveillance et sa disponibilité tout le long de ce stage. Son aide a été précieuse que ce soit pour les côtés pratiques du stage mais aussi pour la compréhension des données et des résultats.

Pour sa gentillesse, son humour et nos nombreuses discussions un grand merci à Pascal, Technicien de recherche à la Tour du Valat. Grâce à lui, j'ai découvert qu'il était possible d'accumuler le dépôt de café de 20années de service dans une seule et même tasse.

Pour finir, je souhaite remercier tous mes collocs et collègues en particulier Priya, Léa, Ethel, Juliette, Arthur et Hugo pour ces longues discussions à table le soir, pour leur humour et pour leur soutien sans faille dans les moments où le moral n'était pas au beau fixe. Merci à David pour m'avoir fait part de ses erreurs de réflexion pendant sa thèse. Ses idées ont alimenté ma réflexion pour rédiger la discussion.

Un grand merci à ma mère et mon père, pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, tout au long de mes études. Si je peux rédiger aujourd'hui ce mémoire, c'est grâce à eux.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction 1
2. Matériel et Méthodes 3
   2.1. Site d'étude 3
   2.2. Voies de migration des anguilles 4
   2.3. Suivi de la sous-population de l'anguille européenne dans le bassin du Fumemorte 5
      2.3.1. Echantillonage 5
      2.3.2. Suivi de l'échappement par pêche 6
      2.3.3. Détermination du stade de développement 6
      2.3.4. Calcul des CPUE 7
   2.4. Suivi télemetrique RFID des déplacements des anguilles 7
      2.4.1. Marquage des anguilles avec les marques RFID 8
      2.4.2. Présentation des stations d'écoute fixes 8
      2.4.3. Tests des capacités de détection 10
      2.4.4. Réestimations du nombre de détections 11
      2.4.5. Exploitation des données RFID 12
      2.4.6. Covariables environnementales 13
   2.5. Modèle sur les données de pêche et sur les données RFID 13
3. Résultats 17
   3.1. Analyse des données de dévalaison observées par pêche à la station AVAL 17
      3.1.1. Analyse graphique exploratoire 17
      3.1.2. Test des effets année, mois et sexe à l'aide d'un modèle Bayésien 18
   3.2. Capacités de detections des antennes RFID 22
   3.3. Analyse des enregistrements RFID d'individus marqués 23
      3.3.1. Comportement migratoire des anguilles 24
      3.3.2. Période de devalaison et temps de transit, le cas des individus marqués à l'AVAL 24
      3.3.3. Réestimation des données RFID 25
      3.3.4. Stades des anguilles detectées et lien avec les facteurs environnementaux 26
      3.3.5. Influence des facteurs environnementaux sur les détections RFID 27
4. Discussion 28
   4.1. Le suivi de la devalaison par pêche : une méthode passive sur du long terme 28
   4.2. Forte variabilité interannuelle des devalaisons et du sexe des argentées 29
   4.3. Une dynamique de dévalaison saisonnière, d'octobre à avril 29
   4.4. RFID : Une efficacité de détection variable dans le temps 30
   4.5. Facteurs d'influence saisonniere plutôt que déclencheur de la devalaison 31
   4.6. Autres limites à considérer 32
5. Conclusion 33

Bibliographie 34

Annexe 38

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Cycle de vie de l'anguille européenne A.anguilla 1

Figure 2: Carte représentant le fonctionnement hydrologique de l'île de Camargue. SMM : ville des Saintes Maries de la Mer, SDG : ville de Salins de Giraud. L'hydrosystème Vaccarès est défini comme l'ensemble des Etangs du Vaccarès, des Impériaux (IL), du Lion et de la Dame(LDL), des étangs et des marais des salins de Camargue et des bassins versants non poldérisés (en sombre) du Fumemorte (FUM) et du Roquemaure (ROQ). (Source : Tour du Valat) 4

Figure 3 : Représentations des principales voies de migration potentielles de l'anguille européenne pour (i) coloniser le bassin du Fumemorte (recrutement) et (ii) repartir en mer (dévalaison) 5

Figure 4: Schéma légendé d'un verveux. Source : Ifremer 5

Figure 5: Localisation des stations d'échantillonnage aux verveux dans le bassin du Fumemorte (en vert). La zone grisée représente le domaine de la Tour du Valat. La station F-1 correspond à la station du suivi ichtyologique mensuel sur le long-terme, la station 6

Figure 6: PIT Tag utilisé pour le suivi RFID 8

Figure 7: Marquage avec un transpondeur d'une anguille anesthésiée par laparotomie 8

Figure 8:Section transversale du canal du Fumemorte au niveau du pont des Garçines (représenté en beige) avec les dimensions des 2 antennes RFID à l'aval 9

Figure 9: Plan du point d'écoute RFID au niveau du pont des Garçines (1) et photo du site (2) avec a) antenne, b) container en bois avec panneaux solaires, batteries et coffrets R(Source image : Google Earth, 09/2019 et © DNS) 9

Figure 11: Section transversale du canal du Fumemorte au niveau du barrage à sel avec les dimensions des 4 antennes RFID 9

Figure 10:Plan du point d'écoute RFID au niveau du Barrage à sel (1) et photo du site (2). a) antenne, b) container en bois avec panneaux solaires, batteries et coffrets RFID (Source image : Google Earth, 09/2019 et © EMR) 9

Figure 13: Schéma explicatif du calcul de l'efficacité de détection avec les données de tests à la perche 11

Figure 12: Répartition des différents points de coordonnées (x,y) pour lesquels les tests de passage des transpondeurs sont effectués sur le site du pont des Garçines (7.a) du barrage à sel (7.b). La ligne rouge représente la forme des 2 antennes extérieures. 11

Figure 14: Méthode d'attribution des stades des anguilles détectées au RFID. 12

Figure 15: Evolution de la variance par rapport à la moyenne, obtenue par croisement de facteurs. En rouge la ligne représentant la condition Moyenne=Variance. 14

Figure 16:Code R pour la définition de mu, combinaison linéaire des effets. a) pour le modèle sur les données de pêche et b) pour les données RFID 15

Figure 17: Résumé schématique des deux modèles utilisés avec les données et les loi utilisées. ... 16

Figure 18:Histogramme du log de la somme des CPUE mensuelles des anguilles argentées mâles et femelles capturées à la station AVAL et effort de pêche associé (droite) 18

Figure 19: Proportion d'anguilles argentées mâles et femelles capturées à la station AVAL, selon les mois et les années 18

Figure 20: Résumé des posteriors des autres paramètres du modèle (sd,int_mu,alpha,phi) 20

Figure 21: Highest Posterior Density interval à 95 % des posteriors des paramètres alpha_années (effet année) et pourcentages de valeurs positives associés. La couleur noire indique que plus de 95 % des valeurs sont de mêmes signes que la médiane (symbolisée par le point). 20

Figure 22: Résumé des posteriors des paramètres alpha_mois (effet mois) et pourcentages de valeurs positives associés 21

Figure 23: Résumé des posteriors des paramètres alpha_sex_month (effet du sexe sur l'abondance d'un sexe) et pourcentages de valeurs positives associés 21
Figure 24: Nombre de détections du markertag de l'antenne Garçines Aval droite au cours du temps 22
Figure 25: Efficacités de détection des antennes mesurées à l'aide des markertags et des tests perche-tortue à la Station AVAL 22
Figure 26: Tracé de la régression Lœss pour les points de l'antenne Rive Gauche de Garçines Aval 23
Figure 27: Nombre total d'individus détectés par heure selon les mois de l'année et moyenne des efficacités de détection horaires des antennes (marker tags)..... 24
Figure 28: Pourcentage d'individus selon les vitesses de déplacement entre les deux stations et selon leur lieu de marquage..... 25
Figure 29: Réestimation des détections d'anguilles à l'aide des efficacités de détection markertag (rouge) et perche-tortue (bleu) 26
Figure 30: Nombre d'individus détectés et estimés au stade migrant selon le stade évolution temporelle des covariables environnementales 27
Figure 32: Résumé des posteriors des autres paramètres du modèle 28
Figure 31: Résumé des posteriors des paramètres alpha_temp, alpha_niv_eau, aplha_qmoy et pourcentages de valeurs positives associés 28

TABLES DES ANNEXES

Annexe I : Photo du dispositif tortue, utilisé pour passer un transpondeur à différents points dans le cadre de l'antenne pour tester son efficacité……..38

Annexe II : Signe des effets des différentes variables environnementales sur chaque antenne……...38

Annexe III : Part (en %) de la déviance expliquée par le modèle par rapport au modèle nul……...38

Annexe IV : Explication et précision sur les indicateurs utilisés pour évaluer et diagnostiquer les modèles……..39

Annexe V : Tableau résumé des nuages de points entre les efficacités obtenues au marker tags et celles du test perche-tortue……40

Annexe VI : Explications complémentaires sur le fonctionnement de la méthode loess ……..…..40

Annexe VII : Tableau résumé des plots de corrélations entre les efficacités obtenues au marker tag et celles du test perche-tortue …….. ……41

Annexe VIII : Consommations moyennes des antennes des Garçines et de la station AVAL……...….42

Annexe IX : Nombre d'anguilles détectées par jour et par antenne selon leur lieu de marquage……...43

Annexe X : Extrait du « Guide technique pour le terrain RFID de l'anguille » rédigé pendant le stage…….…..44

Annexe XI : Sorties des indicateurs utilisés pour le diagnostic du modèle sur données RFID avec covariables…….45

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ICES : International Council for the Exploration of the Sea

WGEEL : Working Group on Eels

IUCN : international union for conservation of nature

1. INTRODUCTION

L'anguille européenne *(Anguilla anguilla*) est un poisson migrateur catadrome c'est-à-dire qui se reproduit en mer et croît en eaux continentales. Après éclosion en mer des Sargasses, au niveau du Triangle des Bermudes (Tesch, Thorpe 2003a), la larve (dénommée leptocéphale) est transportée par les courants jusqu'aux côtes Européennes et Nord-Africaines. A l'approche du plateau continental, elle se métamorphose en civelle. Elle peut alors coloniser l'ensemble des milieux aquatiques continentaux : les fleuves, les rivières, les lacs ou les eaux saumâtres des lagunes. C'est le stade anguillette. Elle se sédentarise ensuite pour se nourrir et croître pendant plusieurs années. Durant cette phase de croissance pouvant durer de 2 à 20ans, l'individu est au stade jaune. L'anguille européenne connait ensuite une seconde métamorphose appelée « argenture ». Celle-ci entraine de nombreux changements physiologiques, morphologiques et anatomiques incluant l'apparition d'une robe argentée et le début de la croissance gonadique. Ce passage au stade argenté prépare les anguilles au grand voyage pour rejoindre leur lieu de reproduction (Figure 1).

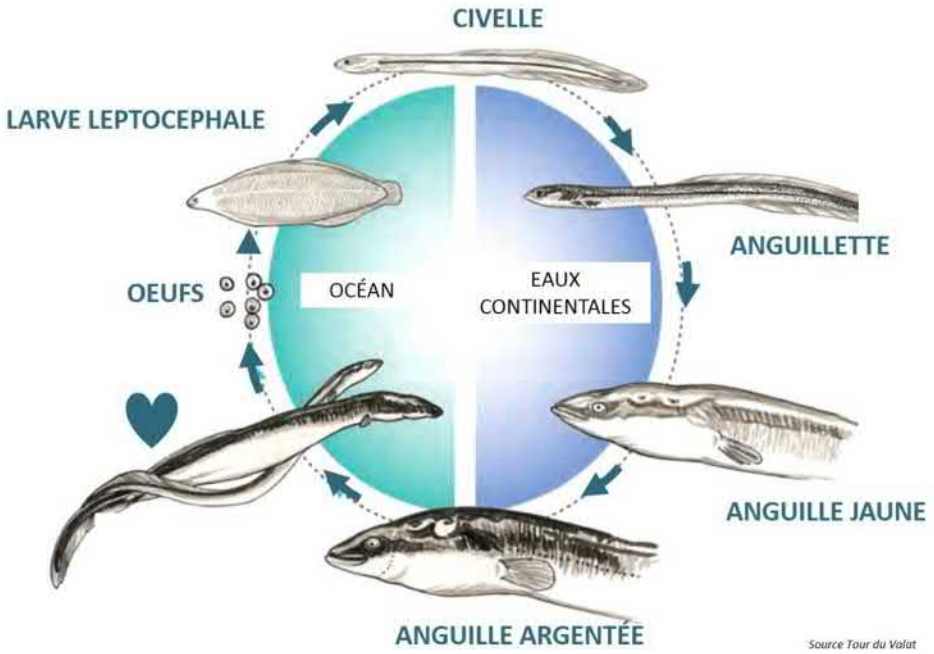


Figure 1: Cycle de vie de l'anguille européenne A.anguilla

Depuis le début des années 80, le stock de l'anguille européenne connaît un fort déclin à l'échelle de sa répartition spatiale (ICES WGEEL 2020). En effet, le cycle de vie complexe de cette espèce la rend particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, à la prédation, aux maladies et aux parasites, ainsi qu'à une large variété de pressions anthropiques telles que les barrières à la migration (barrages et centrales hydroélectriques), le braconnage, la dégradation et la perte d'habitats et les pollutions. Afin d'alerter et de mettre en place une stratégie de conservation, l'anguille européenne est classée depuis 2008 en danger critique d'extinction par l'IUCN (IUCN 2013) et bénéficie depuis 2007 de l'instauration de plans de gestion nationaux par les Etats membres de l'Europe (règlement n°1100/2007 du conseil européen). Conformément à ce règlement, les plans de gestion de l'anguille doivent garantir au niveau local un taux d'échappement d'au moins 40% de la biomasse pristine de pré-adultes qui auraient été produites par chaque

bassin hydrographique en l'absence d'impacts anthropiques. Les mesures peuvent porter sur les différents types de pêcheries, les obstacles à la circulation des anguilles, le repeuplement, la restauration des habitats et les contaminations, à la discrétion du pays. En France, un réseau de surveillance de l'état de la population de l'anguille européenne est également mis en place. L'hydrosystème lagunaire du Vaccarès, localisé en Camargue entre les deux bras du Rhône, est l'un des 11 systèmes retenus par le plan de gestion français pour suivre l'état de la population. Ce plan et le PLAGEPOMI (plan de gestion des poissons migrateurs) Rhône Méditerranée y fixent plusieurs objectifs dont le suivi de l'échappement.

La migration d'avalaison, ou dévalaison, constitue la dernière phase continentale du cycle de l'anguille. Son imprédictibilité et les barrières qui peuvent l'entraver ou la perturber ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs ces dernières années. Bien qu'il soit communément admis que l'intensité migratoire des anguilles argentées soit maximale en automne, ce phénomène est observable toute l'année (Acou, Boisneau, Feunteun 2009). En effet, la période secondaire d'échappement des anguilles argentées vers la mer pendant le printemps, quoique moins décrite, est fréquemment observée (Briand, Sauvaget, Eriau 2015; Lagarde et al. 2020; Verhelst et al. 2018). La migration d'avalaison est très liée aux facteurs environnementaux. Le départ des anguilles pour la mer semble répondre à des signaux déclencheurs bien particuliers. Parmi les facteurs souvent évoqués : la température, l'influence des crues, les phases lunaires (Haraldstad, Vollestad, Jonsson 1985; Vøllestad et al. 1986), la pression atmosphérique, la turbidité et le vent (Durif 2003a; Acou et al. 2008).

Malgré l'existence de nombreuses études qui documentent le mouvement des anguilles des rivières jusqu'à la mer, ces travaux se concentrent principalement sur la façade Atlantique. En effet, il a longtemps été suggéré que le stock d'anguilles européennes de Méditerranée ne contribuait pas à la reproduction de l'espèce (Kettle, Asbjørn Vøllestad, Wibig 2011). Mais les récentes preuves du passage d'anguilles argentées par le détroit de Gibraltar ont démontré la capacité de cette population à rejoindre son lieu de reproduction (Amilhat et al. 2016). Or, les lagunes méditerranéennes constituent un habitat important pour l'anguille européenne, avec des biomasses estimées de7à 30 kg.ha (Bevacqua et al. 2019; Amilhat et al. 2008), largement supérieures à celles rapportées pour les rivières (Amilhat et al. 2008). Ces informations renforcent l'idée que les pays Méditerranéens ont un rôle à jouer dans la conservation et le rétablissement du stock de l'anguille. Les connaissances sur les mouvements de dévalaison dans les pays du pourtour méditerranéen restent rares et le rôle des facteurs environnementaux sur le déclenchement de cette migration demeure encore obscur.

Certaines études menées dans des habitats lentiques comme des lagunes (Dainys et al. 2017; Charrier et al. 2010), des lacs (Trancart et al. 2018; Dainys et al. 2017) ou des systèmes poldérisés[1] (Verhelst, Reubens, et al. 2018) se sont intéressées aux liens entre les paramètres environnementaux et la dévalaison des anguilles européennes. Tandis que la plupart de ces études retrouvent des effets environnementaux similaires à ceux précédemment cités pour les milieux lotiques, Trancart et al. (2018) identifie l'augmentation du niveau d'eau et l'ouverture de certains ouvrages comme les écluses comme facteurs déclencheurs de la dévalaison.

Depuis 1993, la population d'anguille d'un canal de drainage camarguais, le canal du Fumemorte, fait l'objet d'un suivi scientifique. À partir de 2001, un suivi des individus en capture-marquage-recapture (CMR) est mis en place pour mieux caractériser la dynamique

[1] Un système poldérisé fait référence ici à un milieu où le réseau hydrographique a été artificialisé, avec une gestion de l'eau contrôlée et des connexions modifiées. Les écoulements peuvent ne plus être gravitaires et déviés par pompage.

de cette sous population et d'estimer des taux d'échappement (Acou et al. 2003; Bevacqua et al. 2006). Afin de mieux comprendre la dynamique des déplacements migratoires de l'anguille, un suivi télémétrique par radio-identification (*Radio Frequency Identification – RFID)* a été installé en 2019. Ce dispositif permet, en théorie, de suivre en continue le passage des anguilles marquées en différents points d'écoute fixes. L'installation de ce type de suivi RFID à l'intérieur d'un système lagunaire, pouvant être soumis à de fortes variations environnementales et notamment, périodiquement, à des remontées de salinité, constitue une innovation dont l'efficacité doit être démontrée.

Afin de caractériser la dynamique de dévalaison des anguilles dans le canal du Fumemorte, deux approches seront développées dans cette étude, (i) l'une à partir des données de pêche acquises à proximité de l'embouchure du Fumemorte depuis 2001, (ii) l'autre à partir du suivi RFID déployé depuis début 2019. Les objectifs de l'analyse des 20 années de pêche visent à déterminer si des périodes de l'année sont plus favorables à la dévalaison et à étudier leur éventuelle variabilité inter- et intra-annuelle. Après avoir vérifié et évalué le fonctionnement et les efficacités de détections des stations d'écoute RFID, les enregistrements d'individus marqués seront analysés afin d'identifier d'éventuels pics de dévalaison et de tester l'influence de facteurs environnementaux. Des modèles Bayésiens seront développés dans les 2 approches afin de tester, respectivement, (i) les effets mois et années, et (ii) les effets de facteurs environnementaux.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITE D'ETUDE

L'île de Camargue constitue la partie centrale du delta du Rhône et se caractérise par un hydrosystème complexe constitué de plusieurs étangs. À l'est et à l'ouest, cette île est délimitée par les défluents du Rhône (Grand et Petit Rhône) qui sont endigués pour assurer une protection contre les inondations lors de fortes crues. Au sud, une digue dite « à la mer » protège l'île des tempêtes de la mer. Ainsi, les connexions hydrauliques avec les systèmes adjacents, d'eau douce ou marine, sont restreintes et contrôlées en fonction des usages. Les échanges avec la mer se limitent à deux voies principales : au Sud-Ouest avec un pertuis barré par un ouvrage constitué de 13 martelières : le pertuis de la Fourcade, et au Sud-Est, aux étangs et marais des Salins de Camargue (EMSC). Les EMSC constituent une nouvelle voie de connectivité hydrobiologique seulement depuis les années 2010, suite à la déprise industrielle de l'exploitation du sel, et à des travaux de restauration. La fonctionnalité de cette voie de communication de faible profondeur est très tributaire des conditions météorologiques. L'apport en eau douce s'effectue majoritairement par un réseau de pompage qui permet d'irriguer l'ensemble des parcelles agricoles du delta (Figure 2). Les eaux d'irrigation sont acheminées dans des réseaux de drainage qui s'écoulent gravitairement en direction de la dépression centrale de l'île de Camargue : l'étang du Vaccarès. Afin de limiter les risques d'inondation et d'assurer le bon fonctionnement écologique du delta, une large partie des bassins agricoles ont été poldérisés, c'est-à-dire que leurs eaux de drainage sont repompées au Rhône. Ils sont donc déconnectés du système Vaccarès (Figure 2). Les bassins versants non poldérisés et les étangs du Vaccarès, des Impériaux et des EMSC forment l'hydrosystème lagunaire du Vaccarès.

Le bassin de Fumemorte, situé à l'Est de l'étang du Vaccarès, est le principal bassin versant non poldérisé. Ce bassin (68km²) collecte les eaux de drainage d'un réseau

complexe de canaux et de fossés d'une longueur totale de 400km (Chauvelon 1998). Le bassin de Fumemorte est alimenté par 15 stations de pompage au Rhône. Majoritairement d'avril à octobre, ces stations fournissent de l'eau douce d'irrigation qui alimente les cultures (riziculture, maraichage), les élevages (taureaux, chevaux) et les marais destinés à la chasse. Les eaux de drainage, sont acheminées gravitairement *via* le principal canal du Fumemorte, dans l'étang du Vaccarès.

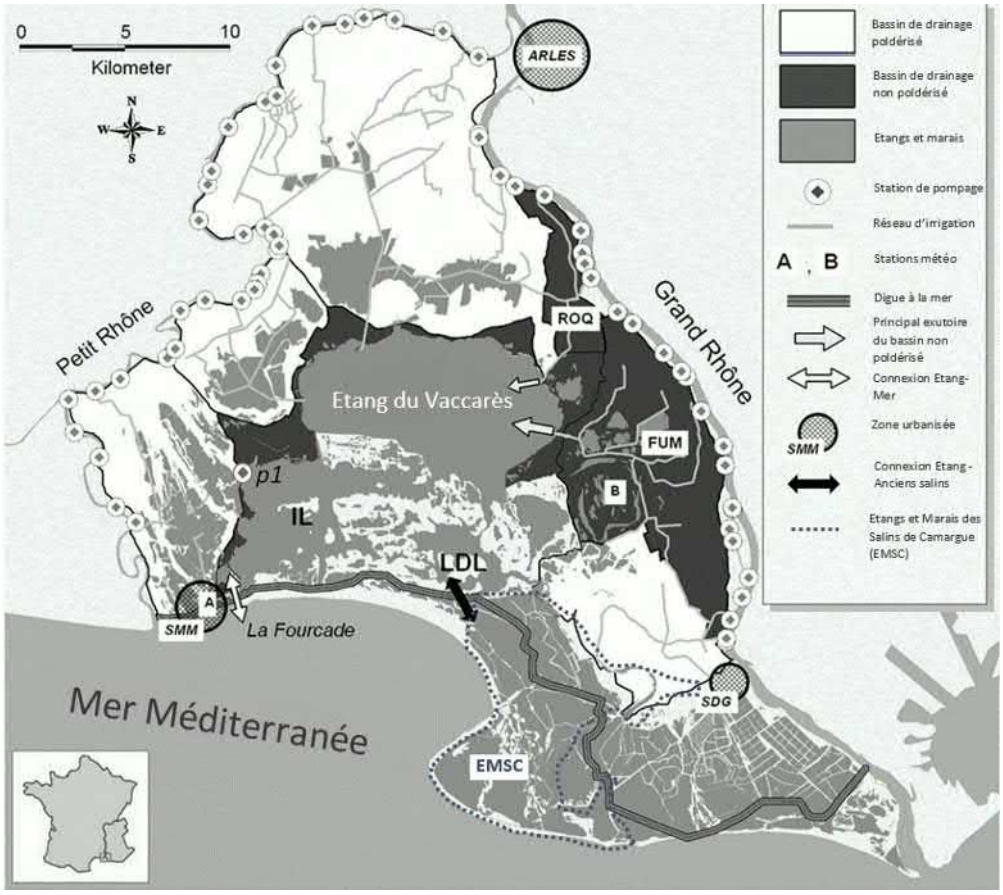


Figure 2: Carte représentant le fonctionnement hydrologique de l'île de Camargue. SMM : ville des Saintes Maries de la Mer, SDG : ville de Salins de Giraud. L'hydrosystème Vaccarès est défini comme l'ensemble des Etangs du Vaccarès, des Impériaux (IL), du Lion et de la Dame(LDL), des étangs et des marais des salins de Camargue et des bassins versants non poldérisés (en sombre) du Fumemorte (FUM) et du Roquemaure (ROQ). (Source : Tour du Valat)

2.2. VOIES DE MIGRATION DES ANGUILLES

Au sein de l'hydrosystème du Vaccarès, le recrutement en civelles se fait essentiellement *via* le pertuis de la Fourcade (Lambremon et al. 2021; Bouchard et al. soumis). Les civelles peuvent aussi être recrutées *via* les EMSC (Nicolas, 2018) ou par le réseau de pompage (Poizat et al., 1999). Pour repartir en mer, les anguilles argentées du Fumemorte doivent d'abord passer par l'étang du Vaccarès puis par les étangs inférieurs pour enfin rejoindre la mer *via* le pertuis de la Fourcade ou *via* les EMSC (Figure 3).

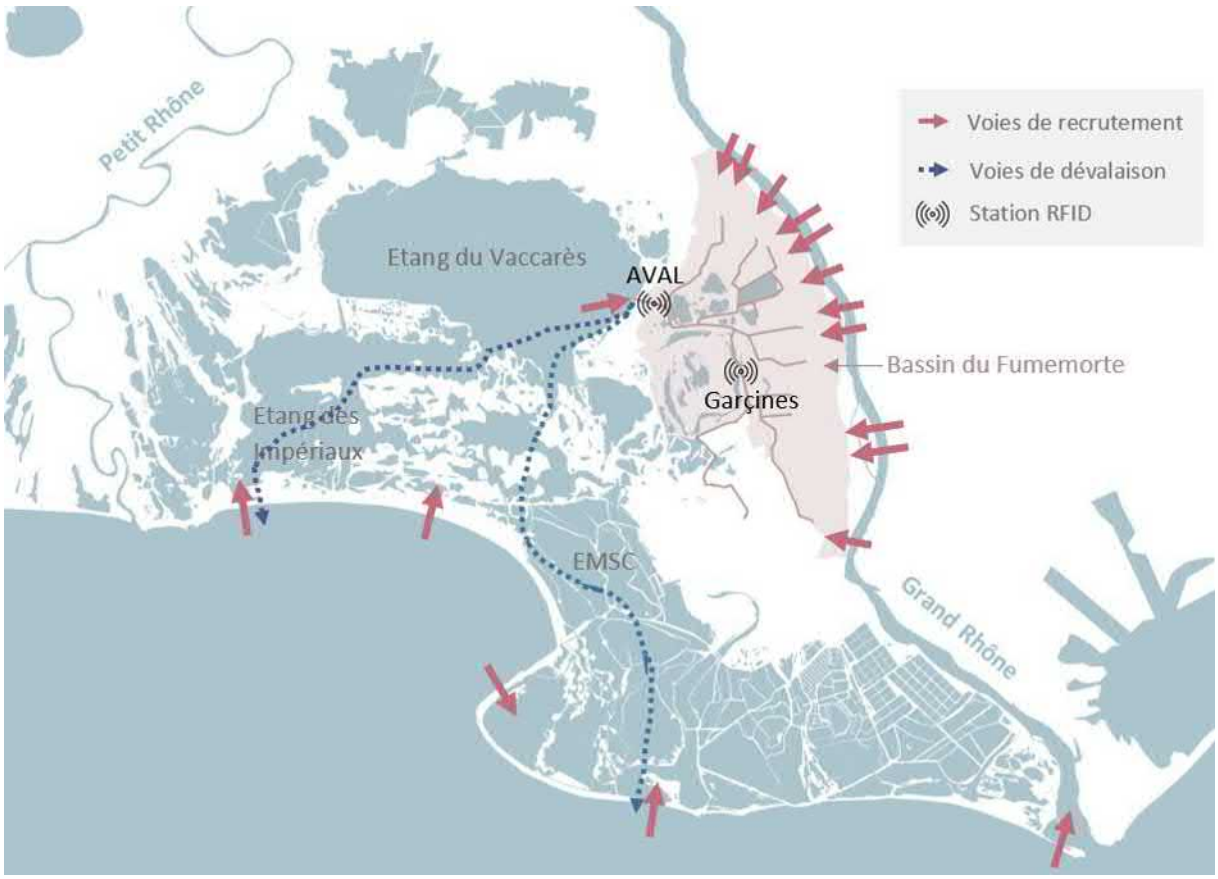


Figure 3 : Représentations des principales voies de migration potentielles de l'anguille européenne pour (i) coloniser le bassin du Fumemorte (recrutement) et (ii) repartir en mer (dévalaison)

2.3. SUIVI DE LA SOUS-POPULATION DE L'ANGUILLE EUROPEENNE DANS LE BASSIN DU FUMEMORTE

2.3.1. ECHANTILLONAGE

Dans le canal du Fumemorte, au niveau de la réserve régionale de la Tour du Valat, plusieurs sites d'échantillonnage (Figure 5) sont suivis à l'aide d'engins passifs : des verveux. Ces pièges sont constitués de poches cylindriques (ou coniques), montées sur des cerceaux et complétées par des ailes (ou guideaux) (Figure 4). A chaque station, deux verveux sont placés en tête à queue, de manière à barrer toute la section transversale du canal. Les ailes du verveux forment un entonnoir qui guide les poissons vers les goulets du verveux où ils se retrouvent piégés.

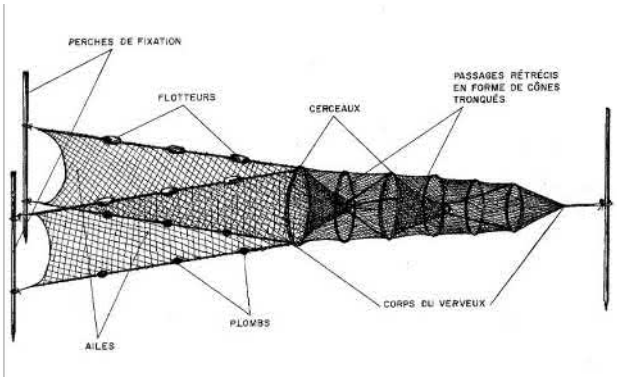


Figure 4: Schéma légendé d'un verveux. Source : Ifremer

Depuis le début des années 90, plusieurs stations d'échantillonnages ont été mises en place (Figure 5) parmi lesquelles certaines ont été échantillonnées mensuellement jusqu'à aujourd'hui (Fume 1 depuis 1993 et Fume Bon depuis 2013).

Depuis 2001, la sous-population d'anguilles du Fumemorte est suivie en capture-marquage-recapture (CMR). Tous les individus capturés de plus de 15cm sont marqués en sous-cutané avec un transpondeur de 6mm de longueur. Ce transpondeur, aussi appelé PIT-tag (*Passive Integrated Transponder*) est composé d'une puce électronique contenant un code unique et d'une antenne en cuivre insérée dans une capsule en verre. Cette marque est dite passive car elle ne nécessite pas de batterie et n'émet pas de signal par elle-même. Elle a une durée de vie quasi illimitée. Une fois marqués, les individus sont relâchés, au niveau du pont des Garçines jusqu'en janvier 2019, puis au niveau de la station Fume_1 (F_1, Figure 5).

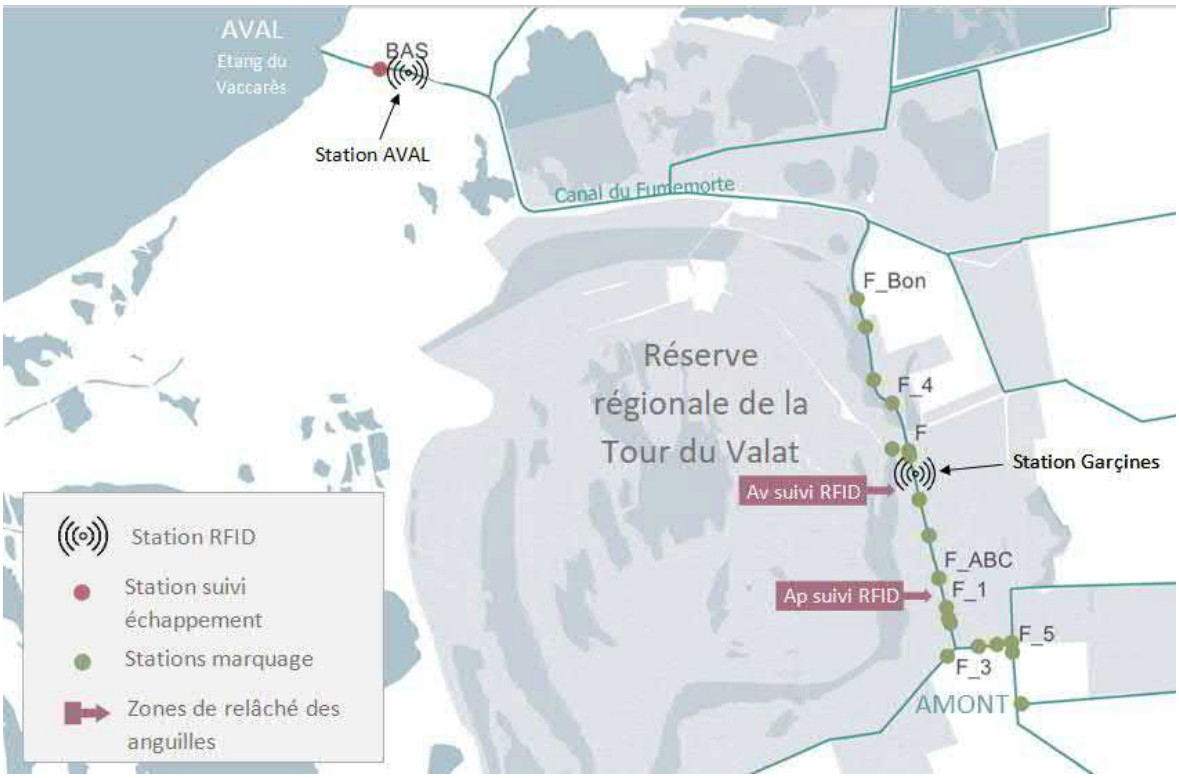


Figure 5: Localisation des stations d'échantillonnage aux verveux dans le bassin du Fumemorte (en vert). La zone grisée représente le domaine de la Tour du Valat. La station F-1 correspond à la station du suivi ichtyologique mensuel sur le long-terme, la station

2.3.2. SUIVI DE L'ECHAPPEMENT PAR PECHE

Afin d'évaluer le taux d'échappement du bassin du Fumemorte, un filet a été placé à partir de 2001 à proximité de l'embouchure du canal du Fumemorte, à la station « AVAL», au niveau du barrage à sel (BAS, Figure 5). Ce barrage, en place jusqu'à l'automne 2012, permettait de limiter la pénétration des eaux saumâtres du Vaccarès dans le système du Fumemorte. Cette structure a ensuite été enlevée du fait de son mauvais état. Le filet a été mis en place le plus souvent possible, en continu, de 2001 à 2016. Les relèves ont été effectuées à différentes fréquences par un pêcheur professionnel basé à proximité immédiate du site d'échantillonnage : tous les 24h, 48h, 72h, une fois par semaine, une fois toutes les deux semaines et parfois même jusqu'à une fois toutes les 3 semaines. Suite au ralentissement de l'activité de ce pêcheur, l'effort de pêche a été relâché entre 2016 et 2019. La Tour du Valat a repris plus assidument ce suivi en plaçant ce même filet d'octobre à avril, depuis 2020.

2.3.3. DETERMINATION DU STADE DE DEVELOPPEMENT

Toutes les anguilles capturées sont mesurées (longueur totale) et pesées (biomasse). Les individus de moins de 30cm sont considérés comme anguillettes ou anguilles jaunes

indifférenciées. Pour les anguilles de plus de 30cm, des mesures supplémentaires sont relevées afin de déterminer le stade de développement.

De 2001 à 2005, le stade de développement (jaune ou argenté) fut déterminé avec l'application de l'indice oculaire de Pankhurst (Pankhurst 1982), qui nécessite la mesure des diamètres verticaux et horizontaux des yeux. A partir de 2005, la longueur de la nageoire pectorale fut en plus systématiquement relevée afin d'appliquer l'indice EELREP (Durif et al. 2005) qui permet de décrire plus finement le stade de développement :

- **I :** Indéterminé ;
- **FII :** Femelle jaune, toujours en croissance ;
- **FIII :** Femelle pré-migrante, chez qui les gonades commencent à se développer ;
- **FIV :** Femelle argentée migrante, qui cesse de s'alimenter avant de migrer ;
- **FV :** Femelle argentée migrante, ayant un tractus digestif régressé et des nageoires pectorales allongées
- **MII :** Mâle argenté migrant.

Néanmoins, des dissections entreprises dans le cadre d'études du parasitisme (Lefebvre et al. 2002; Lefebvre, Contournet, Crivelli 2007) et la disponibilité de l'ensemble des mesures complètes (longueur totale, longueur de la nageoire pectorale et diamètres des yeux) pour bon nombre d'individus a permis d'avoir des informations le plus souvent complètes (degré d'argenture et sexe) pour la plupart des anguilles capturées entre 2001 et 2005.

L'étude portant sur la dynamique de dévalaison, on s'intéresse ici aux stades argentés migrants (mâles et femelles) c'est-à-dire FIV, FV, MII. Les stades I, FII, FIII ainsi que les anguillettes sont considérés comme « non argentés ».

2.3.4. CALCUL DES CPUE

L'analyse des CPUE (Captures par unités d'effort) permet d'avoir une indication standardisée de l'abondance des anguilles en fonction de l'effort de pêche, qui correspond à la durée de pose d'un engin. Les CPUE sont calculées pour 24h selon la formule suivante :

$$CPUE = \frac{Nb\ de\ captures * 24h}{temps\ de\ pause\ du\ filet}$$

Les CPUE ont été calculées en sommant le nombre d'individus par mois et par année puis en divisant par l'effort total appliqué à la période. Ce calcul a été fait pour l'ensemble des anguilles « argentées » et pour les anguilles argentées par sexe (mâles et femelles). Une log-transformation des CPUE (log(CPUE+1)) a été appliquée afin de limiter l'influence des quelques valeurs extrêmes. Les CPUE sont uniquement utilisées dans les représentations graphiques de ce rapport (pas pour les modèles qui utilisent les données d'abondance).

2.4. SUIVI TELEMETRIQUE RFID DES DEPLACEMENTS DES ANGUILLES

Afin de suivre les déplacements longitudinaux des anguilles jaunes et argentées dans le canal du Fumemorte, un suivi télémétrique par radiofréquence, dit RFID (*Radio-Frequency Idendification*), a été déployé. L'identification par radiofréquence permet l'identification automatique d'individus marqués qui passent à proximité d'un interrogateur produisant un rayonnement radio fréquence. Ici, il s'agit d'une antenne constituée d'un cadre placé en

travers du cours d'eau. Ce dispositif peut s'adapter à une large gamme de contextes, depuis la petite rivière aux passes à poissons présentes sur les grands fleuves. A cela s'ajoutent d'autres avantages à savoir la durabilité des antennes et le faible coût des transpondeurs utilisés pour marquer les poissons (moins de 3€ la marque).



Figure 6: PIT Tag utilisé pour le suivi RFID

Pour être identifiés par ces dispositifs, les poissons doivent être au préalable équipés d'une marque similaire à celle utilisée pour les suivis CMR. Les transpondeurs utilisés en RIFD sont néanmoins plus grands (23mm) afin d'augmenter leur portée de lecture (Figure 6). Ils sont réactifs aux basses fréquences (une centaine de kilohertz) qui permettent la communication dans l'eau. Le protocole normatif de ce système (*HDX, halfdupleX*) consiste à ce que l'antenne envoie un signal radio pour exciter l'éventuel PIT Tag se trouvant dans son champ de détection, puis de l'écouter pour récupérer son numéro d'identification unique.

2.4.1. MARQUAGE DES ANGUILLES AVEC LES MARQUES RFID

Entre octobre et avril, lorsque les températures sont inférieures à 16°C pour limiter les risques d'infection, des anguilles de plus de 30cm sont équipées avec un transpondeur inséré par laparotomie sous anesthésie (Figure 7). Ce protocole de marquage fait l'objet d'une autorisation d'utilisation d'animaux à des fins expérimentales octroyée par le ministère de la Recherche. Depuis la mise en route des stations d'écoute en février 2019, les individus marqués sont relâchés en amont de la station du Fume_1 (et des stations d'écoute RFID, Figure 5).



Figure 7: Marquage avec un transpondeur d'une anguille anesthésiée par laparotomie

2.4.2. PRESENTATION DES STATIONS D'ECOUTE FIXES

Deux stations d'écoute fixes ont été installées dans le canal du Fumemorte :

Sur le pont des Garçines

Ce premier point d'écoute est situé au cœur du secteur où les individus sont capturés et marqués. Sur ce site, 2 séries de 2 antennes ont été installées de part et d'autre pont, de manière à renseigner le sens du passage d'un individu marqué (vers l'amont ou vers l'aval). Les deux antennes (Antenne 1 et Antenne 2) d'un côté du pont, amont ou aval (Nommées respectivement Garçines Amont et Garçines Aval) (Figure 8) sont reliées à un boitier RFID qui est alimenté par deux panneaux solaires (Figure 9). Sur ce site, les antennes mesurent 3m de largeur sur 1m50 (Figure 9).

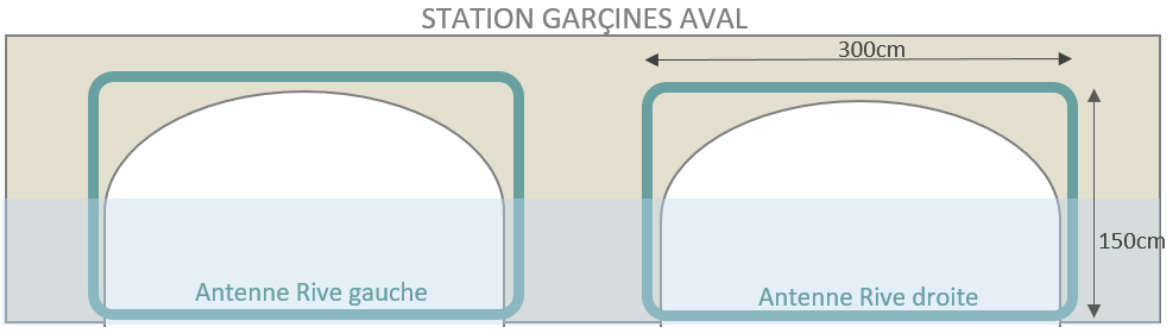


Figure 8: Section transversale du canal du Fumemorte au niveau du pont des Garçines (représenté en beige) avec les dimensions des 2 antennes RFID à l'aval



Figure 9: Plan du point d'écoute RFID au niveau du pont des Garçines (1) et photo du site (2) avec a) antenne, b) container en bois avec panneaux solaires, batteries et coffrets R(Source image : Google Earth, 09/2019 et © DNS)

A l'aval, à proximité de l'embouchure du canal dans l'étang du Vaccarès

Un deuxième point d'écoute a été installé en utilisant l'aqueduc de l'aube de Bouic comme structure d'appui pour les antennes. Sur ce site, deux stations d'écoute RFID chacune reliée à deux antennes cadres ont également été installées. Mais, afin de couvrir la totalité de la section du canal qui est relativement large (~10m) et profond (jusqu'à 1.5m), les 4 antennes disponibles ont été installées en parallèle (Figure 10). Ici, il n'est donc pas possible de connaître le sens de passage des individus marqués. Elles sont adaptées au profil du canal grâce aux deux antennes externes qui sont profilées pour s'adapter à l'inclinaison du fond (Figure 11).

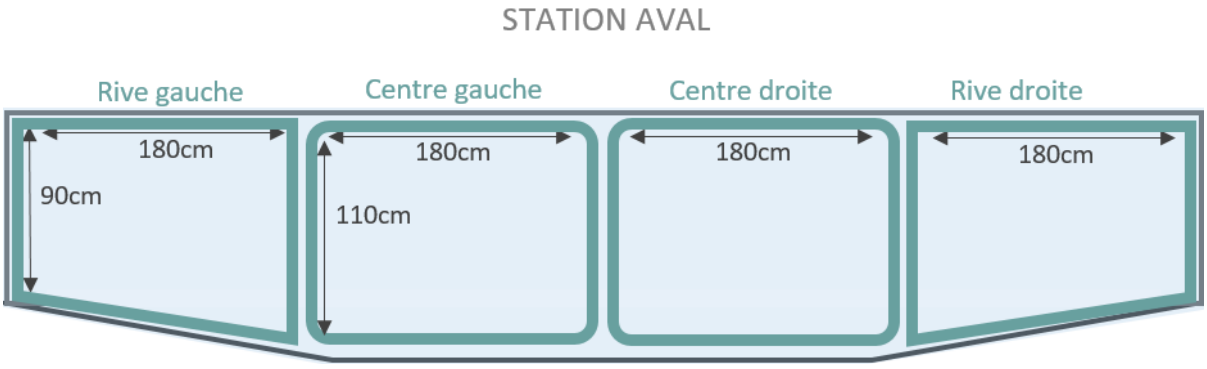


Figure 11: Section transversale du canal du Fumemorte au niveau du barrage à sel avec les dimensions des 4 antennes RFID



Figure 10:Plan du point d'écoute RFID au niveau du Barrage à sel (1) et photo du site (2). a) antenne, b) container en bois avec panneaux solaires, batteries et coffrets RFID (Source image : Google Earth, 09/2019 et © EMR)

Les boitiers RFID enregistrent et stockent en continu les données relatives à l'alimentation électrique de l'installation (tension et intensité du courant), à l'enregistrement de transpondeurs test (voir section suivante, § les *marker tags*) et à l'enregistrement du numéro des transpondeurs des individus marqués qui passent à travers les antennes.

2.4.3. TESTS DES CAPACITES DE DETECTION

La technologie RFID est très sensible aux perturbations électromagnétiques, et la portée de détection des antennes peut fluctuer dans le temps. Afin d'évaluer le bon fonctionnement des stations d'écoute, il est indispensable de tester régulièrement leurs capacités de détection. L'estimation de l'efficacité du dispositif, c'est-à-dire la probabilité qu'une antenne détecte et reconnaisse un individu qui la traverse (Horton, Dubreuil, Letcher 2007), permet de réestimer plus justement les flux d'individus qui passent à travers les antennes RFID. Trois méthodes ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de détection selon plusieurs critères : les détections des *marker tags* qui fournissent une information de fonctionnement en continu ; le test dit « à la tortue » qui permet d'évaluer la surface de détection à l'intérieur de l'antenne ; et enfin le test à la perche qui indique la portée de détection des antennes. Les tests à la perche et à la tortue ont été plus ou moins régulièrement menés dans le temps, depuis la mise en place des dispositifs (février 2019).

Détection en continue avec les Marker Tags

Chacune des antennes est équipée d'un transpondeur test, dit *marker tag*, qui s'allume toutes les demi-heures afin d'être détecté par l'antenne à laquelle il est accolé. Le nombre de détections du *marker tag* est une première indication de l'efficacité de détection de l'antenne qui est enregistré en continu. Par jour, un marker tag est censé être détecté 48 fois. Si le nombre de détection est inférieur, alors la capacité de détection de l'installation n'est pas optimale. A partir du nombre de détection par jour, on peut calculer un pourcentage de détection quotidien. A noter qu'une antenne peut détecter les *markers tags* des antennes voisines mais seul le *marker tags* propre à chaque antenne a été utilisé pour le calcul de l'efficacité de détection.

Le maillage de détection avec le test à la tortue

Ce test vise à évaluer le maillage de détection de chaque antenne. Un dispositif, baptisé « tortue » (Annexe I) a été conçu dans le but de tester la détection d'un transpondeur placé au travers du plan de l'antenne en plusieurs points équidistants en largeur (45cm aux Garçines et 30cm à la station aval) et en profondeur (20cm). La détection d'un transpondeur est testée cinq fois par point. La détection du transpondeur par l'antenne est signalée par un signal sonore qui est émis par un *Bipper* branché au boitier RFID. Pour chaque point, une probabilité de détection est calculée en divisant le nombre de passage détecté par le nombre total de passage. Le nombre de points de passage dépend de la taille de l'antenne : 40 points pour les 4 antennes du pont des Garçines (Figure 12a), 49 pour les antennes intérieures de l'aval et 36 pour celles situés à l'extérieur en raison de l'inclinaison des berges (Figure 12b). Le niveau d'eau pouvant varier selon les saisons, une rangée de point peut être rajoutée afin d'évaluer au mieux toute la surface de passage.

Ce test plus complet a été mis en place au cours d'un stage de Master 1 en automne 2020 et est depuis réalisé au moins une fois par mois. Depuis mon arrivée en février 2021 et jusqu'en août 2021, j'ai eu à charge la réalisation de ces tests, et l'écriture du protocole associé (Annexe X)

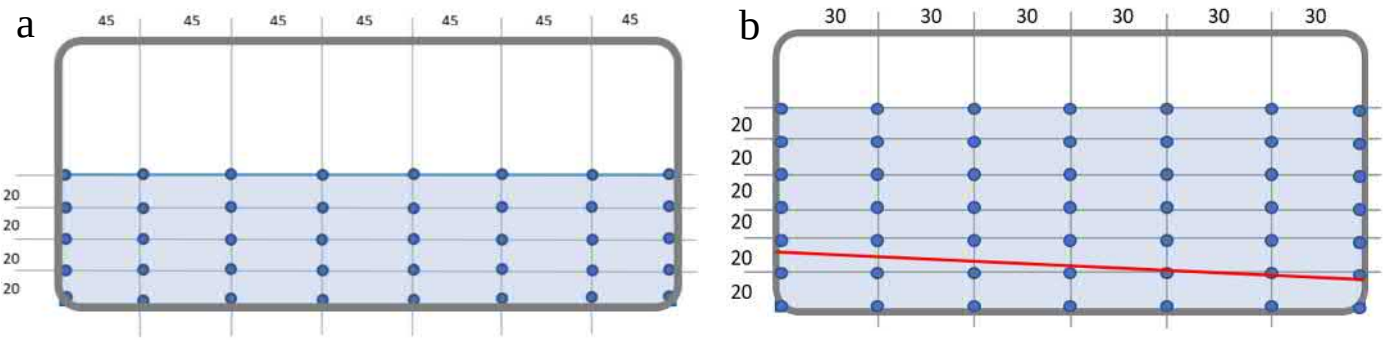


Figure 12: Répartition des différents points de coordonnées (x,y) pour lesquels les tests de passage des transpondeurs sont effectués sur le site du pont des Garçines (7.a) du barrage à sel (7.b). La ligne rouge représente la forme des 2 antennes extérieures.

La portée de détection à l'aide de la perche

Manuellement, un test de portée (*range)* de détection (distance à partir de laquelle un tag peut être détecté aux abords de l'antenne) est régulièrement réalisé à l'aide d'une perche. Un transpondeur fixé à l'extrémité d'une perche est approché lentement perpendiculairement au plan de l'antenne. La distance maximale de détection est ainsi mesurée. Ce test est relativement rapide à mettre en œuvre. En faisant l'hypothèse que la portée de détection est identique tout autour de l'antenne, on peut en déduire le nombre de points pour lesquels le Tag serait détecté comme lors d'un test à la tortue. Les efficacités de détection obtenues à la perche et à la tortue sont alors faciles à comparer (Figure 13).

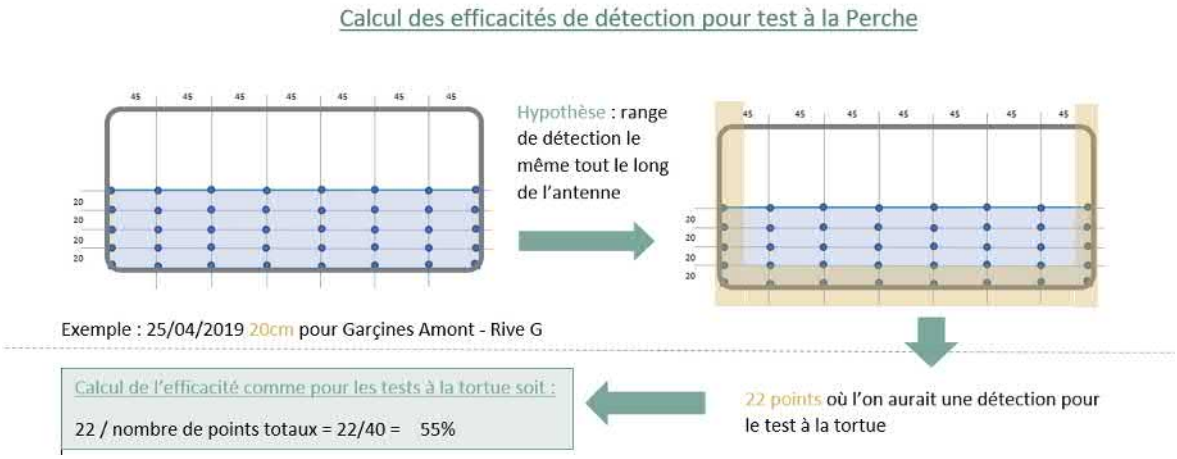


Figure 13: Schéma explicatif du calcul de l'efficacité de détection avec les données de tests à la perche

Etant donné la corrélation entre les estimations des données obtenues à la perche et à la tortue (test de Pearson r=0,8 et p-value<0,05), les efficacités de ces deux méthodes ont été rassemblées pour être considérées comme une seule (méthode « perche-tortue »).

2.4.4. REESTIMATIONS DU NOMBRE DE DETECTIONS

Le nombre de détections des antennes RFID dépend directement de leur efficacité de détection. Le nombre d'anguilles détectées a donc été réévalué, par station d'écoute et selon l'efficacité de détection (*marker tag* ou perche-tortue), avec la formule de calcul suivante (Horton, Dubreuil, Letcher 2007) :

$$Nb\ individus\ reestimés = \frac{Nb\ individus\ detectés}{Efficacité\ de\ detection}$$

2.4.5. EXPLOITATION DES DONNEES RFID

Avant de traiter les données, on supprime les marques test qui ne correspondait pas à des individus marqués.

Attribution des stades

Pour pouvoir repérer d'éventuels pics de dévalaison, le stade de développement de l'anguille qui passe à travers de l'antenne doit être connu. Toutes les anguilles détectées ne sont pas nécessairement des anguilles argentées migrantes. Une méthode a été élaborée afin d'attribuer un stade de développement pour chaque anguille détectée (Figure 14).

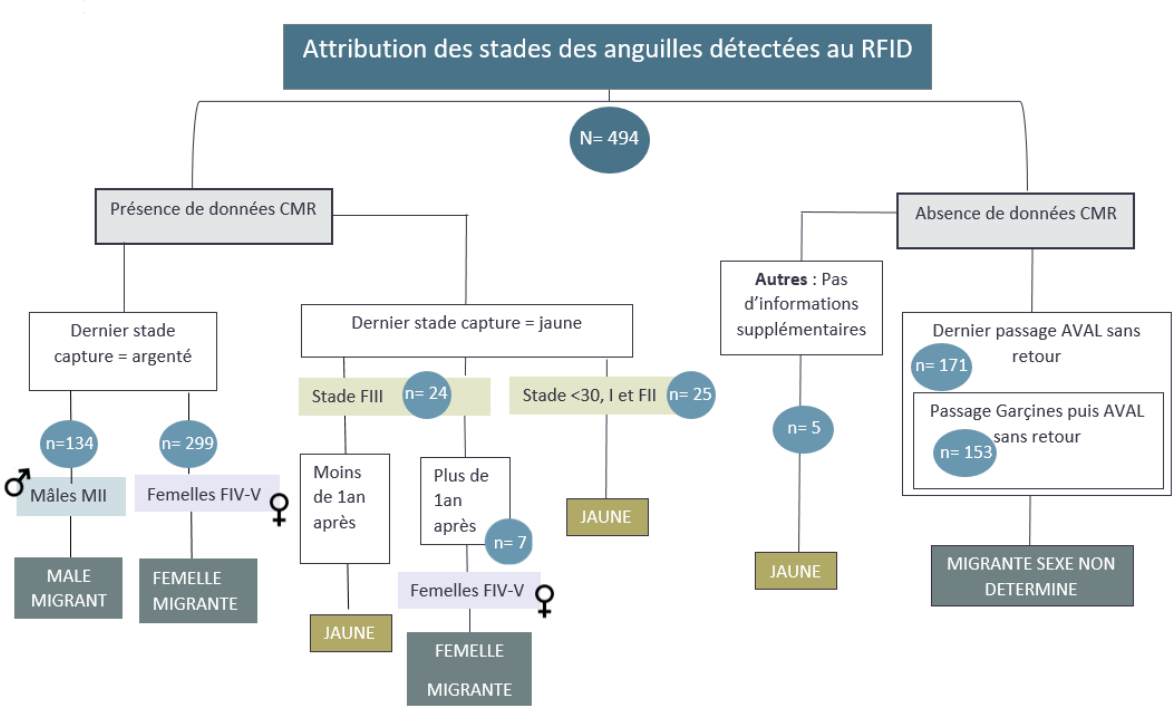


Figure 14: Méthode d'attribution des stades des anguilles détectées au RFID.

➢ Présence de données CMR

Les individus capturés au stade FIV-V et MII sont définis, respectivement, comme femelles et mâles migrants. En revanche, si le dernier stade assigné est un stade non migrant, plusieurs cas sont possibles :

- Si le stade est FIII et qu'il date de moins de 6mois on peut raisonnablement penser que l'anguille est toujours à ce stade (Acou et al. 2003). On la note « Jaune ». Cependant, 7 femelles dépassent ce délai (1an après détermination). Parmi elles, 5 ont été détectées aux deux stations RFID, successivement, sans retour. Il est probable qu'elles se soient métamorphosées durant ce laps de temps et que ce mouvement soit effectivement une dévalaison. On les note donc « Femelle migrante ».
- Pour les individus capturés à des stades moins développés (<30, I ou FII) il est plus difficile de faire des hypothèses sur le passage à des stades supérieurs d'autant plus que ces individus n'ont pas été détectées longtemps après la détermination de leur stade (10

mois en moyenne). On peut alors considérer qu'elles sont encore toutes à un stade Jaune.

➢ Absence de données CMR

- En l'absence de données CMR, le stade peut être estimé grâce aux informations sur le trajet effectué ou sur le temps écoulé après le marquage. Si l'anguille a été détectée aux Garçines puis à la station AVAL sans retour, ou si elle a été détectée à l'AVAL sans retour, son mouvement est interprété comme une dévalaison, l'anguille est alors considérée « Migrante » (le sexe n'est pas connu).

Afin d'avoir une meilleure vision des mouvements pouvant être lié à des dévalaisons, les anguilles estimées au stade jaune seront ensuite retirées du jeu de données RFID.

2.4.6. COVARIABLES ENVIRONNEMENTALES

Les données de niveau d'eau ont été récupérées auprès de la SNPN (Société nationale de protection de la nature). Les mesures ont été obtenues à l'aide d'une sonde située à la station AVAL. Les données de débit et de températures ont été mesurées par des sondes de la Tour du Valat. Des problèmes techniques ayant eu lieu sur l'une des sondes ont causé la perte d'une partie de la série temporelle de température. A l'aide de certaines mesures in situ effectuées par un technicien, une partie des données a pu être récupérée en utilisant une régression *loess*. Néanmoins la longue absence de mesures entre 12/05/2020 et 26/10/2020 ne permettait pas d'effectuer une telle approximation. Cette période a donc été retirée du jeu de données pour la partie modélisation.
Pour les données de débit, un nouveau paramétrage du débitmètre le 29/07/20 a causé des changements dans les mesures prises par la sonde. Les données doivent être corrigées par la suite mais ces modifications n'ont pu être faites avant la fin du stage. Afin de vérifier si la dynamique entre les deux séries de données est la même, un test de Pearson a été effectué. La p-value inférieure à 0,05 indique qu'il y a bien une corrélation entre les deux. Nous traiterons par la suite les données du débitmètre telles quelles.

Tableau 1: Résumé des covariables utilisées pour le modèle sur les données RFID

Covariables	Température	Niveau d'eau	Débit
Unité	°C	mNGF	m3/s
Min/Max	3.1/29.5	-0.39/0.28	-1.69/4.6

2.5. MODELE SUR LES DONNEES DE PECHE ET SUR LES DONNEES RFID

À partir des données d'abondance obtenues par mois à la station AVAL sur une période de 20 ans, un modèle bayésien a été construit afin de répondre aux questions suivantes : *Quel(s) mois semble(nt) le(s) plus favorable(s) pour la dévalaison de l'anguille ? Cette période est-elle dépendante du sexe ? Existe-t-il une variation interannuelle ?* Un second modèle bayésien a ensuite été développé pour répondre aux questions suivantes : *Quels paramètres environnementaux influencent les phénomènes de dévalaison des anguilles ? Y'a-t-il des paramètres déclencheurs ?*

Choix et construction des modèles

Pour répondre à ces questions, l'utilisation des statistiques Bayésiennes semblait la plus adaptée. Outre la possibilité d'intégrer de l'information *a priori,* les statistiques bayésiennes offrent un cadre adapté pour la modélisation et l'inférence à partir de modèles complexes marqués par de nombreuses sources de variabilité et d'incertitudes dans les

processus latents et / ou observés ainsi que dans les données. Le choix du langage de programmation s'est porté sur Stan d'une part pour sa facilité de traitement des structures hiérarchiques mais aussi pour sa simplicité d'utilisation (Manuel d'utilisation très complet, diagnostics utiles qui permettent une résolution rapide des problèmes…etc.).

➢ Données de pêche

Les données de pêche étant des données d'abondance avec de nombreux zéros, il a d'abord semblé cohérent d'utiliser un modèle qui puisse gérer à la fois des données d'abondance et de présence/absence. Le modèle mixte *zero-inflated mixed model* combinant à la fois une loi binomiale (qui gère la présence/absence) et une loi de poisson (qui gère l'abondance) semblait la mieux adapté. Néanmoins la sur-dispersion des données d'abondance (variance >> moyenne), clairement visible sur la Figure 15, rend ce modèle inexploitable puisque la loi de Poisson ne peut être appliquée que si la variance des données est égale à la moyenne.

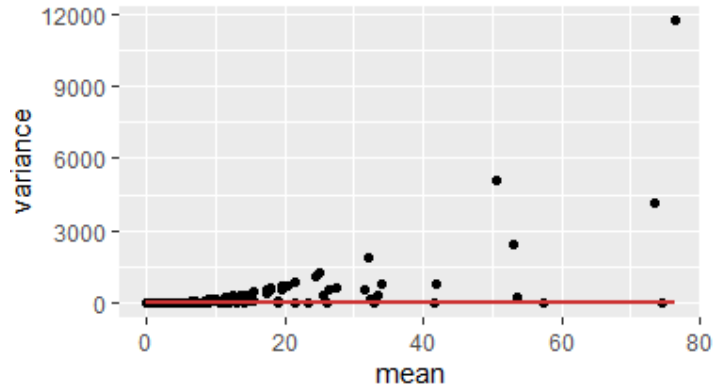


Figure 15: Evolution de la variance par rapport à la moyenne, obtenue par croisement de facteurs. En rouge la ligne représentant la condition Moyenne=Variance.

La loi négative Binomiale est une alternative à la loi de Poisson d'autant plus qu'il est possible d'y ajouter un paramètre permettant d'intégrer la sur-dispersion des données : ϕ.

La loi négative Binomiale classique (paramétrisation standard) décrit la situation suivante : une expérience consiste en une série de tirages indépendants (les occasions de capture à la station AVAL) donnant un « succès » (capture d'une anguille argentée) avec la probabilité **μ** et un *« échec »* (pas de capture d'anguille argentée) avec une probabilité complémentaire **(1- μ)**. Cette expérience se poursuit jusqu'à l'obtention d'un nombre **n** de succès (n anguilles argentées capturées lors de l'occasion de capture). On donne alors k, le nombre d'essais nécessaires (autrement dit, d'échecs) pour obtenir ce nombre n de succès.

La distribution du nombre d'échecs k est donnée par la fonction de masse suivante :

$$f(k;n,p) = \binom{k+n-1}{k}\mu^n(1-\mu)^k$$

$\binom{k+n-1}{k}$: Combinaison de ces k échecs parmi tous les tirages nécessaires : k + n-1

μ^n : n succès

$(1-\mu)^k$: k échecs

Afin de gérer la sur-dispersion des données d'abondance évoquée précédemment, un paramètre supplémentaire, ϕ, est utilisé afin d'ajuster la variance indépendamment de la moyenne. On a alors E[y] = $\frac{\mu}{\phi}$ et la variance = $\frac{\mu}{\phi^2} * (\phi + 1)$

➢ Données RFID

Les données RFID sont des données de comptage individuel. Au regard des estimations de stade faites précédemment, on sélectionne uniquement les anguilles argentées détectées quotidiennement. Comme les antennes fonctionnent tous les jours (même si la détection est

faible), on peut considérer qu'un NA dans le jeu de données est un « zéro biologique » (i.e. il n'y a pas eu d'anguille détectée à cette date).

Encore une fois la sur-dispersion des données de détection ne permettait pas d'utiliser une loi de Poisson. Le choix de la Négative Binomiale semble être la solution la plus appropriée. Néanmoins, la proportion de zéros des données de détection RFID est plus élevée que celle des données de pêche utilisées pour le modèle précédent (30% contre environ 20% pour le modèle des données de pêche). L'ajout d'une loi Binomiale pour gérer ce grand nombre de zéros et mieux décrire les deux sources éventuelles de zéro (zéro biologique ou zéro de non détection) paraissait intéressant. Cependant l'intégration de cette loi dans la fonction de vraisemblance a considérablement augmenté les temps de calculs du modèle. De plus, les LOOIC obtenus pour des modèles nuls (sans effets) sont inférieurs lorsque la loi Binomiale n'est pas considérée (LOOIC de 2242 contre 2064 sans la binomiale). Par conséquent, une loi négative Binomiale simple a été utilisée pour expliquer la distribution des données.

Fonction de vraisemblance

L'écriture de la fonction de vraisemblance s'articule donc, pour les deux modèles, autour de cette loi négative binomiale de paramètres μ (mu, probabilité d'obtenir une anguille argentée) et ϕ (phi, paramètre qui permet de gérer la sur-dispersion des données). Dans la régression négative Binomiale, le log du paramètre mu est déterminé comme une combinaison linéaires des données xi tel que : $mu = \exp(\text{int}_{\text{mu}} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k)$ avec int_{mu} l'intercept de mu (valeur moyenne) auquel on ajoute des effets sous la forme de coefficients de régression β1, β2, ..., βk (paramètres inconnus estimés par le modèle) et de variables (x_1,x_2.., x_k) présentes dans les données.

a)
```
for(i in 1 : n_obs){
 mu[i] = exp(int_mu + alpha * Effort[i]
                    + alpha_year[Year[i]]
                    + alpha_month[Month[i]]
                    + alpha_sex[Sex[i]]
                    + alpha_sex_month[Month[i], Sex[i]]);
```

b)
```
for(i in 1 : n_obs){
 mu[i] = exp(int_mu + alpha * Antenna_eff[i]+
                      alpha_niv_eau*Niv_eau[i]+
                      alpha_temp*Temp[i]+
                      alpha_qmoy*Qmoy[i]);
```

Figure 16: Code R pour la définition de mu, combinaison linéaire des effets. a) pour le modèle sur les données de pêche et b) pour les données RFID

Test des effets

- Modèle données de pêche

L'effort de pêche, ayant une influence directe sur l'abondance des anguilles capturées, est le premier effet inclus dans le modèle sous la forme d'un effet alpha. De la même façon, des paramètres alpha_month et alpha_year sont ajoutés afin de tester un éventuel effet année ou mois. Dans un deuxième temps, un effet sexe a été ajouté afin de tester si leur dévalaison est synchrone ou si certains mois apparaissent plus favorables à la dévalaison de l'un des deux sexes. On obtient donc la définition du paramètre mu suivante : $mu = \exp(\text{int}_{\text{mu}} + alpha * Effort + alpha_{année} * Année + alpha_{mois} * Mois + alpha_{sex} * Sex + alpha_{sexmonth})$.

- Modèle données RFID

Tout comme l'effort de pêche, l'efficacité de détection des antennes au cours du temps conditionne le nombre d'anguilles détectées. Dans le code, il est symbolisé par alpha. On ajoute ensuite les effets des données environnementales : le niveau d'eau (alpha_niv_eau), la température (alpha_temp) et enfin le débit (alpha_q). Ces variables environnementales ont des échelles différentes c'est pourquoi elles ont été centrées réduites. On obtient la définition du paramètre mu suivante :

$$mu = \exp(\text{int}_{\text{mu}} + alpha * Efficacité\ de\ detection + alpha_{niveau\ eau} * Niveau\ d'eau + alpha_{température} * Température + alpha_{débit} * Débit)$$

Afin de mieux comprendre la démarche adoptée, on peut résumer les deux modèles à l'aide de la Figure 17

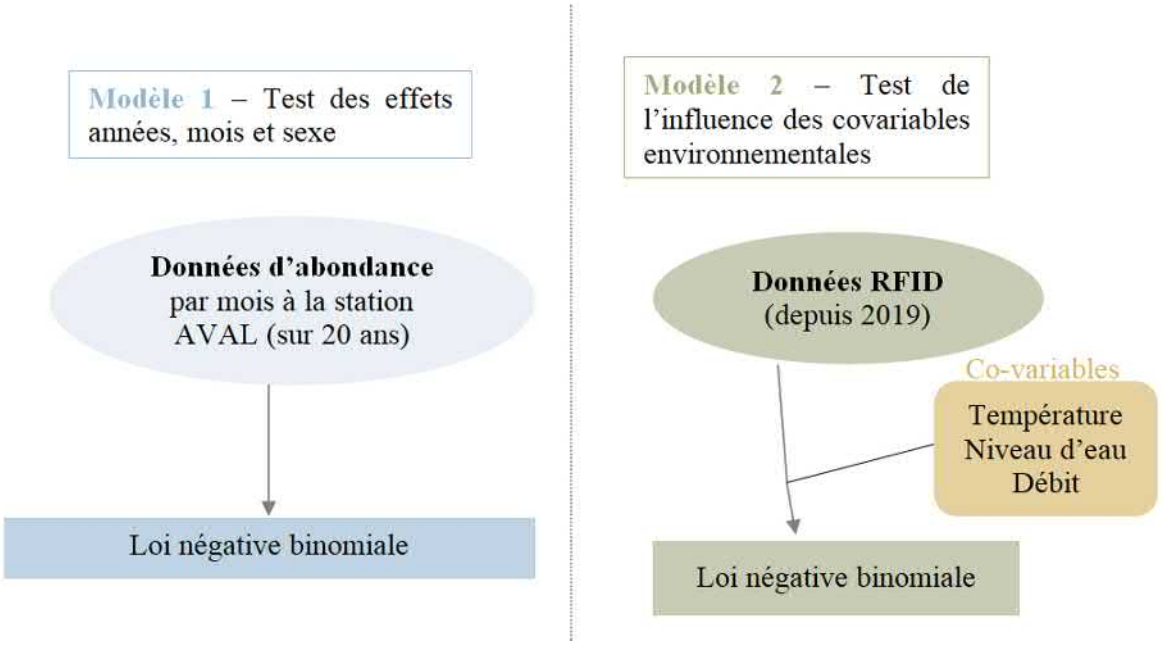


Figure 17: Résumé schématique des deux modèles utilisés avec les données et les loi utilisées.

Significativité des effets

Pour simplifier l'interprétation des distributions *a posteriori*, un seuil de significativité à 5 % a été appliqué. La valeur médiane des paramètres est reportée avec le *Highest Posterior Density interval* à 95 % ($HPD_{95\%}$). Ainsi pour chaque paramètre, la probabilité de direction (Makowski et al. 2019) est indiquée comme étant la probabilité que le paramètre est strictement positif ou négatif. Cet indice varie de 0.5 à 1.0 et est calculé comme la proportion de valeurs *a posteriori* qui sont de même signe que la médiane. Si cet indice est supérieur ou égal à 0.95, alors le paramètre est significativement différent de 0.

Définition des *priors*

L'intérêt des statistiques Bayésiennes est aussi d'ajouter de l'information avec les *priors*. Pour tous les paramètres estimant les effets (alpha_year/ alpha_month/ alpha/ alpha_sex/ alpha des facteurs environnementaux) un compromis a été fait entre une loi peu informative (uniforme) et une loi informative. Pour cela, les *priors* de tous les paramètres suivent une loi de Cauchy de paramètres x_0 et sd. Le premier donne une indication sur la moyenne et sd donne une information sur l'étalement de sa fonction. Comparativement à une loi normale, la loi de Cauchy a l'avantage d'avoir des queues de distribution plus longues, c'est-à-dire que même en imposant une moyenne à zéro, on autorise de grandes valeurs.

Pour tous les paramètres, on suppose qu'*a priori* $x_0 = 0$ c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'effet de l'effort, de l'année, du mois, du sexe ou des covariables environnementales. Pour pouvoir laisser plus de liberté au modèle et à la formation des *priors*, on établit des *hyperpriors* sur les sd des cauchy qui suivent une loi gamma de paramètre 1,4.

Comparaison des modèles : critère LOOIC et autres critères de diagnostic

Le choix des modèles s'est fait selon plusieurs critères. A chaque ajout d'un effet, nous avons utilisé le critère d'évaluation LOOIC afin de comparer les différents modèles entre eux. Le leave-one-out indice criteria (LOOIC) est un critère qui permet d'évaluer la qualité de la prédiction d'un modèle en utilisant la log-vraisemblance calculée lors des simulations des posteriors. Sa lecture fonctionne comme pour le DIC c'est-à-dire que la valeur la plus faible est la meilleure. Plusieurs autres critères ont été utilisés pour effectuer un diagnostic du modèle. Ces indicateurs et les valeurs qu'ils doivent prendre sont décrits dans le Tableau 2. Les précisions sur ces indicateurs et ce sur quoi ils reposent sont détaillés dans le tableau en Annexe IV.

Tableau 2: Résumé des indicateurs pour le diagnostic du modèle avec valeurs attendues

Indicateurs	**R-hat** des paramètres	**Log-posterior**	**L'ESS** (effective sample-size)	**MMA** (MeanMetropAcceptance)
Intérêt	Convergence du modèle	Convergence du modèle	Fiabilité des posteriors	« fluidité » du modèle
Valeurs attendues	[1 ;1.05]	Distribution homogène avec un seul mode	Supérieur à 0.5	Valeurs les plus proches de 1 possible

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DES DONNEES DE DEVALAISON OBSERVEES PAR PECHE A LA STATION AVAL

3.1.1. ANALYSE GRAPHIQUE EXPLORATOIRE

Les captures d'anguilles argentées présentent une forte variabilité interannuelle, malgré un effort de pêche relativement constant, au moins jusqu'à la saison 2015-2016 (Figure 18). Globalement les captures d'anguilles argentées ont diminué entre 2010 et 2016 (1.03523 ± 0,42) par rapport à la période de 2001 à 2009 (1.24618±0,23). Les niveaux de capture restent faibles jusqu'en 2014-2015. Intra-annuellement, les captures d'anguilles argentées varient également. Les anguilles argentées sont quasi absentes des filets pendant toute la période estivale, de juin à août. Elles sont le plus souvent présentes le reste de l'année. Le graphique de la Figure 18 ne fait pas apparaître clairement un patron de distribution répétitif d'année en année. Les densités apparaissent toutefois régulièrement plus élevées à l'automne (par exemple les saisons de 2003 à 2005 et de 2006 à 2008) et parfois, pendant l'hiver (saison 2005-2006 et 2008-2009) ou au printemps (2002-2003 et 2006-2007). L'année 2016-2017 est marquée par un fort pic de dévalaison en novembre, alors que l'effort de pêche fut très limité en comparaison avec la plupart des autres années.

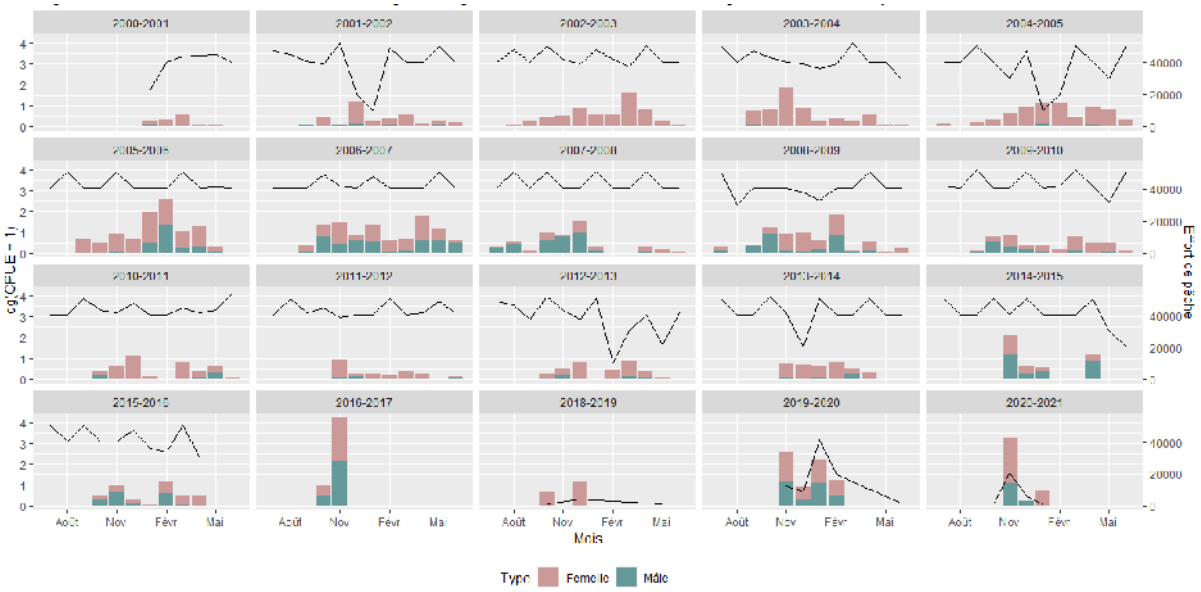


Figure 18: Histogramme du log de la somme des CPUE mensuelles des anguilles argentées mâles et femelles capturées à la station AVAL et effort de pêche associé (droite)

Globalement les anguilles argentées femelles sont davantage capturées que les anguilles argentées mâles (Figure 18 et

Figure 19, 2857 femelles et 971 mâles soit 74% de femelle sur toute la durée du suivi). Toutefois, lors de certaines saisons, les anguilles argentées mâles sont bien représentées (37% en 2006-2007, 43% en 2015-2016 et 51% en 2016-2017), voire dominent les captures argentées (64% en 2014-2015, 65% en 2007-2008).Ces explorations graphiques ne permettent pas de mettre en évidence des patrons de migration de dévalaison distincts en fonction du sexe.



Figure 19: Proportion d'anguilles argentées mâles et femelles capturées à la station AVAL, selon les mois et les années

3.1.2. TEST DES EFFETS ANNEE, MOIS ET SEXE A L'AIDE D'UN MODELE BAYESIEN

Diagnostic du modèle : critères LOOIC, Convergence et qualité d'estimation

On a comparé les LOOIC pour les 4 modèles, de plus en plus complexe (Tableau 3)

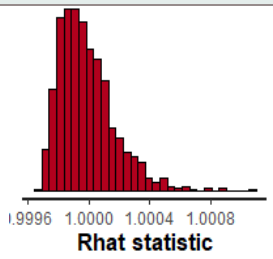
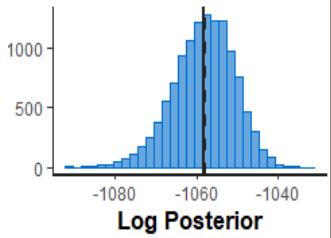
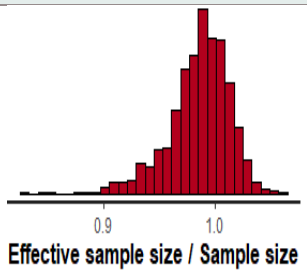
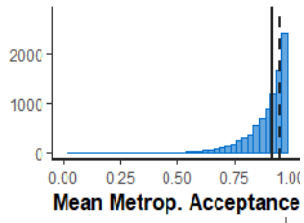
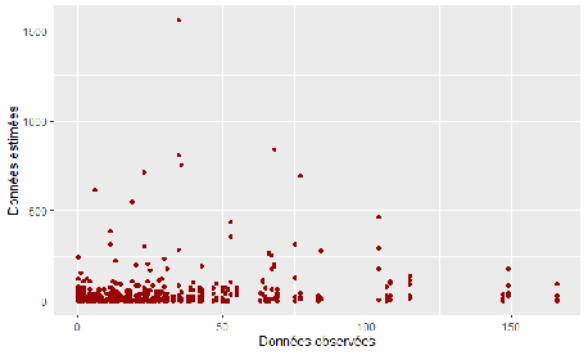
Tableau 3: Résumé des valeurs des critères LOOIC pour les 4 modèles (selon le niveau de complexité)

Modèle	Modèle sans effet	+ effet mois	+ effet année	+ effet sexe et mois sur le sexe
LOOIC	2252.7	2178.9	2144.5	2101.5

Au regard des LOOIC obtenus, le modèle utilisé (avec tous les effets ajoutés) semblait le plus parcimonieux (compromis log-vraisemblance et nombre de paramètres).

On peut regarder ensuite les indicateurs et faire un plot des valeurs estimées par rapport aux valeurs observées afin de voir si les données suivent la même dynamique et si notre modèle a une bonne capacité de prédiction (Tableau 4).

Tableau 4 : Résumé des indicateurs de convergence du modèle et plot des données observées face aux données estimées

Indicateurs	Rhat	Log-posterior	ESS
Plot			
	R-hat très concentrés autour de 1, peu de valeurs au-dessus de 1,05. Bonne convergence	Bon log-posteriors avec une bonne distribution donc bonne convergence	ESS assez élevés donc bonne estimation à posteriori des paramètres
Indicateurs	MMA	Données observées vs données estimées	
			
	MMA majoritairement proches de 1. Bonne« fluidité » du modèle	Tendance à la surestimation (surtout pour les mois où les effectifs sont les plus importants)	

Estimation des paramètres

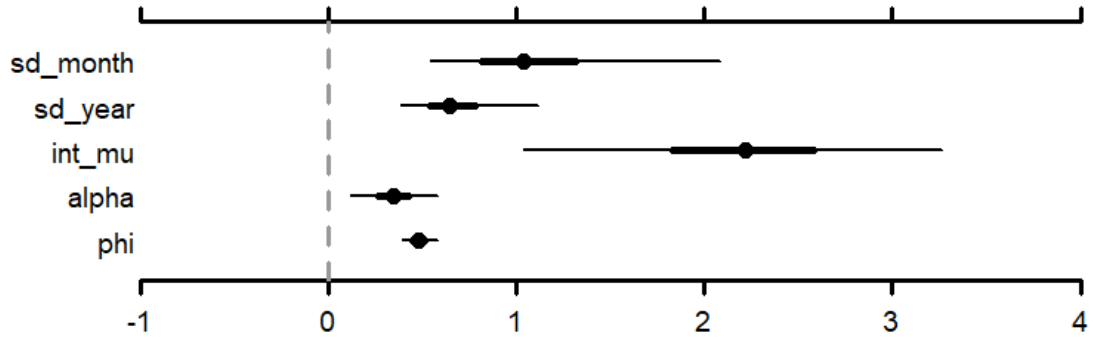


Figure 20: Résumé des posteriors des autres paramètres du modèle (sd,int_mu,alpha,phi)

Les posteriors des paramètres du modèle (Figure 20) indiquent que l'écart-type des effets mois (sd_month) est plus étalé que celui des effets année (sd_year). Les variations saisonnières sont plus importantes que les variations inter-annuelles et tendent à expliquer une plus grande part des variations des données. Le paramètre de distribution phi a une moyenne de 0,465. La moyenne de alpha est de 0,378 et témoigne de l'influence positive de l'effort de pêche sur l'abondance des anguilles capturées.

Effet année

D'après le modèle réalisé, trois années, 2006, 2007 et 2019 présentent des abondances d'anguilles argentées nettement plus élevées que les autres années : avec respectivement 100%, 100% et 99% de valeurs positives des posteriors (Figure 21). La période de 2005 à 2008 semble en effet avoir été favorable à la production d'anguilles argentées, les modes des posteriors ayant été tous obtenus supérieures à zéro. A l'inverse, la période de 2010 à 2013 l'a beaucoup moins été (94% de valeurs négatives en 2013). L'année 2019 apparaît à nouveau très favorable. Ainsi, les résultats du modèle font transparaître de fortes variabilités inter-annuelles dans les captures d'anguilles argentées à la station AVAL.

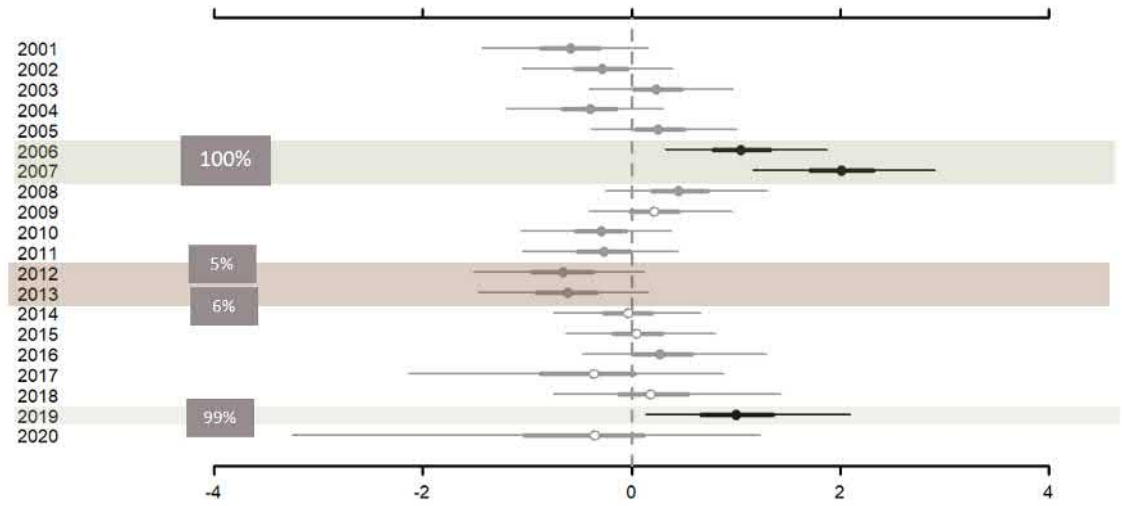


Figure 21: Highest Posterior Density interval à 95 % des posteriors des paramètres alpha_années (effet année) et pourcentages de valeurs positives associés. La couleur noire indique que plus de 95 % des valeurs sont de mêmes signes que la médiane (symbolisée par le point).

Effet mois

Les résultats du modèle Bayésien confirment les effets mensuels observés graphiquement (Figure 18), avec notamment de très faibles abondances d'anguilles argentées capturées les mois d'étés (0% de valeurs positives de juin à août, Figure 22). D'octobre à avril, les

abondances d'anguilles argentées sont significativement plus élevées que le reste de l'année (pas de chevauchement des $HPD_{95\%}$). Le mois de novembre présente le pourcentage de valeurs positives le plus élevé (100%), suivis des mois de décembre et de février (94 et 85%) et du mois de mars (84%). La médiane d'environ 1.65 en novembre correspond à une multiplication par plus de 5 du nombre d'anguille par rapport à octobre.

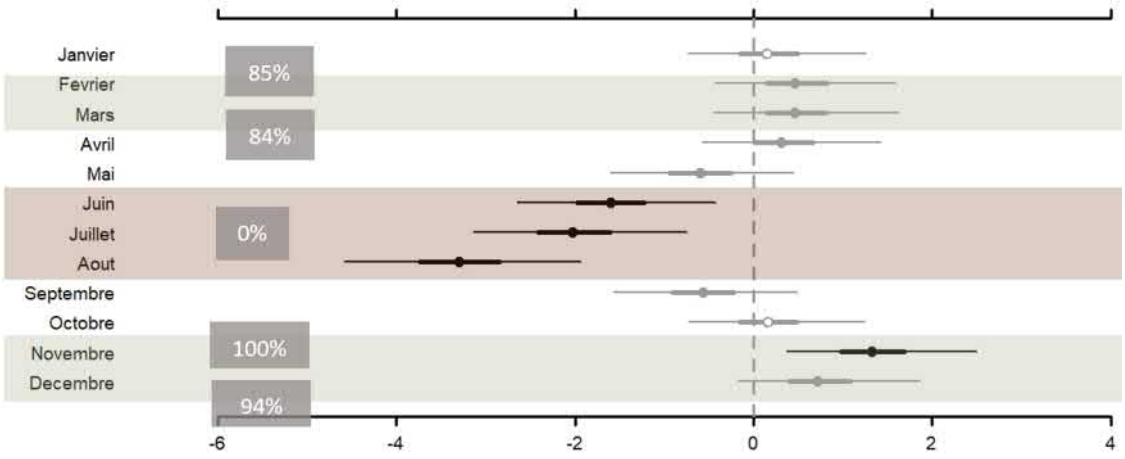


Figure 22: Résumé des posteriors des paramètres alpha_mois (effet mois) et pourcentages de valeurs positives associés

Effet du mois sur l'abondance de chaque sexe

Le paramètre alpha_sex_month permet d'avoir des estimations sur l'effet du mois sur chaque sexe. Les mois de mars (84% de valeurs positives) et de décembre (81%) présentent des abondances de femelles significativement plus élevées (Figure 23). Pour les mâles, aucun mois n'a un effet significatif positif, mais la période de l'automne présente néanmoins de forts pourcentages de valeurs positives avec respectivement 72% et 73% en octobre et en novembre. Ces résultats suggèrent ainsi une tendance à la dévalaison plus précoce pour les mâles que pour les femelles.

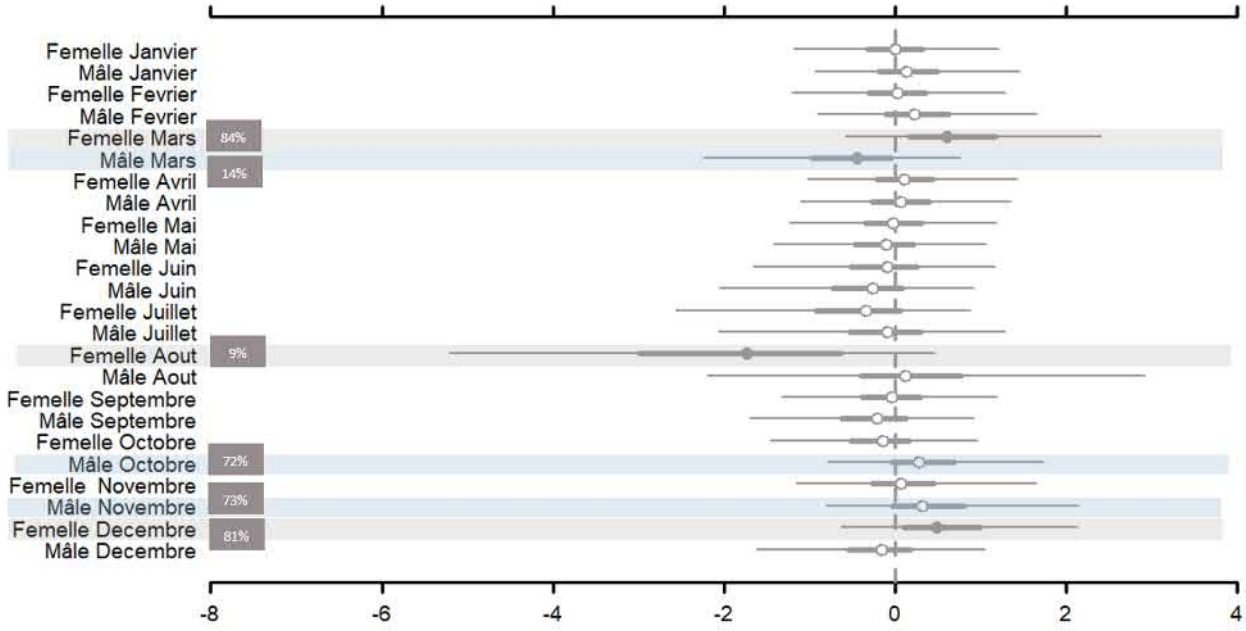


Figure 23: Résumé des posteriors des paramètres alpha_sex_month (effet du sexe sur l'abondance d'un sexe) et pourcentages de valeurs positives associés

3.2. CAPACITES DE DETECTIONS DES ANTENNES RFID

➢ Station des Garçines

Les efficacités de détection issues des *marker tags* varient fortement de manière saisonnière (Figure 24). C'est nettement le cas pour les deux antennes Rive Gauche de l'Aval et de l'Amont (Annexe V). Les détections, relativement satisfaisantes du printemps à l'automne (de mai à octobre) diminuent drastiquement pendant la période hivernale (de novembre à mai). Les deux antennes Rive droite amont et aval ne suivent pas le même schéma. A partir de novembre 2019, l'antenne amont rive droite a cessé de fonctionner correctement, alors que son avale fonctionne quasiment à la perfection de manière continue. Il est intéressant de noter que les efficacités de détections obtenus par les *marker tags* et les tests perche-tortue ne concordent pas spécialement : les *marker tags* accolés aux antennes peuvent être très bien détectés dans une journée alors que les portées de détection (méthode perche-tortue) sont très faibles.

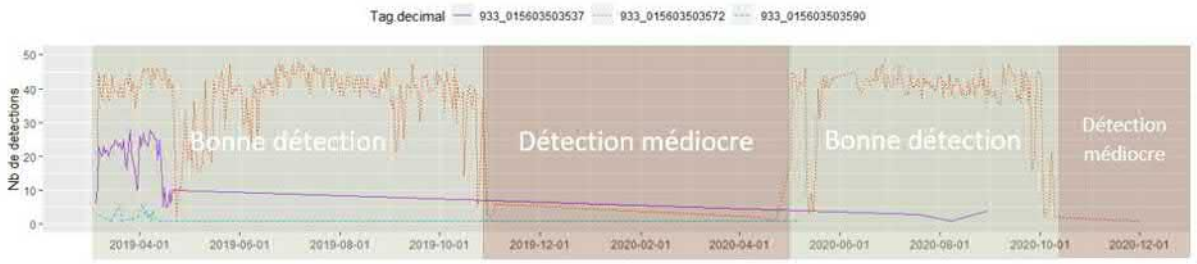
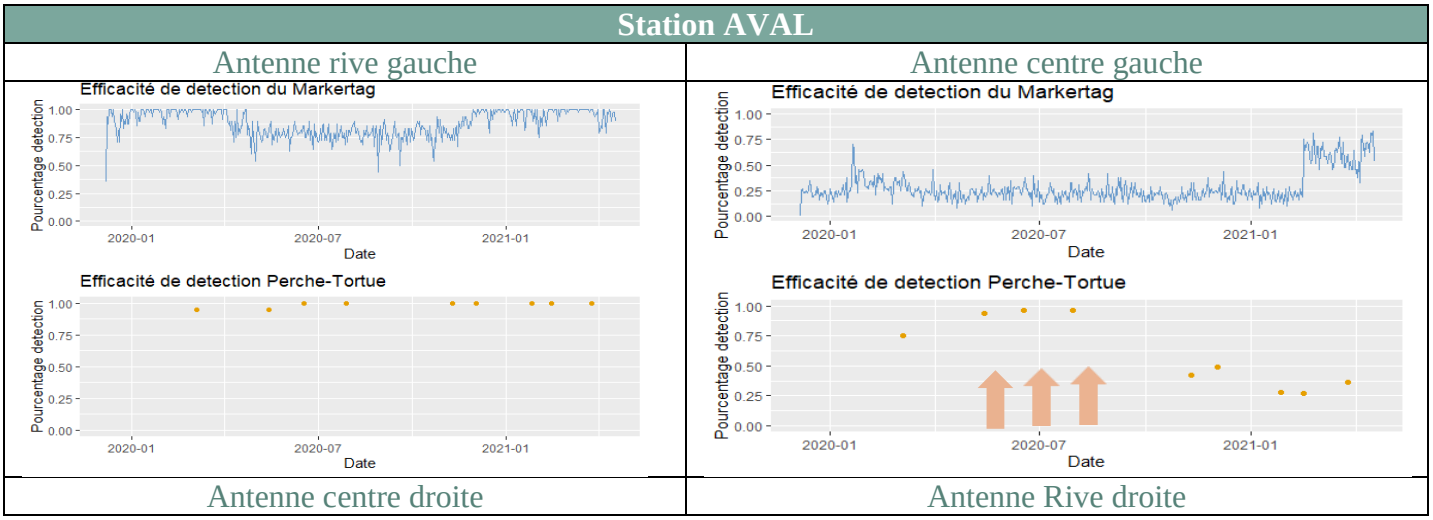


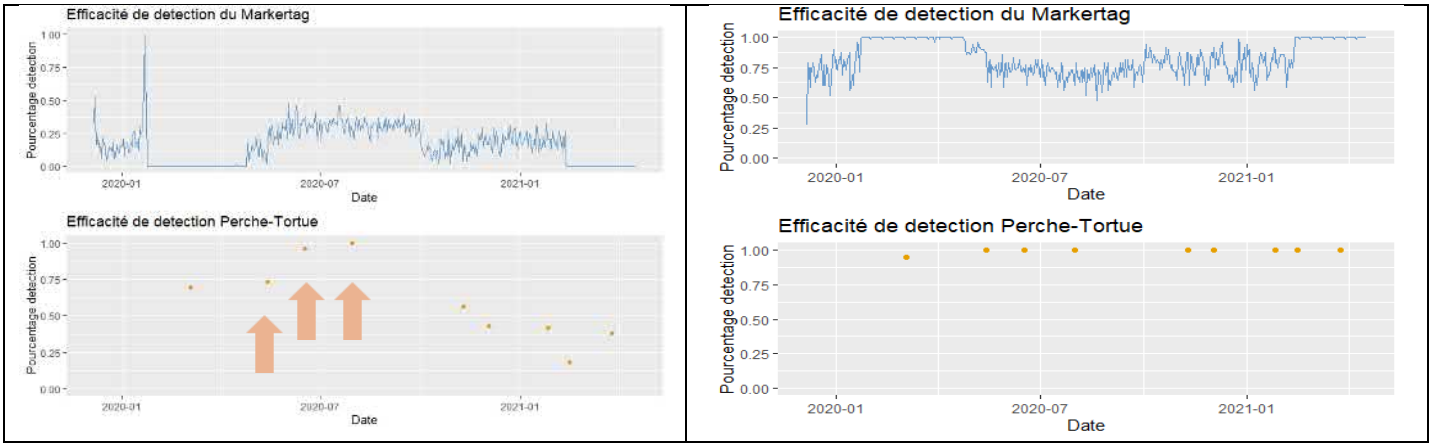
Figure 24: Nombre de détections du markertag de l'antenne Garçines Aval droite au cours du temps

➢ Station AVAL

A noter que les données de *marker tags* pour la période de février 2019 à décembre 2019 ont été perdues suite aux remplacements des cartes mémoires des boitiers RFID. La saisonnalité des détections des *marker tags* n'est pas aussi visible aux antennes de la station AVAL que pour celles du pont des Garçines. Les deux antennes situées aux extrémités, sur les rives droite et gauche, sont les plus efficaces et affichent des pourcentages de détection élevés tout au long de l'année (Figure 25). Les deux antennes centrales présentent des performances plus faibles selon la détection des *marker tags*. Cependant, en plusieurs occasions où les détections des *marker tags* étaient peu satisfaisantes, les tests à la perche-tortue ont montré des portées de détection très correctes (flèches sur la Figure 25).

Figure 25: Efficacités de détection des antennes mesurées à l'aide des marker tags et des tests perche-tortue à la Station AVAL





Le test de Spearman a été utilisé afin d'évaluer la corrélation entre les efficacités de détection obtenues par les *marker tags* et les tests à la perche-tortue (Tableau 5). Au regard des valeurs obtenues, l'hypothèse selon laquelle on aurait une corrélation nette entre les deux est rejetée. Mis à part pour l'antenne centre droite de la station AVAL (r=0.76, p-value<0.05), les coefficients de corrélation ne s'approchent pas de 1 et sont même parfois négatifs. Les p-values aussi sont très faibles. Pour mieux visualiser ces résultats, les plots de corrélation entre les deux jeux de données ont été mis en Annexe VII.

Tableau 5: Tableau résumé des tests de corrélation de Spearman entre les efficacités de détection calculées à la perche-tortue et celles obtenues avec le marker tag pour chaque antenne.

Station	GARÇINES				AVAL			
Antennes	Amont rive gauche	Amont rive droite	Aval rive gauche	Aval rive droite	Rive gauche	Centre gauche	Centre droite	Rive droite
r^2	0.2317	-0.3984	0.5132	-0.2031	0.0406	-0.6037	0.7601	-0.3154
p-value	0.5194	0.2541	0.03511	0.4043	0.9056	0.0492	0.006618	0.3447

Ces deux sources d'information relative à l'efficacité de détection seront donc traitées de manière indépendante dans la suite des analyses. Les efficacités de détection au *marker tag* constituent une information en continue et seront utilisés telles quelles par la suite. En revanche, La portée de détection obtenue avec les tests manuels constitue une information discontinue. Une régression *loess* (Méthode en Annexe VI) a été appliquée afin d'obtenir une interpolation quotidienne de cette donnée. La zone grisée qui encadre les valeurs correspond à l'intervalle de confiance à 95% (Figure 26).

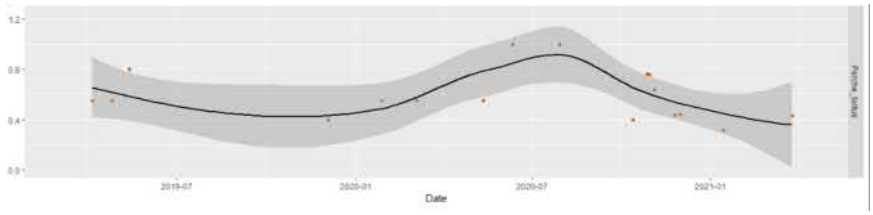


Figure 26: Tracé de la régression Læss pour les points de l'antenne Rive Gauche de Garçines Aval

Les efficacités issues du test à la perche-tortue seront celles retenues dans les modèles, puisque ce test permet d'évaluer la portée de détection et est considéré plus informatif.

3.3. ANALYSE DES ENREGISTREMENTS RFID D'INDIVIDUS MARQUES

Entre le 5 mars 2019 (date de mise en route des 2 stations d'écoute) et le 4 avril 2021 (dernière relève des données avant leur analyse), on dénombre 90719 détections. Parmi

elles, 490 marques d'anguilles ont été détectées 104 marques ont été détectées à Garçines Amont, 475 à Garçines Aval et enfin 191 à la station AVAL.

3.3.1. COMPORTEMENT MIGRATOIRE DES ANGUILLES

Déplacements horaires des anguilles argentées

Le nombre de détections d'anguille argentées par heure et par mois permet d'observer la variabilité d'activité inter-mensuelle (Figure 27). Entre Octobre et Avril, les anguilles argentées sont plus actives que le reste de l'année avec un maximum de 400 détections totales pour le mois de mars. Le nombre de détections par heure montre également que l'activité journalière des anguilles s'intensifie aux heures du crépuscule (18h-0h) et de l'aube (0h-5h).

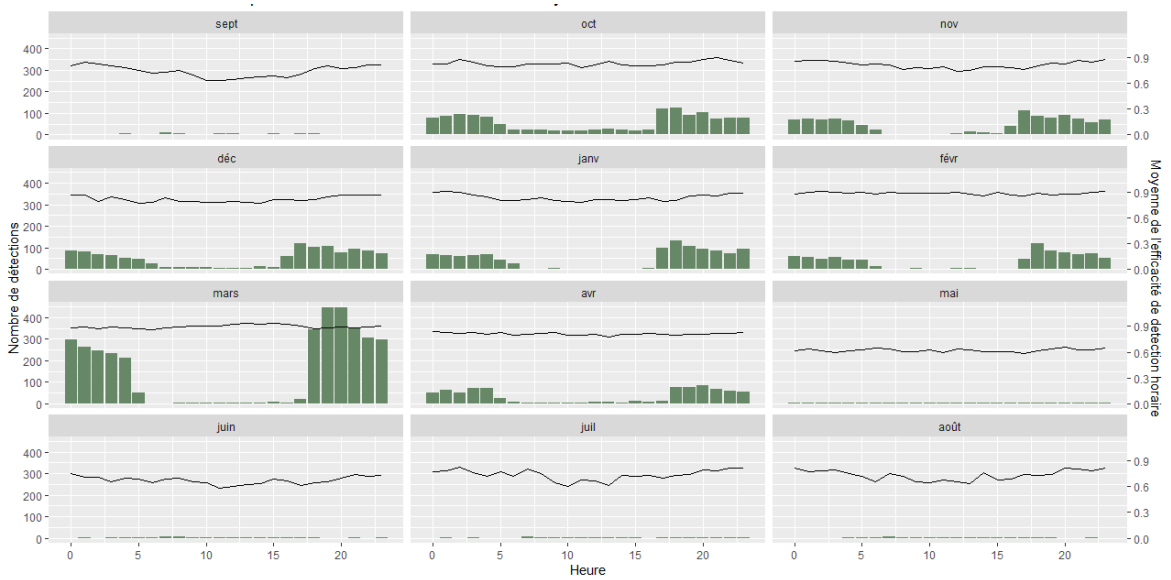


Figure 27: Nombre total d'individus détectés (anguilles argentées marquées) par heure selon les mois de l'année et moyenne des efficacités de détection horaires des antennes (marker tags)

3.3.2. PERIODE DE DEVALAISON ET TEMPS DE TRANSIT, LE CAS DES INDIVIDUS MARQUES A L'AVAL

Au début de la campagne de marquage des anguilles avec les Pit-tag RFID, seuls les anguilles capturées dans le Fumemorte étaient marquées. Cependant, afin d'augmenter le nombre de marques et potentiellement, le nombre d'anguilles détectées aux antennes, il a été décidé de marquer les anguilles qui étaient capturées à la station AVAL. Mais ces anguilles marquées à l'embouchure du Fumemorte doivent être étudiées attentivement. En effet, les anguilles qui ont été capturées pour la première fois (non marquées) à proximité de l'embouchure du Fumemorte peuvent avoir eu différents habitats de croissance privilégiées localisés soit dans la partie amont du bassin du Fumemorte, dans sa partie avale ou bien dans l'étang du Vaccarès. Une fois marqués, ces individus sont relâchés, tout comme les autres anguilles marquées, à l'amont, au niveau de la station du Fume-1.

Le déplacement de ces individus en direction de l'aval peut être expliqué par deux principales hypothèses : soit les individus dévalent, c'est effectivement l'heure de leur grande migration, soit les individus cherchent à regagner leurs habitats de prédilection. Lorsqu'on regarde le nombre d'anguilles détectées aux stations Garçines Aval et Fumemorte Aval (Annexe IX), des pics de détections sont observés aux mêmes périodes que ce soit pour les individus marqués à l'amont ou à l'aval. La période d'activités de

toutes les anguilles détectées s'étale d'octobre à mai avec des pics en novembre et en avril (Figure 1 et 2 Annexe IX).

De plus, le temps de déplacements entre les deux stations d'écoute a été calculé pour les individus qui ont été détectés à la fois au pont des Garçines et à la station AVAL. Les anguilles marquées à la station AVAL sont séparées de celles marquées dans la zone amont (Figure 28). Plus de 64% des anguilles argentées détectées entre les deux antennes ont effectué leur déplacement en moins d'une semaine. Le déplacement le plus rapide a été effectué en 3h10 soit avec une vitesse de 0,4708 m.s-1 pour une anguille qui fut marquée à l'amont du bassin du Fumemorte. Une minorité des individus (4%) ont mis plus de 6 mois à effectuer le déplacement. Cette analyse permet de considérer une grande variabilité dans les comportements migratoires des individus. Néanmoins, il ne permet pas de dissocier statistiquement du point de vue du comportement migratoire les individus marqués à l'amont de ceux marqués à l'aval du bassin du Fumemorte.

En effet, d'après le résultat du test de Wilcoxon[2], la différence de temps de transit entre les deux antennes n'est pas significativement différente entre les anguilles marquées à la station AVAL et celles en amont du Fumemorte (p-value > 0,05). Par conséquent, il est considéré que les anguilles argentées marquées à l'aval n'ont un comportement migratoire significativement différent des autres individus et toutes les anguilles argentées, quel que soit leur site de marquage, sont incluses dans la suite des analyses.

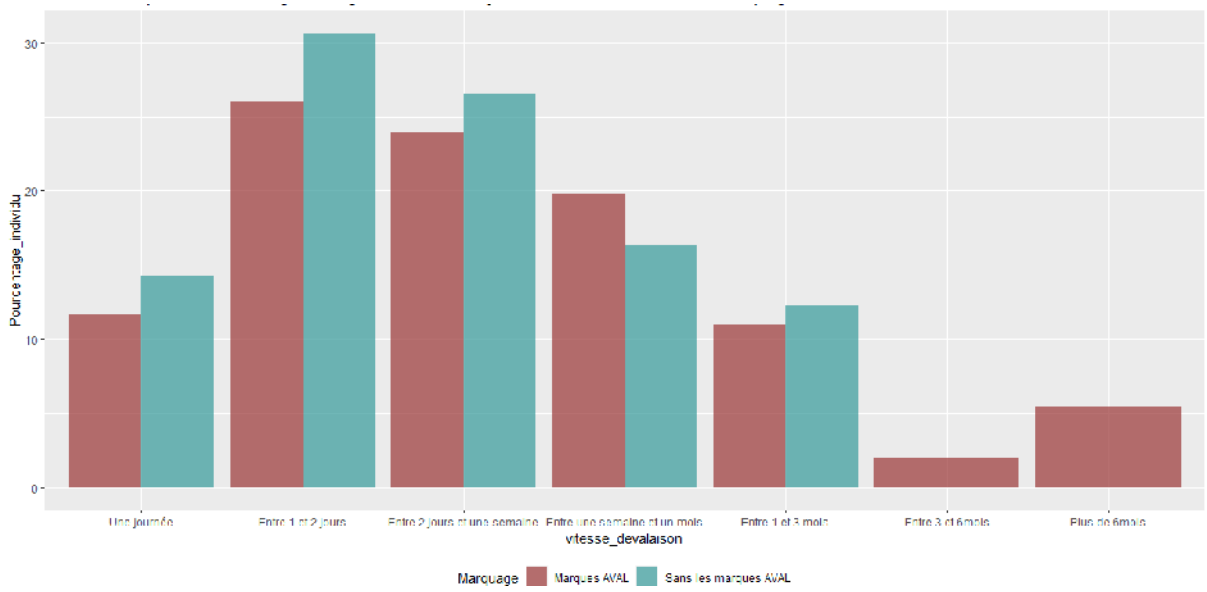


Figure 28: Pourcentage d'individus selon les vitesses de déplacement entre les deux stations et selon leur lieu de marquage

3.3.3. REESTIMATION DES DONNEES RFID

Les efficacités de détection étant régulièrement proches de 0 à Garçines Amont, la réévaluation du nombre d'individus marqués détectés à partir des efficacités de détection obtenues précédemment a induit de nombreuses surestimations avec des valeurs aberrantes. Afin de limiter ce biais, lorsque l'efficacité de détection est inférieure à 20%, la station d'écoute est considérée non fonctionnelle et le nombre d'individus détectés n'a pas été ré-estimé. Les antennes de la station de Garçines Amont présentant très régulièrement des efficacités de détection en dessous de ce seuil, les données de cette station ont été retirées de la suite des analyses. Par conséquent, le sens de passage des individus marqués ne sera pas pris en considération à cette station.

[2]Test non paramétrique car les échantillons ne suivent pas une loi normale

Dans la Figure 29, les détections des individus, tout stades confondus, ont été réestimées avec les efficacités obtenues par les deux méthodes de test (marker tags et perche-tortue). Bien que les deux efficacités de détection calculées ne varient pas dans le temps de la même façon, les mêmes périodes de forte activité des anguilles sont retrouvées avec les deux méthodes. Les enregistrements d'individus marqués sont plus fréquents d'octobre à mai. Des pics d'individus marqués sont enregistrés surtout aux mois de novembre, de décembre et de mars.

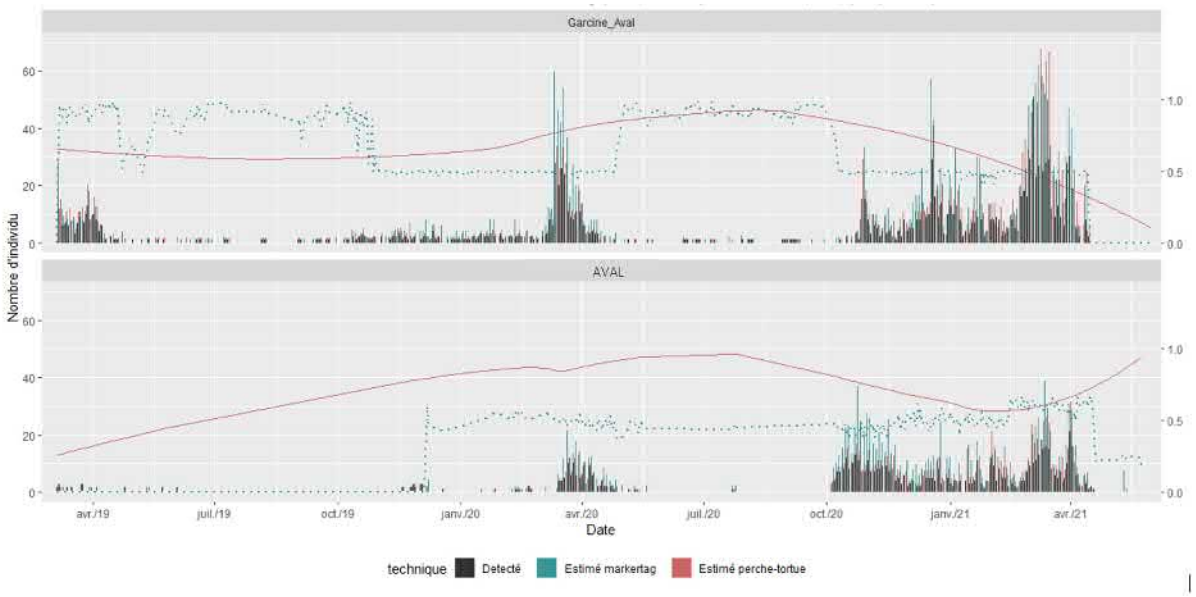


Figure 29: Réestimation des détections d'anguilles à l'aide des efficacités de détection markertag (rouge) et perche-tortue (bleu)

3.3.4. STADES DES ANGUILLES DETECTEES ET LIEN AVEC LES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

Pour les anguilles déterminées comme migrantes, les femelles argentées représentent 60% des détections, les mâles 37%, et les non sexés 3%. Lorsqu'on compare les périodes de détections d'un grand nombre d'anguilles argentées avec l'évolution du niveau d'eau, du débit et de la température de l'eau (Figure 30), aucune de ces covariables ne semble agir en signal de déclenchement de dévalaison. De manière générale, l'augmentation du niveau de l'eau (à environ 0,2 mNGF) et la diminution du débit (environ 0m^3/s) coïncide avec les fortes détections d'anguilles argentées. Pour la température, lorsque l'eau est à plus de 20°C, les détections diminuent drastiquement (moins de 5 individus détectés par jour).

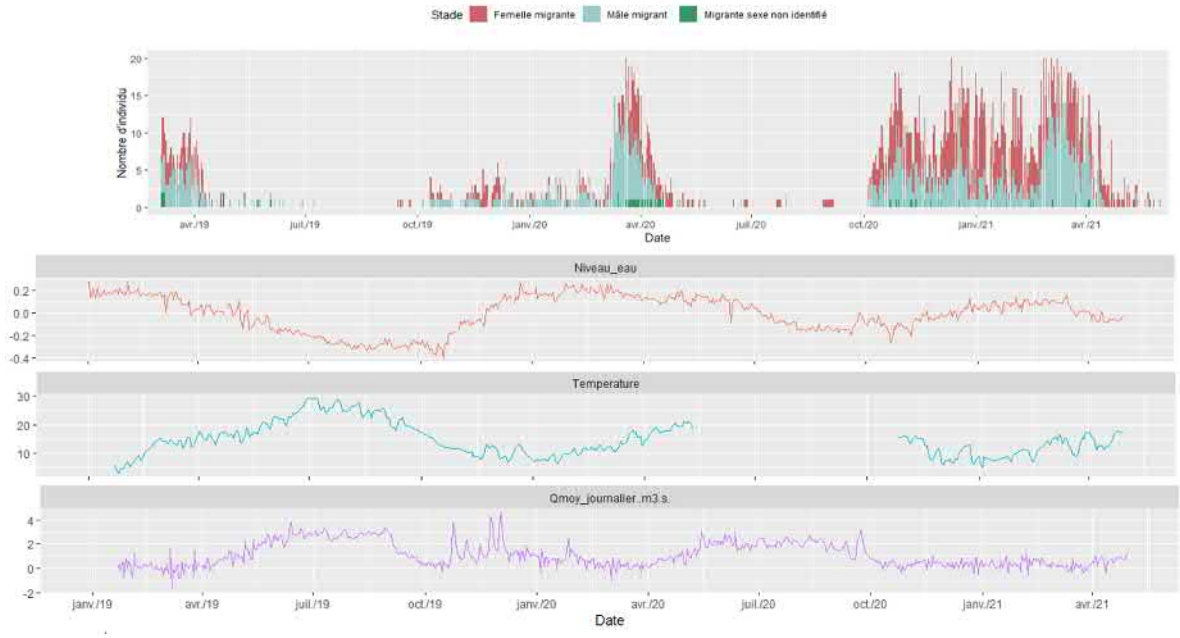


Figure 30: Nombre d'individus détectés et estimés au stade migrant selon le stade évolution temporelle des covariables environnementales

3.3.5. INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LES DETECTIONS RFID

Choix des covariables

Les covariables ont d'abord été testées individuellement puis en combinaison dans le modèle (Tableau 6). Le modèle comprenant les 3 facteurs environnementaux testés (température, niveau d'eau et débit) est le modèle retenu compte tenu de son LOOIC le plus faible.

Tableau 6: Comparaison des LOOIC pour les modèles avec différents covariables

Température	Niveau d'eau	Débit
1972.8	1853.8	1969.2
Temp*Niveau d'eau	**Temp*Débit**	**Niveau d'eau*Débit**
1927.8	1829.2	1827.8
Température * Niveau d'eau * Débit		
1814.3		

Diagnostic du modèle

Pour diagnostiquer notre modèle, on utilise les mêmes indicateurs que pour le modèle précédent. Les Rhat, log-posteriors, ESS et les MMA semblent tous indiquer que le modèle a bien convergé. Le plot des données estimées face aux données observées est lui aussi satisfaisant (Annexe XI).

Autres paramètres estimés

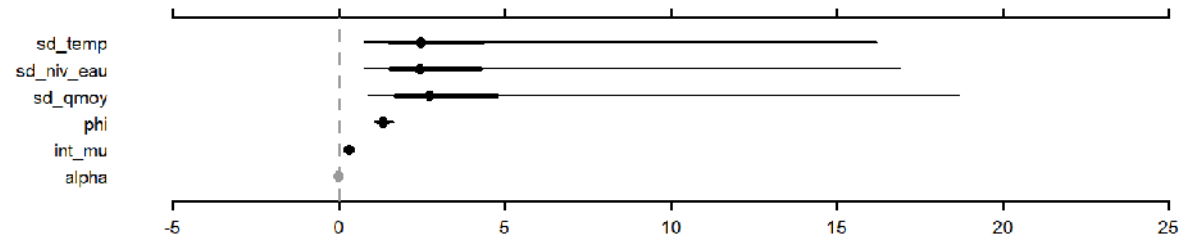


Figure 31: Résumé des posteriors des autres paramètres du modèle

Lorsqu'on regarde les posteriors des autres paramètres du modèle (Figure 31). La moyenne int_mu est de 0,30, l'effet alpha pour l'influence de la détection sur le nombre d'individu est assez faible (0,04) ce qui témoigne d'une faible influence sur les données. Paramètre de surdispersion de la négative binomiale, phi est de 1.32.

Effets des facteurs environnementaux

Les pourcentages de valeurs positives des posteriors obtenus pour les trois effets des facteurs environnementaux indiquent des effets très significatifs, négatifs pour la température et le débit (avec 0% de valeurs positives) et positifs pour le niveau d'eau (avec 100% de valeurs positives) (Figure 32)

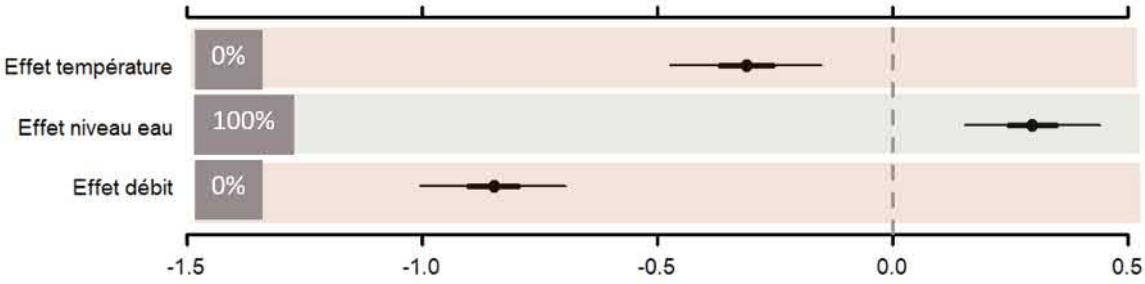


Figure 32: Résumé des posteriors des paramètres alpha_temp, alpha_niv_eau, aplha_qmoy et pourcentages de valeurs positives associés

4. DISCUSSION

La présente étude a pour but de mieux caractériser la dynamique de dévalaison des anguilles dans le canal du Fumemorte. En se basant sur 20 années de données de pêche et deux saisons de suivi télémétrique RFID, des modèles ont été développés afin de mieux cerner les périodes de dévalaison et les facteurs susceptibles d'influencer le déclenchement de cette migration retour vers la mer.

4.1. LE SUIVI DE LA DEVALAISON PAR PECHE : UNE METHODE PASSIVE SUR DU LONG TERME

Durant 20 années, la dévalaison des anguilles du bassin du Fumemorte a été surveillée à l'aide d'un filet posé à proximité de son embouchure, de manière quasi continue, ce qui constitue un suivi unique, surtout pour un milieu situé en amont d'un système lagunaire. A cette station, il est néanmoins possible de capturer également des individus qui ont passé une partie ou une majorité de leur croissance dans l'étang du Vaccarès (Panfili et al. 2012). L'effort de pêche a tout de même varié dans le temps. Entre 2016 et 2019, suite au ralentissement de l'activité du pêcheur, le filet n'a été posé que de manière irrégulière. Des données plus complètes manquent donc pour ces années-là. Depuis 2020, la Tour du Valat a repris ce suivi non plus sur toute l'année mais d'octobre à avril.

De plus, il n'était pas toujours dans l'intérêt du pêcheur professionnel de poser des filets à des périodes où il savait qu'il n'y aurait que très peu d'individus capturés. Lors de la pleine lune par exemple, il est possible que le filet n'ait pas été posé aussi régulièrement qu'indiqué. Selon le technicien, ce problème n'était que ponctuel et il n'influence pas considérablement l'effort de pêche renseigné dans les données.

4.2. FORTE VARIABILITE INTERANNUELLE DES DEVALAISONS ET DU SEXE DES ARGENTEES

L'abondance des anguilles argentées a fortement fluctué entre 2001 et 2020. Le ratio mâle/femelle dans les captures a lui aussi fortement varié dans le temps mais on retrouve majoritairement une plus forte proportion de femelles. La dominance de femelles dans ce court d'eau a déjà été suggérée plusieurs fois dans la littérature avec 81,6% de femelles et 79% à 15ans d'intervalle (Dupont, Gabrion 1984; Acou et al. 2003;). D'après une étude portant sur les femelles du Fumemorte, 94% des individus s'argentent entre 7 et 9ans (Acou et al. 2003). Pour les anguilles mâles, il est communément admis que ces derniers mettent moins de temps pour s'argenter. Pour la sous population de l'étang du Vaccarès, qui produit surtout des mâles argentés (Acou et al. 2003), la majorité des mâles migre à l'âge de 3ans contre 5ans pour les femelles (Melia et al. 2006). Bien que le lien entre recrutement de civelles et abondance des anguilles argentées reste complexe, on peut faire l'hypothèse que les forts recrutements de civelles des saisons 2000-2001, 2003-2004 et 2013-2014 (Lambremon et al. 2021) expliquent les plus fortes densités observées à la sortie du canal du Fumemorte quelques années plus tard durant les saisons 2005-2006, 2006-2007 et 2019-2020 (Bevacqua et al. 2011).

Le déterminisme sexuel des jeunes anguilles lors de leur croissance dépend de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques. Des habitats surpeuplés tendent à produire davantage de mâles alors que des environnements à faibles densités et avec beaucoup de ressources alimentaires fournissent surtout des femelles.

La production d'anguilles argentées du canal du Fumemorte est également, *a priori* dans une moindre mesure, négativement influencée par la présence du silure glane (Bevacqua et al. 2011). Bien que des anguilles aient déjà été retrouvées dans les estomacs des silures, la relation entre les deux espèces pourrait être surtout de l'ordre de la compétition (habitat et nourriture) que de la prédation (Martino et al. 2011).

4.3. UNE DYNAMIQUE DE DEVALAISON SAISONNIERE, D'OCTOBRE A AVRIL

L'analyse des données de pêche montre que la dévalaison des anguilles du Fumemorte ne suit pas systématiquement le schéma décrit ailleurs avec deux pics saisonniers au printemps et à l'automne (Verhelst, Reubens, et al. 2018; Durif 2003a). Malgré une sensible augmentation des captures à ces périodes, les anguilles argentées sont souvent observées toute l'année et parfois de manière non négligeable en plein hiver. Ce constat, déjà fait par Reckordt dans son étude sur la dévalaison des anguilles dans une rivière très anthropisée et à faible courant (2014), tend à remettre en cause la saisonnalité de ce phénomène dans notre cas. Théoriquement, l'augmentation de l'activité de dévalaison au printemps pourrait être attribuée à des anguilles argentées matures qui stoppent leur migration vers la mer lorsque les conditions hivernales sont trop défavorables afin d'attendre une amélioration des conditions environnementales au printemps (Acou et al. 2008). Dans le canal du Fumemorte, les températures très douces de certains hivers pourraient entraîner des départs anticipés.

Les femelles ont tendance à maximiser leur taille avant d'entamer leur migration alors que les mâles migrent à des tailles plus petites et à des âges plus faibles (Reckordt et al. 2014). Sachant la différence de vitesse de nage entre les deux sexes, il est supposé que les mâles quittent plus tôt les rivières pour rejoindre leur lieu de reproduction afin d'arriver de manière simultanée avec les femelles (Reckordt et al. 2014). Ainsi, les mâles seraient attendus migrer en tout début de saison (début d'automne) avant les femelles qui, elles, au contraire partiraient plus tardivement au printemps.

4.4. RFID : UNE EFFICACITE DE DETECTION VARIABLE DANS LE TEMPS

Comme toutes les méthodes de suivi utilisées pour étudier la dynamique de dévalaison des anguilles (caméra acoustique, radio-pistage), le suivi télémétrique RFID peut présenter des erreurs ou des dysfonctionnements de détection qui sont indispensables à prendre en compte dans l'analyse des données. De grandes variations de détection des stations d'écoute du canal du Fumemorte sont en effet constatées, surtout marquées par une fluctuation saisonnière. Les antennes sont alimentées par des panneaux solaires et le bon taux d'ensoleillement en Camargue permet une alimentation continue tout au long de l'année et n'explique pas les fluctuations de détection observées (Annexe VIII). En revanche, la température, le niveau d'eau, qui fluctuent remarquablement entre la période estivale et hivernale, et, dans une moindre mesure, la conductivité et le débit ont été obtenu avoir un effet significatif sur les capacités de détection (Giraud 2021). Néanmoins, ces effets n'ont pas systématiquement été obtenus pour toutes les antennes et avec les mêmes amplitudes. Les variations de capacités de détection des antennes apparaissent être la résultante de plusieurs facteurs liés aux conditions du milieu mais également à des phénomènes d'interférences. En effet, la présence de métal dans les structures soutenant les antennes altère plus ou moins le champ électromagnétique. Selon les responsables de l'installation des stations (Scimabio interface), le métal fonctionne comme une « antenne fantôme » qui a la capacité d'absorber et de propager le champ électromagnétique et ainsi de désynchroniser les antennes. Pour pallier à ce problème, un nouveau système a récemment été mis en place (juillet 2021) afin d'interroger les 4 antennes d'une station d'écoute non plus simultanément mais successivement, en diminuant la fréquence d'interrogation de chaque antenne (2,5 fois par seconde contre 10 auparavant). Ce nouveau dispositif pourrait permettre d'améliorer significativement les efficacités de détections.

Le système RFID présente aussi plusieurs limites (Sacré et al. 2016). D'abord, il ne permet pas de lire deux tags en même temps (pas de système d'anticollision) bien que la fréquence d'interrogation de 500ms limite ce problème. Or, les données RFID indiquent que plusieurs anguilles ont eu tendance à stagner en dessous des stations d'écoute. Ces anguilles qui s'installent régulièrement sous les antennes peuvent empêcher la détection d'autres anguilles qui passeraient sous le pont. Une étude a aussi montré que les femelles argentées migraient en groupe (Palstra et al. 2005) ce qui pourrait poser problème pour leur détection individuelle. La détection d'un transpondeur varie aussi selon son orientation par rapport au plan de l'antenne. L'optimum de détection est atteint lorsque le *tag* est perpendiculaire à l'antenne. Or le mouvement des anguilles, qui n'est pas rectiligne, pourrait aussi altérer leur détection.

Néanmoins, lorsque les antennes fonctionnent correctement, les anguilles traversent des champs électromagnétiques sur une distance allant de 0.60m à 1m. Le calcul de déplacement des anguilles a montré que l'anguille la plus rapide nageait à une vitesse de 0,4708 $m.s^{-1}$. Pendant son passage, elle peut être interrogée jusqu'à 42 de fois.

En théorie, l'évolution des pourcentages de détection obtenus au *marker tags* et ceux obtenus avec les données à la perche devraient être similaires. Mais les résultats des tests

de corrélation prouvent le contraire. Selon Scimabio, une corrélation est observée pour leurs autres sites d'étude. Le problème serait encore une fois lié à la présence de métal qui pourrait créer des interférences lors de l'émission et la réception des *marker tags*. Bien que ces données soient continues, l'utilisation des données discontinues obtenues à la perche semblait plus précautionneuse.

Malgré les dysfonctionnements de détection, cette étude permet d'obtenir des premiers résultats. Il faut cependant garder en tête que sur les 850 individus marqués, seulement 494 ont été détectés au moins une fois (soit un pourcentage de perte de 42%). Une partie de ces individus non détectés a été repêchée à l'AVAL (15 tags), témoignant des failles de détection. Mais une partie de ces pertes peut aussi être due à la mortalité naturelle ou à la prédation par les silures notamment. L'effort de marquage déjà conséquent (jusqu'à 450 individus par an) a été utile, mais il serait peut-être possible de l'augmenter à l'avenir pour améliorer la robustesse des résultats.

4.5. FACTEURS D'INFLUENCE SAISONNIERE PLUTOT QUE DECLENCHEUR DE LA DEVALAISON

Un des objectifs de cette étude était de chercher à identifier des facteurs environnementaux déclencheurs de la dévalaison. Les effets obtenus dans le cadre de ce stage suggèrent une influence surtout saisonnière, plutôt que ponctuelles, ce qui reflète aussi le fait d'avoir obtenus surtout des périodes plutôt que des pics de détection d'anguilles argentées.

La température a un effet négatif sur les détections d'anguilles argentées, les températures estivales les plus chaudes n'étant pas favorables à leur activité (Vøllestad et al. 1986). Néanmoins, les plus faibles températures (en dessous de 10 °C) entraînent également une diminution de leur métabolisme et de leur mobilité (Ovidio et al. 2013). Il s'agit donc plus d'un optimum de température autour de 20 °C plutôt qu'un effet linéaire. Cette hypothèse est renforcée par les meilleures performances du modèle avec un effet quadratique sur la température (Avec le facteur température au carré, le LOOIC du modèle est de 1917.3 contre 1814.3 sans).

L'effet négatif du débit suggère que ce paramètre n'est pas un facteur favorisant la dévalaison comme il l'a été montré pour d'autres cours d'eau plus lentiques (Verhelst, Baeyens, et al. 2018; Bruijs, Durif 2009). Dans les rivières et les fleuves, l'augmentation du débit, notamment lors des crues automnales, a souvent été identifié comme facteur déclencheur, les anguilles argentées profitant des forts courants induits pour dévaler en limitant au maximum leurs dépenses énergétiques (Vollestad et al 1986). Les débits du canal du Fumemorte (au maximum 4.6m^3/s en décembre 2019) sont effectivement très réduits en comparaison avec d'autres cours d'eau comme celui de la Nive (jusqu'à 46,10 ± 6,2 m^3/s en avril[3]) où a été vérifié la corrélation de ce facteur avec les mouvements d'avalaison (Durif et al. 2008).

Le niveau d'eau a un impact positif (100% des valeurs des posteriors positives). Cet effet avait déjà été montré par Tranquart *et al.* dans son étude sur les dévalaisons des anguilles du lac de Grand Lieu (2018). Cette étude montre que, dans ce système lentique, les dévalaisons ne sont pas clairement associées à des facteurs environnementaux qui sont habituellement impliqués dans la migration riverine (vitesse courant, pression atmosphérique, température) mais notamment à l'augmentation du niveau de l'eau. Dans le Fumemorte, bien que l'irrigation (et donc le débit) soit maximal entre mai et septembre, le niveau d'eau du canal est au plus bas. En effet, pendant cette période, les températures sont élevées et l'évaporation dans l'étang du Vaccarès diminue drastiquement le niveau d'eau.

[3] Source : Données station hydrologique de Cambo-les-Bains

Le canal du Fumemorte étant directement relié à l'étang, son niveau suit la même dynamique. Le niveau d'eau du canal a donc un niveau faible malgré les débits importants et son augmentation pourrait permettre aux anguilles d'avoir une indication sur les périodes plus propices à la dévalaison.

Afin de rechercher d'autres éventuels facteurs déclencheurs, il serait intéressant de tester l'influence de paramètres sur les variations journalières des détections (augmentation ou diminution) plutôt qu'uniquement sur les abondances. Seulement 3 facteurs ont été testés dans le cadre de cette étude. D'autres facteurs seraient opportuns de tester. Des études en bassin, où le débit n'est pas perceptible, ont montré que les anguilles étaient plus sensibles à la diminution de la luminosité et au changement de la composition de l'eau notamment via la conductivité (Durif et al. 2008). Il est généralement admis que les anguilles sont fortement photophobiques et que la luminosité influence la migration d'avalaison des anguilles argentées (Bruijs, Durif 2009). Cependant l'influence de la lune reste incertaine. D'un côté certaines publications soulignent la relation entre le phase lunaire et la dévalaison (Dainys et al. 2017; Tesch, Thorpe 2003b). Mais ce lien est aussi remis en question par d'autres études qui échouent à mettre en relation ces deux phénomènes (Haraldstad, Vollestad, Jonsson 1985; Bruijs, Durif 2009). L'intensité lumineuse peut aussi être contrôlée par la turbidité et la nébulosité (Durif 2003b; Durif et al. 2008). La pression atmosphérique pourrait aussi avoir un lien sur la migration d'avalaison (Acou et al. 2000).

4.6. AUTRES LIMITES A CONSIDERER

Il convient de mentionner plusieurs autres limites méthodologiques liées aux hypothèses de ce travail.

Les mesures utilisées pour déterminer le stade de développement (Durif, 2005) sont soumis aux biais de l'observateur qui relève les mesures, notamment celles du diamètre des yeux (Acou, Poizat, Crivelli 2006). La précision de ces mesures peut fortement influencer le classement d'une anguille comme jaune ou argentée. Il est à noter aussi que les individus présentent des variations individuelles et les limites pour distinguer les mâles des femelles sont si proches qu'il est possible de faire des erreurs. Il a été ainsi observé que des anguilles marquées identifiées dans un premier temps mâles argentées se soient avérées lors d'une recapture être des femelles (Nicolas, *pers. Comm.*).

La méthode d'attribution des stades utilisée pour les données RFID peut être discutée. L'hypothèse selon laquelle une anguille au stade FIII est, moins d'un après, toujours jaune doit être testée. L'assomption que le passage sans retour à la station AVAL témoigne d'une dévalaison devrait aussi être examinée plus précisément. Il est possible que l'anguille, bien qu'argentée, se déplace une seule fois vers le Vaccarès pour changer d'habitat ou s'alimenter sans pour autant entamer sa dévalaison.

Afin d'améliorer l'incertitude liée à la détermination du stade, d'autres méthodes auraient pu être utilisées comme le clustering. Chaque stade serait associé à une probabilité que l'anguille appartienne à un stade avec un effet de la taille, du sexe…etc.

Hormis les erreurs de détermination possibles, « anguille argentée » ne veut pas nécessairement dire « anguille migrante ». Certains individus peuvent mettre jusqu'à deux ans avant d'entamer leur migration vers la mer (Haraldstad, Vollestad, Jonsson 1985). Par conséquent, des mouvements considérés comme des dévalaisons pourraient en réalité être des déplacements de l'anguille pour trouver un habitat où se nourrir. Les détections RFID nous indiquent en effet que des individus déterminés argentés sont restés plusieurs mois au niveau de la station des Garçines avant de ne plus être détectés.

5. CONCLUSION

Cette étude, basée à la fois sur l'exploitation et la modélisation bayésienne de données de pêche scientifiques acquises sur 20 ans et d'un suivi télémétrique RFID déployé depuis 2 ans, a permis de mieux cerner la dynamique de dévalaison du canal du Fumemorte. Contrairement à ce qui était attendu, la migration de retour en mer des anguilles argentées apparaît s'étaler sur la période d'octobre à avril, avec des pics de dévalaison dans l'ensemble peu marqués. Ces résultats sont toutefois à approfondir, notamment pour le suivi télémétrique RFID qui a montré des faiblesses saisonnières dans les capacités de détection et qui dépend du nombre d'individus marqués encore vivant dans le système. L'amélioration du système et le maintien d'un effort de marquage permettra peut-être d'observer de nouvelles tendances à l'avenir. Par ailleurs, il sera intéressant de tester davantage de facteurs environnementaux pour appréhender et peut-être prédire d'éventuels pics de dévalaison. Ces résultats pourront par la suite éclairer le choix d'actions pertinentes et efficaces des gestionnaires pour faciliter le retour des anguilles argentées en mer, notamment en ce qui concerne l'amélioration des connectivités.

BIBLIOGRAPHIE

ACOU, A., FEUNTEUN, E., LAFFAILLE, P. et LEGAULT, A., 2000. Catadromous migration dynamics of European eel (*Anguilla anguilla* , L.) in a dammed catchment. *SIL Proceedings, 1922-2010*. décembre 2000. Vol. 27, n° 5, pp. 3117-3120. DOI 10.1080/03680770.1998.11898251.

ACOU, A., LAFFAILLE, P., LEGAULT, A. et FEUNTEUN, E., 2008. Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla* , L.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish*. septembre 2008. Vol. 17, n° 3, pp. 432-442. DOI 10.1111/j.1600-0633.2008.00295.x.

ACOU, A., LEFEBVRE, F., CONTOURNET, P., POIZAT, G., PANFILI, J. et CRIVELLI, A. J., 2003. Silvering of female eels (Anguilla anguilla) in two sub-populations of the Rhône delta. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 2003. N° 368, pp. 55-68. DOI 10.1051/kmae:2003036.

ACOU, A., POIZAT, G. et CRIVELLI, A.-J., 2006. Errors in ocular index measurements in European eel Anguilla anguilla (L.). *Ecology of Freshwater Fish*. décembre 2006. Vol. 15, n° 4, pp. 578-582. DOI 10.1111/j.1600-0633.2006.00189.x.

ACOU, Anthony, BOISNEAU, Catherine et FEUNTEUN, Eric, 2009. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales. . 2009. pp. 126.

AMILHAT, E., FARRUGIO, H., LECOMTE-FINIGER, R., SIMON, G. et SASAL, P., 2008. Silver eel population size and escapement in a Mediterranean lagoon: Bages-Sigean, France. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2008. N° 390-391, pp. 05. DOI 10.1051/kmae/2009005.

AMILHAT, Elsa, AARESTRUP, Kim, FALIEX, Elisabeth, SIMON, Gaël, WESTERBERG, Håkan et RIGHTON, David, 2016. First evidence of European eels exiting the Mediterranean Sea during their spawning migration. *Scientific Reports*. 26 février 2016. Vol. 6, n° 1, pp. 21817. DOI 10.1038/srep21817.

BEVACQUA, D., MELIÀ, P., CRIVELLI, A. J., DE LEO, G. A. et GATTO, M., 2006. Timing and rate of sexual maturation of European eel in brackish and freshwater environments. *Journal of Fish Biology*. décembre 2006. Vol. 69, n° sc, pp. 200-208. DOI 10.1111/j.1095-8649.2006.01265.x.

BEVACQUA, Daniele, ANDRELLO, M., MELIÀ, P., VINCENZI, S., DE LEO, G. A. et CRIVELLI, A. J., 2011. Density-dependent and inter-specific interactions affecting European eel settlement in freshwater habitats. *Hydrobiologia*. août 2011. Vol. 671, n° 1, pp. 259-265. DOI 10.1007/s10750-011-0725-1.

BEVACQUA, Daniele, MELIÀ, Paco, SCHIAVINA, Marcello, CRIVELLI, Alain J, DE LEO, Giulio A et GATTO, Marino, 2019. A demographic model for the conservation and management of the European eel: an application to a Mediterranean coastal lagoon. DURIF, Caroline (éd.), *ICES Journal of Marine Science*. 13 juillet 2019. pp. fsz118. DOI 10.1093/icesjms/fsz118.

BOUCHARD, Colin, DROUINEAU, Hilaire, LAMBERT, Patrick, BOUTRON, Olivier et NICOLAS, Delphine, soumis. Spatio-temporal variations in glass eel recruitment at the entrance pathways of a Mediterranean delta. *ICES Journal of Marine Science*. soumis.

BRUIJS, Maarten C. M. et DURIF, Caroline M. F., 2009. Silver Eel Migration and Behaviour. In : VAN DEN THILLART, Guido, DUFOUR, Sylvie et RANKIN, J. Cliff (éd.), *Spawning Migration of the European Eel* [en ligne]. Dordrecht : Springer

Netherlands. pp. 65-95. [Consulté le 2 mars 2021]. ISBN 978-1-4020-9094-3. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-9095-0_4

CHARRIER, Fabien, LE GURUN, L, ABDALLAH, Y, LEGAULT, A., CARAGUEL, J-M et BLANCK, A, 2010. *Contribution à l'amélioration des connaissances et à la gestion de l'Anguille européenne, Anguilla anguilla, dans les lagunes méditerranéennes - Cas de l'Etang de l'Or.*Rapport CEPRALMAR. Groupement MRM/FISH PASS.

CHAUVELON, P., 1998. A wetland managed for agriculture as an interface between the Rhône river and the Vaccarès lagoon (Camargue, France): Transfers of water and nutrients. In : AMIARD, J.-C., LE ROUZIC, B., BERTHET, B. et BERTRU, G. (éd.), *Oceans, Rivers and Lakes: Energy and Substance Transfers at Interfaces* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. pp. 181-191. [Consulté le 7 avril 2021]. ISBN 978-94-010-6216-9. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-5266-2_15

DAINYS, J., STAKĖNAS, S., GORFINE, H. et LOŽYS, L., 2017. Silver eel, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758), migration patterns in lowland rivers and lagoons in the North-Eastern region of their distribution range. *Journal of Applied Ichthyology*. octobre 2017. Vol. 33, n° 5, pp. 918-924. DOI 10.1111/jai.13426.

DUPONT, Francis et GABRION, Claude, 1984. *Population dynamics of bothriocephalus claviceps goeze, 1782 (cestoda, pseudophyllidae), a parasite of the eel anguilla anguilla in the Camargue*. Thèse 3ème cycle. Montpellier : USTL.

DURIF, C., DUFOUR, S. et ELIE, P., 2005. The silvering process of Anguilla anguilla: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology* [en ligne]. 2005. Vol. 66, n° 4, pp. 1025-1043. [Consulté le 26 novembre 2019]. DOI 10.1111/j.0022-1112.2005.00662.x. Disponible à l'adresse : http://doi.wiley.com/10.1111/j.0022-1112.2005.00662.x

DURIF, Caroline, 2003a. *La migration d'avalaison de l'anguille européenne*. Université Paul Sabatier, Toulouse III.

DURIF, Caroline, 2003b. *La migration d'avalaison de l'anguille européenne*. Université Paul Sabatier, Toulouse III.

DURIF, Caroline M.F., TRAVADE, Francois, RIVES, Jacques, ELIE, Pierre et GOSSET, Claude, 2008. Relationship between locomotor activity, environmental factors, and timing of the spawning migration in the European eel, *Anguilla anguilla*. *Aquatic Living Resources*. avril 2008. Vol. 21, n° 2, pp. 163-170. DOI 10.1051/alr:2008031.

GIRAUD, Jules, 2021. *Evaluation de l'efficacité du dispositif RFID pour le suivi de l'anguille d'Europe*. Rapport de stage. Tour du Valat.

HARALDSTAD, O., VOLLESTAD, L. A. et JONSSON, B., 1985. Descent of European silver eels, Anguilla anguilla L., in a Norwegian watercourse. *Journal of Fish Biology*. janvier 1985. Vol. 26, n° 1, pp. 37-41. DOI 10.1111/j.1095-8649.1985.tb04238.x.

HORTON, Gregg E., DUBREUIL, Todd L. et LETCHER, Benjamin H., 2007. A Model for Estimating Passive Integrated Transponder (PIT) Tag Antenna Efficiencies for Interval-Specific Emigration Rates. *Transactions of the American Fisheries Society*. septembre 2007. Vol. 136, n° 5, pp. 1165-1176. DOI 10.1577/T06-053.1.

ICES WGEEL, 2020. European eel (Anguilla anguilla) throughout its natural range. [en ligne]. 2020. [Consulté le 25 février 2021]. DOI 10.17895/ICES.ADVICE.5898. Disponible à l'adresse : http://www.ices.dk/sites/pub/Publication Reports/Forms/DispForm.aspx?ID=37080

IUCN, 2013. *Anguilla anguilla: Jacoby, D. & Gollock, M.: The IUCN Red List of Threatened Species 2014: e.T60344A45833138* [en ligne]. 28 mai 2013. International

Union for Conservation of Nature. [Consulté le 25 février 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.iucnredlist.org/details/60344/0

KETTLE, A. James, ASBJØRN VØLLESTAD, L. et WIBIG, Joanna, 2011. Where once the eel and the elephant were together: decline of the European eel because of changing hydrology in southwest Europe and northwest Africa?: Where once the eel and the elephant were together. *Fish and Fisheries*. décembre 2011. Vol. 12, n° 4, pp. 380-411. DOI 10.1111/j.1467-2979.2010.00400.x.

LAMBREMON, J., NICOLAS, D., CRIVELLI, A.J., CONTOURNET, P. et CAMPTON, P., 2021. *Étude du recrutement en civelles et de leur devenir dans l'étang du Vaccarès. Campagne d'études 2019-2020.* Association Migrateurs Rhône-Méditerranée, Fondation Tour du Valat.

LEFEBVRE, F, CONTOURNET, P, PRIOUR, F, SOULAS, O et CRIVELLI, Aj, 2002. Spatial and temporal variation in Anguillicola crassus counts: results of a 4 year survey of eels in Mediterranean lagoons. *Diseases of Aquatic Organisms*. 2002. Vol. 50, pp. 181-188. DOI 10.3354/dao050181.

LEFEBVRE, François, CONTOURNET, Pascal et CRIVELLI, Alain, 2007. Interaction between the severity of the infection by the nematode Anguillicola crassus and the tolerance to hypoxia in the European eel Anguilla anguilla. *Acta Parasitologica* [en ligne]. 1 janvier 2007. Vol. 52, n° 2. [Consulté le 28 avril 2021]. DOI 10.2478/s11686-007-0013-4. Disponible à l'adresse : https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/s11686-007-0013-4/html

MAKOWSKI, Dominique, BEN-SHACHAR, Mattan S., CHEN, S. H. Annabel et LÜDECKE, Daniel, 2019. Indices of Effect Existence and Significance in the Bayesian Framework. *Frontiers in Psychology*. 10 décembre 2019. Vol. 10, pp. 2767. DOI 10.3389/fpsyg.2019.02767.

MARTINO, Aurelia, SYVÄRANTA, Jari, CRIVELLI, Alain, CEREGHINO, Regis et SANTOUL, Frederic, 2011. Is European catfish a threat to eels in southern France? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. mai 2011. Vol. 21, n° 3, pp. 276-281. DOI 10.1002/aqc.1177.

MELIA, P., BEVACQUA, D., CRIVELLI, A. J., DE LEO, G. A., PANFILI, J. et GATTO, M., 2006. Age and growth of Anguilla anguilla in the Camargue lagoons. *Journal of Fish Biology*. mars 2006. Vol. 68, n° 3, pp. 876-890. DOI 10.1111/j.0022-1112.2006.00975.x.

NICOLAS, Delphine, 2018. Conséquences de l'introduction d'espèces non natives sur le fonctionnement d'un écosystème méditerranéen sous pression agricole – bilan sur 25 ans de suivi opérationnel et vers des préconisations de gestion. Focus sur deux espèces préoccupantes : le silure glane (Silurus glanis) et le goujon asiatique (Pseudorasbora parva). .

OVIDIO, Michaël, L. SEREDYNSKI, Aurore, PHILIPPART, Jean-Claude et NZAU MATONDO, Billy, 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*. septembre 2013. Vol. 47, n° 3, pp. 291-301. DOI 10.1007/s10452-013-9444-1.

PALSTRA, Arjan, VERSCHOOR, Louise, VAN GINNEKEN, Vincent, LUGTEN, Olivier, ONDERWATER, Marjolijn, VAN HEESWIJK, Richard, EDING, Ep, VIANEN, Gerjanne, VAN DEN THILLART, Guido, VAN SCHIE, Sjoerd, MUUSZE, Bie et NIEMANTSVERDRIET, Patrick, 2005. Gonad development and spawning behaviour of artificially-matured European eel (Anguilla anguilla L.). *Animal Biology*. 2005. Vol. 55, n° 3, pp. 203-218. DOI 10.1163/1570756054472791.

PANKHURST, N. W., 1982. Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel Anguilla anguilla (L.). *Journal of Fish Biology*. août 1982. Vol. 21, n° 2, pp. 127-140. DOI 10.1111/j.1095-8649.1982.tb03994.x.

RECKORDT, Melanie, UBL, Claus, WAGNER, Carola, FRANKOWSKI, Jens et DOROW, Malte, 2014. Downstream migration dynamics of female and male silver eels (*Anguilla anguilla* L.) in the regulated German lowland Warnow River. *Ecology of Freshwater Fish*. janvier 2014. Vol. 23, n° 1, pp. 7-20. DOI 10.1111/eff.12080.

SACRÉ, Bastien, TREMBLAY, Julien, AZAM, Didier, MARCHAND, Frédéric et HUTEAU, Dominique, 2016. Système RFID de détection automatique de poissons. . 2016. pp. 13.

TESCH, F.-W. et THORPE, J.E. (éd.), 2003a. *The Eel* [en ligne]. 1. Wiley. [Consulté le 26 février 2021]. ISBN 978-0-632-06389-5. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470995389

TESCH, F.-W. et THORPE, J.E. (éd.), 2003b. *The Eel* [en ligne]. 1. Wiley. [Consulté le 26 février 2021]. ISBN 978-0-632-06389-5. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470995389

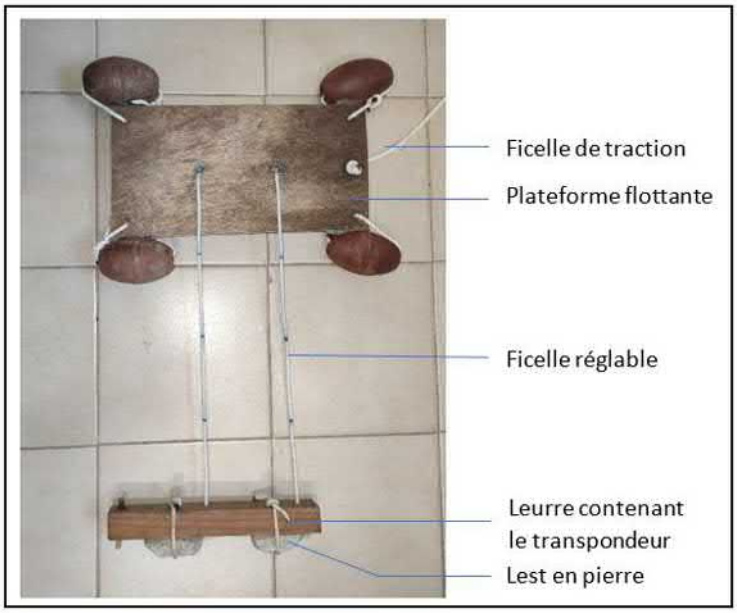
TRANCART, Thomas, FEUNTEUN, Eric, DANET, Valentin, CARPENTIER, Alexandre, MAZEL, Virgile, CHARRIER, Fabien, DRUET, Morgan et ACOU, Anthony, 2018. Migration behaviour and escapement of European silver eels from a large lake and wetland system subject to water level management (Grand-Lieu Lake, France): New insights from regulated acoustic telemetry data. *Ecology of Freshwater Fish*. avril 2018. Vol. 27, n° 2, pp. 570-579. DOI 10.1111/eff.12371.

VERHELST, Pieterjan, BAEYENS, Raf, REUBENS, Jan, BENITEZ, Jean-Phillippe, COECK, Johan, GOETHALS, Peter, OVIDIO, Michaël, VERGEYNST, Jenna, MOENS, Tom et MOUTON, Ans, 2018. European silver eel (Anguilla anguilla L.) migration behaviour in a highly regulated shipping canal. *Fisheries Research*. octobre 2018. Vol. 206, pp. 176-184. DOI 10.1016/j.f

VERHELST, Pieterjan, REUBENS, Jan, PAUWELS, Ine, BUYSSE, David, AELTERMAN, Bart, VAN HOEY, Stijn, GOETHALS, Peter, MOENS, Tom, COECK, Johan et MOUTON, Ans, 2018. Movement behaviour of large female yellow European eel (*Anguilla anguilla* L.) in a freshwater polder area. *Ecology of Freshwater Fish*. janvier 2018. Vol. 27, n° 1, pp. 471-480. DOI 10.1111/eff.12362.

VØLLESTAD, L. A., JONSSON, B., HVIDSTEN, N. A., NÆSJE, T. F., HARALDSTAD, Ø. et RUUD-HANSEN, J., 1986. Environmental Factors Regulating the Seaward Migration of European Silver Eels (*Anguilla anguilla*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1 octobre 1986. Vol. 43, n° 10, pp. 1909-1916. DOI 10.1139/f86-236.

ANNEXE



Annexe I : Photo du dispositif tortue, utilisé pour passer un transpondeur à différents points dans le cadre de l'antenne pour tester son efficacité.

Source : Rapport Evaluation dispositif RFID Jules Giraud

Annexe II : Signe des effets des différentes variables environnementales sur chaque antenne. **Source** : Rapport Evaluation dispositif RFID Jules Giraud

	GAR Amont ANT1	GAR Amont ANT2	GAR Aval ANT1	GAR Aval ANT2
Log (Conductivité)	-	-	-	/
Température	+	+	+	/
Débit	+	+	+	/
Niveau d'eau	-	-	-	/

Annexe III : Part (en %) de la déviance expliquée par le modèle par rapport au modèle nul. Source : Rapport Evaluation dispositif RFID Jules Giraud

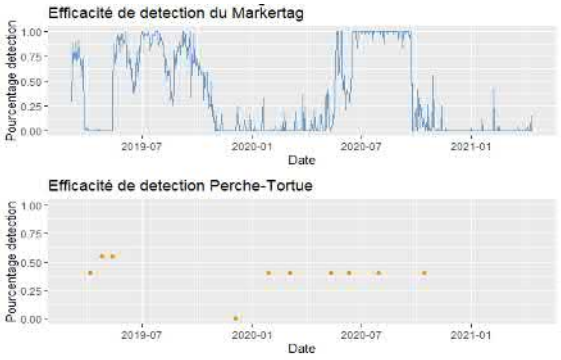
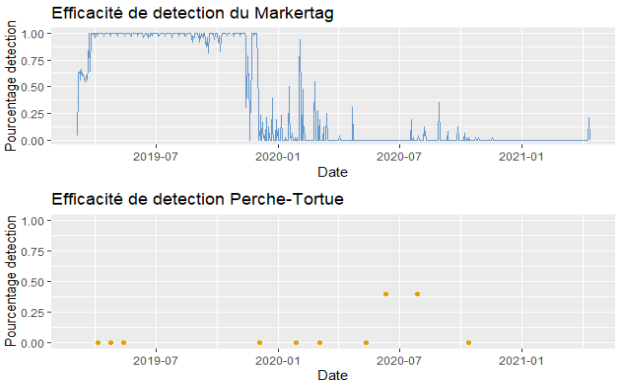
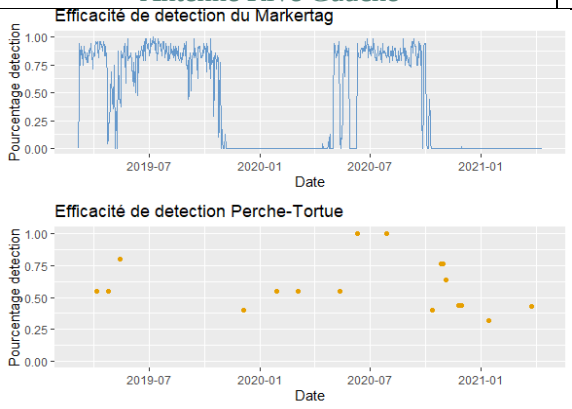
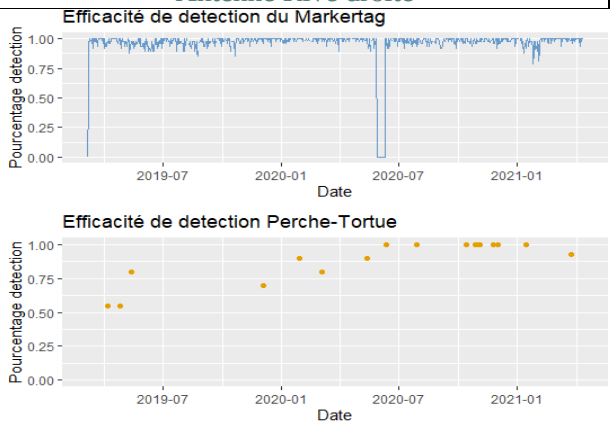
	GAR Amont ANT1	GAR Amont ANT2	GAR Aval ANT1	GAR Aval ANT2
Log(Conductivité)	12,4	9	6,9	0
Température	43,8	62,5	64,8	0
Débit	17,7	2,6	7,7	0
Niveau d'eau	31,4	28,5	36,5	0

Note : Ici, aucune influence des différentes variables environnementales sur l'antenne Aval 2 (droite) des Garçines. Cela est dû au fait qu'elle détecte correctement les markers tags tout au long de l'année donc aucune variation visible de la détection au cours du temps.

Annexe IV : Explication et précision sur les indicateurs utilisés pour évaluer et diagnostiquer les modèles.

Indicateur	Fonctionnement
R-hat	Hormis l'aspect des *traceplots* (chaînes bien mixées), on peut utiliser le **R-hat** pour évaluer la convergence du modèle. Si les chaînes ne se sont pas bien mélangées, le R-hat des paramètres estimés est supérieur à 1 et inférieur à 1,05.
Log-posterior	On peut aussi regarder le **log-posterior** afin de voir si il y a des itérations pour lesquelles le modèle ne converge pas et où les résidus pourraient être mauvais.
ESS	Lorsque la chaîne de Markov ne se « mixe » pas très bien, il peut arriver que les observations successives soient fortement corrélées d'une itération à la suivante (autocorrélation). **L'ESS (*Effective sample size*)**, ou taille d'échantillon effective représente le nombre d'observations (nombre d'itération) apportant effectivement de l'information pour l'estimation a posteriori. Si l'ESS est très petite devant le nombre d'itérations totales on peut considérer que l'estimation de la distribution posterior n'est pas fiable. Si l'ESS est supérieur à 0,5 on peut considérer que l'estimation a posteriori est assez bonne.
MMA	Dans l'algorithme MCMC, à chaque itération on tente de se déplacer dans l'espace des états possibles et le déplacement peut être accepté ou rejeté. Le taux d'acceptation indique à quel point le nouvel état est probable étant donné l'état actuel et selon la distribution. Si l'on cherche à se déplacer vers un état plus probable que l'état actuel, le déplacement est toujours accepté. L'indicateur **MMA** (*Mean Metrop Acceptance*) donne les probabilités d'acceptabilité de ce déplacement. Donc plus les MMA sont élevés, plus le modèle arrive facilement à se déplacer dans l'espace.

Annexe V : Tableau résumé des nuages de points entre les efficacités obtenues au *marker tags* et celles du test perche-tortue

<table>
<tr><th colspan="2">Station Garçines Amont</th></tr>
<tr><th>Antenne Rive Gauche</th><th>Antenne Rive droite</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><th colspan="2">Station Garçines Aval</th></tr>
<tr><th>Antenne Rive Gauche</th><th>Antenne Rive droite</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

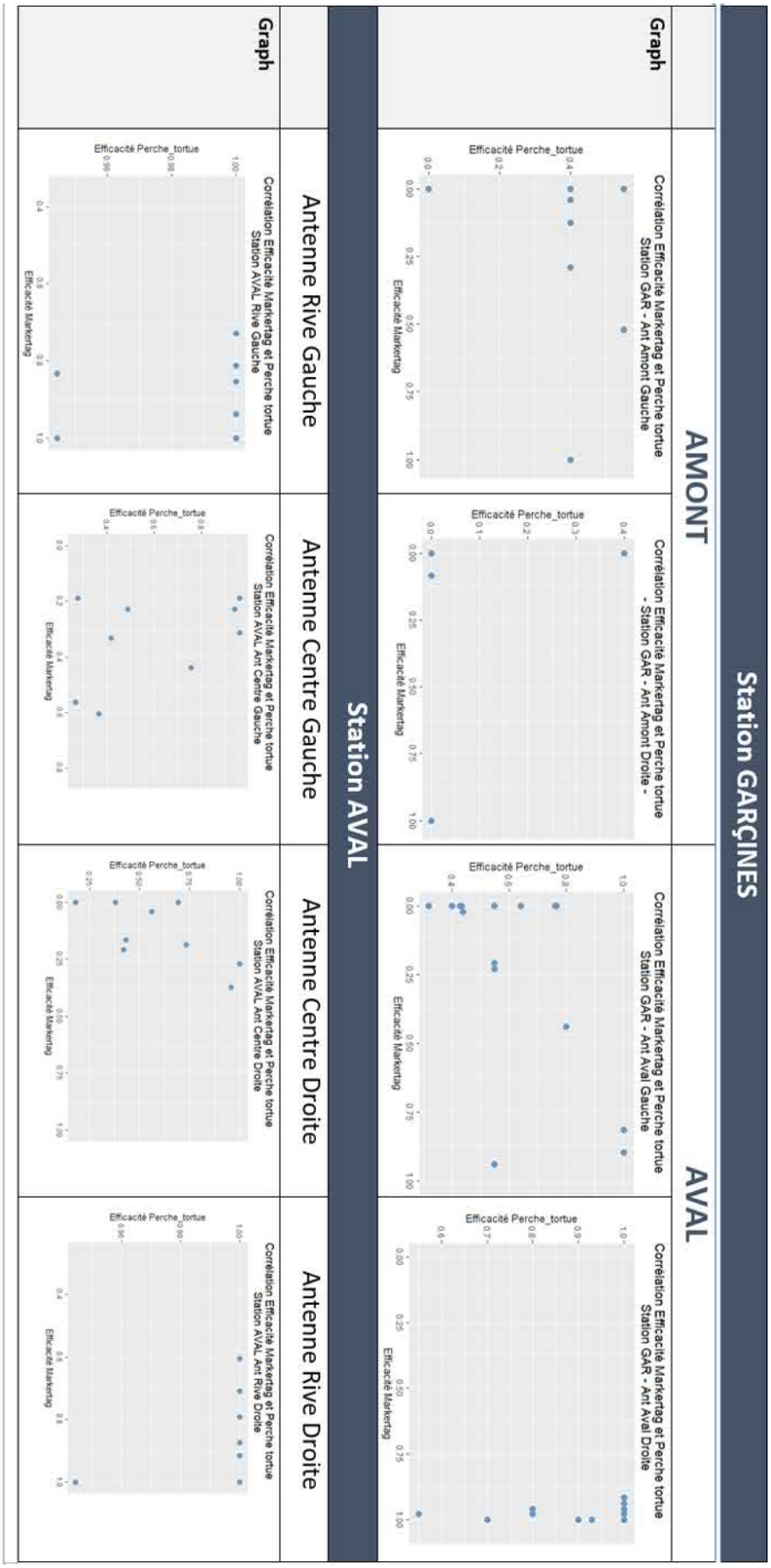
Annexe VI: Explication complémentaires sur le fonctionnement de la méthode *loess*

METHODE LOESS : utilisée pour construire la série de données des efficacités et pour combler les séries de données des covariables

Pour obtenir une série de données d'efficacité par jour pour les tests de portée de détection (perche/tortue), on utilise une régression lœss. Cette méthode de régression est non paramétrique, c'est-à-dire qu'elle n'est pas associée à une équation comme une régression linéaire ou polynomiale. Ici, on ne cherche pas à obtenir une équation mais uniquement à faire une interpolation par jour des valeurs d'efficacité à partir de celles mesurées sur les antennes. Dans une régression lœss, l'ajustement de la courbe se fait localement. Pour déterminer la valeur y que prend la courbe au point xi, la fonction ajuste un polynôme de degré 1 ou 2 aux points au voisinage de xi. Cet ajustement est pondéré : les points les plus proches de xi ont davantage de poids. On peut ensuite récupérer les points de la courbe.

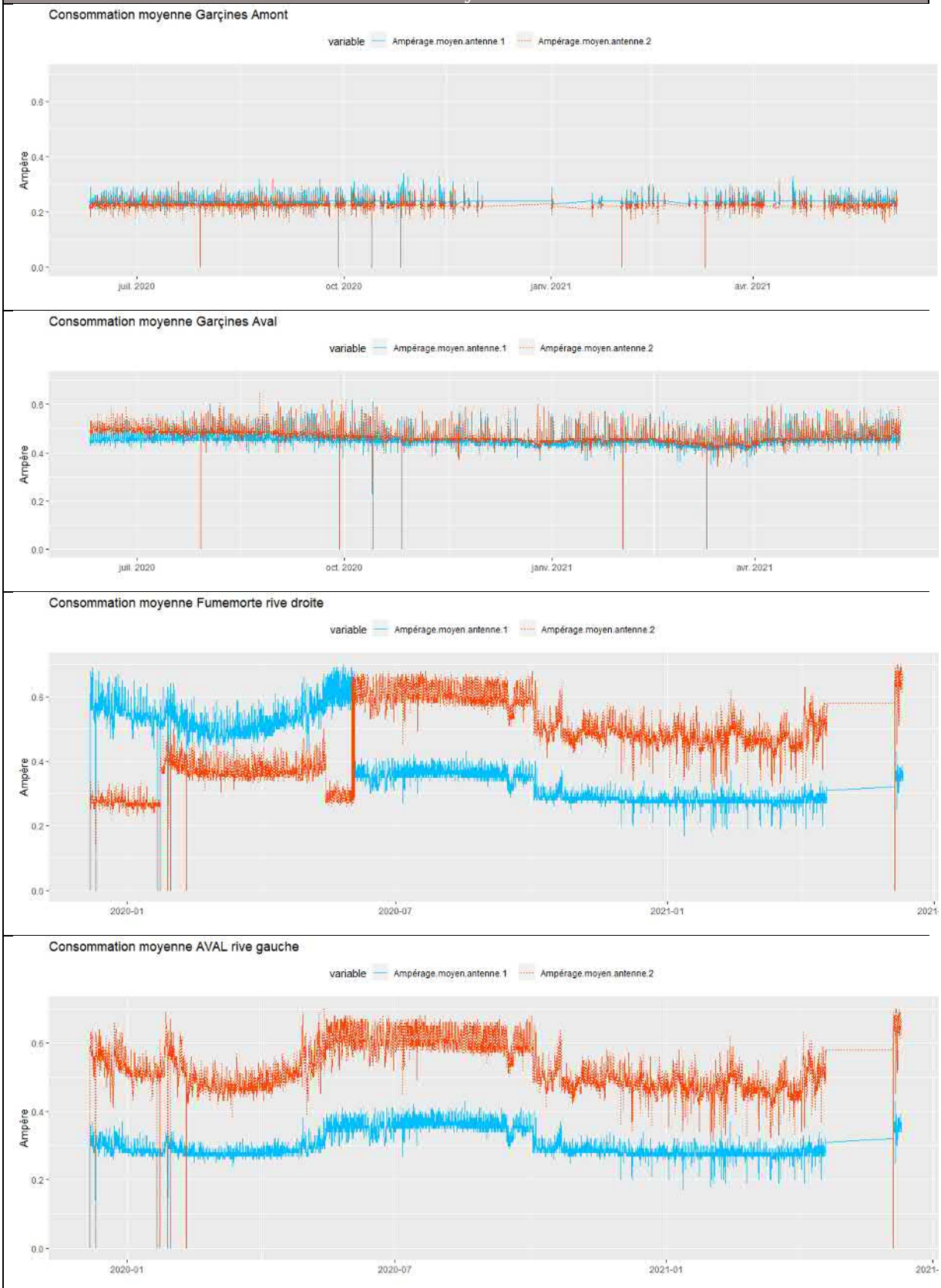
La fonction loess sur R comprend un paramètre de lissage : span. Plus la valeur du span est importante, plus la courbe est lissée. Il faut alors trouver un compromis entre une courbe trop lissée qui ne suit pas assez les points, et une courbe trop abrupte qui donne des valeurs absurdes en voulant coller à toutes les valeurs. Un span = 0.5 a semblé le plus adapté. La zone grisée qui encadre les valeurs correspond à l'intervalle de confiance à 95%

Annexe VII : Tableau résumé des plots de corrélations entre les efficacités obtenues au marker tag et celles du test perche-tortue



Annexe VIII : Consommations moyennes des antennes des Garçines et de la station AVAL

Consommation moyenne des antennes



Annexe IX : Nombre d'anguilles détectées par jour et par antenne selon leur lieu de marquage

Figure 1 : Nombre de détection d'anguille marquées à la station AVAL en fonction du temps

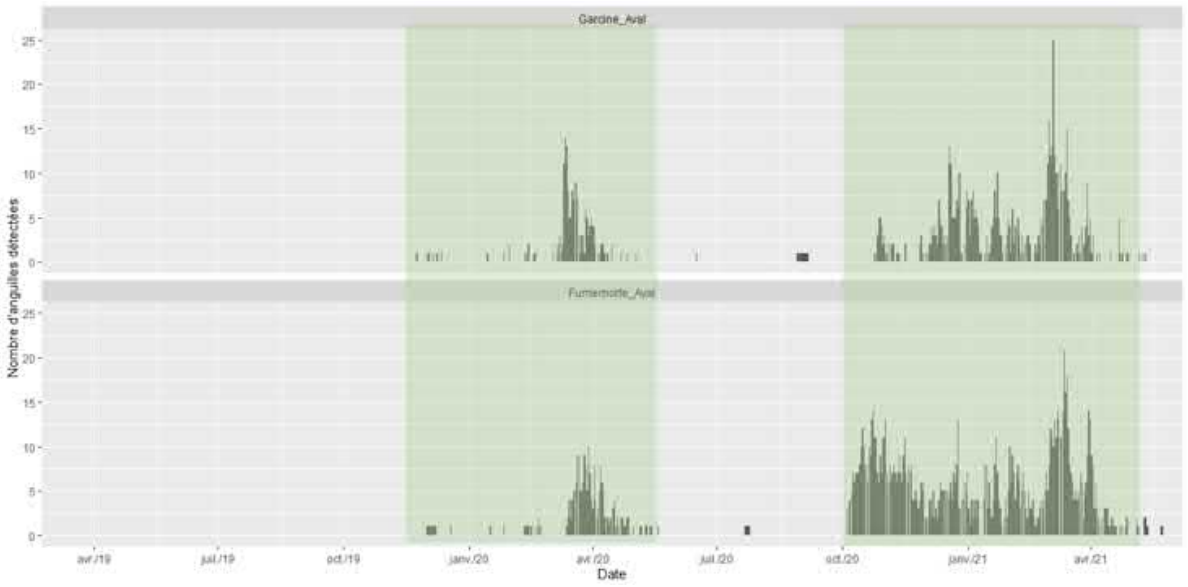
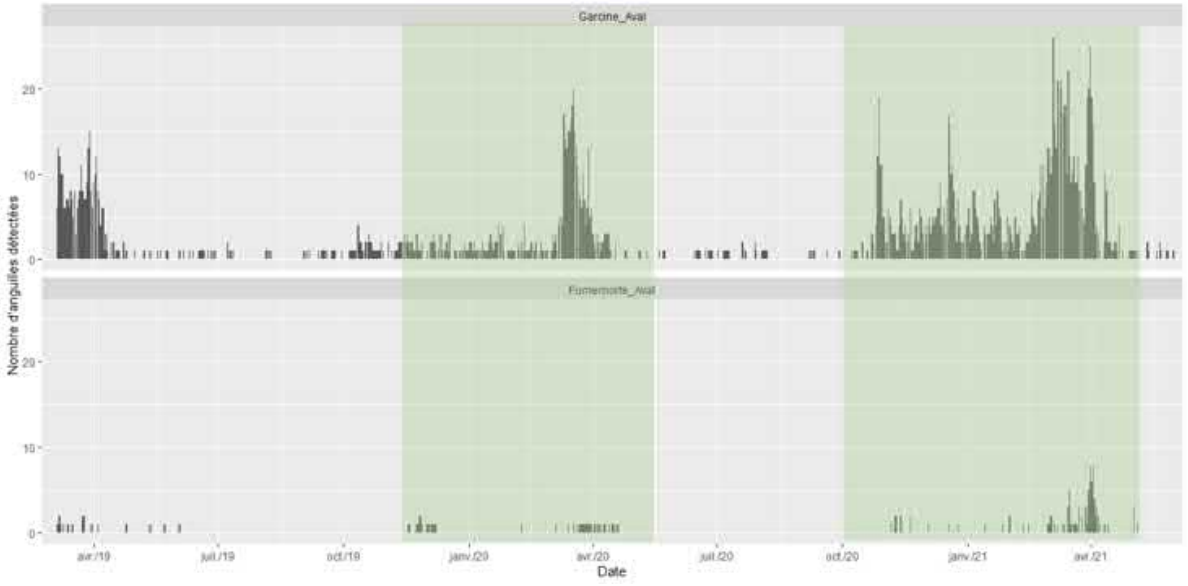


Figure 2: Nombre de détection d'anguille marquées dans le Fumemorte en fonction du temps



Annexe X : Extrait du « Guide technique pour le terrain RFID de l'anguille » rédigé pendant le stage.

1. Faire les tests de détection sur le terrain

Matériel :

- La perche (logique)
- Le mètre
- Un carnet avec les marques préparées à l'avance (c'est plus simple, note en bas)
- Les clefs des stations (3 trousseaux en tout)
- Les bippers



⇨ Ouvrir les cabanes et les coffres et brancher aux deux boîtiers les bippers à l'endroit indiqué par le cercle (Pour s'aider, il y a le liseré blanc qui permet de savoir comment brancher facilement le bipper). Attention, y aller doucement et ne pas tirer de gauche à droite, bien tirer de manière perpendiculaire car les fils sont fragiles.



Pour le Test Tortue :

⇨ Prendre la barque et se rendre aux antennes avec la perche + le mètre + le carnet. Bien se positionner pour être stable.

⇨ Mesurer la profondeur d'eau avec le mètre. Placer la perche graduée à côté du bas de l'antenne (référence du fond car c'est vaseux).



⇨ Passer la perche côté puce, puce positionnée bien horizontalement, pour qu'elle soit perpendiculaire au plan de l'antenne. Dès que le bipper sonne, il y a détection.

⇨ La perche est passée 5 fois à chaque point de la grille prédéfinie, uniquement dans la partie immergée du plan de l'antenne, en s'aidant des traces au marker sur les antennes. Attention, le nombre de points dépend de la profondeur mesurée.
Aux ponts des Garçines, les points sont espacés de 45 cm. A la station AVAL, de 30 cm.

⇨ Ne pas oublier de bien accrocher la barque en partant + récupérer les bippers + remettre le grillage/portail de chez Silke à la station AVAL

Pour le Test Perche :

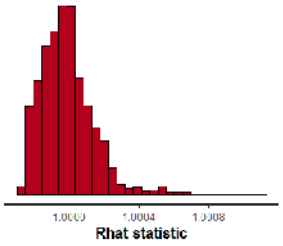
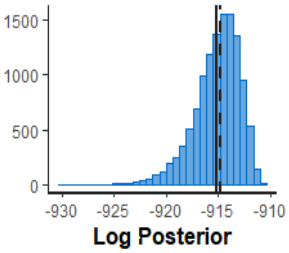
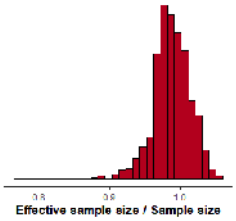
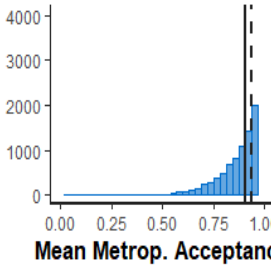
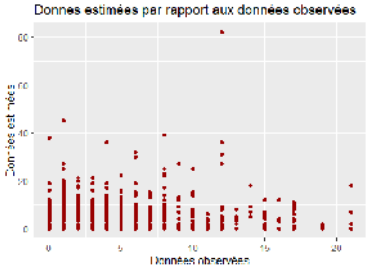
⇨ se positionner au-dessus du pont,

⇨ passer la perche avec la puce positionnée perpendiculaire au plan de l'antenne

⇨ Lire la distance maximale à laquelle la puce est détectée, vers l'extérieur (amont ou aval) et vers l'intérieur du plan de l'antenne. On peut s'aider des marques sur le tube de l'antenne pour lire cette distance.

Cette estimation de détection pourra ensuite être extrapolée et considérée valable pour toute l'antenne.

Annexe XI : Sorties des indicateurs utilisés pour le diagnostic du modèle sur données RFID avec covariables.

Indicateurs	Rhat	Log-posterior	ESS
Plot			
	R-hat très concentrés autour de 1, peu de valeurs au-dessus de 1,05. Bonne convergence	Bon log-posteriors avec une bonne distribution donc bonne convergence	ESS assez élevés donc bonne estimation à posteriori des paramètres
Indicateurs	MMA	Données observées vs données estimées	
			
	MMA majoritairement proches de 1. Modèle assez fluide	Tendance à la surestimation, on n'observe pas de très bonne corrélation entre les données observées et les données simulées.	